

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
ПО КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ «РОСКОСМОС»

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

НАУКА НА
МКС

**ТРЕТЬЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ,
ПОСВЯЩЁННАЯ 25-ЛЕТИЮ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

МОСКВА
2023

Наука на МКС: Третья международная конференция, посвящённая 25-летию Международной космической станции: сб. тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2023. 348 с.

20–23 ноября 2023 г. в ИКИ РАН в честь 25-летия начала полёта Международной космической станции проводится Третья международная конференция «Наука на МКС». Тематика конференции включает результаты и перспективы исследований, проводимых на Международной космической станции, а также вопросы, связанные с разрабатываемой Российской орбитальной станцией. Публикуемый сборник содержит материалы конференции. Предшествующие конференции «Наука на МКС» состоялись в 2008 и 2015 гг.

Серия «Механика, управление и информатика»

Тексты тезисов даны в авторской редакции.

Мнение редакции может не совпадать с точкой зрения авторов тезисов. Качество иллюстраций соответствует предоставленным авторами материалам.

Сборник издаётся в научно-образовательных целях, его издание не преследует коммерческих целей.

Электронная версия сборника размещена на сайтах конференции <https://iss-science.cosmos.ru/>, ИКИ РАН <https://iki.cosmos.ru/research/iki-publications> и Научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru>

Science on the International Space Station: Third International Conference. Moscow: IKI RAS, 2023. 348 p.

Third international conference Science on the ISS was held in Moscow on November 20–23, 2023 on the special occasion of the 25th anniversary of the ISS flight. Its topics included the results of the experiments run at the ISS and issues, which arise in connection with the Russian orbital station (ROS), currently under development. The book collects the abstracts of the talks presented at the conference. Preceding conferences Science on the ISS were held in 2008 and 2015.

Mechanics, Control, and Information Science Series

The following texts are published as they were provided by the authors.

Opinions, given by the authors, are not those of the editorial board.

Figures' quality corresponds to the provided materials.

The publication is a non-profitable endeavour and pursues scientific and educational purposes only.

Electronic copies are published on the web sites of the Conference <https://iss-science.cosmos.ru/>, Space Research Institute <https://iki.cosmos.ru/research/iki-publications> and National Electronic Library <http://elibrary.ru>

Приветственный адрес
участникам Третьей Международной
научно-практической конференции
«Научные исследования и эксперименты на МКС»

Уважаемые коллеги! Дорогие друзья!

От имени Госкорпорации «Роскосмос» приветствую участников Третьей Международной научно-практической конференции «Научные исследования и эксперименты на МКС».

Институт космических исследований Российской академии наук — основная научная организация, занимающаяся подготовкой и проведением программ исследований, разработкой и испытаниями комплексов научной аппаратуры используемой для освоения космического пространства, сегодня принимает участников Конференции, которая является международной площадкой по вопросам изучения и анализа научных изысканий в широком диапазоне направлений, а также по их реализации на борту Международной космической станции.

МКС вот уже 25 лет остается уникальным техническим комплексом для проведения различных научных исследований и экспериментов, помогающих нам лучше понять космос и его влияние на нашу планету и человечество, расширять наши знания и открывать новые горизонты в космической науке.

Желаю вам продуктивных дискуссий, интересных встреч и идей, вдохновения и новых возможностей для дальнейшего развития научных исследований во благо Российской космонавтики!

Генеральный директор
Госкорпорации «Роскосмос»
Ю. И. Борисов

Участникам, организаторам и гостям
Третьей международной конференции
«Наука на МКС»

Глубокоуважаемые друзья!

Рад приветствовать вас на Третьей международной конференции «Наука на МКС».

Мы по праву гордимся историей отечественной космонавтики и замечательными традициями, заложенными основателями российской ракетно-космической отрасли. В её летописи было немало славных страниц — полёт Юрия Алексеевича Гагарина, первый выход человека в открытый космос, создание долговременных орбитальных станций. Запуск Международной космической станции стал ещё одним ярким событием, позволившим продвинуться вперёд в изучении Вселенной, получить ценнейшие для науки данные и практический опыт.

Подчеркну, что дальнейшее освоение Космоса ставит перед научным сообществом новые задачи. Они требуют серьёзной исследовательской работы, реализации новых значимых научных проектов — в том числе создание Российской орбитальной станции, проведения исследований в области медицины, биологии, физики, химии, по целому ряду других востребованных направлений.

Уверен, что нынешняя конференция, программа которой объединила авторитетных учёных, квалифицированных специалистов, будет в полной мере способствовать решению этих научных задач, позволит обсудить широкий спектр вопросов, связанных с изучением Вселенной.

Желаю вам плодотворной работы, интересных научных дискуссий и всего самого доброго.

Президент РАН
академик РАН
Г. Я. Красников

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

БЛОШЕНКО Александр Витальевич («Роскосмос») — председатель

ЗЕЛЕНЫЙ Лев Матвеевич (ИКИ РАН) — председатель

ШИШКИН Дмитрий Александрович («Роскосмос») — заместитель
председателя

ДУБИНИН Владимир Иванович (ЦПК)

АЛИФАНОВ Олег Михайлович (МАИ — секция КНТС

«Космическое образование»)

ОРЛОВ Олег Игоревич (ИМБП — секция КНТС «Космическая
биология и физиология»)

КОВАЛЬЧУК Михаил Валентинович (НИЦ «Курчатовский
институт» — секция КНТС «Космическое материаловедение»)

ЛУПЯН Евгений Аркадьевич (ИКИ РАН — секция КНТС

«Исследования Земли из космоса»)

СОЛОВЬЕВ Владимир Алексеевич (ПАО «Энергия» — секция
КНТС «Технические исследования и технологии пилотируемых
космических полётов»)

ШУСТОВ Борис Михайлович (ИНАСАН — секция КНТС

«Внеатмосферная астрономия»)

ПЕТРУКОВИЧ Анатолий Алексеевич (ИКИ РАН — секция КНТС

«Солнечная система»)

БОСС Эдуард Эрнстович (НИИЯФ МГУ — секция КНТС «Физика
космических лучей»)

КОБЛОВ Сергей Владимирович (ЦНИИмаш)

БАРМИН Игорь Владимирович (президент Межрегиональной

общественной организации «Российская академия

космонавтики имени К. Э. Циолковского», член-

корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук,

председатель Общественного совета)

МАЙОРОВА Виктория Ивановна (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

КРИКАЛЁВ Сергей Константинович (Исполнительный директор
по пилотируемым космическим программам)

ВАСИЛЬЕВ Михаил Михайлович (ОИВТ РАН)

ЛОКАЛЬНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Петрукович А. А. — председатель

Зеленый Л. М. — сопредседатель

Шишкин Д. А. — заместитель председателя

Садовский А. М. — заместитель председателя

Антоненко Е. А.

Закутняя О. В.

Карабаджак Г. Ф.

Жаркова Т. Д.

Фатеева А. В.

Боярский М. Н.

Иванов В. В.

Ревин О. В.

Канарейкина М. Л.

Давыдов В. М.

Новиков Д. И.

Устинов А. Н.

20 ноября 2023 года, понедельник

09:00–14:00 **Регистрация участников конференции**

Вход А4, холл

10:00–11:00 **ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ**

Выступления и приветствия приглашённых гостей конференции (Руководство ГК «Роскосмос» и РАН, представители Правительства, Госдумы, Совета Федерации)

Приветствие космонавтов с орбиты МКС

11:30–14:00 Программные доклады

ПРОГРАММНЫЕ ДОКЛАДЫ

Конференц-зал

11:30–12:00 «Стратегия развития пилотируемых космических средств и Российская орбитальная станция»

В. А. Соловьёв,
Генеральный конструктор по пилотируемым программам, академик РАН

12:00–12:30 «Целевые работы на пилотируемых космических комплексах: состояние и перспективы»

А. В. Bloшенко,
Председатель КНТС Роскосмоса

12:30–13:00 Кофе-брейк. Пресс-подход к выступавшим (выставочный зал ИКИ РАН)

13:00–13:30 «Задачи отбора и подготовки космонавтов при реализации стратегии пилотируемой космонавтики»

М. М. Харламов
Начальник ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина»

13:30–14:00 «Медико-биологические эксперименты на борту Российского сегмента МКС и перспективной РОС»

О. И. Орлов, О. В. Котов,
Ю. И. Смирнов
ИМБП РАН

14:00–14:30 «Материалы и технологии для защиты электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры от радиационного воздействия»

С. С. Грабчиков,
Н. А. Василенков,
С. Б. Ластовский,
С. В. Шведов
ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,
ЗАО «ТЕСТПРИБОР»,
ОЛНТМ ОАО «ИНТЕГРАЛ»

14:30–15:30 Обед

15:30–16:30 **КУЛЬТУРНЫЙ СТОЛ** «Перспективы мировой пилотируемой космонавтики»

16:30–18:00 **ТОРЖЕСТВЕННОЕ ОТКРЫТИЕ** и осмотр выставки «Наука на МКС». Предусмотрено общение со СМИ

18:00–19:00 **КУЛЬТУРНАЯ ПРОГРАММА**

21 ноября 2023 года, вторник

08:30–14:00 **Регистрация участников конференции**

Вход А4, холл

9:00–15:20 Доклады по направлению медико-биологических исследований

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конференц-зал

- | | | |
|-------------|--|---|
| 09:00–09:20 | Сычёв В. Н. , Алексеев В. Р., Горгиладзе Г. И., Гурьева Т. С., Гусев О. А., Ларина О. Н., Левинских М. А., Поддубко С. В., Подольский И. Г.
ИМБП РАН, ЗИН РАН, КФУ ИФМиБ | Биологические исследования на РС МКС |
| 09:20–09:40 | Ильин В. К. , Поддубко С. В., Харин С. А., Морозова Ю. А.
ИМБП РАН | Микробиологические эксперименты на МКС |
| 09:40–10:00 | Смирнов Ю. И. , Ярманова Е. Н., Седлецкий В. С.
ИМБП РАН | Разработка научной аппаратуры для проведения медико-биологических исследований на борту РС МКС |
| 10:00–10:20 | Шуршаков В. А. , Иванова О. А., Иноземцев К. О., Карташов Д. А., Карцев И. С., Дробышев С. Г., Толочек Р. В.
ИМБП РАН | Исследование распределения дозовых нагрузок в отсеках МКС и в теле космонавта |
| 10:20–10:40 | Куссмауль А. Р. , Белаковский М. С., Сахарова А. Б.
ИМБП РАН | Практическое использование результатов медико-биологических исследований, проведённых на РС МКС |
-

10:40–11:00 Кофе-брейк

- | | | |
|-------------|--|--|
| 11:00–11:20 | Рюмин О. О. , Бубеев Ю. А., Поляниченко А. А., Суполкина Н. С.
ИМБП РАН | Психофизиологическое сопровождение экипажей длительных пилотируемых экспедиций на МКС |
| 11:20–11:40 | Томиловская Е. С. , Шигуева Т. А., Рукавишников И. В., Савеко А. А., Шишкин Н. В., Бекренева М. П., Лысова Н. Ю., Наумов И. А., Китов В. В.
ИМБП РАН | Изучение влияния факторов космического полёта на сенсомоторную систему |
| 11:40–12:00 | Русанов В. Б. , Лучицкая Е. С., Черникова А. Г., Фунтова И. И.
ИМБП РАН | Исследование механизмов регуляции и функционального состояния сердечно-сосудистой системы в космическом полёте |

12:00–12:20	Васильева Г. Ю. ИМБП РАН	Гомеостатическая регуляция физиологических функций организма: от научной идеи к стратегии сохранения и укрепления здоровья космонавтов
12:20–12:40	Фомина Е. В. , Сенаторова Н. А., Иванов Д. С., Кокуева М. А., Буракова А. А., Бахтерева В. Д. ИМБП РАН	От силы тяжести к невесомости и обратно — современная концепция профилактики гипогравитационных нарушений
12:40–13:00	Кукоба Т. Б. , Киреев К. С., Харламов М. М. НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина	Динамика восстановления скоростно-силовых качеств мышц космонавтов после космического полёта на разных этапах реабилитации

13:00–14:00 *Обед*

14:00–14:20	Сигалева Е. Э. , Котов О. В., Поляков А. В., Мацнев Э. И., Ковачевич И. В., Ниязов А. Р. ИМБП РАН	Особенности диагностики и лечения заболеваний ЛОР-органов у космонавтов МКС в условиях продолжительных космических полётов
14:20–14:40	Ларина И. М. , Кононихин А. С., Бржозовский А. Г., Каширина Д. Н., Пастушкова Л. Х., Смирнов Ю. И., Николаев Е. Н. ИМБП РАН, Сколтех	Таргетный протеомный анализ образцов крови космонавтов, собранных во время длительных космических полётов
14:40–15:00	Юсупова А. К. , Суполкина Н. С., Швед Д. М., Гущин В. И. ИМБП РАН	Исследование общения экипажа в контуре «борт – Земля». Космический эксперимент «Контент»
15:00–15:20	Председатель, участники	Подведение итогов, краткие выступления по направлению «Медико-биологические исследования»
15:20–17:40	Доклады по направлению материаловедения и физико-химических процессов в условиях микрогравитации	

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

Конференц-зал

15:20–15:40	Тимофеев В. И. Самыгина В. Р., Бойко К. М., Куранова И. П., Ковальчук М. В. ИК РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ФИЦ Биотехнологии РАН	Исследование структуры белков в условиях микрогравитации
15:40–16:00	Усачев А. Д. , Петров О. Ф., Липаев А. М., Зобнин А. В., Наумкин В. Н., Тома М. Х., Кречмер М. ОИВТ РАН, Гисенский университет им. Юстуса Либиха	Космический эксперимент на российско-европейской научной аппаратуре «Плазменный кристалл-4» на борту МКС — цели, аппаратурная реализация и основные результаты

16:00–16:20 **Никифоров А. И.**,
Блинов В. В., Придачин Д. Н.,
Пчеляков О. П.,
Соколов Л. В., Фрицлер К. Б.,
Владимиров В. М.,
Кулинич С. Н., Древин К. А.,
Кулик С. В.,
ИФП СО РАН, ООО НПФ
«Электрон»

Оборудование
для выращивания
полупроводниковых
структур методом
молекулярно-лучевой
эпитаксии в открытом
космосе

16:20–16:40 Кофе-брейк

16:40–17:00 **Долганов П. В.**
ИФТТ РАН

Жидкие кристаллы.
Эксперимент OASIS

17:00–17:20 **Васильев М. М.**,
Дьячков Л. Г., Лисин Е. А.,
Савин С. Ф., Чурило И. В.,
Петров О. Ф.
ОИВТ РАН

Дисперсные активные
системы: результаты
и перспективы
космических исследований

17:20–17:40 Председатель, участники

Подведение итогов,
краткие выступления
по направлению
«Материаловедение
и физико-химические
процессы в условиях
микрогравитации»

17:40–19:00 Доклады по направлению внеатмосферной астрономии
и физики космических лучей

ВНЕАТМОСФЕРНАЯ АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Конференц-зал

17:40–18:00 **Семена Н. П.**
ИКИ РАН

Космический эксперимент
MBH

18:00–18:20 **Махмутов В. С.**
Филиппов М. В.,
Квашнин А. А.,
Максумов О. С.,
Разумейко М. В.,
Мизин С. В., Соков С. В.,
Криволапова О. Ю.,
Гайфутдинова А. Г.
ФИАН, РКК «Энергия»
им. С. П. Королёва

Космический эксперимент
«Солнце – Терагерц»

18:20–18:40 **Литвак М. Л.**,
Митрофанов И. Г.,
Головин Д. В., Пеков А. Н.,
Мокроусов М. И.
ИКИ РАН

Эксперимент «БТН-
нейтрон»: наблюдение за
нейтронной компонентой
радиационного фона
в окрестности МКС

18:40–19:00 **Мокроусов М. И.**,
Митрофанов И. Г.,
Аникин А. А., Головин Д. В.,
Карпушкина Н. Е.,
Козырев А. С., Литвак М. Л.,
Пеков А. Н., Санин А. Б.,
Третьяков В. И.
ИКИ РАН

Второй этап космического
эксперимента «БТН-
нейтрон» на борту
российского сегмента
международной
космической станции:
научная аппаратура
БТН-М2

22 ноября 2023 года, среда

08:30–13:00 **Регистрация участников конференции**

Вход А4, холл

09:00–13:00 Доклады по направлению дистанционного зондирования Земли и атмосферы на МКС

**ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ЗЕМЛИ И АТМОСФЕРЫ НА МКС**

Конференц-зал

09:00–09:20	Лупян Е. А. , Саворский В. П. ИКИ РАН, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН	Исследования по направлению «Исследования Земли из космоса» на РС МКС
09:20–09:40	Селезнёв Д. А. АО «НИИ СТТ»	Научная аппаратура радиотехнического мониторинга «Напор-РТМ»
09:40–10:00	Постол Г. А. , Жаживихин И. М. АО «НИИ СТТ»	Экспериментальная отработка высокопотенциальных широкополосных многофункциональных АФАР космического базирования
10:00–10:20	Беляев М. Ю. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Отработка научной аппаратуры и технологий изучения Земли в эксперименте «Ураган» на МКС
10:20–10:40	Климов П. А. , Белов А. А., Зотов М. Ю., Шаракин С. А. НИИЯФ МГУ им. М. В. Ломоносова	«УФ атмосфера» (Mini-EUSO) — мониторинг излучения атмосферы с высоким временным разрешением. Результаты работы за четыре года на борту МКС

10:40–11:00 Кофе-брейк

11:00–11:20	Есаков А. М. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Планирование и проведение исследований КЭ «Сценарий»
11:20–11:40	Юрина О. А. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Изучение потенциально опасных объектов и явлений в КЭ «Ураган» на РС МКС
11:40–12:00	Кузьмин А. В. , Кузьмичев А. С. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва, МФТИ	Планируемые исследования с НА «Гиперспектрометр» КЭ Ураган» на РС МКС
12:00–12:20	Кузьмин А. В. , Батырев Ю. П. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва, МГТУ им. Н. Э. Баумана	Исследования лесов в КЭ «Дубрава» на РС МКС

- 12:20–12:40 **Трохимовский А. С.**
ИКИ РАН Эксперименты «Русалка» и «Дриада», исследования парниковых газов с борта МКС
- 12:40–13:00 Председатель, участники Подведение итогов, краткие выступления по направлению «Дистанционное зондирование земли и атмосферы»
-

13:00–14:00 Обед

14:00–15:20 Доклады по направлению геофизических исследований

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конференц-зал

- 14:00–14:20 **Полуаршинов М. А.**,
Смирнов Ю. В., Беляев А. Н.,
Николайшвили С. Ш.,
Омельченко А. Н., Страхов А. В.
РКК «Энергия»
им. С. П. Королёва, ИПГ,
Росгидромет, НПП РОБИС Наблюдения с МКС аэрозольного слоя на высотах от 80 до 100 км
- 14:20–14:40 **Андреевский С. Е.**,
Кузнецов В. Д.
ИЗМИРАН Космического эксперимент «Сейсмопрогноз»: результаты исследования локальных и глобальных вариаций электронной концентрации
- 14:40–15:00 **Климов С. И.**, Зеленый Л. М.,
Петрукович А. А.,
Ангаров В. Н., Вайсберг О. Л.,
Веселов М. В., Садовский А. М.,
Скальский А. А.,
Грушин В. А., Новиков Д. И.,
Осадчая Л. А., Эйсмонт Н. А.,
Летуновский В. В.,
Костров А. В., Лихтенбергер Я.,
Надь Я.
ИКИ РАН, ИПФ РАН,
Университет Этвёша, Центр
исследования энергии
Венгрии Опыт и перспективы реализации научно-исследовательских микроспутников в инфраструктуре орбитальных станций
- 15:00–15:20 Председатель, участники Подведение итогов, краткие выступления по направлению «Геофизические исследования»
-

15:20–15:40 Кофе-брейк

15:40–18:00 Доклады по образовательным программам на МКС

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММЫ НА МКС

Конференц-зал

- 15:40–16:00 **Алифанов О. М.**,
Оделевский В. К.,
Фирсюк С. О.
МАИ О научной и практической значимости экспериментов и исследований, проводимых на борту РС МКС по направлению секции № 8 «Космическое образование» КНТС ГК «Роскосмос»
- 16:00–16:20 **Волков О. Н.**
РКК «Энергия»
им. С. П. Королёва Образовательный эксперимент «Великое начало» на РС МКС

- | | | |
|-------------|--|--|
| 16:20–16:40 | Майорова В. И. ,
Рачкин Д. А., Тененбаум С. М.,
Мельникова В. Г.
МГТУ им. Н.Э. Баумана | Образовательный
космический эксперимент
«Парус-МГТУ» —
предварительные
результаты |
| 16:40–17:00 | Садовский А. М.
ИКИ РАН | «Сферы — Zero Robotics.
Опыт проведения
и результаты |
| 17:00–17:20 | Титенко Е. А. , Шиленков Е. А.,
Фролов С. Н., Щитов А. Н.,
Самбуров С. Н.,
Бродский И. Э.
ЮЗГУ, РКК «Энергия»
им. С.П. Королёва» | Применение малых
космических аппаратов для
поддержки космических
экспериментов
«Радиоскаф» с борта МКС |
| 17:20–17:40 | Титенко Е. А. , Шиленков Е. А.,
Добросердов Д. Г.,
Зарубин Д. М., Самбуров С. Н.,
Оделевский В. К.,
Артемьев О. Г.
ЮЗГУ, РКК «Энергия»
им. С.П. Королёва», МАИ,
ГК «Роскосмос» | Космический эксперимент
«О Гагарине из космоса»:
исторический опыт
и перспективы |
| 17:40–18:00 | Председатель, участники | Подведение итогов,
краткие выступления
по направлению
«Образовательные
программы на МКС» |

18:30–20:30 **ЗАКРЫТИЕ** основной части конференции. Фуршет
Выставочный зал ИКИ РАН

22 ноября 2023 года, среда

08:30–13:00 **Регистрация участников конференции**

Вход А4, холл

09:00–13:00 Доклады по направлению технических экспериментов и технологий освоения космического пространства

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ
ОСВОЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Комната 202

09:00–09:20	Беляев М. Ю. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Изучение возможностей выполнения научных исследований в технических экспериментах на МКС и перспективы научного применения орбитальных станций
09:20–09:40	Печеркин В. Я., Шубралова Е. В., Беляев В. С., Василяк Л. М., Дешева Е. А., Цыганков О. С. ОИВТ РАН, ЦНИИмаш, ВНИИФТРИ, ИМБП РАН, РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Новый взгляд на околоземное пространство
09:40–10:00	Сафронов А. А. ГНЦ «Центр Келдыша»	Космические эксперименты с моделями капельных холодильников-излучателей. КЭ «Капля 2-2»
10:00–10:20	Тугаенко В. Ю., Грибков А. С., Кацаба А. В. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва, МФТИ, ФИАН	Исследование плазменного слоя вокруг спускаемого аппарата космического корабля «Союз» при прохождении атмосферы Земли
10:20–10:40	Петров С. В., Кудан Е. В., Левин А. А., Миронов В. А., Хесуани Ю. Д. «3D-Биопринтинг Солюшенс»	Развитие технологий биопринтинга в космосе. Космический эксперимент «Магнитный 3D-биопринтер»

10:40–11:00 Кофе-брейк

11:00–11:20	Бронников С. В., Рожков А. С., Лепорский А. Н., Караваев Д. Ю. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Применение систем позиционирования для поддержки деятельности экипажа МКС
-------------	---	---

11:20–11:40	Рулев Д. Н. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Отработка технологии учёта уходящего от Земли излучения при моделировании прихода электроэнергии от солнечных батарей орбитального космического аппарата в космическом эксперименте «Альбедо»
-------------	---	---

11:40–12:00	Рулев Д. Н. , Ашманов С. И. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва, ООО «Лаборатория Наносемантика»	Разработка виртуального ассистента космонавта. КЭ «Ассистент»
12:00–12:20	Евдокимов Р. А. , Мацак И. С., Тугаенко В. Ю. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Отработка технологии дистанционного энергоснабжения лазерным излучением в космосе на борту РС МКС
12:20–12:40	Шаповалов А. В. , Щеглов Г. А., Георгиев А. Ф., Дарьин Я. В., Казаку И. А., Макаренков Д. А., Никулин Д. С., Верзилин С. С. МГТУ им. Н. Э. Баумана	Малый буксир для РОС. Проектный облик
12:40–13:00	Ваюта М. Н. , Корянов В. В., Кухаренко А. С. МГТУ им. Н. Э. Баумана	Баллистический анализ траекторий спуска малого спускаемого аппарата для доставки научных грузов с МКС

13:00–14:00 Обед

14:00–14:20	Алямовский С. Н. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Эксперименты на МКС по запуску спутников сферической формы
14:20–14:40	Монахов М. И. , Матвеева Т. В., Аюкаева Д. М., Беляев М. Ю. РКК «Энергия» » им. С. П. Королёва	Результаты выполнения КЭ «Изгиб»
14:40–15:00	Волков О. Н. , Монахов М. И., Беляев М. Ю. РКК «Энергия» » им. С. П. Королёва	Изучение смещений элементов конструкции МКС в КЭ «Среда-МКС»
15:00–15:20	Смоленцева Л. А. , Беляев М. Ю. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Задачи научно-технической поддержки экспериментов РКК «Энергия» с помощью наземного сегмента планирования и экспресс-анализа результатов исследований
15:20–15:40	Исиков Н. Е. , Ананьевский И. М., Беляев М. Ю., Болотник Н. Н., Волков О. Н., Якуш С. Е. ИПМех РАН, РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Изучение движения космонавтов в КЭ «Таймер» на МКС

15:40–16:00 Кофе-брейк

16:00–16:20	Рассказов И. В. , Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Караваев Д. Ю. РКК «Энергия» им. С. П. Королёва	Использование платформ при наведении научной аппаратуры на наблюдаемые объекты с борта МКС
16:20–16:40	Залетова И. А. , Ситников Н. Н., Ризаханов Р. Н., Юрченко И. И., Лукьянова О. А. ГНЦ «Центр Келдыша», НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина	Слоистые самозалечивающиеся материалы с внутренним вязкотекучим наполнителем для космической техники

16:40–17:00	Бычков В. Б. , Беляев В. С., Шорин В. Н. ВНИИФТРИ	Акустико-эмиссионная диагностика состояния гермокорпуса обитаемых модулей орбитальной станции: возможности и перспективы
17:00–17:20	Бычков В. Б. , Кузнецов Г. Н., Смагин Д. А. ИОФ РАН	Результаты исследования шумов в рамках космического эксперимента «Бар» и методы их снижения
17:20–17:40	Кузнецов Г. Н. , Смагин Д. А. ИОФ РАН	Методы, технические средства и результаты активного гашения широкополосного шума в авиационных кабинах
17:40–18:00	Янчур С. В. , Даляев И. Ю., Дрондин А. В., Копылов В. М., Кошлаков В. В., Лопота А. В., Ребров С. Г. ГНЦ «Центр Келдыша», ГНЦ РФ ЦНИИ РТК	Проект космического эксперимента по системе орбитальной роботизированной сборки солнечных батарей
18:00–18:30	Председатель, участники	Подведение итогов, краткие выступления по направлению «Технические эксперименты и технологии освоения космического пространства»

18:30–20:30 **ЗАКРЫТИЕ** основной части конференции. Фуршет
Выставочный зал ИКИ РАН

23 ноября 2023 года, четверг

10:00–15:00 **ВЫЕЗДНАЯ СЕССИЯ** с участием всех желающих
Павильон «Космос» ВДНХ

10:00–10:30 **ПРИВЕТСТВЕННОЕ ОБРАЩЕНИЕ** к аудитории.
Выступления приглашённых гостей конференции
(руководство ГК «Роскосмос» и РАН, хозяев площадки)

10:30–12:00 Тематические доклады

ТЕМАТИЧЕСКИЕ ДОКЛАДЫ

10:30–11:00 «Российская программа пилотируемых космических полётов» **С. К. Крикалёв**, исполнительный директор по пилотируемым программам ГК «Роскосмос»

11:00–11:30 «Использование ПКК для проведения научных исследований» **Л. М. Зеленый**, научный руководитель ИКИ РАН, академик РАН

11:30–12:00 Предварительное название доклада «Изучение свойств и структуры материалов в условиях микрогравитации» **М. В. Ковальчук**, член-корреспондент РАН, президент НИЦ «Курчатовский институт»

12:00–12:30 «Образовательные и популяризационный потенциал пилотируемой космонавтики» **О. М. Алифанов**, заведующий кафедрой МАИ, академик РАН

12:30–13:00 «Опыт проведения научных экспериментов на РС МКС (на примере эксперимента Магнитная фабрикация)» **Н. В. Казинский**, генеральный директор организации «Агат»

13:00–14:00 Ответы на вопросы аудитории.

14:00 **ЗАВЕРШЕНИЕ** выездной сессии.

Конференция «Наука на МКС» – 2023

20 ноября 2023 года, понедельник

Выставочный зал ИКИ РАН

16:30–18:00 **РАБОТА ВЫСТАВКИ** «Наука на МКС». Ответы на вопросы от авторов выставочных экспонатов

21 ноября 2023 года, вторник

Выставочный зал ИКИ РАН

10:00–14:00 **РАБОТА ВЫСТАВКИ** «Наука на МКС». Ответы на вопросы от авторов выставочных экспонатов

22 ноября 2023 года, среда

Выставочный зал ИКИ РАН

14:00–18:00 **РАБОТА ВЫСТАВКИ** «Наука на МКС». Ответы на вопросы от авторов выставочных экспонатов

23 ноября 2023 года, четверг

ВЫЕЗДНАЯ СЕССИЯ

О НАУЧНОЙ И ПРАКТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВОДИМЫХ НА БОРТУ РС МКС ПО НАПРАВЛЕНИЮ СЕКЦИИ № 8 «КОСМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ» КНТС ГК «РОСКОСМОС»

О. М. Алифанов, В. К. Оделевский, С. О. Фирсюк
Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Москва, Россия

Ключевые слова: Международная космическая станция (МКС),
космический эксперимент, национальное лабораторное образование,
космическое образование

Рассмотрена мировая и отечественная практика использования космической информации в сфере образования, приведён краткий обзор результатов образовательных экспериментов, проведённых на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), дан перечень предложений по проведению новых образовательных экспериментов на борту МКС и Российской орбитальной станции (РОС) и внедрению результатов космических экспериментов в практику образовательных учреждений.

Международная космическая станция уже более 20 лет работает в качестве космической лаборатории, обеспечивающей проведение различных экспериментов на околоземной орбите. Запуск и эксплуатация МКС стали важным этапом в истории пилотируемой космонавтики, а сама станция превратилась в платформу для освоения человеком космического пространства.

Научные исследования, проводимые на МКС, требуют наличия одного или сочетания нескольких условий, имеющих место в низких околоземных орбитах, реализация которых невозможна в наземных условиях. Прежде всего это — микрогравитация, близкая к невесомости, вакуум, температурные условия и радиация. Основные области исследований включают: изучение влияния космических условий на организм человека и различные биологические объекты, космическую медицину, физические и технические науки, астрономию, метеорологию и др.

За прошедшие годы на МКС было проведено множество научных исследований, затрагивающих самые различные дисциплины: от микробиологии до метеорологии, от медицины до фундаментальной физики.

Следует отметить, что практически с самого начала эксплуатации МКС многие участники этого международного проекта уделяли большое внимание проведению на станции научно-образовательных экспериментов. К числу основных целей такой деятельности относится использование уникальных возможностей МКС в образовательной сфере в области науки, инженерии, математики, биологии, географии, геологии, медицины и др., т. е. использование МКС в качестве образовательного ресурса, позволяющего проводить образовательные мероприятия на борту МКС, а также одновременно в школьных классах и студенческих аудиториях с использованием современных средств массовой коммуникации.

Алифанов Олег Михайлович — главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор, академик РАН, o.alifanov@yandex.ru

Оделевский Владимир Константинович — доцент, кандидат технических наук, академик РАКЦ, odelevsky@mail.ru

Фирсюк Сергей Олегович — начальник СККБ «Искра» МАИ, iskramai@yandex.ru

Таблица 1. Научно-образовательные эксперименты

№ п/п	Шифр	Наименование	Цель	Постановщик
1	«Великое начало»	Популяризация достижений отечественной пилотируемой космонавтики	Популяризация достижений отечественной космонавтики в нашей стране и в мире	ПАО «РКК «Энергия»
2	«Вызов»	Выполнение съёмки фото-, видео- и аудиоматериалов для создания цикла документальных фильмов, серии телевизионных передач, полнометражного художественного фильма и иных аудиовизуальных произведений	Пропаганда достижений российской космонавтики, популяризация космической деятельности	АО «Главкосмос»
3	«Дисперсия»	Формирование и поведение жидкофазных дисперсий в условиях микрогравитации	Демонстрация и исследование процессов жидкостного разделения фаз в системах полимер–растворитель и поведения жидкофазных дисперсий различной природы в условиях микрогравитации при изменении температуры и воздействии вибраций, электрического и магнитного полей	МАИ
4	«Интер-МАИ-75»	Космические аппараты и современные технологии персональных и международных коммуникаций связи в образовании	Отработка методик управления КА и организации персональных коммуникаций между пользователями на Земле и информационными ресурсами внутри МКС	МАИ
5	«О Гагарине из космоса»	Открытая передача с борта РС МКС по радиодлюбительскому каналу связи на наземные приёмные станции радиодлюбителей всего мира изображений фотоматериалов, посвящённых жизни и деятельности первого космонавта Ю. А. Гагарина	Изучение характеристик приёма сигнала сложной природы из космоса (изображения, текст) и пропаганда истории фундаментальных достижений России (СССР) в области освоения космоса.	МАИ

№ п/п	Шифр	Наименование	Цель	Постановщик
6	«Парус-МГТУ»	Развёртывание двухлопастной бескаркасной тонколопастной конструкции в поле центробежных сил с борта сверхмалого космического аппарата	Освоение технологии развёртывания крупногабаритных двухлопастных тонколопастных космических конструкций, стабилизированных вращением	МГТУ им. Н. Э. Баумана
7	«РадиоСкаф»	Создание, подготовка и запуск в процессе ВКД сверхмалых космических аппаратов	Обработка автономной интеллектуальной группировки спутников	ПАО «РКК «Энергия»
8	«Сферы»	Обработка синхронизированного управления положением и переориентацией экспериментальных спутников в условиях невесомости	Демонстрация решения задач управления автономными беспилотными космическими аппаратами в интересах привлечения молодёжи к современным проблемам освоения космоса	ИКИ РАН
9	«Фототропизм»	Изучение влияния спектра светового излучения на жизнеспособность и сравнительные особенности развития в невесомости высших растений	Демонстрация влияния спектра светового излучения на жизнеспособность и сравнительные особенности развития высших растений	ПАО «РКК «Энергия»
10	EarthKAM	Фотосъёмка с борта МКС участков поверхности Земли с высоким разрешением по запросам учащихся образовательных учреждений	Повышение мотивации учащихся к научным исследованиям и качества образовательной деятельности в целом, а также расширение возможностей организации учебного процесса использования фотоматериалов, полученных с борта МКС	МАИ

Таблица 2. Возможные эксперименты

№ п/п	Шифр	Наименование	Цель	Постановщик
1	«Аквафера»	Демонстрация формирования и развития замкнутой экологической микросистемы в условиях космического полёта	Демонстрация формирования симбиоза различных водных животных организмов и растений в условиях космического полёта и изучение их развития в замкнутой экологической микросистеме	ПАО «РКК «Энергия»
2	«Диффузия»	Научно-образовательная демонстрация диффузионных процессов в жидких средах в условиях невесомости	Демонстрация на борту РС МКС концентрационной и тепловой диффузии в жидкой среде в условиях невесомости и проведение сравнительного анализа полученных результатов с расчётно-теоретическими данными	МАИ
3	«Мембрана-РХТУ»	Демонстрация эффективности применения мембранной технологии для разделения, очистки и концентрирования жидких и газовых сред в условиях реального орбитального полёта	Исследование эффективности применения мембранной технологии для разделения, очистки и концентрирования жидких и газовых сред в условиях микрогравитации	РХТУ им. Д. И. Менделеева
4	«Трос-МГТУ»	Развёртывание космической тросовой связки	Освоение технологии космических тросовых систем и является научно-образовательным	МГТУ им. Н. Э. Баумана
5	«МГТУ им. Н. Э. Баумана»	Научно-образовательная демонстрация исследования состава взвесей микрочастиц в воздухе в условиях микрогравитации	Демонстрация и проверка различных методов определения состава взвесей микрочастиц в воздухе в условиях невесомости	МАИ

На российском сегменте МКС в настоящее время образовательные эксперименты проводятся в соответствии с «Долгосрочной программой целевых работ, планируемых на МКС до 2024 года» (ДПЦР 2021фин.pdf (tsniimash.ru)). Координация этих работ осуществляется секцией № 8 Координационного научно-технического совета (КНТС) ГК «Роскосмос». Основные направления деятельности секции:

- разработка рекомендаций по практическому использованию в образовательной деятельности результатов экспериментов, полученных в процессе выполнения программ исследований на космических комплексах;
- разработка предложений по постановке и реализации учебно-научных и учебно-технологических космических проектов (студенческие и школьные микроспутники) и образовательных экспериментов на космических аппаратах (КА) научного назначения;
- организация и координация работ по развитию методов и средств ведения образовательной деятельности на борту РС МКС и других КА научного назначения;
- участие в довузовской просветительской и профориентационной работе с целью формирования интереса у выпускников средних школ к получению специальностей аэрокосмического профиля;
- участие в рассмотрении проектов малых научно-образовательных спутников в инфраструктуре пилотируемых космических комплексов (ПКК);
- участие в разработке аэрокосмическими вузами совместно с предприятиями отрасли орбитальной группировки образовательных спутников различного назначения в инфраструктуре ПКК.

Организацией, обеспечивающей функционирование секции, выступает Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

В рамках Долгосрочной программы в подпрограмме ЦР «Практические задачи и образовательные мероприятия» с началом реализации на МКС до 2024 г. включительно представлены следующие научно-образовательные эксперименты (табл. 1).

Кроме приведённых в табл. 1 экспериментов Долгосрочной программой предусматривалась Подпрограмма ЦР «Практические задачи и образовательные мероприятия», проведение которых будет возможно при продлении эксплуатации МКС после 2024 г., в которой приведены следующие эксперименты (табл. 2).

Рассмотрим основные результаты наиболее популярных среди молодёжи научно-образовательных экспериментов.

Космический эксперимент EarthKAM

Основными результатами КЭ EarthKAM (*англ.* Earth Knowledge Acquired by Middle school students) являются фотоизображения поверхности Земли, полученные с борта МКС, предоставляющие возможность их дальнейшего динамичного хранения, внедрения, тиражирования и распространения. Полученные в результате проведения сеансов эксперимента изображения публикуются на общедоступном сайте проекта EarthKAM (<https://www.earthkam.org/>).

Основные участники КЭ с российской стороны: средние образовательные учреждения Москвы, г. Королёва (Московская обл.) и г. Симферополя (республика Крым). С каждой новой сессией КЭ число участников растёт.

Полученные в ходе КЭ результаты учащиеся используют на уроках географии и истории, обсуждают в ходе тематических внеклассных занятий, оформляют презентации, выступают с докладами

на школьных конференциях, выпускают статьи в местных газетах, публикуют информационные сообщения на сайтах своих учебных учреждений и т. д.

В период с 21 по 23 сентября 2022 г. состоялась 80-я сессия КЭ EarthKAM (проводятся четыре раза в год), в ходе которой команды студентов и школьников из разных стран готовили рабочие программы для съёмки разных районов Земли, обрабатывали и исследовали полученные космоснимки. Постановщиком эксперимента на борту МКС в 80-й сессии был космонавт-исследователь ГК «Роскосмос» Сергей Корсаков.

В ходе занятий студенты получили и исследовали по снимкам экологические проблемы Земли — высыхающее Аральское море, вырубку тропических лесов в Амазонии, лесные пожары в Австралии и в Бразилии, тающие ледники в Южной Америке.

С 7 по 9 октября 2022 г. в Свердловской обл. состоялся 1-й Всероссийский слёт учителей географии «Открываем Россию заново с учителями географии». Организаторами мероприятия стали Русское географическое общество, Министерство просвещения Российской Федерации, журнал «География в школе» и другие организации.

На проекте свои команды по три человека представили восемь федеральных округов, а это 38 очных команд (всего больше 130 чел.) и 57 команд-участников заочного конкурса. Педагог гимназии № 5 г. Королёва Карина Яхно представила свой мастер-класс на 1-м Всероссийском слёте учителей географии, сообщается в Telegram-канале гимназии.

Московскую область представили учителя географии гимназии № 5 Карина Яхно и гимназии № 3 Ксения Никонова. Педагоги из г. Королёва успешно прошли заочный этап испытаний и получили приглашения на слёт.

Результаты используются:

- 1) в образовательном процессе: космические снимки могут использоваться как в рамках школьной программы, так и на дополнительных и факультативных занятиях, внеклассных мероприятиях и конкурсах;
- 2) при разработке научно-методической и учебной литературы, в частности, для создания мультимедийных учебников и электронных справочников для их дальнейшего использования в образовательном процессе;
- 3) для привлечения широкой общественности к непосредственному участию в космической миссии.

Базовым регионом на начальном этапе проведения КЭ выбран г. Королёв Московской обл.

Возможность получения и обработки космических снимков, помимо повышения познавательной активности учащихся за счёт увеличения наглядности и эмоциональной насыщенности, позволяет решить ряд важных учебных задач:

- расширение теоретических и практических знаний учащихся;
- избегание формального подхода к проведению уроков;
- активизация всех видов памяти: учебный материал воспринимается глубже, следовательно, ученик будет воспринимать предмет в другом ракурсе;
- усиление творческого мышления учащихся;
- удобство использования для вывода информации в виде распечаток на принтере в качестве раздаточного материала для учащихся: справочного материала, памяток и т. п.;
- создание мультимедийных учебников по географии для всех классов и электронных справочников.

Совмещение работы со снимками и географическими картами позволит лучше понять назначение карты, а также проиллюстриро-

вать искажения, возникающие при переносе поверхности шарообразной Земли на плоскость.

Космический эксперимент «О Гагарине из космоса»

Начало проведения эксперимента — 22 февраля 2014 г. В ходе проведения КЭ (ЦР) «О Гагарине из космоса» с борта МКС передаются цифровые изображения, связанные с жизнедеятельностью первого космонавта планеты Ю.А. Гагарина. Наряду с этими материалами в ходе проведения эксперимента передавались изображения, посвящённые значимым юбилейным датам, таким как 40-летний юбилей совместного полёта кораблей «Союз» и «Аполлон» и 15-летний юбилей радиотехнических экспериментов с участием сообщества ARISS (*англ.* Amateur Radio on the International Space Station) на МКС, 160-летний юбилей К.Э. Циолковского. Начиная с экспедиции МКС-45/46, изображения в ходе КЭ впервые передавались в увеличенном разрешении в формате PD180.

Кроме того, в ходе КЭ (ЦР) «О Гагарине из космоса» проводились сеансы голосового диалога экипажа МКС со студентами и школьниками различных отечественных и зарубежных учебных заведений, центров детского творчества и дополнительного образования, в том числе центром космического образования «Галактика» г. Калуга, Центра космической связи «Радуга» Санкт-Петербурга, с молодёжью международного лагеря «Славянское содружество» г. Сочи, Центром непрерывного повышения профессионального мастерства педагогических работников Республики Мордовия и др.

За время реализации КЭ (ЦР) проведено более 160 сеансов связи со школьниками и студентами более 18 городов РФ, в том числе: Москвы, Санкт-Петербурга, Сочи, Челябинска, Калуги, Рязани, Курска, Калининградской обл., Томска, Вологды, Уфы, Южно-Сахалинска, Обояни, Тольятти, Нижнего Новгорода, Азнакаево, Саратова, Симферополя, Благовещенска, республик Беларусь, Башкортостан, Мордовия, Чувашия и др., а также с радиолюбителями зарубежных стран: Франции, Перу, Эквадора, Бразилии, Аргентины, Уругвая, Японии, Туниса, Таиланда, Австралии, Италии, Нидерландов, Азорских Островов, США, КНР, Великобритании, Индия, Греции, Испании.

В целом за период проведения КЭ (ЦР) «О Гагарине из космоса» передано более 1100 изображений.

Космический эксперимент «Интер-МАИ-75»

Первый сеанс космического эксперимента «Интер-МАИ-75» был проведён в апреле 2016 г. Тематически он был посвящён истории создания в МАИ студенческим конструкторским бюро «Искра» университетских спутников, включая и первый в мире космический аппарат такого класса «Радио-2», запущенный 26 октября 1978 г.

К середине 2022 г. проведено 28 серий сеансов эксперимента. Полученные в результате эксперимента данные используются в соответствии с существующими образовательными программами и стандартами в МАИ и ряде других вузов России, в том числе Юго-Западным государственным университетом (Курск) и Амурским государственным университетом (Благовещенск).

По результатам научно-образовательных экспериментов, проводимых по направлению секции КНТС ГК «Роскосмос», подготовлено более 200 публикаций в отечественных и зарубежных журналах и средствах массовой информации.

Для реализации на создаваемой Российской орбитальной станции секцией 8 рассмотрены и предложены новые научно-образовательные эксперименты, приведённые в табл. 3.

Программы национального лабораторного образования на МКС реализуются многими участниками программы МКС.

Таблица 3. Новые эксперименты для РОС

№ п/п	Шифр	Наименование	Ожидаемый результат	Постановщик
1	«Инспектор»	Разработка, изготовление, научно-образовательная демонстрация и исследовательские испытания инспекционной системы СБ РОСС на основе шагающего микроробота	Научно-образовательная демонстрация действия мобильных шагающих микророботов в условиях микрогравитации и исследование возможности инспекции внешних поверхностей РОСС на их основе	МАИ
2	«Метеор-IT»	Научно-образовательный космический эксперимент по автоматической съёмке Земли с борта МКС по предварительным заявкам	Значительные объёмы съёмочной информации ДЗЗ в автоматическом режиме для образовательных, научных и социально-экономических задач	МАИ
3	«Рой МКА»	Отработка технологий межспутниковых каналов связи и организации функционирования группы (роя) МКА	<ol style="list-style-type: none"> 1. Технологии реализации межспутниковых каналов связи и организации функционирования для группы МКА. 2. Экспериментальная отработка технологий целевого применения группы МКА на базе технологий мультиагентного управления. 3. Создание и экспериментальная отработка вариантов полезных нагрузок для МКА в составе роя. 4. Создание и практическая отработка методов и средств сброса, приёма и обработки ТМИ и данных с полезной нагрузки, предоставляемой роем МКА. 5. Создание, испытания и применение полуавтоматического. 6. Создание автоматического ПУ для обеспечения начальной скорости и направления полёта МКА. 7. Формирование нового поколения высококвалифицированных специалистов по созданию и запуску МКА 	ПАО «РКК «Энергия»

№ п/п	Шифр	Наименование	Ожидаемый результат	Постановщик
4	«Спутник»	Отработка способов и алгоритмов ориентации в условиях космического полета	<p>1. Демонстрация возможностей, предоставляемых учащимся (школьникам и студентам) для активного участия в разработке программ для роботов, имитирующих спутники.</p> <p>2. Пробуждение интереса к космическим исследованиям у молодёжи и мощь в воспитании нового поколения учёных и инженеров</p>	ИКИ РАН

В США такая программа НАСА стала частью новой системы образования STEM (*англ.* Science, Technology, Engineering, Mathematics) — это модель, объединяющая естественные науки и инженерные предметы в единую систему. В её основе интегративный подход: биологию, физику, химию и математику преподают не по отдельности, а в связи друг с другом, в том числе для решения реальных технологических задач. Данный подход даёт возможность рассматривать проблемы в целом, а не только в области одной науки или технологии.

Закон о полномочиях НАСА 2005 г. (это акт Конгресса США, который требует, чтобы НАСА осуществляло сбалансированный набор программ в области полётов человека в космос, исследований и разработок в области авионики и научных исследований. Предписывает НАСА поддерживать университетские исследования в различных областях. Подписан президентом Джорджем У. Бушем и стал публичным законом 109-155 от 30 декабря 2005 г.) обозначил американский сегмент Международной космической станции в качестве национальной лаборатории с целью расширения использования МКС другими федеральными агентствами и частным сектором (<https://www.nasa.gov/news-release/nasa-names-casis-to-manage-space-station-national-lab-research-2/>).

Основные цели американской программы Национального лабораторного образования НАСА на МКС:

- предоставление образовательным организациям комплекса мероприятий, который позволит преподавателям, учащимся, студентам и общественности участвовать в работах, проводимых на МКС;
- предоставить возможности недопредставленным (недопредставленная группа описывает подмножество населения, которое имеет меньший процент в значимой подгруппе, чем подмножество в общей совокупности.) и недостаточно обслуживаемым (недостаточно обслуживаемые — проживающие в труднодоступных районах, этнические или расовые меньшинства, экономически маргинализованные группы) группам населения участвовать в работах, проводимых на МКС;
- предоставлять возможности университетского уровня, которые способствуют получению знаний и навыков, необходимых для дальнейшего STEM-образования, и обеспечивают трудоустройство в сфере карьеры, связанной со STEM;
- развивать образовательные партнёрские отношения с организациями за пределами НАСА для достижения перечисленных выше целей;
- уделять особое внимание практическим образовательным мероприятиям, уникальным для работ, проводимых на МКС;
- обеспечить начальное и среднее образование, соответствующее национальным стандартам.

Основная деятельность НАСА по проекту национального лабораторного образования на МКС приведена в табл. 4.

Образовательные эксперименты Европейского космического агентства на МКС предусматривают: демонстрацию физических явлений в космосе, любительское радио на МКС (ARISS), камеру наблюдения за Землёй (EVC), демонстрацию электростатической самосборки (*англ.* ElectroStatic Discharge — ESD), эксперимент с масляной эмульсией.

Образовательные эксперименты Японского космического агентства (*англ.* Japan Aerospace eXploration Agency) были направлены на подтверждение гипотезы о том, что внеземные органические соединения сыграли важную роль в зарождении первой земной жизни, а также на проверку гипотезы о панспермии.

Таблица 4. Основные мероприятия проекта национального лабораторного образования НАСА на МКС

№ п/п	Наименование	Содержание
1	«Космическая лаборатория YouTube»	Всмирная образовательная инициатива, в рамках которой учащимся 14–16 и 17–18 лет предлагается разработать научные эксперименты, которые можно проводить в космосе. Видеоролики YouTube с описанием экспериментов были представлены в декабре 2011 г. Экспертная группа оценивала заявки с привлечением сообщества YouTube, и были выбраны региональные победители. В марте 2012 г. были выбраны глобальные победители, и летом они увидели, как их эксперименты запускаются и проводятся на МКС с прямой трансляцией на YouTube
2	«Жизнь на МКС ISSLive»	Предоставляет новый способ узнать о Международной космической станции. Это инновационная интерактивная веб-инициатива, которая позволит передавать данные телеметрии МКС и временной шкалы экипажа в реальном времени в контексте STEM (наука, технология, инженерное дело и математика) в класс или образовательную среду. Всё это будет доступно через общедоступный веб-сайт, мобильные устройства и планшетные приложения
3	«LEGO в космосе»	НАСА и LEGO Group сотрудничали в создании уникальных образовательных мероприятий, сочетающих элементы LEGO, космическую среду и изобретательность молодых умов
4	«Догадка НАСА»	Старшеклассники объединились с НАСА для создания оборудования, или HUNCH, это инновационная школьная программа, которая сотрудничает с НАСА в Космическом центре имени Линдона Джонсона (<i>англ.</i> Lyndon B. Johnson Space Center) и Центре космических полётов имени Джорджа Маршалла (<i>англ.</i> George Marshall Space Flight Center) со средними школами в штатах по всей стране. Партнёрство предполагает, что студенты создают реальные продукты для НАСА, применяя свои навыки STEM, а также учатся работать в команде и творчески мыслить
5	«Коммерческие вкладыши для научного оборудования для биообработки общего назначения»	Коммерческие эксперименты с научной вставкой для универсального устройства для биообработки (CSI) представляют собой повторяющиеся образовательные нагрузки, предназначенные для того, чтобы заинтересовать студентов K-12 STEM, предоставляя им возможность участвовать в исследованиях, проводимых на борту МКС в режиме, близком к реальному времени

№ п/п	Наименование	Содержание
6	ARISS — любительское радио на борту Международной космической станции	Используя любительское радио, студенты со всего мира могут задавать астронавтам вопросы о жизни в космосе и другие темы, связанные с космосом. Учащиеся полностью подключаются к радиолубительскому контакту на Международной космической станции (ARISS), помогая установить наземную станцию любительского радио в школе, а затем используют эту станцию для прямого разговора с членом экипажа на борту в течение примерно 10 мин, что соответствует времени полёта Международной космической станции над приёмной станцией на земле
7	«Нисходящие ссылки на обучение в полёте»	Школы или образовательные организации могут организовать нисходящую образовательную линию связи в полете с членами экипажа космической станции. Нисходящие линии связи похожи на видеоконференцию. Учащиеся задают вопросы и наблюдают из своей школы или научного центра, как члены экипажа отвечают на вопросы и демонстрируют научные, технологические, инженерные и математические концепции способами, которые невозможны на Земле
8	«Международная космическая станция EarthKAM»	Программа «Знания о Земле, приобретаемые учащимися средней школы» (EarthKAM) позволяет учащимся фотографировать нашу родную планету с помощью камеры, расположенной на Международной космической станции. Учащиеся средней школы направляют камеру, чтобы сфотографировать Землю с высоты 250 миль над поверхностью нашей планеты
9	«Дети в Мисго-г» (завершено)	Разработан с учётом потребностей космоса! НАСА предложило учащимся средней школы разработать эксперимент, который можно было бы проводить как в классе, так и на борту Международной космической станции. В 2010 г. было проведено девять экспериментов, а в 2011 г. — шесть

Секцией 8 «Космическое образование» был проведён анализ отечественных образовательных стандартов и тематики космических экспериментов, проводимых на борту РС МКС в рамках Долгосрочной программы. В результате этого анализа был сделан вывод, что результаты практически каждого эксперимента, проводимого на борту РС МКС, имеют образовательную компоненту и могут быть использованы в образовательных целях при создании соответствующих организационных условий.

Применительно к среднему образованию можно говорить о выработке единых образовательных продуктов, особенностью которых должны быть соответствие образовательному стандарту и хорошо отработанных методических указаний для преподавателей.

Применительно к профессиональному образованию можно выделить три направления подготовки образовательных продуктов в интересах подготовки кадров:

- для предприятий аэрокосмической промышленности;
- использующих результаты космической деятельности в рамках работы по специальности;
- широкого спектра в рамках дисциплин, при преподавании которых возможно использование образовательных продуктов на основе данных, получаемых при проведения космических экспериментов.

Важным направлением космической образовательной деятельности становится непосредственное использование РС МКС в качестве образовательного ресурса.

Наиболее рациональным следует считать использование двух основных форм космической образовательной деятельности на базе РС МКС:

- проведение с использованием дистанционных технологий лекционных, лекционно-семинарских, практических занятий (лабораторного характера) на борту РС МКС;
- постановка и проведение учебных и научно-исследовательских экспериментов, наиболее отчётливо демонстрирующих отличия и возможности условий на поверхности Земли от условий космического полёта.

При проведении образовательных экспериментов на борту РС МКС наиболее ответственными этапами представляются:

- процессы предварительной наземной подготовки экспериментов и их проведения;
- анализ полученных результатов, максимально возможное задействование коммуникационных каналов для распространения информации о проведённых учебно-исследовательских работах в условиях космического полёта.

Предложения по активизации образовательной деятельности на борту РС МКС с последующей передачей этих работ на РОС:

- 1) продолжить проведение образовательных экспериментов, включённых в утверждённую Долгосрочную программу научно-прикладных исследований (НПИ);
- 2) разработать «Комплексную программу использования ресурсов РС МКС и РОС в образовательных целях»;
- 3) организовать создание учебно-методических пособий для преподавателей, студентов и школьников с описанием устройства и возможностей МКС, особенностей жизни и работы в условиях космического полёта, содержащих результаты осуществлённых научно-прикладных исследований и экспериментов на РС МКС, проводить повышение квалификации школьных учителей в области космического образования.

- 4) расширить участие школьников в экспериментах на РС МКС и РОС, для чего создать модульную экспериментальную установку, предоставляющую возможность для учащихся самостоятельно готовить эксперимент (в случае его отбора конкурсной комиссией) с использованием стандартных съёмных кассет.
- 5) создать заочную школу «Юный космонавт» с возобновлением практики уроков из космоса с участием экипажа МКС и использованием возможностей сети Интернет.
- 6) подготовить обращение в Министерство просвещения и Министерство науки и высшего образования по привлечению образовательных учреждений к разработке предложений по реализации научно-образовательных экспериментов на борту РС МКС с организацией их последующего конкурсного отбора.

Для реализации данных предложений необходимо создать постоянно действующую группу специалистов с выделением для её работы целевого финансирования. В состав такой группы должны входить представители постановщиков космических экспериментов, преподавателей образовательных учреждений.

К числу задач, решение которых может быть возложено на указанную группу следует отнести:

- разработку рекомендаций по внесению дополнений в существующие образовательные стандарты по использованию результатов космических экспериментов в образовательном процессе и создание необходимых для этого учебно-методических пособий;
- разработку принципов отбора и передачи результатов научных экспериментов, проводимых на борту МКС, учреждениям и организациям общего и высшего образования;
- анализ результатов, выполненных на борту МКС, экспериментов и долгосрочной программы НПИ с целью выбора экспериментов, результаты которых представляют интерес для образовательного сообщества;
- проведение консультаций с постановщиками экспериментов о возможности и условиях передачи результатов научных экспериментов в учреждения и организации общего и высшего образования;
- выпуск и апробацию методических пособий, на основе результатов выполненных на борту МКС экспериментов, в ряде выделенных для этих целей образовательных заведений;
- по результатам апробации разработка рекомендаций по использованию созданных методических пособий в других образовательных учреждениях и организациях.

THE SCIENTIFIC AND PRACTICAL SIGNIFICANCE OF EXPERIMENTS AND INVESTIGATIONS CARRIED OUT ON BOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION (RUSSIAN SEGMENT) ON THE SECTION No. 8 "SPACE EDUCATION" OF THE ROSCOSMOS COORDINATING SCIENTIFIC AND TECHNICAL COUNCIL

O. M. Alifanov, V. K. Odelevskiy, S. O. Firsyuk

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Keywords: International Space Station (ISS), space experiment, national laboratory education, space education

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ И ПОПУЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПИЛОТИРУЕМОЙ КОСМОНАВТИКИ

О. М. Алифанов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Ключевые слова: Международная космическая станция (МКС), научно-образовательные эксперименты, молодёжный космический центр, космическое образование, Универсат

Рассмотрена история использования в СССР и Российской Федерации пилотируемых космических комплексов в образовательной деятельности и при популяризации достижений отечественной космонавтики. Дан краткий обзор текущих отечественных и зарубежных проектов по использованию пилотируемых полётов в образовательных целях. Рассмотрены особенности и преимущества использования космических пилотируемых средств в образовании. Предложены перспективные направления работ по повышению образовательного потенциала пилотируемой космонавтики.

Легендарный полёт в космос Ю. А. Гагарина не только дал мощный толчок «космизации» мировоззрения человечества как составной части мироощущения будущего, а также вызвал появление и быстрое развитие космического образования как одной из базовых частей образования общества.

Космическое образование это многофакторное понятие с двумя основными прикладными компонентами — образование для успешной космической деятельности и использование возможностей космических научных и технических достижений в интересах самого образования. В этот термин часто включается и популяризация космической деятельности с её достижениями для всего человечества. При этом неминуемо имеет место геополитическая конкуренция между странами по качеству интеллектуальных ресурсов как следствие качества образования.

Космическая деятельность и космическое образование рассматриваются как определяющие факторы обеспечения национальной безопасности и упрочнения экономики страны.

Одним из практических инструментов реализации космического образования представляется использование возможностей пилотируемой космической техники, в том числе для проведения соответствующих экспериментов и образовательных мероприятий в целях подготовки инженерных и научных кадров, а также в интересах школьного образования.

Участие космонавтов в реализации научно-образовательных экспериментов, в проведении уроков из космоса, организации телемостов «Земля — орбита», в сочетании с техническими возможностями современных пилотируемых комплексов, образуют мощный образовательный потенциал пилотируемой космонавтики, позволяющий использовать на благо образования уникальные свойства околоземного космического пространства:

- возможность глобального наблюдения в реальном времени поверхности Земли и её атмосферы, а также происходящих в них процессов и явлений;
- возможность глобальной передачи информации в реальном масштабе времени;

- улучшенные, по сравнению с земными условия наблюдения и изучения свойств небесных тел, планет Солнечной системы и космического пространства в целом;
- глубокий вакуум, большие градиенты температуры, микрогравитация, радиационные пояса, солнечная и космическая радиация создают уникальные условия для исследования поведения известных материалов и устройств, а также создания новых материалов и технологий.

Большую роль в космическом образовании играют студенческие секции и конструкторские бюро космической направленности, в которых под руководством сотрудников вузов разрабатываются, создаются и эксплуатируются малые (МКА) и сверхмалые космические аппараты. Именно в Студенческом космическом конструкторском бюро (СККБ) «Искра» Московского авиационного института (МАИ) совместно с Добровольным обществом содействия армии, авиации и флоту России (ДОСААФ) был создан связной искусственный спутник Земли (ИСЗ) «Радио-2», запущенный в космос в 1978 г. Это был первый полноценный с инженерной точки зрения университетский спутник, успешно выведенный и работавший в космосе для радиолюбителей всего мира. Причём впервые в отечественной практике этот космический аппарат имел негерметичный корпус.

Затем, в 1982 г., впервые с борта одного космического аппарата, в данном случае с орбитальной станции «Салют-7», были запущены другие микро-ИСЗ «Искра-1» и «Искра-2», также созданные в СККБ «Искра». Можно упомянуть и ряд других примеров образовательных и научно-образовательных спутников Земли, созданных в МАИ непосредственно с участием студентов и успешно работавших в космосе. Это были первые примеры успешной практической реализации космического образования при подготовке инженерных кадров для ракетно-космической промышленности.

Другое важнейшее направление в космическом образовании студентов и школьников связано с проведением экспериментов и образовательных мероприятий на орбитальной станции «Мир» и Международной космической станции (МКС). Широко известна образовательная программа «Уроки из космоса» под руководством лётчика-космонавта А. А. Сереброва. В ряде сценариев уроков принимали участие сотрудники и студенты Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана) и МАИ. Эти мероприятия на станции «Мир» выполняли, в частности, лётчики-космонавты врач В. В. Поляков и инженеры, выпускники МАИ, П. В. Виноградов и Ю. В. Усачев. При этом студенты интерактивно участвовали в этих лекциях, находясь в Центре управления полётами (ЦУП).

Орбитальные станции выступают многоцелевыми исследовательскими лабораториями. Рассмотрение и отбор предложений по экспериментам осуществляется координационным научно-техническим советом (КНТС) «Роскосмоса». Вопросами, связанными с использованием российского сегмента (РС) МКС для образовательной деятельности, занимается секция КНТС «Космическое образование».

Основные цели работы секции:

- повышение качества подготовки молодых специалистов и научных работников аэрокосмического профиля;
- популяризация и повышение престижа космической деятельности;
- повышение информированности граждан и экономически активного бизнес сообщества о возможностях использования космических технологий и результатов исследований в различных секторах экономики и решении других образовательных задач.

Следует отметить, что практически с самого начала эксплуатации МКС многие участники этого международного проекта уделяли большое внимание проведению на станции научно-образовательных экспериментов. Основными задачами такой деятельности становится использование уникальных возможностей МКС в образовательной сфере в области науки, инженерии, математики, биологии, географии, геологии, медицины и др. То есть использование МКС в качестве образовательного ресурса, позволяющего проводить образовательные мероприятия на борту МКС, а также одновременно в школьных классах и студенческих аудиториях с применением современных средств массовой коммуникации.

На российском сегменте МКС в настоящее время образовательные эксперименты проводятся в соответствии с «Долгосрочной программой целевых работ, планируемых на МКС до 2024 года». Координация этих работ осуществляется секцией № 8 «Космическое образование» КНТС «Роскосмос».

Наиболее активными участниками по проведению научно-образовательных экспериментов, представленных в долгосрочной программе, выступают: МАИ, МГГУ им. Н. Э. Баумана, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (РХТУ им. Д. И. Менделеева), Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), а также ПАО «РКК «Энергия», АО «Главкосмос», Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН) и Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН).

МАИ является постановщиком следующих научно-образовательных экспериментов на российском сегменте МКС:

- «Дисперсия». Цель эксперимента заключается в демонстрации и исследовании процессов жидкостного разделения фаз в системах «полимер – растворитель» и поведения жидкофазных дисперсий различной природы в условиях микрогравитации при изменении температуры и воздействии вибраций, электрического и магнитного полей;
- «Интер-МАИ-75». Эксперимент направлен на отработку методик управления КА и отработку технологии организации персональных коммуникаций между пользователями на Земле и информационными ресурсами внутри МКС;
- «О Гагарине из космоса». При проведении сеансов данного эксперимента изучаются характеристики приёма сигнала сложной природы из космоса (изображения, текст) и пропаганда истории фундаментальных достижений России (СССР) в области освоения космоса;
- EarthKAM. Фотосъёмка с борта МКС участков поверхности Земли с высоким разрешением по запросам учащихся образовательных учреждений. Проводится совместно с НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (*англ.* National Aeronautics and Space Administration – NASA));
- «Диффузия». Научно-образовательная демонстрация диффузионных процессов в жидких средах в условиях невесомости;
- «Экология-образование». Демонстрация и проверка различных методов определения состава взвесей микрочастиц в воздухе в условиях невесомости.

Для обеспечения взаимодействия с РС МКС при подготовке и проведении экспериментов в МАИ создан и функционирует Центр приёма и обработки информации (ЦПОИ), оснащённый современным оборудованием, которое позволяет студентам участвовать в сеансах связи с российским сегментом МКС.

В настоящее время в МАИ готовятся предложения по проведению научно-образовательных экспериментов на проектируемой в ПАО РКК «Энергия» Российской орбитальной станции (РОС),

которая будет обладать большими возможностями по наблюдению поверхности Земли.

Большую работу по космической образовательной деятельности проводит созданный более 25 лет назад в МГТУ им. Н. Э. Баумана Учебно-научный молодёжный космический центр (МКЦ), ставший одним из признанных участников в организации и проведении космической исследовательской и проектной деятельности в университете.

На базе МКЦ на протяжении последних лет реализуется научно-образовательная программа создания малоразмерных космических аппаратов, изначально нацеленная на совершенствование подготовки высококвалифицированных специалистов для космической промышленности.

За последние годы при взаимодействии с индустриальными партнёрами (АО «ВПК «НПО машиностроения», Научно-производственное предприятие (НПП) «Лептон», НПП «Саит», ООО «Нилакт ДОСААФ») были разработаны и созданы спутники дистанционного зондирования Земли «Бауманец» (2003–2006), «Бауманец-2» (2013–2017), спроектирован и доведён до габаритно-массового макета микроспутник «Бауманец-3» (2017–2018). В рамках выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР) с ПАО «РКК «Энергия» по проведению Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов на российском сегменте Международной космической станции разработан спутник «Парус-МГТУ», запланированный к запуску с борта МКС 25 октября 2023 г. Цель разработки — отработка механизма развёртывания солнечного паруса.

Среди других центров в МГТУ им. Н. Э. Баумана создано и работает Конструкторское бюро «Прорывные космические исследования и технологии»; оно занимается разработкой малых космических аппаратов типоразмера CubeSat.

Первые научные наноспутники «Ярило» № 1 и № 2 (формата Cubesat 1,5U) с полезной нагрузкой для изучения космической погоды в интересах Росгидромета были запущены на орбиту в 2020 г. и успешно функционируют по настоящее время. В 2023 г. выведены на орбиту ещё четыре МКА: «Ярило» № 3 и № 4 (3U) и «Хорс» № 1 и № 2 (6U). Находится в разработке спутник «Ярило» № 5 (16U), предназначенный для мониторинга парниковых газов. Все спутники запущены на орбиту по программе «Роскосмоса» «Универсат» на безвозмездной основе.

Активным участником проведения научно-образовательных экспериментов на борту РС МКС в рамках долгосрочной программы является ПАО «РКК «Энергия», которое выступает постановщиком таких экспериментов, как:

- «Великое начало». В рамках эксперимента разрабатываются технологии использования результатов космической деятельности в образовательных целях и народном хозяйстве, доведение результатов экспериментов до широких слоёв населения и органов власти.
- «РадиоСкаф». Создание, подготовка и запуск в процессе внекорабельной деятельности (ВКД) сверхмалых космических аппаратов.
- «Фототропизм». Изучение влияния спектра светового излучения на жизнеспособность и сравнительные особенности развития в невесомости высших растений.
- «Аквасфера». Демонстрация формирования и организации симбиоза различных водных животных организмов и растений в условиях космического полёта и изучение их развития в замкнутой экологической микросистеме.
- «Ряска». Изучение механизмов ориентации в невесомости гравитационно- и фоточувствительных органов растений на различные факторы окружающей среды.

Важным событием в истории пилотируемых полётов стало проведение космического эксперимента (КЭ) «Вызов», постановщиком которого выступило АО «Главкосмос». Целью эксперимента было выполнение съёмки фото-, видео- и аудиоматериалов для создания цикла документальных фильмов, серии телевизионных передач, полнометражного художественного фильма и иных аудиовизуальных произведений. Результаты этого эксперимента легли в основу первого в мировой практике художественного фильма «Вызов», снятого в условиях космического пространства, вышедшего в текущем году на экраны страны.

Активными участниками научно- образовательных экспериментов на борту РС МКС являются ОИВТАН и ИКИ РАН.

В результате выполнения ОИВТАН космического эксперимента «Кулоновский кристалл» — «Изучение динамики системы заряженных частиц в магнитном поле в условиях микрогравитации», продемонстрированы возможности использования магнитных полей в фундаментальных и прикладных исследованиях в условиях микрогравитации. Изучено поведение сильно идеальной плазмы в магнитном поле.

ИКИ РАН в рамках КЭ «Сферы» — «Демонстрация решения задач управления автономными беспилотными космическими аппаратами в интересах привлечения молодёжи к современным проблемам освоения космоса», проводимого совместно с НАСА, осуществляет большую работу по привлечению к решению задач управления автономными беспилотными космическими аппаратами студентов и школьников старших классов в интересах решения современных проблем освоения космоса.

Программы национального космического образования на МКС реализуются космическими агентствами США, Японии и многими другими участниками программы МКС.

EDUCATIONAL AND POLARIZING POTENTIAL OF MANNED COSMONAUTICS

O. M. Alifanov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Keywords: International Space Station (ISS), scientific and educational experiments, Bauman Youth Space Center, space education, Cubesat

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА МКС ПО ЗАПУСКУ СПУТНИКОВ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

С. Н. Алямовский

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: спутник сферической формы, орбитальная станция, сила сопротивления атмосферы Земли, центр масс

Космический эксперимент «Вектор-Т», выполняемый на российском сегменте Международной космической станции (МКС), направлен на разработку методов высокоточного прогнозирования движения МКС. Постановщик эксперимента — Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва». Научный руководитель — доктор технических наук М. Ю. Беляев (РКК «Энергия»).

Для решения многих научных и прикладных задач важно точное знание положения станции на орбите. МКС — большой и сложный динамический объект, поэтому в ряде случаев необходима информация о точном местоположении центра масс орбитальной станции.

Основные трудно учитываемые возмущения движения орбитальной станции связаны с изменением силы сопротивления атмосферы Земли и зависят от плотности атмосферы и изменения миделя станции. Оно вызвано изменениями конфигурации МКС и положения подвижных конструктивных элементов МКС (например, солнечные батареи американского сегмента) в результате стыковок и расстыковок МКС с космическими аппаратами, а также с поддержанием ориентации МКС в полёте с определённой точностью (точность ориентации относительно орбитальной системы координат $\pm 3^\circ$ по каждой оси). Не учёт данных возмущений резко снижает точность определения и прогнозирования движения МКС на орбите.

В качестве инструментов исследования данной задачи предлагается использовать спутники идеальной сферической формы двух типов: для проведения экспериментов вне орбитальной станции и внутри неё.

В рамках космического эксперимента «Вектор-Т» для проверки и калибровки математических моделей и алгоритмов, используемых при расчёте плотности атмосферы в задачах определения и прогноза движения космических аппаратов на низких околоземных орбитах, с борта МКС запускается спутник идеальной сферической формы, размеры и масса которого точно известны. Движение спутника определяется по траекторным измерениям (с помощью наземных станций радиоконтроля орбиты), и так как его баллистический коэффициент постоянен, появляется возможность по движению спутника по орбите рассчитать плотность атмосферы и уточнить параметры модели атмосферы (Алямовский и др. 2017).

Обработка данных осуществляется двумя способами. В первом наряду с начальными условиями движения уточняется баллистический коэффициент спутника. При этом параметры модели атмосферы принимают реальные значения. Посредством соотношения найденного значения баллистического коэффициента с его истинным значением находится поправочный множитель для плотности атмосферы.

Во втором способе обработке баллистический коэффициент принимает заданное значение, индексы активности Солнца принимают предписываемые ГОСТом значения, а уточняемым параметром

служит среднесуточный индекс геомагнитной возмущённости. Такой подход представляется более корректным, так как индекс геомагнитной возмущённости изменяется очень динамично.

Зная такие поправки, можно уточнить решения ряда задач, в которых данная модель применяется. Найденные поправки можно использовать только на том интервале времени, для которого они были определены. Кроме того, в случае со станцией надо потребовать, чтобы орбиты станции и спутника были близки.

Необходимость продолжения таких исследований можно проиллюстрировать графиками высоты движения спутника, запущенного в августе 2017 г. При подготовке запуска были сделаны прогнозы для разных значений активности Солнца. В зависимости от неё прогноз жизни спутника составлял от 7 до 12 мес, реально он опустился до высоты 200 км только через 15 мес (в полтора раза больше расчётного значения). На рис. 1 зелёным цветом показано расчётное движение спутника при ожидаемой активности Солнца, голубым и красным — при повышенной и пониженной активности. Синим и фиолетовым цветом обозначены графики фактической высоты полёта спутника (минимальной и максимальной).

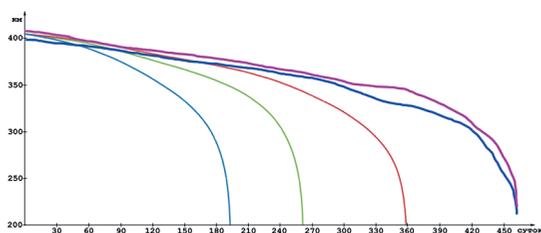


Рис. 1. Высота полёта спутника

На плотность атмосферы Земли влияют многие факторы: активность Солнца, геомагнитная активность и т. д. Из-за влияния этих факторов плотность атмосферы может значительно отличаться от прогнозируемого значения. Это обстоятельство часто приводит к трудностям эксплуатации космических аппаратов. Например, орбитальная станция «Салют-7» в конце своей работы была выведена на высокую орбиту — она должна была дожидаться старта орбитального корабля «Буран» и стыковки с ним. Однако из-за изменения плотности атмосферы в прогнозируемом временном интервале она гораздо быстрее ожидаемого срока вошла в плотные слои атмосферы.

Задаче уточнения прогноза движения космических аппаратов в верхних слоях атмосферы посвящено большое количество работ, однако она далека от своего решения.

Подобные исследования довольно дороги (запускаемый с борта станции спутник является одноразовым, а стоимость его изготовления и доставки на борт МКС достаточно высока), кроме того, запустить его можно только во время выхода в открытый космос. Поэтому стали искать другие возможные способы решения данной задачи. В результате наблюдения за тренировками космонавтов при отработке запуска тестового спутника на борту МКС был предложен новый способ изучения силы аэродинамического сопротивления, действующего на орбитальную станцию. Суть этого метода состоит в следующем. На орбитальную станцию действует сила сопротивления атмосферы Земли, а объекты внутри герметичных отсеков станции защищены от действия этой силы корпусом станции. Вследствие этого, при освобождении спутника внутри герметичного отсека станции (безынерционном запуске), он начинает двигаться относительно корпуса станции (Алямовский и др. 2018). Решается задача аналогичная приведённой выше. Траектория движения спутника относительно корпуса станции определяется по видеозаписи с камер,

прикреплённых к корпусу станции (жёстким элементам конструкции). Численное моделирование показало возможность анализа плотности атмосферы, причём на довольно коротких временных участках. На рис. 2 приведены примеры движения спутника внутри герметичных отсеков МКС. По траектории спутника можно точно и оперативно оценить силу аэродинамического сопротивления МКС.

Во время движения по орбите корпус орбитальной станции поворачивается вокруг своего центра масс. Движение спутника внутри герметичного отсека станции позволяет уточнить местоположение центра масс станции, а также уточнить массу станции (сравнением траекторий движения спутника до и после изменения конфигурации станции) (Беляев и др. 2022).

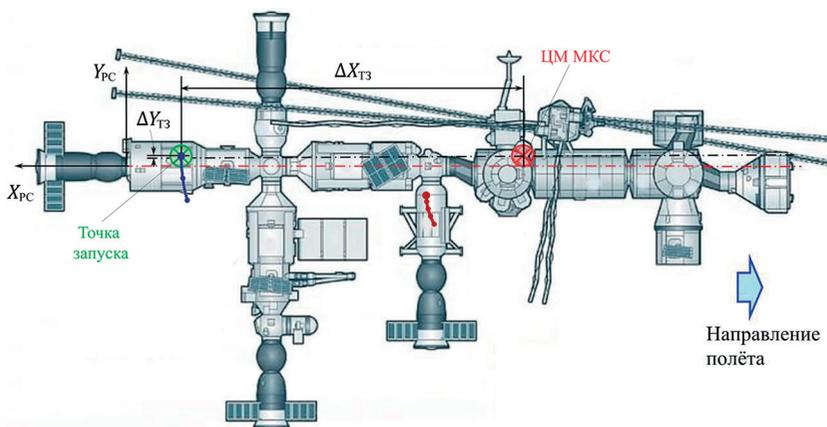


Рис. 2. Траектории движения спутника внутри герметичных отсеков МКС

Данные исследования направлены на экспериментальную проверку и калибровку математических моделей и алгоритмов, используемых при расчёте силы атмосферного сопротивления в задачах определения и прогнозирования движения МКС.

Литература

- Алямовский С. Н., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н. и др. Сферические спутники — от начала космической эры до современных экспериментов (к 60-летию запуска первого в мире спутника Земли) // Косм. техника и технологии. 2017. № 4(19). С. 5–14.
- Алямовский С. Н., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н. Способ определения плотности атмосферы на высоте полета космического аппарата. Патент на изобретение № 2662371 от 25.07.2018.
- Беляев М. Ю., Кудрявцев С. И., Рулёв Д. Н. и др. Исследование возможных траекторий дрейфа калиброванного твердого тела внутри герметичного объема МКС при проведении эксперимента «Вектор-Т» // Косм. техника и технологии. 2022. № 1(36). С. 21–35.

EXPERIMENTS ON THE ISS TO LAUNCH SPHERICAL SATELLITES

S. N. Alyamovskiy

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: spherical satellite, orbital station, Earth's atmospheric drag force, center of mass

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «СЕЙСМОПРОГНОЗ»: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ И ГЛОБАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

С. Е. Андреевский, В. Д. Кузнецов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова, Троицк, Москва, Россия

Ключевые слова: ионосфера, магнитосфера, электромагнитные излучения, критическая частота, электронная концентрация, ионосферные неоднородности, плазменные резонансы

Космический эксперимент «Сейсмопрогноз» («Экспериментальная отработка методов мониторинга электромагнитных и плазменных предвестников землетрясений, чрезвычайных ситуаций и техногенных катастроф») проводился на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) с 2014 по 2016 г. В состав научной аппаратуры космического эксперимента входили два измерительных прибора: радиочастотный анализатор (РЧА) и аппаратура спутниковой навигации (АСН).

Прибор РЧА был предназначен для регистрации радиочастотных излучений естественного и искусственного происхождения, предоставляющих информацию о параметрах ионосферной плазмы. По данным прибора РЧА регистрировалось распределение электронной плотности вдоль орбиты станции, выполнялась оценка критической частоты максимума слоя F2 (f_oF2), измерялись параметры ионосферных неоднородностей, проводился поиск излучений, генерируемых потоками высыпавшихся частиц, а также импульсных радиоизлучений с высот атмосферы Земли. Особенность измерений электронной концентрации прибором РЧА заключается в высокой скорости изменения пространственного положения прибора и соответствующем быстром изменении геофизических условий, определяющих величину электронной концентрации. Широкий диапазон изменения географического положения приёмника и быстрое изменение локального времени затрудняют возможность использования стандартных подходов для анализа характера изменения электронной концентрации. К таким подходам можно отнести выделение суточного хода, сезонных аномалий, широтных и долготных вариаций. Глобальному характеру измерений сопутствуют дополнительные сложности — это меньшая плотность измерений в пространстве и во времени, и большая динамика геофизических факторов, влияющих на значение электронной концентрации. Для выделения аномальных отклонений электронной концентрации требуется сравнение результатов измерений с данными глобальной модели электронной концентрации, относящимися к соответствующему пространственному положению приёмника и локальному времени. Наиболее удобной для такого сравнения в настоящее время выступает модель ионосферы NeQuick. Данная модель используется для расчёта электронной концентрации вдоль траектории движения прибора РЧА, в соответствии с параметрами орбиты МКС, в заданном интервале времени. Для просмотра и обработки результатов измерений, выполненных прибором РЧА, была разработана программа, обеспечивающая автоматическую привязку результатов измерений к географическому положению приёмника и расчёт модельных параметров f_oF2 , $NmF2$

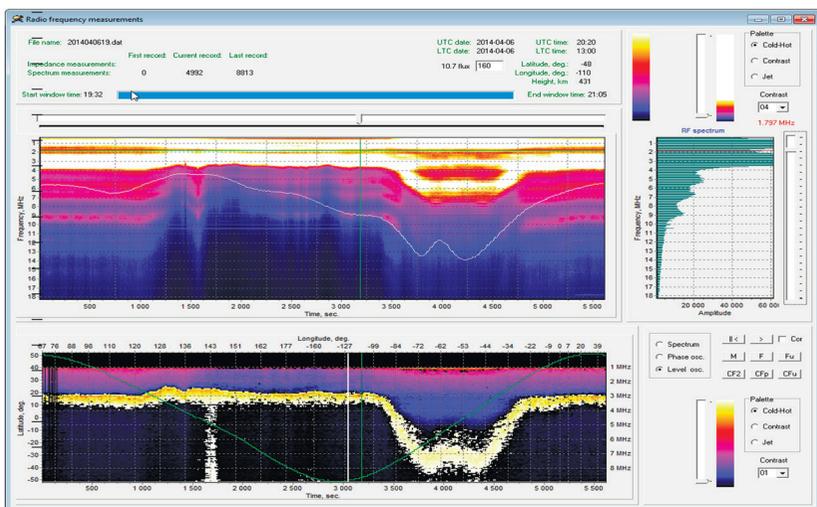
Андреевский Станислав Евгеньевич — старший научный сотрудник, astas17@yandex.ru

Кузнецов Владимир Дмитриевич — директор, доктор физико-математических наук, kvd@izmiran.ru

(максимальная плотность электронов) и Ne (концентрация электронов) для соответствующих значений координат и времени.

Круг задач, доступных для решения с использованием результатов измерений прибора РЧА, можно разделить на несколько сегментов, характеризующихся различными пространственными и временными масштабами вариаций параметров ионосферы:

- выделение флуктуаций квазитеплого плазменного шума, плазменных резонансов, частоты отсечки на высоте орбиты станции с целью оценки локальных параметров среды (плотности электронной концентрации, электронной температуры, частоты столкновений);
- обнаружение ионосферных неоднородностей, связанных быстрыми изменениями параметров окружающей среды, возникающими в результате взаимодействия верхней атмосферы с тропосферой и магнитосферой или прямого влияния быстрых изменений потока электромагнитного излучения Солнца, связанных со вспышками;
- обнаружение ионосферных неоднородностей, связанных с большими пространственными градиентами параметров окружающей среды, определяющимися в первую очередь пространственными градиентами потока электромагнитного излучения Солнца, ионизацией энергичными частицами, изменением величины и направления магнитного поля, а также с такими факторами как приливы, планетарные волны и внутренние гравитационные волны в атмосфере;
- выделение пространственно-временных вариаций высокочастотных квазишумовых сигналов, ставших результатом влияния шумового фона естественного и искусственного происхождения в нижней атмосфере Земли.



Для решения поставленных задач в приборе РЧА реализованы два метода измерений: метод широкополосной спектрометрии и импедансный метод. Широкополосная спектрометрия основана на анализе спектра радиочастот с целью выделения вариаций квазитеплого плазменного шума, плазменных резонансов, частоты отсечки на высоте орбиты станции, сигналов естественного и искусственного происхождения. Импедансный метод основан на измерении вариаций параметров приёмной антенны и измерении вариации частоты резонанса антенны в окружающей её плазме. Пример первичных измерений прибора РЧА показан на рисунке.

Рисунок содержит три графические панели. Верхняя панель (*слева*) отображает результаты измерения радиочастотного спектра в полосе частот до 18 МГц. Горизонтальная ось является шкалой времени, вертикальная ось показывает значение частоты, а цвет меняется пропорционально амплитуде сигнала. Тонкая белая линия на рисунке соответствует модельным расчётам ожидаемого значения плазменной частоты. Вертикальная зелёная черта указывает на момент времени для результата измерения радиочастотного спектра, показанного на графике справа. Нижняя панель содержит результаты импедансных измерений. Горизонтальная ось — шкала времени, вертикальная ось соответствует значению частоты генератора, а амплитуда сигнала генератора, регистрируемого приёмником РЧА, кодируется цветом. Вариации частоты резонанса антенны в окружающей её плазме имеют хорошую корреляцию с модельным профилем плазменной частоты. Шумовые вариации, наблюдаемые на верхней панели рисунка, имеют аналогичный характер.

Для обнаружения и выделения пространственно-временных отклонений параметров ионосферы по результатам измерений прибора РЧА использовался следующий алгоритм:

- определение локальных параметров среды (плотности электронной концентрации, электронной температуры, частоты столкновений) по частоте отсечки на высоте орбиты станции;
- сравнение полученных значений со значениями модели ионосферы NeQuick, рассчитанными для соответствующих координат и времени измерений;
- оценка значимости и длительности отклонений результатов измерений от медианных параметров, получаемых с помощью выбранной модели ионосферы;
- анализ обнаруженных отклонений с целью определения возможного источника аномалии.

Значительные отклонения измеряемых параметров среды могут быть связаны со следующими факторами:

- аппаратные сбои или погрешности измерений;
- аномальные отклонения известного геофизического фактора, учитываемого в используемой модели среды;
- влияние известного геофизического фактора, не учитываемого в используемой модели среды;
- влияние неизвестного геофизического фактора.

Отклонения, связанные с аппаратными сбоями или погрешностями измерений, определяются особенностями измерительной аппаратуры и регистрирующей системы. К признакам такого рода событий можно отнести:

- скорость изменения параметра превышает скорость, обеспечиваемую полосой пропускания самого инерционного компонента измерительного тракта прибора;
- результат измерения находится за пределами динамического прибора;
- данные телеметрии свидетельствуют об аномальных режимах работы прибора;
- данные привязки измерений прибора к шкале времени либо отсутствуют, либо имеют неопределённую величину погрешности.

Для отбора отклонений, связанных с аппаратными сбоями, использовался следующий набор процедур:

- проверка наличия меток времени, и оценка абсолютной погрешности шкалы времени прибора;
- проверка отсутствия сбоев и отклонения в режиме работы прибора по данным телеметрии;

- исключение интервалов времени с работой прибора в режиме амплитудного ограничения;
- исключение быстрых скачков в результатах измерений (выбросов, ступенек и пропусков).

Обнаружение отклонений, связанных с аномальным отклонением известного геофизического фактора, учитываемого в используемой модели среды, является наиболее распространённым событием, влияющим на результаты измерений. Возможность обнаружения такого события прямо связана с наличием постоянных инструментальных наблюдений за определёнными геофизическими факторами (интенсивность потока солнечного излучения, солнечные вспышки, индексы возмущённости магнитного поля и т. п.) и доступом к таким базам данных.

Обнаружение отклонений, связанных с влиянием известного геофизического фактора, не учитываемого в используемой модели среды, также зависит от наличия соответствующих инструментальных наблюдений. В этом случае необходимо использовать дополнительные модели взаимодействия среды с соответствующими геофизическими факторами и оценивать вероятность обнаружения такого рода взаимодействия в результатах измерений.

В случае обнаружения отклонений, которые в первом приближении не связаны с вышеперечисленными событиями, может рассматриваться гипотеза о влиянии неизвестного геофизического фактора. Дальнейшая работа требует формирования гипотезы о физической природе такого фактора, его пространственных, временных и амплитудных вариациях. Далее требуется проверка степени согласованности обнаруженных отклонений со свойствами рассматриваемого фактора, разработка аналитической или эмпирической модели его влияния и, возможно, организация дополнительных инструментальных наблюдений.

Изложенный алгоритм обнаружения локальных возмущений ионосферной электронной концентрации была использован при анализе результатов измерений, выполненных в рамках космического эксперимента «Сейсмопрогноз» на интервале времени с февраля по июль 2016 г.

SPACE EXPERIMENT “SEISMOPROGNOZ”: LOCAL AND GLOBAL VARIATIONS OF ELECTRONIC CONCENTRATIONS RESEARCH RESULTS

S. E. Andreevsky, V. D. Kuznetsov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Troitsk, Moscow, Russia

Ключевые слова: ionosphere, magnetosphere, electromagnetic radiations, critical frequency, electronic density, ionospheric irregularities, plasma resonance

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВЕДЁННЫХ НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

М. С. Белаковский, А. Р. Куссмауль, А. Б. Сахарова

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: космическая медицина и биология, инновационная деятельность, интеллектуальная собственность, средства профилактики, оценка функционального состояния, кинетозы, телемедицина

Медико-биологические исследования на пилотируемых космических аппаратах проводятся с целью получения новых данных для решения фундаментальных проблем гравитационной физиологии и биологии, психофизиологии, радиобиологии и т. д. для разработки и стандартизации медицинского и научного оборудования и, в первую очередь, для совершенствования системы медицинского обеспечения космических полётов, включая перспективу полётов на другие планеты. Реализуя системный и инновационный подходы в осуществлении научной деятельности, Институт медико-биологических проблем Российской академии наук проводит на борту космических объектов фундаментальные и прикладные исследования в области медицинских наук, радиобиологии, инженерной науки, биотехнологии и т. д. на различных видах биообъектов и с участием человека.

За период эксплуатации российского сегмента Международной космической станции (МКС) выполнен большой объём таких исследований, получены уникальные результаты, значимая часть из которых имеет важное практическое значение и требует получения правовой охраны, в том числе для регистрации приоритета Института в данной области. В 2002–2023 гг. было получено 162 охраняемых документа на интеллектуальную собственность, из них: 101 патент на изобретение, 28 патентов на полезную модель, зарегистрировано 7 программ для ЭВМ, 21 база данных, 5 товарных знаков (Белаковский, Самарин, 2011; Григорьев, 2007; Космическая..., 2014; Орлов и др., 2021; Orlov et al., 2014, 2022).

Первоочередная задача для создания таких разработок — совершенствование медицинского обеспечения здоровья и работоспособности космонавтов в полете и после возвращения на Землю.

Так, были разработаны и успешно применялись методы и средства диагностики состояния здоровья космонавтов, направленные на прогнозирование и раннее выявление различных патологических состояний, вызванных длительным воздействием факторов космического полёта. Среди них, например, система бесконтактной непрерывной регистрации частоты сердечных сокращений, частоты дыхания и двигательной активности космонавтов для оценки качества сна и восстановления функциональных резервов организма (патент на полезную модель № 73772, авторы: Баевский и др.); компактное мобильное устройство для исследования кардиореспираторной системы космонавтов (патент на полезную модель № 77783, авторы: Баевский и др.); способ оценки уровня компенсаторно-приспособительных и адаптационных возможностей организма космонавтов, который

Белаковский Марк Самуилович — заведующий отделом, кандидат медицинских наук, info@imbr.ru

Куссмауль Анна Рейнгольдовна — заместитель заведующего отделом, кандидат биологических наук, kussmaul@imbr.ru

Сахарова Анна Борисовна — главный специалист по патентной работе, sakharova_ann@mail.ru

обеспечивает возможность прогноза необходимости проведения дополнительных реабилитационных процедур в период реадaptации космонавтов к земной гравитации после окончания космических полётов (патент на изобретение № 2624860, авторы: Косякова Н. В. и др.).

Значимые изменения в сенсомоторной системе требуют средств для оценки таких изменений. Специалистами института разработаны такие методы и средства как мобильное устройство для исследования сократительной активности мышц космонавтов (патент на полезную модель № 131586, авторы: Григорьев А. И. и др.); способ комплексной оценки состояния вестибулярной функции, межсенсорных взаимодействий и следящей функции глаз, который может быть использован для выявления как патологии, так и адаптационных перестроек (патент на изобретение № 2301622, авторы: Корнилова Л. Н. и др.) и многие другие.

Накопленный массив диагностической информации о состоянии здоровья космонавтов представляет собой ценную информацию для исследователей и врачей и фиксируется в базах данных. Уже зарегистрированы базы данных «Результаты экспресс-оценки острого и хронического стресса у космонавтов» (Свидетельство РФ № 2022620249, авторы: Скедина М. А. и др.), «Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия участников космических полетов на ОС «Мир» и МКС» (Свидетельство РФ № 2021620207, авторы: Гордиенко К. В. и др.), «Микробиом космонавтов «MICROBIOME-SPACE»» (Свидетельство РФ № 2020622717, авторы: Ильин В. К. и др.), «Антибиотикорезистентность микроорганизмов биотопов космонавтов» (Свидетельство РФ № 2021621706, авторы: Ильин В. К. и др.).

Не менее важным является фиксация результатов изучения состояния среды обитания космонавтов, зарегистрированная в базах данных «Химический состав воздушной среды долговременных орбитальных станций» (Свидетельство № 2018620328, авторы: Мухамедиева Л. Н. и др.), «База данных о составе газовыделений из неметаллических материалов» (Свидетельство № 2018621072, авторы: Мухамедиева Л. Н. и др.), «База данных результатов микробиологического мониторинга состояния среды обитания РС МКС» (Свидетельство № 2023620527, авторы: Поддубко С. В. и др.). Эти систематизированные массивы данных могут способствовать решению проблем мониторинга и санитарно-гигиенической оценки качества воздушной среды и могут быть использованы в проектировании перспективных систем очистки и регенерации воздушной среды соответствующих обитаемых объектов.

Для профилактики негативного воздействия факторов космического полёта, в первую очередь на опорно-двигательный аппарат, создан целый комплекс средств, включающий в себя «бегущую» дорожку (патент на изобретение № 2524912, авторы: Григорьев А. И. и др.), устройство для перераспределения крови, увеличивающее объём крови в поверхностных венах нижних конечностей (патент на полезную модель № 47643 авторы: Григорьев А. И. и др.), костюм аксиальной нагрузки (патент на изобретение № 2295321, авторы: Григорьев и др.) и многие другие.

Космическая радиация представляется одним из лимитирующих факторов пребывания человека в космическом полете. Были разработаны технологии как для изучения её воздействия (патенты на изобретение № 2410758 и 2451604, авторы: Ушаков И. Б. и др.), так и для защиты человека (патенты на полезную модель № 135153 и 149573, авторы: Ушаков И. Б. и др.), успешно применяемые на борту.

Дальние космические полёты потребуют совершенствования систем жизнеобеспечения, работы в этом направлении ведутся многие годы на борту МКС. В результате были разработаны технологии для получения кислорода и водорода (патенты на полезную модель

№ 93087 и 93804, автор: Зорина Н. Г.), технологии регенерации воды (патент на изобретение № 2422381, авторы: Синяк Ю. Е. и др., патент на изобретение № 2500590, авторы: Климарев С. И. и др., патент на изобретение № 2659201, авторы: Назаров Н. М. и др.), технологии для выращивания растений в условиях космического полёта (патент на изобретение № 2528934, авторы: Беркович Ю. А. и др.).

Неукоснительное развитие и совершенствование технологий приводит к созданию всё более точных приборов и всё более эффективных методов для космической медицины, что обеспечивает накопление новых данных, необходимых для совершенствования системы медицинского обеспечения пребывания человека в космосе.

Вместе с тем, уникальные технологии космической медицины не могут не находить практического выхода в интересах здравоохранения и обеспечения сохранения здоровья населения на Земле (Григорьев, 2007; Космическая..., 2014; Orlov et al., 2014, 2022).

Одним из направлений стало развитие телемедицины. Институтом запатентован целый ряд разработок в этой области, включающий как устройства и программное обеспечение, так и методологию проведения (патент на полезную модель № 33320, автор: Григорьев и др.; свидетельство на программу для ЭВМ № 2012619808, авторы: Переведенцев О. В., Орлов О. И. и т. д.). Преимущества разработанных для космоса приборов и устройств решают проблемы, возникающие при медицинском обеспечении пребывания человека в других экстремальных условиях или отдалённых регионах.

Применяются на Земле и используемые ранее на борту МКС методы оценки функционального состояния организма для донозологической диагностики развития патологий на основе регистрации физиологических сигналов (патенты на изобретение № 2240035 и 2586041, автор: Баевский Р. М.; № 2510621, авторы: Орлов О. И. и др.; патент на полезную модель № 77766, автор: Баевский Р. М.).

Средства и методы профилактики негативного воздействия факторов космического полёта послужили основой для разработки методов лечения «земных» заболеваний, патогенез которых сходен с изменениями, характерными для процессов адаптации к условиям космического полёта. Прежде всего, к числу таких разработок относятся технологии, оказывающие воздействие на сенсомоторную систему. Среди них стоит упомянуть способ профилактики вестибуловегетативных расстройств у человека при укачивании (патент на изобретение № 2183118, авторы: Григорьев А. И. и др.), костюм аксиальной нагрузки и методики его использования (патенты на изобретение № 2197215, 2221537, 2295321, 2401622, авторы: Григорьев А. И. и др.), средства и методы миостимуляции для профилактики и лечения ряда заболеваний (патенты на изобретение № 2415054, авторы: Григорьев А. И. и др., № 2729932, авторы: Козловская И. Б. и др.), подошвенный имитатор опорной нагрузки (патент на изобретение № 2330640, 2506069, авторы: Григорьев А. И. и др.)

Разработаны методы тренировки мышц, повышения их устойчивости к утомлению, созданы высокоэффективные и технологичные тренажёры, тренировочно-измерительные комплексы для спортивной медицины (патенты на изобретение № 2306960, авторы: Виноградова и др., № 2334535 и 2334536, авторы: Нетреба А. И. и др.; патенты на полезную модель № 62530, 65772, 87919, 92338, 92342, 92339, 108987, авторы: Нетреба А. И. и др.)

Таким образом, на основании большого количества медико-биологических исследований на борту РС МКС, был разработан целый комплекс методов и средств, используемых как в космической медицине, так и в интересах здравоохранения на Земле.

Литература

Белаковский М. С., Самарин Г. И. Практическое внедрение результатов медико-биологических исследований, проводимых на РС МКС // Косм. био-

логия и медицина. В 2-х т. Т. 2. Медико-биологические исследования на российском сегменте МКС. М.: Науч. кн., 2011. С. 508–516.

Григорьев А. И. Вклад космической медицины в здравоохранение // Авиакосм. и эколог. медицина. 2007. Т. 41. № 6–1. С. 26–29.

Космическая медицина и здравоохранение (вклад ИМБП в клиническую практику, здравоохранение, экстремальную и спортивную медицину) // Институт медико-биологических проблем: полвека на службе науке и человеку в Космосе и на Земле / отв. ред. А. И. Григорьев, И. Б. Ушаков. М.; Воронеж: Изд.-полигр. центр «Науч. кн.». 2014. С. 403–416.

Орлов О. И., Белаковский М. С., Самарин Г. И. и др. Результаты медико-биологических исследований — инновационный вклад в космонавтику и здравоохранение // Медико-биолог. эксперименты на борту рос. сегмента Международ. косм. станции. М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН, 2021. 232 с.

Orlov O., Belakovskiy M., Kussmaul A. Potential markets for application of space medicine achievements // Acta Astronautica. 2014. V. 104. No. 1. P. 412–418.

Orlov O. I., Belakovskiy M. S., Kussmaul A. R., Tomilovskaya E. S. Using the Possibilities of Russian Space Medicine for Terrestrial Healthcare // Frontiers in Physiology. 2022. V. 13. Article 921487. DOI: 10.3389/fphys.2022.921487.

PRACTICAL USE OF THE RESULTS OF BIOMEDICAL RESEARCH, CONDUCTED AT THE RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

M. S. Belakovskiy, A. R. Kussmaul, A. B. Sakharova

Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: space medicine and biology, innovation activity, intellectual property, countermeasures, functional state assessment, kinetosis, telemedicine

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА МКС И ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

М. Ю. Беляев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: Международная космическая станция МКС, научные исследования, технические эксперименты, характеристики МКС

Первый модуль Международной орбитальной станции (МКС) был выведен на орбиту 20 ноября 1998 г. 25-летний полёт МКС, а также выполненные ранее длительные полёты отечественных орбитальных станций (ОС) «Салют» и «Мир» позволяют оценить возможности и перспективы выполнения космических экспериментов (КЭ) на околоземных орбитах с помощью пилотируемых станций (Беляев, 2021).

Такую оценку целесообразно провести по следующим направлениям: физические условия, возникающие на ОС в полёте; возможности выполнения на ОС КЭ различных направлений исследований и наведения исследовательской аппаратуры ОС на изучаемые объекты; эффективность участия экипажа в КЭ на ОС. На основе такой оценки можно сформулировать требования к перспективным проектам ОС.

Реальные условия, возникающие на борту ОС во время её полёта, создают помехи для выполнения некоторых экспериментов (Беляев, 1984). МКС представляется наиболее сложным космическим объектом, имеющим большие размеры и массу, причём в течение полёта характеристики МКС меняются и их надо уточнять, в том числе и для целей управления. Для решения этих задач на МКС были организованы эксперименты «Тензор», «Среда-МКС» (Банит и др., 2005; Беклемишев и др., 2019; Беляев, Рязанцев, 2009; Беляев и др., 2005, 2007, 2011, 2013а, 2015; Belyaev et al., 2017; Sevastyanov et al., 2007). Выполненные исследования показали, что микрогравитационная обстановка на борту российского сегмента (РС) МКС не является благоприятной. Это связано с тем, что центр масс МКС находится в зоне американского сегмента (АС), а многие бортовые системы, создающие микроперегрузки, размещены на РС МКС. Динамическая обстановка на борту пилотируемых ОС характеризуется сложной суперпозицией микровибраций и квазипостоянных микроускорений. Амплитуда возмущений изменяется от 10^{-6} до $10^{-1}g$, а частотный спектр — от 0,01 до нескольких сотен герц. Мощным источником вибровозмущений на РС становятся, например, компрессоры системы кондиционирования воздуха (СКВ). Спектр возмущений СКВ имеет линейный характер с фундаментальной частотой $\Phi_{\text{СКВ}} + 23\text{--}24$ Гц. Кроме того, в спектрах возмущений на РС имеются составляющие, обусловленные работой вентиляторов системы терморегулирования и воздухопроводов. Основная мощность вибровозмущений, вызванных работой бортового оборудования, сосредоточена в области частот, превышающих 20 Гц. При одновременной работе штатного оборудования с близкими частотами могут наблюдаться биения и местные резонансы.

При выполнении стыковок транспортных и грузовых кораблей с МКС уровень микроускорений составляет $10^{-3}\text{--}10^{-2}g$.

Беляев Михаил Юрьевич — научный руководитель, доктор технических наук, профессор, Mikhail.Belyaev@rsce.ru

В рамках КЭ «Среда-МКС» изучаются также другие физические эффекты, возникающие на станции в полёте. Уточняются магнитные помехи от магнитно-твёрдых, магнитно-мягких материалов и токовых контуров (Беляев, Рязанцев, 2009; Belyaev et al., 2017). Определяются также смещения элементов корпуса МКС, например, вследствие перепада температуры её элементов в процессе полёта. При этом используется, в том числе, и новый способ, основанный на применении фото- и видеорегистрации элементов корпуса МКС через иллюминаторы станции, что позволяет определять смещение элементов размерами от 0,1 мм (Беклемишев и др., 2019; Беляев, Рязанцев, 2009; Беляев и др., 2016).

Особенностью ОС выступает наличие на их борту экипажа. В настоящее время функции космонавта при реализации научной программы на борту ОС сводятся к следующему: монтаж и обслуживание научной аппаратуры в полёте; выполнение эксперимента в соответствии с методикой КЭ и бортовой инструкцией; участие в некоторых случаях в выборе объектов исследования; проведение ремонтных и профилактических работ.

Проведение ремонтных и профилактических работ на ОС может сильно повлиять на эффективность, а в некоторых случаях и возможность выполнения научной программы. В то же время заметим, что ремонтные и профилактические работы могут осуществляться космонавтами не непрерывно, а во время периодических посещений ОС. Вместе с тем, наличие экипажа на ОС требует создания системы жизнеобеспечения и регулярного восполнения ресурсов пилотируемой ОС. Выполнение обязательных физических упражнений каждым членом экипажа приводит, помимо этого, к возникновению значительных микроускорений порядка $10^{-3}g$, исследование которых при использовании экипажем ОС различных тренажёров приведено в публикациях (Беляев и др., 2007, 2011, 2013б; Математическое..., 2008; Проблемы..., 2011). Поэтому для проведения экспериментов в области микрогравитации предложено использовать транспортные грузовые корабли (ТГК) «Прогресс» после выполнения ими своих основных функций (Беляев и др., 2018, Matveeva et al., 2014). В этом случае может обеспечиваться как минимальный уровень микроускорений $\sim 10^{-6}g$, так и уровень, заданный в необходимом диапазоне значений. ТГК «Прогресс» позволяют также выполнить много других предложенных уникальных экспериментов (Беляев и др., 2018, Matveeva et al., 2014).

Таким образом, с начала полёта МКС на ней были организованы и проводились технические эксперименты «Тензор», «Среда-МКС», «Изгиб», «Вектор-Т» и др. для уточнения физических условий и характеристик станции, а также для отработки новых методов управления при проведении исследований. МКС имеет существенные ограничения для реализации ряда экспериментальных исследований. Поэтому в рамках программы технических экспериментов разрабатывались технологии использования грузовых кораблей «Прогресс» для проведения экспериментов. Вследствие ограниченной величины располагаемого кинетического момента силовых гироскопов американского сегмента имеются трудности выполнения ориентации станции для наведения научной аппаратуры на изучаемые объекты. Для устранения данной проблемы в настоящее время на станции установлены и разрабатываются дополнительные специальные подвижные платформы (ПП) (Беляев и др., 2022). Использование ПП позволяет значительно расширить возможности МКС по исследованию Земли и небесной сферы. При выполнении наблюдений заданных объектов в этом случае могут использоваться разработанные методы оптимального планирования программы научных экспериментов (Беляев и др., 2011). Кроме того, следует заметить, что орбитальные станции обладают уникальными возможностями для обеспечения наблюдений исследуемых объектов даже без выполнения разворотов станции

или аппаратуры. Одновременно с подъёмом высоты орбиты возможно обеспечивать прохождение станции над требуемыми исследуемыми объектами (Беляев и др., 2011).

Предложенные и отработанные на ОК «Мир» и МКС подходы к ориентации научных приборов на исследуемые объекты целесообразно использовать для эксплуатируемой в настоящее время и перспективных ОС (Беляев, 2021, Беляев и др. 2008, 2011). ОС целесообразно оснастить ПП для расширения возможностей наблюдения изучаемых объектов научными приборами. Датчики ориентации ОС не должны быть удалены от научных приборов, требующих наведение на изучаемые объекты. Оборудование КЭ в области микрогравитации желательно размещать возможно ближе к центру масс ОС. Для управления полётом многоцелевой ОС потребуется создание и использование специального комплекса математических моделей, созданного ранее для ОК «Мир» (Беляев, 2016, Беляев и др., 1989).

Литература

- Банит Ю. Р., Беляев М. Ю., Добринская Т. А. и др.* Определение тензора инерции Международной космической станции по телеметрической информации // Косм. исслед. 2005. Т. 43. № 2. С. 135–146.
- Беклемиев Н. Д., Беляев М. Ю., Богуславский А. А. и др.* Исследование колебаний элементов конструкции космической станции по видеoinформации // 12-й Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теорет. и приклад. механики. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С. 633–635.
- Беляев М. Ю.* Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение. 1984. 264 с.
- Беляев М. Ю.* Технология проведения экспериментов на орбитальном комплексе «Мир» и пути повышения эффективности исследований с помощью орбитальных станций // Тр. 50-х Чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Казань: Изд-во Казанского ун-та. 2016. С. 258–277.
- Беляев М. Ю.* От ракеты Р-7 и первого полета человека в космос до постоянной пилотируемой орбитальной станции // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 3(114). С. 96–121.
- Беляев М. Ю., Зыков С. Г., Манжелей А. И. и др.* Математическое обеспечение автоматизированного планирования исследований на орбитальном комплексе «Мир» // Косм. исслед. 1989. Т. 27. Вып. 1. С. 126–134.
- Беляев М. Ю., Завалишин Д. А., Егоров Н. А. и др.* Определение массы Международной космической станции в полете // Космонавтика и ракетостроение. 2005. № 4. С. 224–232.
- Беляев М. Ю., Брюханов Н. А., Рябуха С. Б. и др.* Микровозмущения, возникающие в процессе эксплуатации российского сегмента МКС // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 1(46). С. 121–129.
- Беляев М. Ю., Рязанцев А. В.* Определение магнитных помех на МКС в полете // Тр. 43-х Научных чтений К. Э. Циолковского. Казань: Изд-во Казанского ун-та. 2009. С. 70–81.
- Беляев М. Ю., Бабкин Е. В., Рябуха С. Б., Рязанцев А. В.* Микроускорения на Международной космической станции при физических упражнениях экипажа // Косм. исслед. 2011. Т. 49. № 2. С. 167–181.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Рябуха С. Б.* (2013а) Микровозмущения на Международной космической станции // Косм. техника и технологии. 2013. № 3(3). С. 14–24.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Рябуха С. Б.* (2013б) Микровозмущения на Международной космической станции при динамических операциях // Косм. исслед. 2013. Т. 51. № 4. С. 303–307.
- Беляев М. Ю., Дубовской В. Б., Леонтьев В. И. и др.* Современное состояние и перспективы спутниковой акселерометрии и градиентометрии // Альманах современ. метрологии. 2015. № 3. С. 84–96.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Монахов М. И.* Способ определения деформации корпуса космического аппарата в полёте. Патент на изобретение № 2605232 от 25.11.2016.

- Беляев М. Ю., Карасев Д. В., Матвеева Т. В., Рулев Д. Н.* Грузовые корабли «Прогресс» в программах орбитальных станций // Косм. техника и технологии. 2018. № 1. С. 85–101.
- Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Ветошкин А. М. и др.* Наведение научной аппаратуры международной космической станции на исследуемые объекты // Косм. исслед. 2022. Т. 60. № 1. С. 80–89.
- Математическое моделирование — основа создания и эксплуатации сложных орбитальных комплексов: сб. ст. / под ред. Н. А. Брюханова, М. Ю. Беляева // Ракетно-космическая техника. 2008. Сер. XII. Вып. 1. 191 с.
- Проблемы и задачи повышения эффективности программ исследований на космических кораблях и орбитальных станциях: сб. ст. / под ред. В. П. Легостаева, М. Ю. Беляева // Ракетно-космическая техника. 2011. Сер. XII. Вып. 1–2. 294 с.
- Belyaev M. Yu., Volkov O. N., Monakhov M. I., Sazonov V. V.* Estimating the Accuracy of the Technique of Reconstructing the Rotational Motion of a Satellite Based on the Measurements of Its Angular Velocity and the Magnetic Field of the Earth // Cosmic Research. 2017. V. 55. No. 5. P. 317–332.
- Matveeva T. V., Belyaev M. Yu., Tsvetkov V. V.* Challenges and Perspectives of Transport Cargo Vehicles Utilization for Performing Research in Free Flight / Acta Astronautica. 2014. V. 94. P. 139–144.
- Sevastianov N. N., Branets V. N., Belyaev M. Yu. et al.* Analysis of possibilities of the Jamal-200 control using motion mathematical model // 14th Saint Petersburg Intern. Conf. Integrated Navigation Systems. 2007. P. 196–203.

THE STUDY OF THE POSSIBILITIES OF PERFORMING SCIENTIFIC RESEARCH IN TECHNICAL EXPERIMENTS ON BOARD THE ISS AND THE PROSPECTS FOR THE SCIENTIFIC APPLICATION OF ORBITAL STATIONS

M. Yu. Belyaev

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: International Space Station (ISS), scientific research, technical experiments, characteristics of the ISS

ОТРАБОТКА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «УРАГАН» НА МКС

М. Ю. Беляев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: Международная космическая станция (МКС), научная аппаратура, технологии изучения Земли, космические эксперименты

Одно из основных направлений использования космической техники связано с наблюдением и изучением Земли. Для нашей страны, имеющей обширную территорию, это направление является особенно важным. Создание автоматических космических систем, осуществляющих непрерывный мониторинг земной поверхности и отработку поступающей информации, предполагает предварительную отработку используемых методов и средств наблюдения. Такую отработку наиболее удобно проводить на пилотируемой орбитальной станции, представляющей собой научную космическую лабораторию. Именно с этой целью на российском сегменте (РС) международной космической станции (МКС) был организован космический эксперимент (КЭ) «Ураган», целью которого и стала отработка технических средств и методов наблюдения Земли с борта РС МКС. Наибольшее внимание в КЭ «Ураган» уделяется наблюдению потенциально опасных и катастрофических явлений, возникающих на Земле. Изучение различных объектов и явлений на поверхности Земли и в её атмосфере выполняется приборами, работающими в различных областях спектра электромагнитного излучения. Поэтому в КЭ «Ураган» создаётся и используется научная аппаратура (НА), способная работать в различных спектральных диапазонах. Это позволяет комплексно исследовать изучаемые в эксперименте объекты и явления. Выявление какого-либо фактора в изучаемом явлении или процессе одним из используемых в КЭ «Ураган» прибором, может сигнализировать о подготовке важного, порой даже катастрофического события на Земле, и целесообразности применения для его изучения других приборов, входящих в состав КЭ.

Ярким примером комплексного применения различной научной аппаратуры КЭ «Ураган» может служить использование данных от научной аппаратуры «Икарус», разработанной по соглашению между «Роскосмосом» и Немецким космическим агентством (*нем.* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR), и входящей в КЭ «Ураган». НА «Икарус» в КЭ «Ураган» позволяет отслеживать перемещения животных и птиц на земной поверхности. С этой целью на исследуемых объектах размещаются миниатюрные (массой 5 г) датчики (теги), в состав которых входят приёмники спутниковой навигационной системы, вычислительное устройство, аккумулятор, солнечная батарея, приёмопередатчик, акселерометр, магнитометр, датчик температуры. Информация от тега поступает на РС МКС, снабжённой специальными мощными приёмными антеннами, и затем по штатным каналам связи доставляется в московский Центр управления полётами ЦУП-М. Пройдя предварительную проверку и обработку в ЦУП-М, данные от тегов передаются российским и немецким учёным, участникам эксперимента. По информации от тегов учёные отслеживают миграции животных и их состояние. Этап эксплуатации НА «Икарус» на РС МКС был начат в сентябре 2020 г. и проводился в 2021–2023 гг. Важно отметить, что комплексное использование всех данных КЭ «Ураган» позволяет не только отследить

Беляев Михаил Юрьевич — научный руководитель, доктор технических наук, профессор, Mikhail.Belyaev@rsce.ru

пути перемещения животных, но и понять причины изменения их миграционных путей с помощью оценки экологической обстановки аппаратурой из состава эксперимента «Ураган».

На начальном этапе выполнения экспериментов по программе «Ураган» на МКС для наведения на исследуемые объекты использовались ручные приборы: фотоаппараты и спектрометры. На рис. 1 показано использование экипажем на борту РС МКС видеоспектральной системы (ВСС), изготовленной в НИИ прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета по техническому заданию РКК «Энергия».



Рис. 1. Видеоспектральная система (ВСС). Космонавт А. Шкаплеров ведёт съёмку с помощью ВСС

ВСС работает в спектральном диапазоне 0,35–1,1 мкм и позволяет решать задачи с пространственным разрешением 50 м. Выполняемые на борту фотосъёмки земной поверхности позволяют получать цветные снимки с разрешением до 2–3 м, что соответствует мировому уровню получения цветных снимков с автоматических КА. При этом в отличие от автоматических аппаратов на борту РС МКС при выполнении съёмки используются интеллектуальные возможности космонавтов и специально разработанное математическое обеспечение для поддержки КЭ.

В процессе выполнения эксперимента исследуются ледники, оползни, вулканы, возникающие пожары, наводнения и т. д.

В ходе реализации КЭ «Ураган» накоплен значительный банк данных по результатам исследований с РС МКС. Космические снимки и спектрометрическая информация, полученные при реализации КЭ на борту РС МКС, широко используются различными организациями в научных целях и в прикладной сфере деятельности.

Среди полученных в КЭ «Ураган» результатов большое значение имеет исследование, изложенное в докладе директора Института географии РАН (ИГ РАН) академика В. М. Котлякова 25 июля 2012 г. в г. Геленджике Президенту РФ по катастрофе в районе г. Крымска. В основе этого исследования были использованы данные, полученные в эксперименте. Доклад был заслушан также на Президиуме РАН. В обоих случаях доклад получил высокую оценку.

Использование возможностей космонавтов при выполнении научных наблюдений даёт определённые преимущества в процессе проведения исследований. К сожалению, постоянно работать

с НА КЭ «Ураган» космонавты не могут, так как большую часть суток они должны заниматься другой работой, а ночью отдыхать. Поэтому в рамках КЭ «Ураган» разрабатываются и создаются специальные системы для автоматической ориентации научной аппаратуры на объекты исследований. Первый экземпляр такой аппаратуры СОВА-1-426 (система ориентации видеоспектральной аппаратуры) ранее уже был доставлен на борт РС МКС и успешно используется при выполнении экспериментов. НА СОВА-1-426 может устанавливаться на иллюминатор диаметром 426 мм служебного модуля российского сегмента МКС и позволяет осуществлять как автоматическое наведение различной НА для видео-, фото- и спектральной съёмки под управлением бортового компьютера, так и съёмку по заданной оператором программе. Для расширения возможностей наблюдения исследуемых объектов в августе 2023 г. на борт РС МКС доставлены дополнительно новые модификации ППН «СОВА». При этом в процессе их использования обеспечивается построение оптимальных программ наблюдения исследуемых объектов, что впервые в мире реализовано на борту космического аппарата.

В настоящее время в рамках КЭ «Ураган» с целью дальнейшего развития системы мониторинга Земли создана и готова к отправке на борт РС МКС научная аппаратура «Гиперспектрометр». НА «Гиперспектрометр» предназначена для выполнения космонавтами съёмки земной поверхности. Обработка результатов съёмки НА «Гиперспектрометр» будет осуществляться на борту с участием космонавта. Это позволит повысить оперативность анализа полученных данных, повысит качество планирования наблюдений и сократит потоки оперативно передаваемых данных на Землю.

Для выполнения мониторинга Земли в среднем и дальнем ИК-диапазонах в КЭ «Ураган» создаётся НА «Радиометр инфракрасный высокого разрешения» (РИВР). Эта аппаратура изготавливается на предприятии «Российские космические системы» и с учётом высоты орбиты МКС позволит получать информацию выше мирового уровня.

В составе бортовой аппаратуры КЭ «Ураган» уже сейчас используется более 20 наименований оборудования и технических средств (ФСС (фотоспектрометрические), ВСС, цифровые фотоаппараты, объективы, специальные кронштейны с датчиками угловых перемещений, ноутбуки, приёмно-передающие бортовые и наземные устройства из состава НА «Икарус» и т. д.). Аппаратура КЭ «Ураган» используется также в задачах других экспериментов: «Сценарий», «Дубрава», «Альбеда», «Вектор-Т» и др.

Одновременное создание и использование целого комплекса НА в рамках одного КЭ даёт ряд существенных преимуществ. Следует отметить, что интеграция аппаратуры на борт орбитальной станции является сложной научно-технической задачей, сопоставимой по затратам с созданием самой НА. Кроме того, для планирования наблюдений и интерпретации данных каждого прибора обычно требуется большое количество дополнительной информации: баллистической, информации по ориентации и физическим условиям на МКС, позволяющей учесть различные помехи на измерения, например, от влияния атмосферы и т. д. Разработка методов и программного обеспечения расчёта такой информации в рамках одного КЭ для разных используемых приборов даёт существенную экономию и облегчает решение данной задачи. И, конечно, главное преимущество одновременного использования в КЭ «Ураган» различной аппаратуры заключается в том, что такой подход позволяет решать совершенно новые задачи, объясняющие, например, причины изменения миграций животных, что является уникальным результатом для мировой практики.

При выполнении КЭ «Ураган» получены следующие основные результаты:

1. Осуществляется отработка научной аппаратуры: видеоспектрометрическая аппаратура, фотоспектрометрическая аппаратура, «Икарус» и другие и технологии изучения объектов земной поверхности.
2. Более двадцати обрабатываемых на РС МКС технических решений (изобретений) защищены патентами РФ.
3. Отработаны технологии работы с данными наблюдения Земли, получаемыми с МКС, в системах семейства «Созвездие-ВЕГА».
4. Налажено взаимодействие с МЧС РФ. Получено благодарственное письмо от МЧС РФ за качественный прогноз о крупном катастрофическом событии на оз. Байкал, что позволило своевременно принять необходимые решения и избежать негативных последствий.
5. Результаты съёмки были использованы для оперативной оценки обстановки после катастрофического наводнения в г. Крымск. Результаты работ и анализа были доложены руководителю МЧС и Президенту РФ.
6. Результаты КЭ используются в курсах лекций «Экспериментальные исследования и комплексные испытания», «Использование космических технологий в народном хозяйстве», «Методы и алгоритмы обработки сигналов и изображений» и др. в Мытищинском филиале (МФ) Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.
7. Результаты КЭ активно используются ИГ РАН и другими организациями.
8. Активно используются данные с НА «Икарус» КЭ «Ураган».
9. Во втором всероссийском орнитологическом конгрессе, прошедшем в Санкт-Петербурге с 30 января по 2 февраля 2023 г. на базе Санкт-Петербургского научного центра РАН и Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена, приняли участие 455 орнитологов из множества регионов России и из Беларуси. По итогам обсуждений участники конгресса приняли следующую резолюцию:
10. «Конгресс отмечает высокую научную значимость и уникальность результатов исследований, выполненных с использованием спутниковых передатчиков и космической научной аппаратуры «Икарус» эксперимента «Ураган» на российском сегменте Международной космической станции. Участники конгресса подчёркивают необходимость продолжения дистанционных исследований миграций птиц с использованием космической аппаратуры. Эти исследования имеют большое значение как для фундаментальной науки, так и для прикладных разработок в сфере охраны редких видов птиц и рационального природопользования». Результаты КЭ отражены в материалах многочисленных научно-технических конференций и большом количестве публикаций в тематических научных журналах (более ста публикаций), освещаются в средствах массовой информации (газеты, телевидение и т.д.). При разработке методологии и реализации КЭ были поданы заявки и получены десятки российских патентов и т.д.

Отработанные в КЭ «Ураган» технические средства и методы будут использованы при создании автоматизированных спутниковых систем мониторинга и контроля земной поверхности.

Литература

- Акимов Н. П., Беляев М. Ю., Гектин Ю. М. и др. Использование инфракрасного радиометра высокого разрешения для исследования потенциально опасных и катастрофических явлений и объектов на земной поверхности в эксперименте «Ураган» на МКС // Тр. 52-х Науч. чтений К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники», Калуга, 19–21 сент. 2017. Казань, 2018. С. 22–30.
- Артемьев О. Г., Прокопьев С. В., Аюкаева Д. М. и др. Технология монтажа крупногабаритной аппаратуры на внешней поверхности российского сегмента МКС на примере аппаратуры «Икарус» // Пилотируемые полеты в космос. 2019. № 2(31). С. 34–43.
- Аюкаева Д. М., Беляев М. Ю., Волков О. Н. и др. Решение задач интеграции научной аппаратуры «Икарус» российского космического эксперимента «Ураган» на борту российского сегмента МКС // Тр. 52-х Науч. чтений К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Калуга, 19–21 сент. 2017. Казань, 2018. С. 31–38.
- Аюкаева Д. М., Беляев М. Ю., Веплер Й. и др. Проверка работоспособности научной аппаратуры «Икарус» после установки на борт служебного модуля российского сегмента МКС // Материалы 55-х Науч. чтений памяти К. Э. Циолковского. Ч. 1. Калуга, 2020, С. 188–190.
- Беляев М. Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В. Мониторинг Земли с Международной космической станции // Земля и Вселенная. 2002. С. 16–25.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Караваев Д. Ю. и др. Изучение катастрофических явлений и природной среды с борта МКС по программе «Ураган» // 6-я Международ. научно-практ. конф. «Пилотируемые полеты в космос». 10–11 нояб. 2005. Звёздный городок, Московская обл. 2005. С. 141.
- Беляев М. Ю., Котляков В. М., Десинов Л. В., Юрина О. А. Проблемы и задачи изучения Земли космическими методами: докл. // 42-е Науч. чтения К. Э. Циолковского. Калуга, 17–19 сент. 2007. Секция «Проблемы ракетной и космической техники»: тр. Казанский гос. ун-т. Казань, 2008. С. 8–24.
- Беляев М. Ю., Рязанцев В. В., Сармин Э. Э. и др. Использование научной аппаратуры «Фотоспектральная система» в эксперименте «Ураган»: докл. // 44-е Науч. чтения К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники»: тр. Калуга, 15–17 сент. 2009. Казань, 2010. С. 51–59.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Катковский Л. В. и др. (2011а) Некоторые результаты летных испытаний фотоспектральной системы ФСС // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 264–272.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Десинов Л. В. и др. (2011б) Летно-космические испытания фотоспектральной системы ФСС на борту МКС // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы Международ. науч. практ. конф. Минск, 28 февр. 2011, НИИ ПФП им. А. Н. Севченко, БГУ. 2011. С. 15–16.
- Беляев М. Ю., Рязанцев В. В., Сармин Э. Э. и др. (2011в) Первые результаты использования фотоспектральной системы ФСС в эксперименте «Ураган» // Тр. 45-х Науч. чтений К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Казань, 2011. С. 64–69.
- Беляев М. Ю., Рязанцев В. В., Сармин Э. Э. и др. (2011г) Использование научной аппаратуры «Фотоспектральная система» в экспериментах по программе «Ураган» на борту Международной космической станции // Сб. ст. под ред. В. П. Легостаева, М. Ю. Беляева. Ракетно-космическая техника. Сер. XII. Вып. 1–2. 2011. С. 233–244.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Гусев В. Ф. и др. Радиометрическая и геометрическая коррекция данных фотоспектральной системы. // 10-я Всерос. открытая ежегодная конф. « Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса»: тез. Москва, ИКИ РАН, 12–16 нояб. 2012.

- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю., Легостаев В. П.* (2013а) Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса // Изв. Рос. акад. наук. Энергетика. 2013. № 4. С. 75-90.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Гусев В. Ф. и др.* (2013б) Видеоспектральная система ВСС для космического эксперимента «Ураган» на МКС // 11-я Всерос. открытая конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса»: сб. тез. докл. конф. Москва, ИКИ РАН, 11–15 нояб. 2013.
- Беляев М. Ю., Богатырев В. А., Десинов Л. В., Юрина О. А.* (2013в) Использование информации о перемещении животных и птиц в программе «Ураган» на российском сегменте Международной космической станции // Материалы 48-х Науч. чтений К. Э. Циолковского. Калуга, 2013.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю., Легостаев В. П.* (2013г) Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса // Изв. РАН. «Энергетика». 2013. № 4. С. 75–90.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Листошенкова Н. С. и др.* (2014а) Возможности мониторинга с МКС нефтяных загрязнений Прикаспийского региона // Конф. «Географ. проблемы региона Каспийского моря и изучение путей достижения устойчивого развития территорий» в рамках 18-й Совместной сессии Объединенного научного совета по фундам. геогр. проблемам при Международной ассоциации академий наук (МАН) и Научного совета по фундам. геогр. проблемам РАН. Баку, 15–20.09.2014.
- Беляев М. Ю., Артемьев О. Г., Десинов Л. В. и др.* (2014б) Наблюдение океанских кольцевых волн вблизи острова Дарвин с Международной космической станции // Докл. на 49-х Науч. чтениях К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космич. техники», Калуга. 2014.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др.* (2014в) Обработка спектров и изображений с фотоспектральной системы в космическом эксперименте «Ураган» на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 54–65.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др.* (2014г) Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 27–39.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др.* (2014д) Летная отработка исследовательской аппаратуры «Фотоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // Косм. техника и технологии. 2014. № 1(4). С. 22–28.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю. и др.* (2015а) Особенности проведения и использования результатов съемки земной поверхности, выполняемой экипажами российского сегмента МКС // Косм. техника и технологии. 2015. № 1(8). С. 17–30.
- Беляев М. Ю., Юрина О. А., Караваев Д. Ю., Десинов Л. В.* (2015б) Изучение динамики развития катастрофических явлений по изменению площади наблюдаемых объектов в эксперименте «Ураган» на РС МКС // Междунард. научно-практ. конф. «Науч. исслед. и эксперименты на МКС». 9–11 апр. 2015, Москва, ИКИ РАН. 2015. С. 194.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю. и др.* (2015в) Изучение с борта российского сегмента Международной космической станции в рамках программы «Ураган» катастрофических явлений, вызывающих экологические проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1(80). С. 71–79.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Гусев В. Ф. и др.* (2015г) Использование видеоспектральной системы ВСС в эксперименте «Ураган» на РС МКС // Междунард. научно-практ. конф. «Науч. исслед. и эксперименты на МКС». 9–11 апр. 2015, Москва, ИКИ РАН. 2015. С. 192.
- Беляев М. Ю., Викельски М., Лампен М. и др.* (2015д) Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на российском сегменте МКС // Косм. техника и технологии. 2015. № 3. С. 38–51.

- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Юрина О. А. (2015е) Способ определения скорости движения фронтальной части ледника с космического аппарата. Патент на изобретение № 2568152 от 10.11.2015.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю., Юрина О. А. (2016а) Изучение катастрофических явлений и экологических проблем с российского сегмента МКС // Тр. 50-х Науч. чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского: материалы докладов. 2016. С. 79–87.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Сармин Э. Э. и др. (2016б) Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система на борту российского сегмента МКС // Косм. техника и технология. 2016. № 2. С. 12–20.
- Беляев М. Ю., Рулев Д. Н., Юрина О. А. Вариант подхода к планированию наблюдений потенциально опасных ледников на земной поверхности с борта орбитальной станции // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 3(96). С. 107–115.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Юрина О. А. (2016в) Способ определения момента времени схода наблюдаемого с космического аппарата ледника. Патент на изобретение RU 2605528 С2. 20.12.2016.
- Беляев М. Ю., Караваев Д. Ю., Юрина О. А. (2016г) Способ определения координат фотографируемых с космического аппарата земных объектов. Патент на изобретение RU 2587539 С2, 20.06.2016.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Боровихин П. А. и др. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Косм. техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 70–80.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Катковский Л. В. и др. (2019а) Классификация водных объектов по спектрам, измеренным с борта МКС в космическом эксперименте «Ураган» // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 201–208. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-201-208.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Катковский Л. В. и др. (2019б) Кросскалибровка данных «Фотоспектральной системы» с борта МКС в космическом эксперименте «Ураган» // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 45–55. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-45-55.
- Беляев М. Ю., Катковский Л. В., Силук О. О. и др. (2019в) Сравнение спектральных характеристик отражения вулканов Камчатки // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 115–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-115-129.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Катковский Л. В. и др. (2019г) Классификация водных объектов по спектрам, измеренным с борта МКС в космическом эксперименте «Ураган» // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 201–208. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-201-208.
- Беляев М. Ю., Воронин Ф. А., Харчиков М. А. (2019д) Контроль перемещения животных на Земле с помощью научной аппаратуры, установленной на российском сегменте Международной космической станции // Лесной вестн. 2019. № 4. Т. 23. С. 49–58.
- Беляев М. Ю., Вепплер Й., Викельски М. и др. Отработка технологии контроля перемещения животных на Земле с помощью научной аппаратуры, установленной на РС МКС // 27-я Санкт-Петербургская международ. конф. по интегрированным навигац. системам: сб. препринтов. Санкт-Петербург, 2020. С. 9–17.
- Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Караваев Д. Ю., Рассказов И. В. (2021а) Оптимизация наведения научной аппаратуры крупногабаритной орбитальной станции на наблюдаемые объекты // Материалы 14-й Всерос. мультikonф. по проблемам управления (МКПУ-2021). В 4 т. Ростов-на-Дону, 2021. С. 70–72.
- Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Караваев Д. Ю. (2021б) Планирование наблюдений наземных объектов с борта МКС несколькими комплектами

- научной аппаратуры // Тр. 15-х Науч. чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Материалы докл. 15-х Науч. чтений. Сер. «Проблемы ракетной и космической техники». Казань, 2021. С. 25–37.
- Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Ветошкин А. М. и др. (2022а) Наведение научной аппаратуры международной космической станции на исследуемые объекты // Косм. исслед. 2022. Т. 60. № 1. С. 80–89.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Соломина О. Н., Тертицкий Г. М. (2022б) Исследование миграций животных с помощью научной аппаратуры «Икарус» в космическом эксперименте «Ураган» в РС МКС // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. № 3(118). С. 3–19.
- Беляев М. Ю., Катковский Л. В., Силуко О. О. и др. (2022в) Обнаружение усыханий хвойных лесов по авиакосмическим данным // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 88–102. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-88-102.
- Десинов Л. В. (2003а) Аральская катастрофа — прямая угроза южному Уралу // Биржа интеллектуальной собственности. 2003. Т. 2. № 9. С. 23–27.
- Десинов Л. В. (2003б) Проблемы окружающей среды бассейна реки Волги // Биржа интеллектуальной собственности. 2003. Т. 2. № 8. С. 23–29.
- Десинов Л. В. (2003в) Космический мониторинг эрозии черноземных почв России // Биржа интеллектуальной собственности. 2003. Т. 2. № 5. С. 17–24.
- Десинов Л. В. Цунами с орбитальной высоты // Биржа интеллектуальной собственности. 2005. Т. 4. № 2. С. 32–37.
- Десинов Л. В. Природные катастрофы на Кавказе: вид с МКС // Земля и Вселенная. 2021. № 5(341). С. 5–20.
- Десинов Л. В., Десинов С. Л. Катастрофа в Геналдонской долине. 2003. С. 66–71.
- Десинов Л. В., Десинов С. Л., Ивонин И. Л. и др. Экологические проблемы Центральной России, Крыма и Кавказа в программе «Ураган» в 2017 г. // Материалы 1-го Международ. эколог. форума в Крыму. Севастополь, 2017. С. 117–121.
- Котляков В. М., Десинов Л. В. Подвижка ледника Медвежьего в 2011 году // Лёд и снег. 2012. Т. 52. № 1. С. 128–131.
- Котляков В. М., Десинов Л. В., Долгов С. В. и др. Наводнение 6–7 июля 2012 года в городе Крымске // Изв. Рос. академии наук. Сер. географическая. 2012. № 6. С. 80–88.
- Котляков В. М., Десинов Л. В., Десинов С. Л. и др. Колебания ледников северного и южного ледниковых полей Патагонии по данным мониторинга с Международной космической станции // Лёд и снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 5–18.
- Падалка Г. И., Ревин С. Н., Десинов Л. В. и др. Результаты мониторинга с борта РС МКС катастрофических наводнений Краснодарского края // Пилотируемые полеты в космос. 2013. № 4(9). С. 42–59.
- Сармин Э. Э., Секерж-Зенькович С. Я., Чеботарев А. М. и др. Изучение активных вулканов с борта МКС по программе «Ураган» // Международ. научно-практ. конф. «Научные исслед. и эксперименты на МКС». 2015. С. 190–194.
- Хлебников Д. В., Иванов А. Ю., Коновалов Б. В. и др. Антропогенные загрязнения Российской прибрежной зоны Черного моря: взгляд из космоса. Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития // Тр. 3-й Всерос. конф. Санкт-Петербург, 2019. С. 909–913.
- Belyaev M. Yu., Dessinov L. V. Study of the Environment from the ISS in the URAGAN Program // 23rd Intern. Symp. Space Technology and Science. May 26 – June 2, 2002. Matsuc, Japan: abstr. 2002. P. 74. Article 2002–n-25.
- Belyaev M. Yu., Dessinov L. V. Investigation of the Earth Catastrophes from the International Space Station // 24th Intern. Symp. Space Technology and science. May 30 – June 6, 2004, Miyazaki, Japan: abstr. 2004. Article 2004–n-19.
- Beljaev M. Yu., Beljaev B. I., Kazak A. A. et al. Spectral brightness distributions in spectrometric monitoring of the earth from space // J. Applied Spectroscopy. 2012. P. 1–8.

- Belyaev M. Yu., Katkovsky L. V., Beliaev B. I. et al.* Method and results of comparing multilevel spectral reflectance measurements of various earth surfaces // *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2020. V. 17. No. 6. P. 30–36.
- Jetz W., Tertitski G., Kays R.* Biological earth observation with animal sensors // *Trends in Ecology and Evolution*. 2022. V. 37. No. 4. P. 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.11.011>.
- Iurina O., Belyaev M. Yu., Karavaev D. Yu., Desinov L. V.* Study of catastrophic phenomena and environmental problems from the Russian segment of the ISS // *Proc. 66th Intern. Astronautical Congress. IAC*. 2015. P. 3987–3997.
- Naumann W., Belyaev M. Yu., Wikelski M., Claasen F.* ICARUS — a new global observation system for small objects. 2023. Article IAC-15-B2.1.9. <https://galileo-masters.eu/winner/icarus-new-global-tracking-service-small-objects/#>.
- Weppler J., Belyaev M. Yu., Solomina O. et al.* ICARUS — Animal Observation from ISS // *Proc. 68th Intern. Astronautical Congress. IAC*. 2017. P. 5312–5322.
- Weppler J., Belyaev M. Yu., Wikelski M. et al.* Development of Technology for Monitoring Animal Migration on Earth Using Scientific Equipment on the ISS RS // *27th Saint Petersburg Intern. Conf. Integrated Navigation Systems (ICINS)*. 2020. P. 1–7.
- Weppler J., Belyaev M. Yu., Pitz W. et al.* First Results from the German-Russian ICARUS System for Animal Tracking from ISS // *72nd Intern. Astronautical Congress (IAC)*. Dubai, United Arab Emirates, 25–29 Oct. 2021. Article IAC-21-B3.3.7.
- Wikelski M., Uschi Mueller U., Scocco P. et al.* Potential short-term earthquake forecasting by farm animal monitoring // *datadryad.org*. 2020. doi:10.5061/dryad.q2bvq83gq.

TESTING OF SCIENTIFIC EQUIPMENT AND EARTH EXPLORATION TECHNOLOGIES IN THE SPACE EXPERIMENTS “URAGAN” ON THE ISS

M. Yu. Belyaev

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: International Space Station ISS, scientific equipment, Earth exploration technologies, space experiments

ЦЕЛЕВЫЕ РАБОТЫ НА ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. В. Блошенко

Государственная корпорация «Роскосмос», Москва, Россия

Ключевые слова: космические исследования, пилотируемые космические комплексы, целевые работы, научно-прикладные исследования

Научно-прикладные исследования (НПИ) проводились на всех без исключения пилотируемых космических комплексах (ПКК), начиная с самого первого пилотируемого полёта. С появлением долговременных орбитальных станций ресурсы и возможности реализации программы НПИ кардинально изменились. Появились масштабные программы исследований, сформировалась система планирования и реализации космических экспериментов (КЭ). Многоплановость целевого использования позволила выполнить на орбитальном комплексе «Мир» исследования по 55 российским и зарубежным программам суммарным объёмом более 31 000 сеансов экспериментов.

Действующая система организации НПИ была определена в 1994 г. решением Российского авиационно-космического агентства (Росавиакосмос) после подписания соглашения по проекту Международной космической станции (МКС). Ключевое её отличие — доступность. Система выступает открытой для участия организаций различной ведомственной принадлежности, нацелена на внедрение полученных результатов и предусматривает поддержку постановщиков работ в рамках научно-технического сопровождения. В период 2020—2023 гг. система приобрела современные облик: утверждена новая редакция ГОСТ Р 52017-2023, подробно описывающая порядок реализации целевых работ (ЦР) по различным направлениям, приняты необходимые отраслевые стандарты и положения.

Координация работ по формированию программ НПИ осуществляется коллегиальным совещательным органом — Координационным советом научно-техническим советом Госкорпорации «Роскосмос» (КНТС), в состав которого входит восемь тематических секций по трём основным направлениям: научно-фундаментальные исследования, технологии освоения космического пространства, практические задачи и образовательные мероприятия.

Современная система планирования и реализации ЦР предусматривает долгосрочное планирование в рамках долгосрочной программы ЦР, в которую входят все ЦР, запланированные к реализации на ПКК, среднесрочное планирование в рамках этапной программы целевых работ на срок действия государственных контрактов на реализацию ЦР и краткосрочное планирование в рамках программ конкретных экспедиций на ПКК.

С учётом большого количества накопленных знаний и результатов исследований актуальной задачей становится повышение доступности этих результатов российским потребителям. В 2023 г. утверждено положение и введён в опытную эксплуатацию Головной банк данных результатов ЦР на МКС (ГБД), который позволяет реализовать централизованный сбор, корректировку, длительное хранение данных, поиск и предоставление регламентированного доступа к данным, а также проверку информации на соблюдение интеллектуальных прав.

В рамках научно-технического сопровождения программ НПИ осуществляется выдача заключений и рекомендаций по организации работы, обработка и комплексный анализ результатов, в том числе

Блошенко Александр Витальевич — исполнительный директор, председатель КНТС, кандидат физико-математических наук

оценка полученных научных результатов и их сопоставление с имеющимися в этой области данными, оценка полученного эффекта и его сравнение с ожидаемым, выработка предложений по использованию полученных результатов.

Всего за более чем 20 лет полёта на борту МКС осуществлено 69 основных экспедиций и 20 экспедиций посещения, реализовано 69 программ НПИ, включающих 146 ЦР. Запланировано к реализации ещё около 100 новых ЦР. Результаты выполненных ЦР на МКС используются в промышленности, медицине, спорте, образовании и других отраслях.

КНТС организована работа по формированию программы ЦР на перспективной Российской орбитальной станции (РОС). На сегодняшний день от организаций науки и промышленности поступило 57 заявок. Предложены работы различной тематической направленности, представляющие особый научный интерес благодаря наклонению орбиты РОС, в том числе работы по синтезу новых материалов, дистанционному зондированию Земли, диагностике и контролю состояния станции, разработке новых видов связи, изучению состояния и работоспособности космонавтов, исследованию дальнего космоса. Большинство планируемых экспериментов (43 из 57) — это развитие исследований, проводимых на МКС.

Успешное выполнение действующей и перспективных программ НПИ призвано обеспечить передовой уровень достижений отечественной науки и промышленности.

TARGETED WORKS ON MANNED SPACE COMPLEXES: STATUS AND PROSPECTS

A. V. Bloshenko

State Corporation Roscosmos, Moscow, Russia

Keywords: space research, manned space complexes, targeted work, scientific and applied research

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА МКС

С. В. Бронников, А. С. Рожков, А. Н. Лепорский, Д. Ю. Караваяев
Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: система позиционирования, Международная космическая станция, экипаж, угломерная система, умная полка

Введение

В рамках космического эксперимента (КЭ) «Визир», который проводился на российском сегменте МКС с 2012 по 2023 г. исследовались принципы, способы построения и технические характеристики систем позиционирования, на базе которых могут быть разработаны устройства поддержки деятельности экипажей космических кораблей и орбитальных станций. К такой деятельности относятся, например, фотосъёмка земной поверхности через иллюминаторы, поиск хранящихся на борту предметов, автоматический сбор данных о местонахождении членов экипажа, об использовании полезного объёма станции.

Цель исследования — повышение эффективности решения таких прикладных задач, как привязка снятых изображений земной поверхности, определение длительности и частоты нахождения космонавта в различных местах жилого объёма пилотируемого космического аппарата (КА), для сокращения времени поиска хранящихся на борту предметов.

Под эффективностью понимаются полные приведённые затраты на выполнение задачи. Полные затраты состоят из капитальных и эксплуатационных затрат, включая затраты на создание и эксплуатацию бортовых средств деятельности вместе с подготовкой космонавтов, а также затраты на выполнение задачи во время полёта и обработку на Земле полученных в результате деятельности экипажа данных.

КЭ «Визир» проводился по трём направлениям:

- «Визир-У» разработка и исследования системы позиционирования на базе ультразвуковых излучения;
- «Визир-УП» — использование при позиционировании радиочастотного излучения;
- «Визир-И» — использование при позиционировании инфракрасного излучения.

Направление «Визир-У»

Цель исследования — разработка ультразвуковой системы позиционирования и технологий её применения при проведении космонавтом съёмки земной поверхности с помощью свободно перемещаемых на борту камер.

Во время полёта экипажи РС МКС ежедневно проводят через иллюминаторы съёмки земной поверхности цифровыми профессиональными фотоаппаратами. Хотя детальность съёмки с МКС уступа-

Бронников С. В. — главный научный сотрудник, кандидат технических наук, sergey.bronnikov@rsce.ru

Рожков А. С. — главный специалист, alexander.rozhkov@rsce.ru

Лепорский А. Н. — инженер-программист 1-й категории, andrey.leporskiy@rsce.ru

Караваяев Д. Ю. — главный специалист, кандидат технических наук, dmitry.karavaev@rsce.ru

ет детальности изображений, получаемых с современных спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и фоторазведки, эта разница частично нивелируется более низкой орбитой МКС (высота орбиты 420 км против 600–700 км у большинства спутников ДЗЗ) и для съёмки в надири сейчас достигает 2 м/пиксель.

Кроме этого, съёмки тренированным космонавтом, имеющим соответствующий опыт, могут в ряде случаев дать преимущество перед автоматическими спутниками ДЗЗ в оперативности обнаружения и фиксации различных явлений на суше и в акватории Мирового океана. При этом космонавт способен быстро опознать наблюдаемую местность, а также быстро перенацелить фотоаппарат на множество объектов по ходу полёта.

Таким образом, съёмка экипажами с борта РС МКС представляется ценным самостоятельным источником информации и существенным дополнением к данным, получаемым с автоматических КА. Космонавты при этом предпочитают использовать свободно перемещаемые камеры, не имеющие жёсткой связи с конструкцией КА. Это позволяет не использовать какие-либо кронштейны, загораживающие обзор из иллюминатора и мешающие наведению, передающие вибрации и т. п.

За время полугодового полёта экипаж получает сотни тысяч изображений земной поверхности. Однако коэффициент их использования составляет единицы процентов из-за трудностей привязки полученных изображений, что связано с тем, что при съёмке свободно перемещаемой камерой неизвестно текущее направление объектива, и это не позволяет рассчитать положение оси визирования объектива и координаты снятого района. При высоте орбиты КА 400 км потенциальная площадь поиска района съёмки очень велика и представляет собой круг радиусом 800 км с центром в подспутниковой точке МКС на момент съёмки. Некоторые однородные фотоизображения (лес, море) невозможно распознать в связи с отсутствием каких-либо уникальных ориентиров.

Поэтому становится актуальным создание и использование при съёмках системы позиционирования, которая бы позволяла автоматически определять пространственное (угловое) положение объектива относительно системы координат КА. На основе данных об ориентации камеры относительно КА, а также известных данных о пространственном положении КА и его ориентации в инерциальной системе координат на момент съёмки можно рассчитать географические координаты центра снимка.

Разработанная угломерная система СКП-У приведена на рис. 1, 2. СКП-У состоит из следующих компонентов: камеры с платформой излучателей (см. рис. 1), размещённой вокруг иллюминатора платформы приёмников, на которой расположены шесть ультразвуковых приёмников, и находящиеся за панелями интерьера КА блок управления с Wi-Fi устройством связи и комплект кабелей (см. рис. 2).

Принцип работы системы заключается в непрерывном излучении ультразвуковых импульсов, получении их приёмниками и измерении времени прохода импульсов от передатчиков до приёмников. В компьютере экипажа по получаемому времени прохода импульсов и известной скорости ультразвука рассчитывается расстояние между излучателями и приёмниками. По этой совокупности расстояний вычисляется пространственное положение СК камеры относительно СК КА (Бронников и др., 2014, 2016, 2019; Виноградов и др., 2009).

С вводом УС существенно упрощается технология привязки изображения земной поверхности. Процесс распознавания изображения наземный оператор проводит на небольшой ограниченной площади радиусом 15 км вокруг расчётной точки пересечения оси камеры с земной поверхностью, которая рассчитывается на основе данных УС.

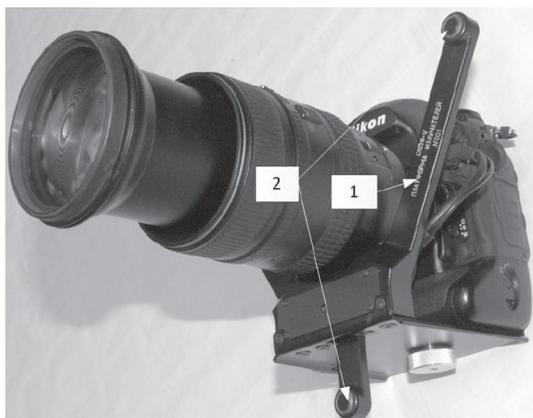


Рис. 1. Фотокамера с платформой излучателей:
1 — платформа; 2 — ультразвуковые излучатели

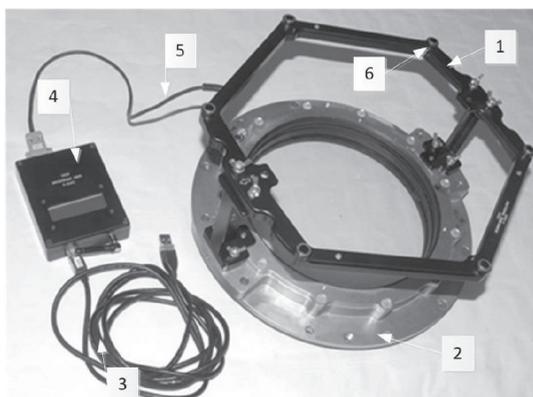


Рис. 2. 1 — платформа ультразвуковых приёмников; 2 — иллюминатор; 3 — кабель подключения блока управления к компьютеру; 4 — блок управления с Wi-Fi устройством связи; 5 — кабель подключения ультразвуковых приёмников к блоку управления; 6 — ультразвуковой приёмник



Рис. 3. Платформа излучателей с малогабаритным экраном



Рис. 4. Жидкокристаллический малогабаритный экран с меткой отклонения центра кадра от направления на заданный объект

Кроме того, УС позволяет упростить космонавту наведение камеры на заданный объект. Для поддержки наведения камеры в состав платформы излучателей был введён малогабаритный экран (рис. 3, 4). На экран в реальном масштабе времени выдаётся изображение условной «мишени» и перемещающаяся относительно мишени метка. Центр мишени — заданный объект съёмки, перемещающаяся метка — это место пересечения осью камеры земной поверхности. Также с компьютера экипажа, в котором размещено программное обеспечение УС, выдаются голосовые указания по наведению.

Направление «Визир-УП»

Цель — отработка средств и методов работы с единицами хранения (ЕХ). В эксперименте в качестве ЕХ используются контейнеры с лекарственными средствами. Разработана «умная полка» для хранения лекарственных средств на базе RFID технологии (радиометок).

СКП УП включает следующие блоки (рис. 5):

- стойка (1 шт.), состоящая из четырёх умных полок, предназначенных для хранения и автоматической идентификации объектов;
- планшетный компьютер (1 шт.), установленный на стойке, управляющий работой аппаратуры;
- контейнеры с лекарственными средствами (КЛС) (240 шт.), предназначенные для использования в полете экипажем РС МКС, установленные в умные полки стойки.



Рис. 5. Космонавт О. Кононенко выполняет установку тестовых ЕХ в УП

На каждый контейнер с лекарственными средствами установлена RFID-метка. Каждая из умных полок оборудована антенной для считывания RFID-меток. Поместив КЛС в умную полку, аппаратура

СКП-УП распознает метку и занесёт информацию о ней в базу данных аппаратуры. С помощью планшетного компьютера выполняется поиск необходимых КЛС во всех умных полках.

Доступ к базе данных аппаратуры СКП-УП возможен как с помощью планшетного компьютера из состава НА, так и через бортовую локальную сеть с любого рабочего места МКС или из ЦУП.

Направление «Визир-И»

Цель — исследование технических характеристик и отработка в натурных условиях аппаратно-программных средств с использованием инфракрасной аппаратуры для определения трёхмерных координат объектов в контролируемом пространстве.

Актуальность исследования связана с тем, что при эксплуатации орбитальных пилотируемых станций имеется ряд полётных операций, при выполнении которых группе управления полётом необходимо знать местоположение членов экипажа, некоторого инструмента или элемента оборудования. Важно знать местоположение каждого члена экипажа внутри станции при принятии решений в процессе ликвидации аварийных ситуаций; при выполнении экипажем опасных операций, например, внекорабельная деятельность (ВКД).

СКП-И включает следующие компоненты:

- 9 инфракрасных автономных приёмников (ИКП);
- 3 автономных инфракрасных маяка (ИКМ);
- модуль управления (МУ);
- программное обеспечение для обработки, полученной от инфракрасных приёмников, информации;
- бортовой лэптоп.

Схема системы СКП-И приведена на рис. 6.

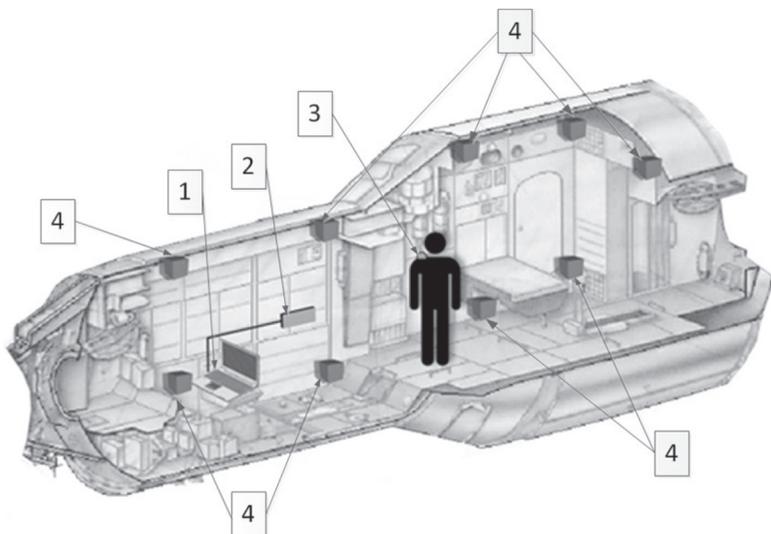


Рис. 6. Схема системы СКП-И: 1 — бортовой лэптоп; 2 — модуль управления; 3 — инфракрасный маяк; 4 — инфракрасные приёмники

Система СКП-И работает в импульсном режиме. МУ по радиоканалу запускает по очереди каждый ИКМ, находящийся в контролируемом пространстве. В ответ каждый ИКМ излучает ИК-импульс. Каждый ИКП, принявший ИК-импульс от ИКМ, передаёт в МУ двухмерные координаты центра светового пятна, образованного в результате воздействия ИК-импульса на сенсор ИКП. Данные измерений с МУ по интерфейсу USB поступают в бортовой лэптоп, где

рассчитываются текущие трёхмерные координаты всех ИКМ, находящихся в данный момент в контролируемом пространстве.

Система позволяет определять координаты объекта с периодом 1/6 с. Точность определения местоположения космонавта составляет около 1 м. К недостаткам СКП-И относится необходимость калибровки аппаратуры перед каждым сеансом, что не позволяет использовать её в автоматическом режиме.

Результаты

1. Разработанные аппаратно-программные средства подтвердили работоспособность и возможность применения на КА.
2. Использование представленных систем позиционирования позволяет повысить эффективность выполнения ряда типовых полётных задач пилотируемого КА.
3. По результатам работы было получено 18 патентов, реализовано 14 публикаций.

Литература

Бронников С. В., Рожков А. С., Караваев Д. Ю. и др. Способ ориентирования перемещаемого в пилотируемом аппарате прибора и система для его осуществления. Патент на изобретение RU 2531781 C2, 27.10.2014. Заявка № 2012134959/11 от 16.08.2012.

Бронников С. В., Рожков А. С., Поздняков П. А. Способ определения положения объекта преимущественно относительно космического аппарата и система для его осуществления. Патент на изобретение RU 2600039 C1, 20.10.2016. Заявка № 2015121470/11 от 04.06.2015.

Бронников С. В., Рожков А. С., Боровихин П. А., Рулев Д. Н. Способ ориентирования перемещаемой на борту пилотируемого корабля аппаратуры. Патент на изобретение RU 2695739 C1, 25.07.2019. Заявка № 2018136716 от 17.10.2018.

Виноградов П. В., Крикалев С. К., Калери А. Ю. и др. Способ определения географических координат изображений объектов на поверхности планеты при съемке с пилотируемого космического аппарата». Патент на изобретение RU 2353902 C2, 27.04.2009. Заявка № 2007117663/28 от 11.05.2007.

USING OF POSITIONING SYSTEMS TO SUPPORT THE ISS CREW ACTIVITIES

S. V. Bronnikov, D. Yu. Karavaev, A. N. Leporsky, A. S. Rozhkov

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: positioning system, international space station, crew, goniometric system, smart shelf

АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ГЕРМОКОРПУСА ОБИТАЕМЫХ МОДУЛЕЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В. Б. Бычков, В. С. Беляев, В. Н. Шорин

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, пос. Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл., Россия

Ключевые слова: акустическая эмиссия, диагностика, микроорганизмы, биодеструкция, тепловлажностные параметры среды обитания, ультразвуковой фон, поверхность гермокорпуса, очаги коррозии, преобразователи акустической эмиссии

Метод акустической эмиссии (АЭ), внедрённый за последние пятьдесят лет во многие области техники и отрасли промышленности, доказал свою эффективность в диагностике разного рода дефектов. Известны многочисленные примеры успешного его применения при диагностике дефектов, в том числе коррозионных, в магистральных трубопроводах (компании «Интерюнис», «Диатон» и др.). Однако эффективность АЭ-диагностики в данной области во многом связана с тем, что в толстостенной (16 мм для трубы диаметром 1020 мм) оболочке коррозионный процесс может развиваться без ущерба для перекачки продукта достаточно долго и обнаруживается он уже на стадии появления каверны значительных размеров. Серьёзное влияние оказывает здесь также имеющаяся и используемая возможность ступенчатого подъёма внутреннего давления относительно нормального рабочего значения. Совсем иная ситуация наблюдается в космонавтике, где приходится иметь дело с оболочками толщиной 2–3 мм, и где коррозию необходимо обнаружить при весьма незначительных поражениях (с глубиной ниши порядка 100 мкм). В этих случаях — при микродеструкции материала, происходящей на ранних стадиях коррозии, вероятность обнаружения дефектов остаётся достаточно низкой. В то же время, опыт эксплуатации орбитальных станций показал, что коррозионные процессы в конструкционном материале гермокорпуса представляют высокую потенциальную опасность. Как отмечалось в работе (Борисов и др. 2009), в процессе установки жизнеобеспечивающих систем и оборудования космической станции, при доставке экипажей и научной аппаратуры трудно избежать попадания высоко агрессивных видов микроорганизмов, которые могут в период эксплуатации станции вызвать биодеструкцию конструктивных элементов. Активному разрушительному воздействию бактерий и грибов подвергаются как металлы, так и другие материалы (пластмасса, резина и пр.). Способствует коррозионным процессам также наличие в модулях станции так называемых «холодных» зон, где температура корпуса ниже температуры точки росы. Кроме того, усугубляет развитие коррозии напряжённое состояние оболочки, возникающее из-за воздействия внутреннего атмосферного давления. Контаминация поверхности микроорганизмами-биодеструкторами, в том числе на участках с высокой влажностью, и полётное напряжение обечайки в совокупности создают идеальные условия для развития коррозионного растрескивания под напряжением (КРН),

Беляев Владимир Сергеевич — заместитель начальника, кандидат физико-математических наук, belyaev@vniiftri.ru

Бычков Виктор Борисович — ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, vbb-1507@mail.ru

Шорин Владимир Николаевич — старший научный сотрудник, chorin@vniiftri.ru

иначе говоря, стресс-коррозии. В наземных экспериментах было установлено, что дополнительным фактором, влияющим на эрозию металла под плёночной влагой, выступает наличие ультразвукового фона. Излучение воздушного ультразвука с частотой 20–50 кГц и уровнем порядка 50 дБ на образцы сплава АМг-6Н (при имитации микробиологической среды и полётного напряжения, характерных для МКС), ускоряло в 5–6 раз коррозию по критерию потери массы и в 2 раза коррозионное растрескивание сварного материала, а также увеличивало в 2–3 раза глубину проникновения коррозии (Борисов и др., 2009).

В ходе выполнения космического эксперимента (КЭ) «Бар» были выполнены измерения климатических параметров среды и акустического фона более чем в 200 зонах, преимущественно в запанельном пространстве модулей станции. Работы в рамках КЭ «Эксперт» выявили зоны контаминации поверхности обечайки служебного модуля (СМ) грибами и бактериями с превышением установленных норм в ряде случаев на четыре порядка. В потенциально опасных зонах космонавты проводили микрофотографирование очагов коррозионной микродеструкции (ОКМ) на гермокорпусе. Учёными Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш) (Е. В. Шубралова с сотрудниками) была сформирована из многочисленных (несколько сотен) микрофотографий база данных КОРРОЗИЯ, иллюстрирующая зарегистрированные ОКМ и их классификацию по видам коррозии.

В работе (Дешева и др., 2019) на основе обработки данных многочисленных измерений, выполненных на борту станции, впервые был проведён анализ проблемы микродеструкции внутренней поверхности обечайки гермокорпуса станции с учётом всех упомянутых выше факторов. В результате анализа отобранных 27 зон (суммарно 129 ОКМ в модулях СМ, функционального грузового блока (ФГБ), малого исследовательского модуля (МИМ-1)) были выделены как наиболее опасные 16 зон СМ, общее количество ОКМ в которых составило 110. Заимствованный из статьи (Дешева и др., 2019) рис. 1 содержит семь бортовых микрофотографий и снимок, иллюстрирующий результат описанного выше наземного эксперимента. Четыре снимка получены в промежуточной камере (ПрК), где в пяти зонах обнаружили 34 ОКМ (почти треть имеющихся во всём СМ коррозионных дефектов находится в малообъёмной ПрК!). Девять из них расположены в зоне гермоплат системы терморегулирования (СТР); выявленное здесь количество микроорганизмов-деструкторов на четыре порядка выше предельно допустимого. В зоне велика вероятность выпадения конденсата и слабый вентиляционный обдув (признаки «холодной зоны»). Заметно поражены коррозией зоны ПрК в области сварного шва и за панелью 140. В целом в ПрК коррозионная обстановка признана крайне неблагоприятной. Немногим лучше ситуация в переходном отсеке (ПхО) (две микрофотографии на рис. 1). Приведём дословно один из выводов статьи (Дешева и др., 2019), которая была опубликована в конце 2019 г.: «Восемь зон СМ: в рабочем отсеке (РО) — за панелями 131, 135, за панелью 139 и в зоне потолка автоматизированной системы управления (АСУ), у иллюминаторов № 3 и 5; в ПрК около гермоплат СТР; в ПхО вблизи иллюминатора № 14 — по результатам проведённого анализа отнесены к числу наиболее опасных в аспекте развития коррозионных повреждений гермокорпуса. В четырёх зонах (за панелями 134, 228, 250 и 140) коррозионная обстановка признана неблагоприятной и требует регулярного контроля, приборного и визуального. Ещё в четырёх зонах необходимо визуальное наблюдение».

Осенью 2020 г. появилась информация о падении давления в РС МКС. Сквозной дефект (в виде трещины) в гермокорпусе был обнаружен в ПрК. Отсек закрыли, герметично изолировав его от РО. Впоследствии была обнаружена трещина в ПхО, а затем вновь

в ПрК. Таким образом, по состоянию на март 2023 г. в отсеках СМ были установлены три места негерметичности. Трещины были заделаны космонавтами, РС МКС продолжает действовать, очередные космические экспедиции отправляются на станцию и возвращаются согласно плану. Однако из происшедшего напрашивается вывод: дефекты появились именно в тех отсеках, в которых незадолго до этого диагностировали потенциально опасные зоны.



Рис. 1. Коррозионная микроструктура на МКС

Учёными ЦНИИмаш, Института медико-биологических проблем РАН (ИМБП РАН) и Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) была проведена в наземных условиях серия экспериментов по обнаружению очагов коррозионной микрострукции с помощью преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ). АЭ сигналы возбуждались в тонких пластинах (толщина 2–3 мм) травлением поверхности пластины каплями раствора кислоты. Пластина подвергалась при этом действию растягивающего устройства для имитации полётной нагрузки гермокорпуса модуля МКС. По результатам экспериментов было принято решение о постановке КЭ «Эмиссия», разработка научной аппаратуры (НА) для которого возлагалась на ВНИИФТРИ.

Разработка технического проекта НА АКЭМИД показала возможность регистрации сигналов АЭ, создаваемых воздействием минимальной дозы слабого (2%-й концентрации) раствора соляной кислоты в пластине из сплава АМг6 толщиной 3 мм. Использовались специально разработанные ПАЭ, отличающиеся высокой чувствительностью и превосходящие по обнаружительной способности ПАЭ других типов, в том числе выпускаемые такими производителями, как фирма Physical Acoustics Corporation, являющаяся мировым лидером в данной области техники, и ведущая компания России — ООО «ГлобалТест». Результаты сравнительной оценки ПАЭ приводятся в работе (Беляев и др., 2019). В указанном эксперименте преобразователи устанавливались вертикально на плоскую пластину АМг6 толщиной 3 мм и прижимались с силой от 0,22 до 5 Н. Пластина располагалась горизонтально с закреплением концов через резиновые прокладки. Были просверлены лунки диаметром 2 мм и глу-

биной 0,5–2 мм в центральной области пластины. Лунки заполнялись до верха, так чтобы объём раствора составлял 1,5–6 мкл. Преобразователи располагались симметрично относительно пластины с двух сторон в местах, на расстоянии 12–15 см от места травления.

Таблица 1. Отношение сигнал/шум при регистрации импульсов АЭ, возбуждаемых химической коррозией

Преобразователь	Частота пика	Отношение сигнал/шум, дБ
PKWDI	170	10
GT300	100	5
ПАЭР 2500Д	160	21

При последующем уменьшении концентрации кислоты в растворе с помощью датчика ПАЭР 2500Д уверенно регистрировались спектры импульсов акустической эмиссии, вызванных воздействием на пластину из АМг6 дозы в 5 мкл 0,5%-го раствора HCl.

Это даёт основания полагать, что установка подобной аппаратуры в обитаемых отсеках орбитальной станции или иного пилотируемого космического аппарата (ПКА), обеспечит своевременное обнаружение деструктивных изменений состояния гермокорпуса, возникающих как в результате коррозионных процессов, так и вследствие механических и иных воздействий факторов космического пространства. Создание в ближайшей перспективе отечественной орбитальной станции РОС также представляется серьёзным поводом для развития АЭ диагностики в приложении к проблемам эксплуатации ПКА.

В докладе представлены технические решения по созданию АЭ аппаратуры космического назначения, излагается методика проведения экспериментов и приводятся их результаты.

Авторы выражают глубокую благодарность Елене Владимировне Шубральной за постановку задачи, ценные советы и постоянное внимание к исследованиям и разработкам.

Литература

- Дешевая Е. А., Беляев В. С., Бычков В. Б. и др.* Микробиологический, климатический и акустический факторы внутренней среды российского сегмента Международной космической станции: связь с деструктивными процессами материала гермокорпуса // *Авиакосм. и эколог. медицина.* 2019. Т. 53. № 6. С. 77–85. DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-6-77-85.
- Беляев В. С., Бычков В. Б., Судденко Ю. А. и др.* Метод акустической эмиссии. Преобразователи для регистрации волн Лэмба, возбуждаемых коррозионными процессами // *Альманах современ. метрологии.* 2019. № 3(19). С. 58–66.
- Борисов В. В., Дешевая Е. А., Шубралова Е. В. и др.* Оработка метода обнаружения мест негерметичности на борту российского сегмента Международной космической станции // *Космонавтика и ракетостроение.* 2009. № 4(57). С. 144–153.

ACOUSTIC-EMISSION DIAGNOSTICS OF THE CONSISTENCY CONDITION OF THE ORBITAL STATION'S HABITABLE MODULES PRESSURIZED HULL: OPPORTUNITIES AND PROSPECTS

V. B. Bychkov, V. S. Belyaev, V. N. Chorin

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering
Mendeleevo, Moscow region, Russia

Keywords: acoustic emission, diagnostics, microorganisms, biodestruction, thermal and humidity parameters of the environment, ultrasonic background, surface of the pressurized hull, corrosion centers, acoustic emission transducers

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМОВ В РАМКАХ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «БАР» И МЕТОДЫ ИХ СНИЖЕНИЯ

В. Б. Бычков, Г. Н. Кузнецов, Д. А. Смагин

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: шумы внутри пилотируемых космических аппаратов, подавление шумов и дискретных составляющих активными методами и техническими средствами

Анализируются результаты исследования помеховой обстановки внутри различных секций российского сегмента Международной космической станции (МКС). Установлено, что во внутренних объёмах МКС наблюдаются не только широкополосные шумы, но и достаточно мощные дискретные составляющие, заметно превышающие уровни, допустимые по санитарно-гигиеническим нормам. Сделан вывод о необходимости разработки и применения на борту пилотируемых космических аппаратов (ПКА) технических средств, подавляющих как широкополосные, так и узкополосные компоненты сигналов. Обоснована необходимость использования для этой цели малогабаритных локальных или объёмных активных технических средств и методов борьбы с шумом, обеспечивающих подавление широкополосного шума не менее чем на 4–6 дБ, а узкополосных составляющих — на 8–12 дБ. Причём при их разработке и эксплуатации должны учитываться ограничения как по массо-габаритам, так и по энергопотреблению.

В рамках космического эксперимента (КЭ) «Бар» в 2008–2017 гг. в российском сегменте МКС проводилось исследование шумового фона как фактора, оказывающего негативное влияние на самочувствие и работоспособность космонавтов, а также создающего помехи речевому общению членов экипажа. Использовались результаты измерений акустического фона, выполненных в период космических экспедиций экипажами в различных модулях МКС с помощью специально разработанного шумомера — анализатора АУ-1, измеряющего третьоктавные уровни звука в диапазоне частот 12,5–100 000 Гц. Статистическая обработка выборки данных суммарным объёмом более 1000 спектров позволила установить, что реальные шумы в различных секциях значительно превышают предельно допустимые уровни (ПДУ) шума. В частности, в отдельных модулях станции уровни шума лежат выше ПДУ с вероятностью:

- служебный модуль (СМ) — 80–90 % в пределах декады 200–2000 Гц, при этом превышение достигает 12 дБ;
- функционально-грузовой блок (ФГБ) — 60 % в октавах 250 и 500 Гц, более 80 % в октаве 1000 Гц, 70 % в октаве со средней частотой 2000 Гц;
- малый исследовательский модуль МИМ-1 — 80 % в октаве 500 Гц, более 90 % в октавах 1000, 2000 и 4000 Гц (Афанасьев и др., 2015; Кутина и др., 2017).

Важным обстоятельством, которое необходимо учесть при анализе шумового воздействия на человека, представляется спектральный состав окружающего шума. ГОСТ 12.1.003-2014, устанавливающий классификацию шума, характеристики и допустимые уровни

Бычков Виктор Борисович — старший научный сотрудник, кандидат

технических наук, старший научный сотрудник, vbb-1507@mail.ru

Кузнецов Геннадий Николаевич — зав отделом, кандидат физико-математических наук, профессор, skbmortex@mail.ru

Смагин Дмитрий Анатольевич — ведущий инженер, zsystems@yandex.ru

шума на рабочих местах, подразделяет шум по характеру спектра на широкополосный с непрерывным спектром шириной более одной октавы либо тональный, в спектре которого имеются выраженные дискретные составляющие. Тональный характер шума для практических целей (при контроле его параметров на рабочих местах) устанавливается измерением в третьоктавных полосах частот по превышению уровня звукового давления в одной полосе над соседними не менее чем на 10 дБ. Для тонального шума, усугубляющего вредное воздействие на организм, этот стандарт требует принимать как предельно допускаемые уровни, которые на 5 дБ меньше установленных ПДУ. На рис. 1 приведено семейство третьоктавных спектров, полученных в проведённом 06.12.2012 в см измерительном сеансе. Присутствующий во всех пяти спектрах острый пик в третьоктаве 250 Гц как раз и являет собой пример тонального шума. Его уровень приблизительно равен 72 ± 3 дБ, а ПДУ в этом случае следует принять меньшим на 5 дБ от установленного значения 63 дБ, т. е. равным 58 дБ. Превышение нормы, таким образом, если исходить из требований ГОСТ, составит уже 11–17 дБ.

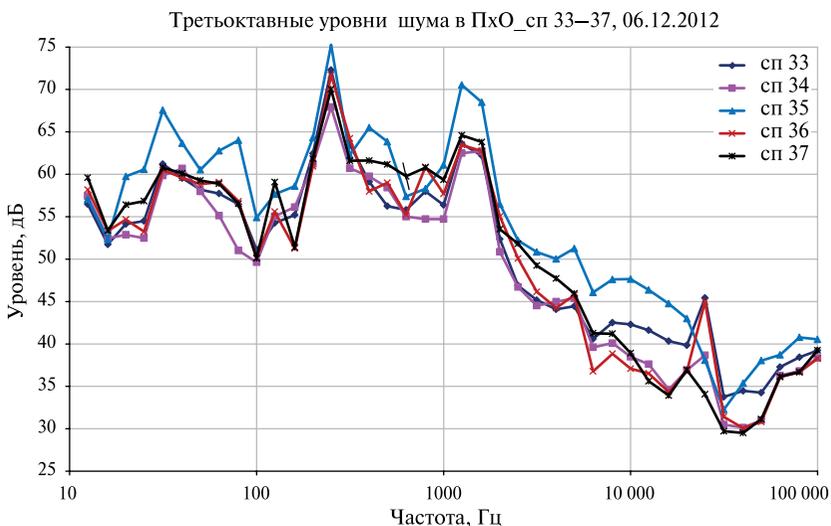


Рис. 1. Третьоктавные спектры шума в пяти точках внутри МКС

Сравнение спектров шума в основных модулях российского сегмента (РС) станции, показывает, что в РС МКС присутствует постоянный акустический фон с близким в разных модулях спектральным составом. Воздействие шума с такими спектральными характеристиками, по мнению специалистов-медиков, приводит к снижению работоспособности космонавтов, вызывает утомление слуха и организма в целом.

Рассматривая медицинские аспекты проблемы, дополнительно отметим: в нормальных земных условиях действие производственного шума ограничивается 8-часовым рабочим днём. В длительном космическом полете привычный для человека период тишины в суточном цикле у экипажа отсутствует, т. е. повышенные шумы действуют на космонавта многие месяцы непрерывно. Отмечается также негативное влияние акустического фона как помехи для речевого общения. Как следствие космонавты и врачи после полётов наблюдают психологический дискомфорт, нарушение сна и нередко возникающую патологию слухового аппарата. Проанализировав состояние слуха тридцати космонавтов, совершивших длительные полёты на станции «Мир», медики установили у семи из них постоянный сдвиг порогов слуха, семнадцать человек испытали временный

сдвиг порогов слуха. При этом акустический фон на рабочих местах станции «Мир» и РС МКС (в начальный период) характеризовался сопоставимыми уровнями, с некоторым даже ухудшением на МКС. Сохранение слуха космонавтов в длительных полётах — это общепризнанная актуальная задача мировой космонавтики.

Эти результаты в сочетании с опубликованными результатами медицинских исследований и выводами других авторов позволяют сделать вывод о необходимости принятия своевременных мер по снижению шумности прежде всего в модулях разрабатываемой орбитальной станции РОС, а также в перспективных ПКА. Оптимальным направлением их реализации следует признать разработку методов и средств активного гашения (Кузнецов и др., 2012, 2014а–в; Пудовкин и др., 2013, 2016, 2019; Kuznetsov et al., 2011), отличающиеся от пассивных методов повышенной эффективностью, возможностью адаптации алгоритма гашения к форме спектра подавляемого шума и существенно меньшими массо-габаритами.

В результате экспериментальных исследований на лабораторных и полунатурных установках в рамках ряда НИР и ОКР, выполненных в Институте общей физики РАН, разработчиками систем активного гашения (САГ) подтверждена возможность реального подавления низкочастотного широкополосного шума на 6–8 дБ и узкополосных составляющих на 8–15 дБ. Отработана технология идентификации моделей передаточных функций, разработаны робастные алгоритмы активного гашения, созданы физические основы для применения адаптивных алгоритмов активного гашения, которые могут «подстраиваться» к изменению режима излучения исходного шумового поля. Разработаны и испытаны применительно к воздуховодам и замкнутому пространству первые версии малогабаритного и высокоэффективного спецвычислителя активного гашения (СВАГ) и прибора контроля режима активного гашения, которые в автоматизированном режиме в случае появления нештатной ситуации отключают САГ или переводят её в ждущий режим, тем самым обеспечивается отсутствие самовозбуждения. Методы и технические средства должны быть разработаны и испытаны с применением отечественных акустических приёмных и излучающих элементов.

Для отработки в натуральных условиях технических средств и методов анализа сигналов представляется целесообразным выполнить целевую НИОКР, которая должна закончиться космическим экспериментом и созданием научно-технического базиса для штатных бортовых средств РС МКС и перспективных ПКА. В итоге должен быть разработан, изготовлен и испытан малогабаритный многофункциональный лётный образец САГ.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- выполнен анализ спектрально-корреляционных характеристик шумов акустических источников в различных зонах МКС и определена их локализация;
- разработан и изготовлен комплект бортовой аппаратуры для приёма, усиления, активного гашения и регистрации подавляемых и управляющих сигналов;
- разработаны и испытаны в лабораторных и натуральных условиях алгоритмы и программное обеспечение для идентификации путей распространения излучаемых (гасимых) и гасящих звуковых сигналов в зоне установки САГ
- разработаны и испытаны в лабораторных и натуральных условиях алгоритмы и программное обеспечение для управления в реальном времени звуковыми полями и реализации задач активного гашения, контроля величины гашения в натуральных условиях, а также контроля за самовозбуждением;
- выполнены эксперименты по активному гашению в реальном времени широкополосного шума и дискретных составляющих

- в лабораторных условиях и разработаны практические рекомендации по созданию летного образца САГ;
- разработана и изготовлена конструкция САГ с учетом ограничений размещения в МКС, произведена установка САГ на модели МКС;
 - выполнены полунатурные эксперименты по активному гашению широкополосного шума и дискретных составляющих на полной модели реального объекта;
 - обучение специалистов заказчика методике установки САГ на объекте и применению САГ с оценкой эффективности гашения;
 - передача САГ с комплектом эксплуатационной документации заказчику;
 - проведены натурные эксперименты на объекте МКС и определена возможность достижения требований по величине гашения;
 - оценка выполнимости требований по массо-габаритам и энергопотреблению;
 - проверка выполнимости автоматического режима гашения и контроля за самовозбуждением работы САГ в режиме автономного акустического робота.

Заключение

Анализ характеристик шумов внутри МКС позволил сделать вывод о необходимости применения методов подавления шумовых полей внутри рабочих отсеков. Полученные в результате разработки и испытаний технические характеристики систем активного гашения позволяют уже сейчас прогнозировать достижение указанных выше значений активного гашения в случае применения аппаратуры весом менее 10 кг с энергопотреблением не более 300–400 Вт. Разработанные комплекты аппаратуры могут быть установлены в каютах космонавтов для обеспечения локального комфорта (режима тишины) или установлены в рабочих или обитаемых объёмах ПКА для активного гашения наиболее мощных акустических составляющих.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Е. В. Шубралову — активного участника обсуждения как постановки задачи, так и полученных результатов.

Литература

- Афанасьев А. В., Бычков В. Б., Куцнев В. Н., Шубралова Е. В.* Акустический фон российского сегмента Международной космической станции: результаты измерений и проблемы его снижения // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 5(84). С. 61–69.
- Кузнецов Г. Н., Кирюхин А. В., Михайлов С. Г. и др.* Проблемы и предварительные результаты испытания систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной средах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 4. № 3. С. 93–107.
- Кузнецов Г. Н., Михайлов С. Г., Смагин Д. А., Кирюхин А. В.* (2014а) Результаты исследования систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной среде // Сб. тр. науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия РАО». СПб., 2014. С. 821–838.
- Кузнецов Г. Н., Пудовкин А. А., Кутаков С. И., Майзель А. Б.* (2014б) Активное гашение широкополосного шума на выходе воздуховода в рабочее помещение // Сб. тр. науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия РАО». СПб., 2014.
- Кузнецов Г. Н., Пудовкин А. А., Кутаков С. И.* (2014в) Результаты исследования активного гашения широкополосного шума внутри магистрального воздуховода // Сб. тр. науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия РАО». СПб., 2014.

- Кутина И. В., Бычков В. Б., Дешевая Е. А., Шубралова Е. В.* О снижении уровня шума в российском сегменте Международной космической станции // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2017. Т. 51. № 2. С. 5–12.
- Пудовкин А. А., Кузнецов Г. Н., Кутаков С. И.* Гашение акустического шума в воздуховодах как реализация стандартной задачи управления // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Метрология гидроакустических измерений»*. 25–27 сент., Менделеево). Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. Т. 2. С. 27–33.
- Пудовкин А. А., Кешков Д. И., Китанов М. Ю. и др.* Экспериментальная оценка величины активного гашения широкополосного шума, проникающего в рабочее помещение // *Докл. Научно-практ. конф. «Гидроакустика»*. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2016. С. 360–371.
- Пудовкин А. А., Кешков Д. И., Китанов М. Ю. и др.* Поглощение шума при его активном гашении в воздуховоде // *Тр. XXXII сессии Российского акустического общества*. М., 2019. С. 100–101.
- Kuznetsov G. N., Mikhailov S. G., Pudovkin A. A., Smagin D. A.* Physical modeling of active cancellation of low-frequency sound signals // *Physics of Wave Phenomena*. 2011. V. 19. No. 3. P. 210–223

RESULTS OF NOISE STUDY WITHIN THE FRAMEWORK OF THE “BAR” SPACE EXPERIMENT AND METHODS THEIR REDUCTIONS

V. B. Bychkov, G. N. Kuznetsov, D. A. Smagin

Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

Keywords: noise inside manned spacecraft, suppression of noise and discrete components by active methods and technical means

ДИСПЕРСНЫЕ АКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М. М. Васильев¹, Л. Г. Дьячков¹, Е. А. Лисин¹, С. Ф. Савин^{1,2},
И. В. Чурило^{1,2}, О. Ф. Петров¹

¹ Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

² Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: активные броуновские частицы, коллоидная плазма, кулоновский кристалл

В последние десятилетия большой интерес научных групп во всём мире сосредоточен вокруг исследований сильновзаимодействующих кулоновских систем. В качестве отдельного класса открытых систем можно выделить системы так называемых активных броуновских частиц, т. е. частиц, способных преобразовывать энергию, получаемую извне, в энергию собственного (не теплового) движения (Bechinger et al., 2016). В качестве примера «природных» активных броуновских частиц можно выделить, например, подвижные клетки (Selmecki et al., 2008) или многоклеточные живые организмы (Komin et al., 2004). Диапазон искусственных активных частиц широк; в основном, это системы коллоидов с химически активной поверхностью (Golestanian et al., 2007; Howse et al., 2007), перспективным представляется также изучение активных наночастиц (Raxton et al., 2004). Исследование самоорганизации в системах активных частиц в последние годы вызывает особенный интерес. Так, актуальной становится задача оптимизации транспортных процессов в активных средах (Chen et al., 2015).

В космическом эксперименте «Кулоновский кристалл» проведены исследования динамики сильновзаимодействующих заряженных макрочастиц и образования ими анизотропных структур в условиях микрогравитации. Исследован разлёт пылевого кластера из $\sim 10^3$ частиц, когда силы кулоновского отталкивания между частицами превышают силы молекулярного сцепления между ними. Исследовано формирование плотных кластеров в магнитной ловушке и образование цепочечных структур из диамагнитных макрочастиц при наложении неоднородного электрического поля в условиях микрогравитации. Результаты космического эксперимента «Кулоновский кристалл» по исследованию формирования пространственно-упорядоченных структур диамагнитных частиц легли в основу нового метода для формативной трёхмерной биофабрикации тканевых конструкций, осуществляемой методом программируемой самосборки живых тканей и органов в условиях земного притяжения и условиях микрогравитации посредством неоднородного магнитного поля (Parfenov et al., 2018).

Васильев Михаил Михайлович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, vasiliev@ihed.ras.ru

Дьячков Лев Гаврилович — главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, dyachk@mail.ru

Лисин Евгений Александрович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ealisin@ya.ru

Савин Сергей Федорович — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, sergey.savin@rsce.ru

Чурило Игорь Владимирович — начальник отдела, кандидат технических наук, igor.churilo@rsce.ru

Петров Олег Федорович — главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, проф., академик РАН, ofpetrov@ihed.ras.ru

В развитие космического эксперимента «Кулоновский кристалл» ведётся подготовка космических экспериментов «Кулон-магнит» и «Кулон-плазма». В качестве дисперсных материалов в этих экспериментах будут использованы частицы, способные поглощать лазерное излучение и преобразовывать в кинетическую энергию собственного движения.

В рамках космического эксперимента «Кулон-магнит» формирование структур активных броуновских частиц в магнитной ловушке будет исследовано в атмосфере инертного газа и жидкости (классический коллоид). В эксперименте «Кулон-плазма» формирование структур и их удержание будет осуществлено в электромагнитной ловушке в плазме газового разряда низкого давления.

В рамках данных экспериментов будет изучаться характер изменения энтропии и потоков энтропии (их уменьшение или возрастание) для активных броуновских (заряженных) частиц, левитирующих в магнитных ловушках, а также коллоидной плазме при воздействии лазерного излучения. Будут изучены механизмы движения активных броуновских частиц; формирование случайного, броуновского или направленного движения.

В целом, понимание общих свойств и коллективного движения активных броуновских частиц ставит фундаментальные и сложные вопросы для неравновесной статистической физики. Так, в ближайшем будущем могут быть созданы новые материалы, сформированные путём активной самосборки на основе активных микроскопических компонентов, таких как самодвижущиеся коллоидные частицы, и, таким образом, может быть создано новое направление в материаловедении. Вместе с тем, изучение активных броуновских частиц стимулирует развитие направления активной транспортировки микро- и нанообъектов как в технологических процессах, так и в медицинских приложениях.

Литература

- Bechinger C., Leonardo R.Di, Löwen H. et al.* Reviews of modern physics. 2016. V. 88. Iss. 4. Article 045006.
- Chen K., Wang Bo, Granick S.* Memoryless self-reinforcing directionality in endosomal active transport within living cells // Nature Materials. 2015. V. 14. P. 589–593.
- Golestanian R., Liverpool T.B., Ajdari A.* Designing phoretic micro- and nanoswimmers // New J. Physics. 2007. V. 9. Article 126.
- Howse J. R., Jones R. A. L., Ryan A. J. et al.* Self-Motile colloidal particles: From directed propulsion to random walk // Physical Review Letters. 2007. V. 99(4). Article 048102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.048102>.
- Komin N., Erdmann U., Schimansky-Geier L.* Random walk theory applied to daphnia motion // Fluctuation and Noise Letters. 2004. V. 4(1). P. 151–159. <https://doi.org/10.1142/S0219477504001756>.
- Parfenov V., Koudan E. V., Bulanova E.A. et al.* Scaffold-free, label-free and nozzle-free biofabrication technology using magnetic levitational assembly // Biofabrication. 2018. V. 10(3). Article 034104. DOI: 10.1088/1758-5090/aac900.
- Paxton W. F., Kistler K. C., Olmeda C. C.* Catalytic nanomotors: Autonomous movement of striped nanorods // J. American Chemical Society. 2004. V. 126(41). P. 13424–13431. DOI: 10.1021/ja047697z.
- Selmeczi D., Li L., Pedersen L. I. I. et al.* Pedersen et al. Cell motility as random motion: A review // European Physical J. Special Topics. 2008. V. 157. P. 1–15. DOI: 10.1140/epjst/e2008-00626-x.

DISPERSE ACTIVE SYSTEMS: RESULTS AND PROSPECTS OF SPACE RESEARCH

M. M. Vasiliev¹, L. G. Dyachkov¹, E. A. Lisin¹, S. F. Savin^{1,2}, I. V. Churilo^{1,2}, O. F. Petrov¹

¹ Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

² S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: active Brownian particles, dusty plasma, coulomb crystal

ГОМЕОСТАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ОРГАНИЗМА: ОТ НАУЧНОЙ ИДЕИ К СТРАТЕГИИ СОХРАНЕНИЯ И УКРЕПЛЕНИЯ ЗДОРОВЬЯ КОСМОНАВТОВ

Г. Ю. Васильева

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: гомеостаз, адаптация, факторы космического полёта

Научный поиск в области космической медицины основной своей целью ставит получение знаний, направленных на сохранение здоровья космонавтов и поддержание их физической и психической работоспособности в сложных условиях космического полёта (КП). Медико-биологические исследования, которые были начаты задолго до полёта Юрия Алексеевича Гагарина и уникальных полётов первого десятилетия пилотируемой космонавтики, были направлены на обеспечение максимальной защиты жизни космонавтов и выживания при возникновении экстремальных ситуаций, создание систем жизнеобеспечения, а также на совершенствование системы медицинского отбора и стандартизацию медицинского обследования участников КП.

При этом основоположники космической медицины в нашей стране — В. И. Яздовский, Н. Н. Гуровский, В. В. Парин, И. С. Балашовский, А. М. Генин, И. М. Хазен, О. Г. Газенко и многие их соратники и ученики в своей работе опирались на ключевые понятия физиологии человека. Базовыми положениями для отечественной космической биологии и медицины стали предложенная Клодом Бернардом в 1864 г. (Bernard, 1865) и получившая развитие в работах Брэдфорда Кеннона (Cannon, 1932) теория постоянства внутренней среды (гомеостаза) и сформулированное П. К. Анохиным понятие о функциональных системах организма (Анохин, 1970).

По мере развития пилотируемой космонавтики и достижения целей в области обеспечения поддержания основных функций организма в КП фокус внимания исследователей переходит на определение механизмов функциональных изменений, наблюдаемых в космическом полёте, и выявление физиологических закономерностей реакций организма в ответ на действие как отдельных факторов КП, так и их комплекса. Накопленные в период 70–90-х гг. прошлого века объективные медицинские данные о состоянии здоровья космонавтов во время полётов на кораблях «Союз» и долговременных орбитальных комплексах «Салют» и «Мир», а также огромный объём экспериментальных наблюдений, собранный, в том числе в наземных модельных экспериментах с участием добровольцев-испытателей, нашли своё отражение в ряде публикаций. О. Г. Газенко и А. Д. Егоров обобщили результаты медицинских исследований и предположили, что «...процесс приспособления организма к невесомости обеспечивается саморегуляцией и направлен на сохранение гомеостаза жизненно важных констант». На этой основе ими была разработана схема периодизации процесса приспособления организма человека к невесомости (Газенко, Егоров, 1984).

В эти же годы учёные проводят большое количество целенаправленных исследований для установления роли ключевых систем поддержания гомеостаза организма (сердечно-сосудистой, эндокринной, нервной и иммунной систем; местных и иммунозависимых систем регуляции остеогенеза и системы регуляции водно-электролитного баланса; систем красной крови и гемостаза) и определения

регуляторных механизмов в процессе адаптации организма к факторам КП. Проводятся углублённые исследования водно-электролитного и минерального обмена, метаболических реакций, состояния почек и гистогематических барьеров (Ветрова и др., 1980; Газенко и др., 1986; Григорьев и др., 1976, 1994а, б, 2002).

Полученные в этот период знания находят отражение в разрабатываемых мерах для профилактики негативных последствий действия факторов КП (Kozlovskaya, Grigoriev, 2004). Уникальная российская система профилактики была направлена, в том числе, и на коррекцию неблагоприятных изменений водно-солевого обмена, повышение общей устойчивости организма в длительных КП и снижение ортостатической неустойчивости в ранний послеполётный период (Григорьев и др., 1998; Носков, 1994).

К моменту открытия Международной космической станции (МКС) были выполнены главные задачи медико-биологических исследований — созданы методики отбора и подготовки будущих космонавтов и усовершенствована система медицинского обеспечения для длительных орбитальных полётов (продолжительностью до 437 сут) (Орбитальная..., 2001). Однако стремление человечества к другим планетам потребовало от специалистов по космической медицине получения новых знаний, связанных со снижением риска развития патологических изменений и предупреждения заболеваний у человека при полётах в дальний космос и освоении других планет. Поэтому космические эксперименты на борту МКС необходимо проводить на новом уровне, опираясь на предыдущие результаты исследований, но с применением новых клинико-диагностических методов, в том числе с использованием клеточных и молекулярно-генетических технологий. Это позволит в дальнейшем применять персонализированные подходы в прогнозировании заболеваний космонавтов и профилактике неблагоприятных последствий действия на организм факторов КП.

Для изучения гомеостатических реакций организма при действии на него экстремальных факторов внешней среды российскими исследователями был разработан ряд космических экспериментов (целевых работ), проводящихся на борту МКС, а также в послеполётный реабилитационный период. В числе этих экспериментов «Биохимические механизмы адаптации обмена веществ к условиям космического полёта», «Исследование морфофункциональных свойств клеток крови и интенсивности эритропоэза у человека при воздействии факторов КП», «Исследование водно-солевого обмена и гормональной регуляции волеми в условиях КП», «Исследование нейроэндокринных и иммунологических изменений во время и после космического полета», «Мониторинг обмена веществ и его регуляции, динамики защитных систем организма и экологических факторов во время космических полетов на МКС», «Исследование эффективности фармакологической коррекции минерального обмена в условиях длительного воздействия микрогравитации», «Оценка состояния здоровья и адаптивных резервов человека по сухим пятнам крови методами протеомики, метаболомики и липидомики» и ряд других работ.

В этих экспериментах были поставлены задачи, которые позволяют последовательно проанализировать состояние волюморегуляции и уровня гидратации, динамику перераспределения жидкостных сред организма и изменения состава тела; определить особенности обмена веществ, а также характер метаболических реакций; выявить референтные величины показателей гемостаза для российских космонавтов; оценить динамику ключевых параметров костно-минерального обмена и его регуляции; исследовать взаимосвязь и взаимовлияние нейроиммуноэндокринного и психофизиологического статуса, их гено- и фенотипической детерминированности; исследовать спектр нейроспецифических белков для оценки риска развития

аутоиммунной патологии и дегенеративных изменений нервной системы.

Проведение исследований, направленных на изучение иммунной системы, ставит задачей детально изучить взаимосвязи между основными параметрами врождённого и адаптивного иммунитета, характеризующими иммунную систему как единое целое; определить функциональную способность клеток системы образосознающих рецепторов, Т-, В- и ЕК-лимфоцитов; провести анализ содержания цитокинов в сыворотке крови и определить способность иммунокомпетентных клеток к продукции цитокинов, а также провести анализ интегративных взаимодействий системы иммунитета с физиологическими функциями организма.

Отдельно необходимо отметить включение современных высокотехнологичных методов исследования ОМГС (протеомики, транскриптомики, метаболомики) для анализа полученных в ходе экспериментов биоматериалов (Pastushkova et al., 2013).

Таким образом, поступательное накопление фактического материала, постоянное расширение научных знаний в области космической биологии и медицины в совокупности с новыми методами исследований и анализа данных с применением математических моделей и машинного обучения даст возможность не только определить общие механизмы гомеостатического регулирования функциональных систем, но перейти в дальнейшем к индивидуализации рекомендаций для снижения риска развития неблагоприятных последствий для организма у будущих пионеров сверхдальних космических полётов.

Работа выполнена в рамках темы 65.1 РАН.

Литература

- Анохин П. К.* Теория функциональной системы // *Успехи физиол. наук.* 1970. Т. 1. № 1. С. 19–54.
- Ветрова Е., Дроздова Т., Тигранян Р., Шульженко Е.* Ферменты энергетического метаболизма при совместном воздействии на организм моделируемой невесомости и гравитационных перегрузок // *Косм. биол. и авиакосм. медицина.* 1980. Т. 15. № 5. С. 34–38.
- Газенко О. Г., Егоров А. Д.* Гомеостатическая регуляция и адаптация в длительных космических полетах // *Физиол. проблемы адаптации.* Тарту, 1984. С. 19–27.
- Григорьев А. И., Козыревская Г. И., Наточин Ю. В. и др.* Обменно-эндокринные процессы // *Косм. полеты на кораблях «Союз».* Биомед. исслед. / ред. О. Г. Газенко, Л. И. Какурин, А. Г. Кузнецов. М.: Наука, 1976. С. 266–303.
- Газенко О. Г., Наточин Ю. В., Григорьев А. И.* Водно-солевой гомеостаз и космический полет // *Проблемы косм. биологии* / ред. А. М. Уголев, В. Л. Свидерский. 1986. Т. 54. 240 с.
- Григорьев А. И., Воложин А. И., Ступаков Г. П.* (1994а) Минеральный обмен у человека в условиях измененной гравитации // *Проблемы косм. биологии.* 1994. Т. 74. 216 с.
- Григорьев А. И., Носков В. Б., Попова И. А. и др.* (1994б) Влияние длительного космического полета на биохимический статус человека // *Клин. лаб. диагностика.* 1994. Т. 1994. № 1. С. 19–22.
- Григорьев А. И., Носков В. Б., Поляков В. В. и др.* Динамика реактивности системы гормональной регуляции при воздействии ОДНТ во время длительного космического полёта // *Авиакосм. и эколог. медицина.* 1998. Т. 32. № 3. С. 18–23.
- Григорьев А. И., Хантун К., Моруков Б. И. и др.* Исследования метаболизма. Изучение взаимодействия эндокринной, почечной системы и циркуляторных факторов в поддержании объемного и электролитного гомеостаза в условиях микрогравитации: российско-американский проект // *Орбитальная станция «Мир».* Косм. биология и медицина. Т. 2. Медико-биолог. эксперименты. М.: Слово, 2002. Гл. 3. С. 69–85.

- Носков В. Б.* Фармакологическая гипогидратация как средство повышения работоспособности человека в ранний период невесомости // Авиакосм. и эколог. медицина. 1994. Т. 28. № 4. С. 9–12.
- Орбитальная станция «Мир»: Т. 1. Медицинское обеспечение длительных космических полетов. М., 2001. 660 с.
- Bernard C.* Introduction à l'étude de la médecine expérimentale. Paris: Flammarion, 1865.
- Cannon W. B.* The Wisdom of the Body. N. Y.: W. W. Norton and Company, 1932. P. 177–201.
- Kozlovskaya I. B., Grigoriev A. I.* Russian system of countermeasures on board of the International space station (ISS): the first results // Acta Astronautica. 2004. V. 55. No. 3–9. P. 233–237.
- Pastushkova L. Kh., Kireev R. S., Kononikhin A. S. et al.* Detection of Renal Tissue and Urinary Tract Proteins in the Human Urine after Space Flight // PloS One. 2013. V. 8. Article e71652.

HOMEOSTATIC REGULATION OF PHYSIOLOGICAL BODY FUNCTIONS: FROM SCIENTIFIC IDEA TO COSMONAUTS HEALTH CONSERVATION AND PROMOTION STRATEGY

G. Yu. Vassilieva

Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: homeostasis, adaptation, factors of space flight

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ВЕЛИКОЕ НАЧАЛО» НА РС МКС

О. Н. Волков

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: Международная космическая станция, космические эксперименты, снимки Земли, результаты космических исследований

Рассматриваются особенности проведения образовательного космического эксперимента (КЭ) «Великое начало» осуществляемого на Международной космической станции (МКС) с целью популяризации достижений отечественной пилотируемой космонавтики. Постановщиком эксперимента выступает ПАО «Ракетно-космическая корпорация „Энергия“ имени С. П. Королёва». Научный руководитель — доктор технических наук, профессор М. Ю. Беляев (РКК «Энергия»). Конечными потребителями результатов эксперимента и участниками КЭ «Великое начало» стали различные организации: Институт географии РАН, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), другие вузы страны.

В рамках эксперимента разрабатываются технологии использования результатов космической деятельности в образовательных целях и народном хозяйстве, доведения результатов экспериментов до широких слоёв населения и органов власти.

Одной из задач эксперимента стала демонстрация достижений отечественной пилотируемой космонавтики с помощью научно-образовательных видеосюжетов о научных исследованиях, реализуемых на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). В рамках эксперимента проводится подготовка сценариев научно-образовательных видеосюжетов с борта РС МКС, разрабатываются методические материалы как для образовательных целей, так и для целей хозяйственной деятельности с использованием результатов космических исследований (Беляев и др., 2016; Волков и др., 2013, 2015).

Ещё одна задача эксперимента — приобщение студентов и школьников к практической работе с космическими снимками Земли, которые были выполнены космонавтами по запросу школьников и студентов, участвующих в проекте «Взгляд с орбиты». По заявкам участников проекта космонавты фотографируют объекты на земной поверхности. На основании выполненных космонавтами снимков Земли участники проекта проводят различные исследования. Школьники, студенты знакомятся с возможностями использования в хозяйственной деятельности результатов космических полётов. Таким образом, отрабатывается методика использования учащимися космических снимков Земли в области географии, сельского хозяйства, экологии и др. (Беляев, 2019; Беляев, Поялков, 2019).

Для реализации этих задач в 2011 г., в год 50-летия полёта первого человека в космос, был создан многостраничный интернет-портал «Планета Королёва» (<https://gagarin.energia.ru/>), который предоставляет пользователям информацию на русском и английском языках.

Интернет-портал «Планета Королёва» имеет разделы, на которых размещаются образовательные интервью ведущих специалистов пилотируемой космонавтики, репортажи космонавтов с борта РС МКС, архивные материалы, редакционные статьи, посвящённые

знаменательным датам и актуальным вопросам в области пилотируемой космонавтики, фотографии и т. д. Интервью, как и репортажи, размещаются на портале как видеofайлы. Кроме того, на страницах портала происходит проведение викторин, конкурсов, анкетирования и т. д.

На рис. 1 представлена главная страница интернет-портала «Планета Королёва».



Рис. 1. Главная страница интернет-портала «Планета Королёва»

На рис. 2 представлен именной сертификат победителя викторины «Задай свой вопрос экипажу МКС», подписанный российским космонавтом М. В. Тюриным.



Рис. 2. Именной сертификат победителя викторины «Задай свой вопрос экипажу МКС»

На рис. 3 Космонавт С. В. Корсаков демонстрирует аппаратуру видеоспектральной системы (ВСС) в рамках проведения образовательного репортажа «Изучение Земли космонавтами орбитальной станции».



Рис. 3. Космонавт С. В. Корсаков демонстрирует аппаратуру ВСС

На рис. 4 представлен логотип проекта «Взгляд с орбиты»



Рис. 4 Логотип проекта «Взгляд с орбиты»

На рис. 5 представлен пример фотоснимков Земли, выполненных космонавтами с борта МКС по заявкам участников проекта «Взгляд с орбиты».



Рис. 5. Фотографии кольцевых структур, кругов на льду оз. Байкал для Натальи Верстаковой, ученицы 8-го класса из Москвы

Основными результатами эксперимента выступают образовательные видеосюжеты о космических исследованиях, размещённые на портале «Планета Королёва», а также фотоснимки Земли, полученные с борта МКС и переданные участникам проекта «Взгляд с орбиты» для проведения дальнейших исследований.

Видеосюжеты, выполняемые космонавтами на борту РС МКС, в основном посвящены различным научным исследованиям, которые проводятся на борту РС МКС и научной аппаратуре для этих исследований, а также роли космонавтов в них. С помощью портала «Планета Королёва» эта и другая информация доводится до широкой аудитории. Кроме того, сами космонавты не раз отмечали, что после

записи видеосюжетов им самим становится более понятно устройство, принцип работы научной аппаратуры, её назначение и цели проведения эксперимента. Данные знания помогают экипажу в дальнейшей работе при проведении экспериментов, монтаже научной аппаратуры, ремонтно-восстановительных работах и др.

Видеосюжеты используются:

- в образовательном процессе, как в рамках школьной программы, так и на дополнительных и факультативных занятиях,
- при разработке научно-методической и учебной литературы, к примеру, как электронной базы для использования в образовательном процессе.

Кроме того, видеосюжеты привлекают широкую общественность к деятельности российских учёных и космонавтов на борту Российского сегмента Международной космической станции (Алифанов, Беляев, 2021; Тарасова, 2018).

Для популяризации образовательных материалов портала и большего распространения информации в интернете на видеоканале пресс-центра РКК «Энергия» в YouTube создан отдельный раздел с названием «Планета Королёва».

За период проведения эксперимента создано более тридцати видеосюжетов с рассказами космонавтов о космических экспериментах, проводимых на МКС. Представлены многочисленные архивные материалы, интервью, статьи, посвящённые знаменательным датам и актуальным вопросам в области пилотируемой космонавтики, новости и многое другое.

Литература

- Алифанов О. М., Беляев М. Ю. МКС для образования // 1-я Международ. конф. по космическому образованию «Дорога в космос»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2022. С. 15–20.
- Беляев М. Ю. Проблемы управления при проведении экспериментов на российском сегменте МКС и участие МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана в их решении // Лесной вестн. 2019. № 4. Т. 23. С. 5–11.
- Беляев М. Ю., Поярко Н. Г. Участие космического факультета Мытищинского филиала Московского Государственного технического университета имени Н. Э. Баумана в исследованиях и экспериментах на Международной космической станции // 1-я Всерос. конф. по космич. образованию «Дорога в космос». М.: ИКИ РАН, 2019. С. 39–45.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Иконникова Н. В. Популяризация достижений отечественной пилотируемой космонавтики в области науки и техники // Эффект от использования МКС для России. М.: ЦНИИмаш, 2016.
- Волков О. Н., Иконникова Н. В., Минакова Н. С., Беляев М. Ю. Проведение образовательного эксперимента Great Start на МКС // Материалы Науч. чтений памяти К. Э. Циолковского. Калуга, 2013.
- Волков О. Н., Беляев М. Ю., Кинель А. Е., Иконникова Н. В. Популяризация достижений российской пилотируемой космонавтики с помощью интернет технологий в эксперименте «Великое начало» // Материалы Международ. научно-практ. конф. «Науч. исслед. и эксперименты на МКС». М., 2015. С. 182.
- Тарасова Н. А. Космический эксперимент «Великое начало» // Эффект от использования МКС для России. М.: ЦНИИмаш, 2018.

THE EDUCATIONAL EXPERIMENT “GREAT START” ON THE RS ISS

O. N. Volkov

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: International Space Station, space experiments, pictures of the Earth, results of space research

ИЗУЧЕНИЕ СМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ МКС В КЭ «СРЕДА-МКС»

О. Н. Волков¹, М. И. Монахов¹, М. Ю. Беляев^{1,2}

¹ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, Королёв, Московская обл., Россия

² Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищи, Россия

Ключевые слова: микровозмущения, колебания, трекинг, малоинерционные элементы конструкции, видеосъёмка

Работа выполнена в рамках космического эксперимента «Среда-МКС» (постановщик эксперимента — РКК «Энергия», научный руководитель КЭ — доктор технических наук М. Ю. Беляев), в котором изучаются динамические характеристики орбитального комплекса Международная космическая станция (МКС) как технической среды для проведения различных исследований.

В настоящей работе предложен основанный на анализе видеоинформации способ (Беляев и др., 2015, 2016) определения колебаний и возмущений деформаций элементов конструкции комплекса МКС в процессе её орбитального полёта.

Для получения видеоинформации используется имеющаяся на борту российского сегмента (РС) МКС фотоаппаратура Nikon D5. Фотоаппаратура жёстко закрепляется на внутренней стороне одного из иллюминаторов РС МКС посредством специального кронштейна, после чего выполняется видеосъёмка запланированного объекта — внешнего элемента конструкции комплекса МКС. Результаты съёмки в виде файлов пересылаются по радиоканалу на Землю для обработки.

Способ обработки основан на использовании специализированного программного обеспечения, позволяющего отслеживать треки выбранных тестовых точек в картинной плоскости изображения, получаемого в процессе видеосъёмки. Таким образом, числовые характеристики треков выражаются в горизонтальных и вертикальных координатах пикселей трека в кадре видео.

Характер треков позволяет судить о наличии и особенностях колебательных движений объектов съёмки на интервале наблюдения.

По результатам обработки полученных данных выявлена связь колебательных движений элементов конструкции станции с выполнением экипажем физических упражнений на беговой дорожке и велоэргометре.

Особенный интерес представляет собой возможность исследовать поведение периферийных и малоинерционных элементов конструкции (Беклемишев и др., 2021), поскольку характер их колебаний не определяется бортовыми акселерометрами, размещёнными внутри модулей МКС.

Показано, что зрительная информация о колебаниях внешних элементов конструкции станции позволяет получить содержательные количественные характеристики этих колебаний.

Волков Олег Николаевич — главный специалист, oleg.n.volkov@rsce.ru

Монахов Михаил Иванович — ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, mihail.monahov@rsce.ru

Беляев Михаил Юрьевич — научный руководитель, доктор технических наук, профессор, mikhail.belyaev@rsce.ru

Литература

- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Монахов В. В. Способ определения деформации корпуса космического аппарата в полёте. Патент на изобретение № 2605232 от 25.11.2016. Заявка на изобретение № 2015122901 от 15.06.2015.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Монахов М. И. Отработка методики определения деформаций корпуса МКС фотографическим методом // Тр. 51-х Науч. чтений К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники», Калуга, 20–22 сент. 2016. Казань, 2017. С. 64–71.
- Беклемишев Н. Д., Беляев М. Ю., Богуславский А. А. и др. Исследование колебаний элементов конструкции космической станции по видеoinформации // Косм. исслед. 2021. Т. 59. № 3. С. 218–234.

STUDY OF DISPLACEMENTS OF ISS DESIGN ELEMENTS IN SPACE EXPERIMENT “ISS ENVIRONMENT”

O. N. Volkov¹, M. I. Monakhov¹, M. Yu. Belyaev^{1,2}

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

² Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytischki, Russia

Keywords: micro-disturbances, vibrations, tracking, low-inertia structural units, video shooting

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ. ЭКСПЕРИМЕНТ OASIS

П. В. Долганов

Институт физики твёрдого тела имени Ю. А. Осипяна РАН,
Черноголовка, Московская обл., Россия

Ключевые слова: жидкие кристаллы, самоорганизация, топологические дефекты

Приводится информация о космическом эксперименте OASIS (*англ.* Observation and Analysis of Smectic Islands in Space, Наблюдение и анализ смектических островов в космосе), проводившемся на Международной космической станции (МКС) с июля 2015 г. по март 2016 г. В исследованиях принимали участие сотрудники Университета Колорадо (*англ.* Colorado State University, США), Университета Отто фон Герике (*нем.* Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Магдебург, Германия), Институт физики твёрдого тела РАН (ИФТТ РАН) и Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН (Черноголовка, Россия). Установка для космического эксперимента была изготовлена американской группой и доставлена на МКС. Техническое сопровождение эксперимента на МКС выполнялось американскими астронавтами и российскими космонавтами (рис. 1).



Рис. 1. Геннадий Падалка устанавливает видеокамеру, используемую для регистрации изображений образцов в космическом эксперименте OASIS, американский сектор МКС (Glenn Research Center, NASA, <https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/msg/oasis/>)

Экспериментальные данные, получаемые на МКС, в реальном времени транслировалось одновременно в Университет Колорадо, Университет Отто фон Герике и ИФТТ РАН. Американскими и немецкими учёными выполнялись предварительные эксперименты, в том числе с использованием параболических полётов на самолёте Airbus A300 Zero G и суборбитальных ракет TEXUS. Американская и немецкая группа считаются наиболее известными коллективами в исследованиях жидких кристаллов в США и Западной Европе. Группа из Черноголовки была приглашена участвовать в экспериментах, поскольку она имеет большой опыт исследований жидкокристаллических наноплёнок, самоорганизации в жидких кристаллах. Вклад российской группы состоял в проведении предварительных лабораторных исследований и совместном с американскими и немецкими учёными анализе экспериментальных данных. Часть

Долганов Павел Владимирович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, pauldol@issp.ac.ru

полученных на МКС результатов опубликована и докладывалась на конференциях в совместных с российскими учёными публикациях (Dolganov et al., 2018a, b, 2021; Park et al., 2018a–c; Stannarius et al., 2018).

Насколько нам известно, проведённый эксперимент OASIS представляется первым экспериментом на МКС по изучению жидких кристаллов. Было выбрано одно из наиболее перспективных направлений фундаментальных исследований жидких кристаллов: жидкокристаллические наноплёнки. Объектом исследования стали свободно подвешенные, т.е. не имеющие подложки, наноплёнки (сверхтонкие плёнки) смектических жидких кристаллов, приготовленные в виде сферических пузырей (рис. 2). Пленки обладают одномерным трансляционным (слоевым) и ориентационным упорядочением, в плоскости слоёв представляют собой двумерную жидкость. Одним из активно развивающихся направлений исследований жидкокристаллических плёнок является изучение ансамблей частиц, находящихся в плёнках, так называемых жидкокристаллических коллоидов. В плёнках могут находиться частицы различного типа: участки того же материала большей толщины, чем окружающая плёнка или острова, давшие название космическому эксперименту, участки меньшей толщины, чем плёнка или дырки, капли изотропной жидкости. Эти частицы можно создавать в плёнках контролируемым образом. Поведение таких частиц в анизотропной жидкокристаллической среде интересно само по себе, а также позволяет получить важную информацию о физике жидких кристаллов и сверхтонких плёнок. Исследования в условиях микрогравитации позволяют избежать осаждения частиц, находящихся в плёнках, и существенно расширить круг доступных для изучения задач.

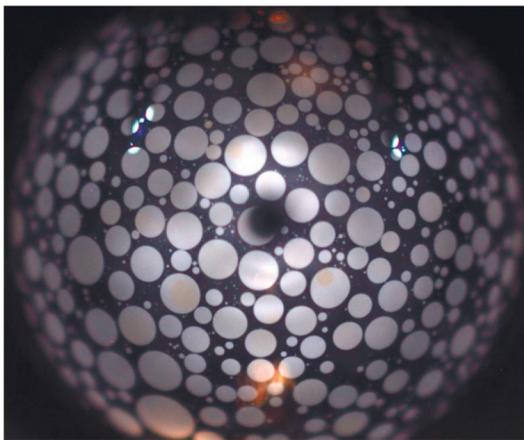


Рис. 2. Смектическая наноплёнка в форме сферического пузыря. Толщина плёнки два молекулярных слоя. Круглые светлые участки — острова толщиной около 10 молекулярных слоёв. Диаметр пузыря около 15 мм (Glenn Research Center, NASA, <https://www1.grc.nasa.gov/space/iss-research/msg/oasis/>), (Dolganov et al., 2021)

Перед началом экспериментов в космосе в ИФТТ РАН были проведены предварительные эксперименты в земных условиях (Долганов и др., 2021). Эти эксперименты проводились на свободно подвешенных плоских плёнках, приготовленных на специальной рамке или на круглом отверстии в пластине. Для приготовления плёнок были использованы жидкокристаллические материалы со смектической А (SmA), смектической С (SmC), сегнетоэлектрической (SmC*) фазами. Измерение спектров отражения плёнок позволяет определять их толщину (число молекулярных слоёв в наноплёнке)

с абсолютной точностью. Изучалось поведение смектических островов, дырок, частиц изотропной жидкости, находящихся в свободно подвешенных плёнках. Проанализирована форма мениска капель жидкости, его отличие от мениска вблизи твёрдых частиц и у плоской поверхности, наблюдались структурные неустойчивости, приводящие к кардинальному изменению формы мениска.

Эксперименты на МКС выполнялись в американском секторе на установке, расположенной в боксе Microgravity Science Glovebox (модуль Destiny, см. рис. 1). Образец приготавливался внутри термостатированной камеры путём выдувания воздуха через тонкий капилляр с небольшим количеством жидкого кристалла. Оборудование позволяло проводить одновременную видеосъёмку всего образца и малого участка плёнки с большим увеличением, что давало возможность исследовать динамику процессов, происходящих на разных пространственных масштабах. Использовались несколько типов жидкокристаллических веществ, образующих SmA фазу (длинные оси молекул перпендикулярны плоскости смектических слоёв), полярную SmC* и неполярную SmC фазу (длинные оси молекул наклонены относительно нормали к плоскости слоёв). Для получения в образце участков другой толщины (островов или дырок) на поверхность образца направлялся поток воздуха с помощью тонких трубок, что приводило к неустойчивости плёнки однородной толщины. С помощью потока воздуха также можно было вызывать вращение пузыря. Капли изотропной жидкости образовывались в плёнке при её нагреве вблизи температуры плавления жидкого кристалла. Число и размер капель можно было контролировать, изменяя скорость нагрева. Конструкция установки позволяла создавать контролируемый градиент температуры в различных направлениях. Сферическая форма образцов даёт возможность минимизировать влияние границ плёнки на её поведение. Проведение большого объёма экспериментов в условиях микрогравитации позволило изучить термокапиллярные эффекты, явления самоорганизации островов, дырок, капель изотропной жидкости, динамику огрубления ансамблей островов и дырок, коалесценции частиц. При изучении коллективного поведения частиц наблюдался ряд нетривиальных эффектов. Обнаружено, что капли жидкости могут образовывать гексагональную структуру с равновесным межчастичным расстоянием в несколько раз превышающим размеры капель (рис. 3).

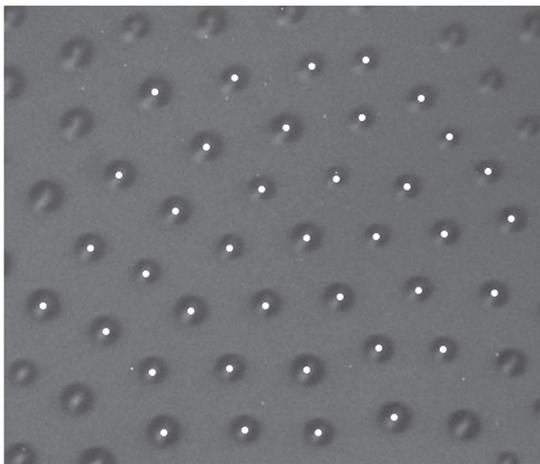


Рис. 3. Двумерная структура с гексагональным упорядочением, образованная каплями изотропной жидкости в наноплёнке жидкого кристалла. Белыми точками отмечены центры капель. Горизонтальный размер фотографии 230 мкм

Проведён анализ пространственного распределения капель в структуре в первых трёх координационных окружностях. Распределение положений капель по азимутальному направлению имеет большую относительную ширину, чем по радиальному направлению. Механизм образования и стабилизации гексагональной структуры может быть связан с деформацией каплями слоевой структуры смектика. Обнаружено нетривиальное динамическое поведение капель с периодическим образованием и разрушением упорядоченной структуры (Dolganov et al., 2021).

Российские участники эксперимента выражают благодарность Центральному научно-исследовательскому институту машиностроения за поддержку исследований.

Литература

- Долганов П. В., Долганов В. К., Кац Е. И.* Аномалии мениска микровключений в свободно подвешенных смектических плёнках // Письма в Журн. Эксперим. и теорет. физики. 2015. Т. 102(4). С. 269–274.
- Dolganov P., Shuravin N., Dolganov V. et al.* (2018a) Ostwald ripening of two-dimensional islands in thin, spherical bubbles of smectic liquid crystal in microgravity // American Physical Society March Meeting. Mar. 5–9, 2018, Los Angeles, California. 2018. Abstract Y53.00002.
- Dolganov P. V., Shuravin N. S., Dolganov V. K. et al.* (2018b) Relaxation dynamics of bola-shaped smectic island in a thin, spherical bubble of smectic C liquid crystal in microgravity // 27th Intern. Liquid Crystal Conference (ILCC2018). Kyoto, Japan, 22–27.07.2018.
- Dolganov P. V., Shuravin N. S., Dolganov V. K. et al.* Transient hexagonal structures in sheared emulsions of isotropic inclusions on smectic bubbles in microgravity conditions // Scientific Reports. 2021. V. 11. Article 19144.
- Park C., Minor E., MacLennan J. et al.* (2018a) Relaxation dynamics of bola-shaped smectic island in a thin, spherical bubble of smectic C liquid crystal in microgravity // American Physical Society March Meeting. Mar. 5–9, 2018, Los Angeles, California. 2018. Abstract S57.00008.
- Park C. S., Minor E. N., MacLennan J. E. et al.* (2018b) Interactions between Chiral Defects and Anisotropic Diffusion of Islands in a Dipolar Chain of Islands in Freely-Suspended Smectic C Liquid Crystal Films // 27th Intern. Liquid Crystal Conference (ILCC2018). Kyoto, Japan, 22–27.07.2018.
- Park C. S., Minor E. N., MacLennan J. E. et al.* (2018c) Ostwald ripening of two-dimensional islands in thin, spherical bubbles of smectic liquid crystal in microgravity // 27th Intern. Liquid Crystal Conference (ILCC2018). Kyoto, Japan, 22–27.07.2018.
- Stannarius R., Trittel T., Harth K. et al.* Droplets and droplet lattices on freely suspended smectic films in microgravity // American Physical Society March Meeting. Mar. 5–9, 2018, Los Angeles, California. 2018. Abstract R46.00010.

LIQUID CRYSTALS. OASIS EXPERIMENT

P. V. Dolganov

Osipyan Institute of Solid State Physics RFS, Chernogolovka, Moscow Region, Russia

Keywords: liquid crystals, self-organization, topological defects

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В КОСМОСЕ НА БОРТУ РС МКС

Р. А. Евдокимов, И. С. Мацак, В. Ю. Тугаенко

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: космический эксперимент, беспроводная передача энергии, лазерное излучение, фотоэлектрический приёмник, оптическая система

В последние десятилетия лазерные технологии нашли достаточно широкое применение в космосе: лазерные дальномеры, лидары, оптические гироскопы, лазерная связь и спектроскопия и пр. Тем не менее, относительно низкий КПД лазеров делал нецелесообразным передачу энергии с борта одного космического аппарата (КА) на другой в лазерном канале. В этой связи данный канал беспроводной передачи энергии рассматривался только в рамках концептуальных проектов космических солнечных электростанций большой мощности для энергоснабжения Земли. Однако значительное улучшение характеристик лазеров и фотоэлектрических приёмников лазерного излучения (включая существенный рост КПД) в последние двадцать лет позволило рассматривать различное применение технологии беспроводной передачи электрической энергии (БПЭЭ) между КА.

В ближайшей перспективе технология БПЭЭ между КА может быть использована в следующих областях:

- энергоснабжение созвездий микроспутников с борта Международной космической станции (МКС) или Российской орбитальной станции (РОС) (Chertok et al., 2011);
- дистанционное энергоснабжение КА для проведения микрогравитационных экспериментов и производства в космосе (КА типа «ОКА-Т») (Евдокимов и др., 2018).

В дальнейшем, после отработки технологии и повышения характеристик систем БПЭЭ они могут применяться с целью:

- энергоснабжения с борта орбитальных КА потребителей на поверхности Луны и других тел Солнечной системы (Марса, астероидов, спутников планет и т.п.), а также отделяемых от основных орбитальных КА модулей в ходе планетных исследований (Евдокимов, Тугаенко, 2019; Hyde et al., 2013; Takeda et al., 2002);
- энергоснабжения межорбитальных буксиров (Грибков и др., 2009).

Возможно также использование элементов этой технологии в наземных средствах БПЭЭ, в частности, для энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов.

Отдельные элементы технологии могут найти применение при создании систем лазерной связи с КА, в исследованиях атмосферы и поверхности Земли посредством лазерного зондирования, в разработке систем дистанционного энергоснабжения потребителей на поверхности Земли из космоса.

Евдокимов Роман Александрович — ведущий научный сотрудник,
Roman.Evdokimov@rsce.ru

Мацак Иван Сергеевич — ведущий научный сотрудник, кандидат
технических наук, ivan.macak@rsce.ru

Тугаенко Вячеслав Юрьевич — главный специалист, доктор технических
наук, Vjatcheslav.Tugaenko@rsce.ru

Необходимым этапом разработки целевых систем дистанционного энергоснабжения КА выступает демонстрация работоспособности основных элементов канала БПЭЭ в условиях космоса. В ПАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» был предложен космический эксперимент (КЭ) по передаче электрической энергии с борта российского сегмента (РС) Международной космической станции на транспортный грузовой корабль «Прогресс» в лазерном канале (КЭ «Пеликан»). Работы по созданию научной аппаратуры (НА) «Пеликан» для выполнения данного эксперимента выполнялись в ПАО «РКК «Энергия» в кооперации со смежными организациями в рамках долгосрочной программы научных экспериментов на РС МКС. Проведение подобного эксперимента в космосе планировалось впервые.

Цель КЭ состоит в отработке технологии БПЭЭ для космического применения в натуральных условиях. Планируется поэтапное увеличение передаваемой электрической мощности с 50–100 до 300–1000 Вт на дальности 1 км, а также демонстрация возможности передачи энергии на дальностях до 5 км.

Схема проведения эксперимента показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема проведения КЭ «Пеликан»

На внешней поверхности многофункционального лабораторного модуля (МЛМ) РС МКС, на двухосевой поворотной платформе (ДПП) размещается передающая часть системы БПЭЭ — блок «Пеликан-Н».

Помимо системы генерации лазерного излучения (СГЛИ) блок «Пеликан-Н» включает (рис. 2): систему обнаружения, наведения и удержания приёмника излучения (СОНУ), систему формирования и наведения пучка излучения (СФИН), а также системы питания и управления (СПУ) и обеспечения условий функционирования (СОУФ).

Блок фотоэлектрического приёмника-преобразователя (блок «Пеликан-ФПП»), включающий приёмник излучения и систему датчиков позиционирования пучка (СДПП), устанавливается на транспортном грузовом корабле (ТГК) «Прогресс», на блоке мишени со специальными призматическими отражателями, обеспечивающими обратную связь для СОНУ.

Эксперимент проводится после доставки ТГК «Прогресс» грузов на МКС. Перед отстыковкой на крышку люка корабля (после демонстрации стыковочного агрегата) устанавливается блок «Пеликан-ФПП». После отхода корабля от станции на безопасное расстояние обеспе-

чиваются его повторные сближения с МКС на расстояние до 1000 м. Процесс поиска приёмника излучения, его захват и сопровождение с помощью системы СОНУ может осуществляться на расстояниях от 800 до 5500 м. Время нахождения ТГК «Прогресс» в рабочей зоне СОНУ для выбранной баллистической схемы составит около 50 мин. Длительность собственно сеанса БПЭЭ, т. е. продолжительность работы СГЛИ на максимальной мощности, составит от 1,5 до 5 мин на разных этапах КЭ.

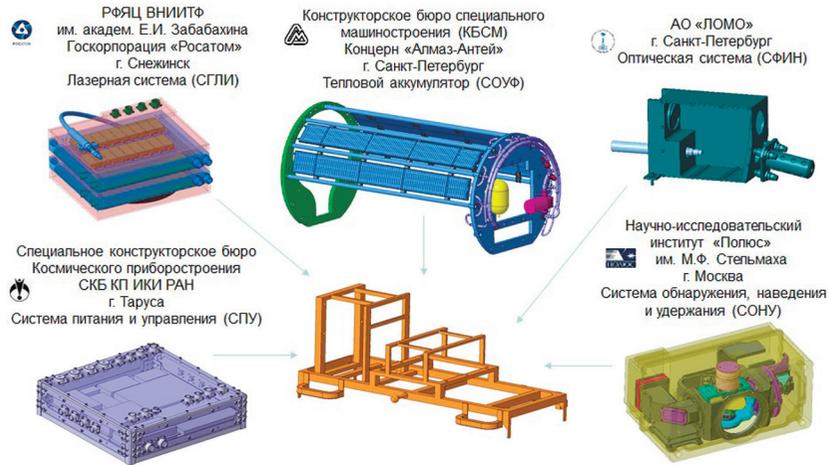


Рис. 2. Научная аппаратура «Пеликан» (блок «Пеликан-Н», составные части)

Продолжительность сеанса ограничивается возможностями СПУ и СОУФ по обеспечению электропитания и охлаждению СГЛИ. Количество сеансов с одним ТГК «Прогресс» (на одном этапе КЭ) — не менее 5. Интервал между сеансами — не менее суток для обеспечения подзарядки аккумуляторных батарей СПУ, сброса излучением тепловой энергии, накопленной тепловыми аккумуляторами СОУФ, а также обеспечения требуемых условий сближения ТГК «Прогресс» и станции в следующем сеансе.

В начале сеанса КЭ блок «Пеликан-Н» наводится с помощью ДПП в область небесной сферы, где по баллистическим данным ожидается появление ТГК «Прогресс». Осуществляется поиск, захват и сопровождение блока «Пеликан-ФПП» с помощью СОНУ. Эта система сканирует лазерным лучом малой мощности (0,5 Вт) с длиной волны 0,665 мкм участок небесной сферы размером $50 \times 50^\circ$. Лазерное излучение, отражённое от блока мишени, формирует в приёмном канале системы изображение. Его обработка позволяет вычислить координаты центра приёмника с погрешностью не более 60 угл. с. По данным ДПП с помощью ДПП осуществляется сопровождение приёмника. Погрешность наведения ДПП по каждой из осей не более 10 угл. мин (грубое наведение).

Перед включением СГЛИ на полную мощность выполняется прецизионное наведение с помощью СФИН и пучка лазерного излучения СГЛИ, функционирующей на минимальной мощности. СФИН является двухзеркальной оптической системой с внеосевым оптоволоконным вводом излучения, генерируемого СГЛИ, формирующей пучок излучения диаметром не более 0,3 м на расстоянии 1000 ± 200 м. СФИН обеспечивает также прецизионное наведение пучка излучения по двум осям в диапазоне $\pm 17,5$ угл. с. После выполнения этапа грубого наведения, СФИН по специальному алгоритму осуществляет сканирование пучком излучения СГЛИ на минимальном уровне оптической мощности (50 Вт) участка небесной сферы размером ± 5 мрад по двум осям. При попадании лазерного

излучения на приёмник датчики СДПП позволяют определить плотность потока в местах их размещения, что даёт возможность уточнить положение пучка относительно центра приёмника.

На разных этапах КЭ в составе СГЛИ используется либо диодный лазер с длиной волны 808 нм (оптическая мощность — около 200 Вт), либо оптоволоконные лазеры с длиной волны 1064 нм (оптической мощностью — до 1800 Вт). Требуемая апертура главного зеркала СФИН при использовании в СГЛИ диодного лазера составит около 300 мм, а при использовании оптоволоконного лазера — только около 40 мм.

Электрическая мощность, получаемая блоком «Пеликан-Н» от РС МКС через интерфейсы платформы ДПП, не может превосходить 400 Вт. Однако требуемая мощность электропитания данного блока достигает 6000 Вт. Поэтому в состав блока «Пеликан-Н» включена СПУ с буферными литий-ионными аккумуляторными батареями.

На РС МКС отсутствуют средства, позволяющие отвести тепло от СГЛИ блока «Пеликан-Н» в сеансе КЭ. В этой связи в составе блока присутствует собственная система охлаждения — СОУФ, отводящая выделяемую тепловую мощность с помощью жидкостного контура в блоки теплового аккумулятора (ТА), функционирующие за счёт фазового перехода (плавления) гексадекана. Накопленная в сеансе тепловая энергия затем излучается с внешней поверхности модулей ТА.

Суммарная масса научной аппаратуры «Пеликан» не превосходит 150 кг.

В рамках наземной подготовки проведена отработка ключевых систем научной аппаратуры: лазерной системы киловаттного уровня, оптической системы формирования и наведения лазерного пучка, высокоэффективной системы фотоэлектрического преобразования интенсивного лазерного инфракрасного излучения с КПД ФЭП до 60 %. Разработана уникальная система охлаждения аппаратуры на основе теплового аккумулятора с фазовым переходом. Отработка полноразмерных экспериментальных образцов системы дистанционного энергоснабжения проводилась на созданной в РКК «Энергия» атмосферной 1,5-км трассе.

Литература

- Грибков А. С., Евдокимов Р. А., Сияевский В. В. и др. Перспективы использования беспроводной передачи электрической энергии в космических транспортных системах // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 10. С. 118–123.
- Евдокимов Р. А., Тугаенко В. Ю. Дистанционное энергоснабжение потребителей на поверхности Луны // Изв. РАН. Энергетика. 2019. № 5. С. 3–19.
- Евдокимов Р. А., Корнилов В. А., Лобыкин А. А., Тугаенко В. Ю. Космическая технологическая система с дистанционным энергоснабжением по лазерному каналу // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 9. С. 82–92. DOI: 10.1134/S0207352818090123.
- Chertok B. E., Evdokimov R. A., Legostaev V. P. et al. Remote Electric Power Transfer Between Spacecrafts by Infrared Beamed Energy // AIP Conf. Proc. 2011. V. 1402(1). P. 489–496. DOI: 10.1063/1.3657057.
- Hyde L., Papadopoulos D. P., Murbach M. S. Combining Laser Communications and Power Beaming for use on Planetary Probes // 10th Intern. Planetary Workshop. 2013. 5 p.
- Takeda K., Tanaka M., Hashimoto K., Miura S. Laser power transmission for the energy supply to the rover exploring ice on the bottom of the crater in the lunar polar region // Proc. SPIE. 2002. V. 4632. P. 223–227. DOI: 10.1117/12.469770.

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF REMOTE POWER SUPPLY BY LASER RADIATION IN SPACE ON BOARD THE ISS

R. A. Evdokimov, I. S. Matsak, V. Yu. Tugaenko

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: space experiment, wireless power transmission, laser radiation, photoelectric receiver, optical system

ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ КЭ «СЦЕНАРИЙ»

А. М. Есаков

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: Международная космическая станция, космические эксперименты, дистанционное зондирование, планирование наблюдений

Рассматриваются особенности планирования и проведения исследований в рамках КЭ «Сценарий» (Есаков, 2020). Космический эксперимент (КЭ) «Сценарий» проводится на Международной космической станции (МКС) с целью отработки методов оценки развития катастрофических и потенциально опасных явлений по результатам их наблюдения с борта станции аппаратурой дистанционного зондирования Земли. Постановщиком эксперимента является ПАО «Ракетно-космическая корпорация „Энергия“ имени С. П. Королёва». Научные руководители: доктор технических наук М. Ю. Беляев (ПАО «РКК «Энергия») и академик РАН С. Т. Суржиков (Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН)). Конечными потребителями результатов эксперимента и участниками КЭ «Сценарий» являются различные организации: МЧС России, Институт географии РАН, ИПМех РАН, Институт космических исследований РАН и другие.

В рамках эксперимента отрабатываются методы оценки возникновения и развития катастрофических и потенциально опасных явлений в атмосфере, на земной и водной поверхности Земли и разрабатываются предложения по использованию отработанных методов в практических целях. Помимо этого, задачей эксперимента является отработка методов телеуправления для дистанционного наблюдения исследуемых объектов с помощью аппаратуры, установленной на Российском сегменте (РС) МКС, а также управления роботизированными устройствами и системами, размещёнными на поверхности Земли, с борта РС МКС с использованием каналов космической связи и наземной телекоммуникационной инфраструктуры.

В соответствии с разработанными способами, защищёнными патентами (Беляев и др., 2019а, б), проводятся наблюдения различных потенциально опасных явлений и объектов. Обработка и анализ полученных данных выполняется совместно с участниками КЭ. Говоря о последних достижениях и результатах КЭ «Сценарий», следует отметить разработанный алгоритм выделения границ очагов пожаров на космических фотоснимках, получаемых с МКС — важнейшей задаче мониторинга и оценки развития лесных пожаров (Есаков, 2020; Есаков, Ильясов, 2021). Также в рамках КЭ был разработан алгоритм восполнения границы изучаемого объекта по отдельным её сегментам. Речь идёт о случаях, когда отдельные участки границы снимаемого объекта (например, ледника) на анализируемых снимках закрыты облачностью, шлейфами дыма или другими препятствиями. Отдельно следует отметить сотрудничество в рамках эксперимента с МЧС России. По заявкам от МЧС осуществляется оперативная съёмка различных объектов. Так, в рамках подготовки к паводкоопасному сезону на территории России для мониторинга гидрологической обстановки осуществляется фотосъёмка паводкоопасных районов.

При проведении научных исследований на борту МКС постановщики эксперимента столкнулись с определёнными трудностями, одна из которых связана со спецификой станции, а именно с её

Есаков Алексей Михайлович — инженер, post@rsce.ru

ориентацией. Трудности, связанные с ориентацией МКС, привели к тому, что в эксперименте вместо стационарных, стали использовать переносные камеры, при этом направление съёмки выбирает сам космонавт. Использование переносной аппаратуры позволило преодолеть проблему наведения на исследуемые объекты — вместо разворота станции космонавт разворачивает камеру и снимает интересный его объект. При этом надёжность съёмки объекта зависит от качества и оперативности исходных данных для планирования, а также умения космонавта своевременно визуально обнаружить исследуемый объект и навести на него перемещаемую аппаратуру. В ряде случаев, особенно когда требуется осуществить съёмку сравнительно небольшого объекта с высоким разрешением (длиннофокусные объективы для такой съёмки имеют малое поле зрения), космонавт может промахнуться и не осуществить запланированную съёмку. Для решения этой проблемы был разработан способ моделирования условий проведения сеансов и автоматизации подготовки планирования наблюдений, позволяющий повысить оперативность подготовки радиограмм и повысить надёжность ручного наведения на исследуемые объекты. Суть способа заключается в моделировании виртуального изображения ограниченной части подстилающей поверхности, которую космонавт увидит в расчётное время пролёта над исследуемым объектом. Данный способ был апробирован в реальных условиях и показал свою высокую эффективность.

Тем не менее, в силу понятных ограничений полностью заменить стационарную аппаратуру переносная не может. Поэтому на станции в ближайшее время на станции появятся новые приборы: «Гиперспектрометр» (лётный образец прошёл комплексные испытания и будет доставлен на борт в 2024 г.) и радиометр инфракрасный высокого разрешения (находится на стадии изготовления опытного образца). Новые образцы научной аппаратуры обладают уникальными характеристиками, позволяют получать научные данные в разных диапазонах и решать множество задач, в частности проводить контроль и оценку лесных пожаров, что повышает ценность и востребованность станции. Новая аппаратура безусловно имеет и свои особенности, что в сочетании со спецификой МКС потребовало разработки метода оптимизации планирования наблюдений с использованием новой научной аппаратуры с учётом новых критериев и ограничений последней (Есаков, 2020; Беляев и др., 2023). При составлении программы наблюдений на интервале планирования возможные зоны наблюдений оцениваются с точки зрения их «информативности». Информативность зон экспериментов является свёрткой различных коэффициентов и рассчитывается следующим образом:

$$I_j = \sum_{i=1}^{M_j} p_{ij} o_{ij} l_{ij} s_{ij}, j = 1, \dots, N,$$

где N и j — количество зон и их номера; M_j и i — количество объектов в зоне с номером j и их номера; p_{ij} — приоритет i -го объекта, наблюдаемого в j -й зоне; o_{ij} — коэффициент облачности при наблюдении i -го объекта в j -й зоне; l_{ij} — коэффициент освещённости при наблюдении i -го объекта в j -й зоне; s_{ij} — коэффициент сканируемой площади объекта.

Для формализации задачи вводятся бинарные переменные x_j , $j = 1, \dots, N$, соответствующие всем возможным зонам наблюдений, такие что:

$$x_j = \begin{cases} 1 - & j\text{-я зона наблюдений выполняется} \\ & \text{(планируется к проведению);} \\ 0 - & \text{не выполняется.} \end{cases}$$

Задача планирования наблюдений формулируется следующим образом: требуется определить вектор $\mathbf{X} = \{x_j, j = 1, \dots, N\}$ доставляющий максимум целевой функции

$$L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^N c_j x_j$$

при условиях

$$L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \geq b_i, \quad i = 1, \dots, m,$$

$$L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = m+1, \dots, M,$$

$$0 \leq x_j \leq 1, \text{ целое, } j = 1, \dots, N,$$

где элементы строки c_j и матрицы a_{ij} — информативность и потребные ресурсы зон; элементы столбца b_i — ограничения на информативность и расход ресурсов. Сформулированная задача является частично-целочисленной задачей линейного программирования и решается методами линейного и целочисленного программирования. Использование данного метода позволяет составлять программу наблюдений, экономя ресурс используемой аппаратуры и затраты рабочего времени экипажа.

Литература

- Беляев М. Ю., Рулев Д. Н., Есаков А. М., Рулев Н. Д. (2019а) Способ контроля лесного пожара с космического аппарата. Патент на изобретение RU 2683142 С1, 26.03.2019.
- Беляев М. Ю., Рулев Д. Н., Есаков А. М., Рулев Н. Д. (2019б) Способ контроля лесного пожара с космического аппарата. Патент на изобретение RU 2683143 С1, 26.03.2019.
- Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Есаков А. М. и др. Новые методы управления при наведении научной аппаратуры на наблюдаемые объекты в эксперименте «Ураган» на МКС // 30-я Юбилейная Санкт-Петербургская международ. конф. по интегрированным навигационным системам: сб. материалов конф. Санкт-Петербург, 2023. С. 319–328.
- Есаков А. М. (2020а) Методика оценки развития пожара с использованием космических снимков в эксперименте «Сценарий» на РС МКС // Тр. 54-х Науч. чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского: материалы докл. 2020. С. 33–40.
- Есаков А. М. (2020б) Планирование сеансов наблюдений изучаемых объектов на поверхности Земли с борта Российского сегмента МКС // Лесной вестн. Forestry Bulletin. 2020. Т. 24. № 5. С. 109–115.
- Есаков А. М., Ильясов Х. Х. Оценка развития лесных пожаров в эксперименте «Сценарий» с борта РС МКС // К. Э. Циолковский и прогресс науки и техники в XXI в.: материалы 56-х Науч. чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Калуга, 2021. С. 188–192.

PLANNING AND CONDUCTING RESEARCH OF THE “SCENARIO” SPACE EXPERIMENT

A. M. Esakov

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: International Space Station, space experiments, remote sensing, observation planning

СЛОИСТЫЕ САМОЗАЛЕЧИВАЮЩИЕСЯ МАТЕРИАЛЫ С ВНУТРЕННИМ ВЯЗКОТЕКУЧИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

И. А. Залетова¹, Н. Н. Ситников¹, Р. Н. Ризаханов¹, И. И. Юрченко¹,
О. А. Лукьянова²

¹ Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, Москва, Россия

² Центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина
Звёздный Городок, Московская обл., Россия

Ключевые слова: самозалечивающиеся материалы, полимерные материалы, слоистые композиционные материалы, космическая техника, факторы космического пространства

Материалы, обладающие способностью автономно устранять повреждения, приобретают всё большее развитие и востребованность в различных областях техники. Многочисленные области применения таких искусственных самозалечивающихся (самовосстанавливающихся) материалов охватывают биомедицинскую, строительную, автомобильную и аэрокосмическую отрасли. Наиболее актуально применение самозалечивающихся материалов в составе устройств долгосрочного использования, предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах или в сложных условиях, где трудоёмко или невозможно заменить повреждённый элемент конструкции, например, на борту космического аппарата (КА).

Неблагоприятные факторы окружающей среды в космосе, такие как активное ультрафиолетовое излучение, атомарный кислород, микрометеороиды и частицы космического мусора, термоциклирование, заряженные ионы и низкое давление, обычно приводят к механическому повреждению элементов конструкции космических аппаратов. Например, столкновения с микрометеороидами и частицами космического мусора могут образовывать трещины в покрытиях и отверстия в обшивках. Для долгосрочного безопасного функционирования систем КА актуальны материалы, способные автономно определять и устранять повреждения при появлении дефектов. Искусственные самозалечивающиеся материалы и композиционные системы при использовании в составе изделий будут способствовать повышению надёжности КА, снижению затрат на замену составных элементов и продлению срока службы.

По принципу реализации процессы самовосстановления в искусственных материалах можно разделить на несколько групп, включая внутренние и внешние подходы к самовосстановлению (Колобков, Малаховский, 2019). Внутреннее самовосстановление обычно происходит путём обратимого образования ковалентных связей или с помощью надмолекулярных (супрамолекулярных) и физических взаимодействий в полимерах. В отличие от него, внешнее самовосстановление как правило реализуется с помощью залечивающих реагентов, хранящихся в резервуарах, таких как кап-

Залетова Ирина Александровна — научный сотрудник,
panocentre@kerc.msk.ru

Ситников Николай Николаевич — заместитель начальника отдела,
кандидат технических наук, panocentre@kerc.msk.ru

Ризаханов Ражудин Насрединович — начальник отдела, кандидат физико-математических наук, panocentre@kerc.msk.ru

Юрченко Ирина Ивановна — главный научный сотрудник доктор физико-математических наук, kerc@elnet.msk.ru

Лукьянова Ольга Алексеевна — ведущий специалист по подготовке космонавтов, O.Lukyanova@gctc.ru

сулы (Pernigoni, Lafont, 2021), полые волокна или сосудистые сети (Skolnik, Putnam, 2020), которые внедрены в полимерные матрицы или другие функциональные материалы. Когда в композите возникают трещины, капсулы или сосудистые сети разрываются, высвобождают реагенты, которые заполняют область дефекта и восстанавливают целостность структуры за счёт реакции полимеризации.

В процессах такого рода можно выделить три этапа. Первый — это пусковое действие (инициирование процесса), которое происходит вскоре после возникновения повреждения, второй этап — транспортировка залечивающего вещества к месту повреждения, третий — химические взаимодействия, образующие новые связи в области дефекта. Наряду с повреждением, которое выступает основным стимулом для автономного самовосстановления, существуют другие различные виды внешних стимулов, включая оптические, тепловые, электрические, химические, которые могут инициировать процесс самовосстановления.

Многие полимеры, особенно в вязкотекучем состоянии, благодаря наличию специфических обратимых химических связей способны восстанавливать связи на границах материалов при их сведении. Такие внутренние факторы самовосстановления в полимерах основаны либо на динамических ковалентных связях, либо на супрамолекулярных взаимодействиях. Самозалечивающиеся материалы, использующие внутренние факторы связей, обладают возможностями многократного самовосстановления в одном и том же месте.

Для самовосстановления в сложных условиях, например в условиях космического вакуума, эффективным подходом представляется применение слоистых композиционных систем. В таких системах каждый слой направлен на выполнение определённой функциональной задачи, например, залечивающие слои из супрамолекулярных эластомеров отвечают за слияние разрушенных связей, а внешние слои — за обеспечение функциональных свойств системы (Ситников и др., 2020).

Функционирование самовосстанавливающихся материалов в космической среде — сложная задача. Во-первых, реакция самовосстановления на повреждение должна быть максимально быстрой после фактического повреждения, поскольку необходимо сохранять внутреннюю среду от утечек в космическое пространство. Во-вторых, механизм самовосстановления должен быть автономным при возникновении повреждений, поскольку место повреждения может быть недоступно. По мнению авторов, наиболее подходящим становится подход, независимый от химических взаимодействий, при котором во внутренней части слоистого материала организовывается доставка залечивающего материала в область дефекта посредством массопереноса внутреннего вязкого вещества. Простейшая схема реализации одного из возможных механизмов такого самозалечивания представлена на рис. 1 (Ситников и др., 2020).



Рис. 1. Механизм самозалечивания в слоистых материалах с внутренним вязкотекучим наполнителем

В слоистой структуре внутренний вязкотекучий слой располагается между внешними защитными слоями (см. рис. 1а). При образовании сквозного дефекта в слоистом материале залечивающий вязкотекучий наполнитель стремится заполнить образовавшуюся

несплошность (см. рис. 1б). Внешние и дополнительные внутренние слои, помимо опорной и защитной функции, могут выполнять иные функциональные задачи — например по уменьшению размера области дефекта за счёт упругости или дополнительного армирования. Вязкотекучий слой может иметь многосоставную композицию на основе полимера, способного к самозалечиванию, поэтому его иногда именуют самозалечивающей матрицей. Массоперенос залечивающего вещества непосредственно к месту дефекта или деструкции, обеспечивающий быстроту самозалечивания в упругих и вязкотекучих материалах, дополнительно может стимулироваться созданием напряжённого состояния в вязкотекучем слое. Такое напряжённое состояние, например, осуществимо с помощью давления между внешними слоями, при котором внутренние слои находятся в сдавленном состоянии, что уменьшает время массопереноса. В такой схеме менее вязкие залечивающиеся матрицы осуществляют более быстрый массоперенос, однако необходимо учитывать вытекание внутреннего залечивающего вязкотекучего вещества за внешние защитные слои и предусматривать механизмы его удержания. Характер и размер образованного дефекта d определяет возможность получения долговременного сохранения эффекта залечивания. При размере дефекта d больше некоторого характерного d^* происходит вытекание вязкотекучего слоя за внешние защитные слои (см. рис. 1з). Размер дефекта, механические напряжения, вязкость залечивающейся матрицы, смачиваемость, капиллярные взаимодействия между материалами и другие параметры определяют характеристики эффекта залечивания и его устойчивость в границах дефекта.

В АО ГНЦ «Центр Келдыша» разрабатываются слоистые самозалечивающиеся композиционные материалы (ССКМ), которые потенциально могут быть применимы в разворачиваемых наддувных системах для защиты от разгерметизации при пробое микрометеороидами или мелкими частицами космического мусора. Разрабатываемые ССКМ имеют внутренний вязкотекучий слой на основе соединений боросилоксана (БС), которые позволяют восстанавливать герметичность слоистого материала в случае его прокола или других повреждений за времена менее 1 с при испытаниях в поддавленном состоянии (Ситников и др., 2019).

Разработано несколько конфигураций ССКМ с различными композициями вязкотекучей матрицы, наполнителями, внутренними барьерными и ограничительными слоями, выполняющими функцию локализации и консолидации основного вязкотекучего залечивающего компонента в области дефекта (рис. 2). Внутренние барьерные слои разделяют вязкотекучие наполнители с различными характеристиками, которые выполняют разные функциональные задачи в слоистом материале (Блошенко, 2023). Ограничительные слои изготавливались на основе соединений БС с функционализацией различными наполнителями. В качестве наполнителей могут применяться различные волокна, такие как стекловолокно, углеродное, базальтовое или арамидное волокно, которые способствуют закупориванию отверстий и локализуют массоперенос внутреннего слоя (см. рис. 2). Наряду с волокнистыми наполнителями для этой функции могут использоваться различные дисперсные функциональные добавки.

Одним из эффективных вариантов конфигураций ССКМ представляется многослойная структура с волокнами в приповерхностных областях и более текучей средней частью (см. рис. 2в). При проколе или разрыве такой структуры более подвижная средняя часть позволяет быстро осуществить массоперенос и заполнить дефект, в то время как волокнистая структура, пропитанная соединениями БС, уменьшает деформационное воздействие и оказывает сдерживающее влияние на просачивание залечивающего вещества через образованные дефекты (Ситников, Машенко, 2022).

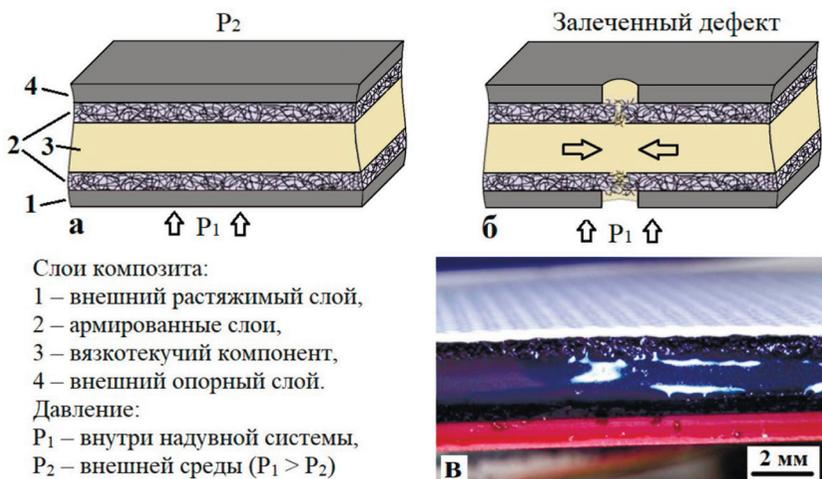


Рис. 2. Схематическое изображение архитектуры ССКМ с трёхслойной внутренней частью, обеспечивающей самозалечивание дефектов: *а* – исходное состояние; *б* – состояние после залечивания дефекта; *в* – поперечный срез такого слоистого материала

Внешние слои ССКМ необходимо подбирать исходя из адгезии к внутренним наполнителям. В разработанных ССКМ использовались силиконовые материалы. Внешний слой со стороны избыточного давления изготовлен из растяжимого материала — монолитной силиконовой резины, а для внешнего опорного слоя была использована армированная ткань с силиконовым покрытием. При подаче газа в объём герметичной конструкции, изготовленной с использованием такого слоистого материала, за счёт разницы внутреннего и внешнего давления в надувной системе обеспечивается напряжённое сдвинутое состояние вязкотекучего слоя, благодаря чему реализуется направленный ускоренный массоперенос вязкотекучего наполнителя в область дефекта с последующей консолидацией связей.

Проверка работоспособности макетов ССКМ на эффективность самозалечивания и экспериментальное определение характеристик при пробое и порезе проводились на специально разработанной лабораторной установке (рис. 3). Испытательная установка представляет собой камеру с фланцевым окошком, клапанами для напуска и выпуска газа и подсоединённым манометром для контроля давления. Испытываемый образец ССКМ помещается во фланцевое окошко и газоплотно фиксируется в нём. В камеру напускается газ, создаётся избыточное давление от 10 до 50 кПа. Оценка реализации эффекта самозалечивания образца проводилась по перепаду давления в камере до его стабилизации после нарушения герметичности вследствие прокола или пореза ССКМ.

Разработанные ССКМ успешно прошли испытания, показав эффективное восстановление герметичности объёма камеры после проколов и прореза. Повреждения после пробоя диаметром около 1 мм залечиваются за время менее 1 с, при этом снижение давления в испытательной камере была незначительным. Более крупные повреждения диаметром 2–2,5 мм залечивались за время от 1 до 3 с со снижением давления 1–5 кПа при исходном давлении в камере 25 кПа. Залеченные дефекты после пореза скальпелем залечиваются за время около 1 с (см. рис. 3). Для наглядности реализации эффекта самозалечивания на внешнюю поверхность макета наливался слой воды. При извлечении скальпеля вырывалась струя газа, что сопровождалось перепадом давления в камере на величину около 2,5 кПа. Давление стабилизировалось за 1–2 с, после этого на поверхности

воды газовых пузырей не наблюдалось. Отмечено, что на скорость за-
лечивания заметное влияние оказывает характер повреждения: про-
кол острым или тупым пробойником, формирование после пореза
ровной или рваной кромки.



Рис. 3. Демонстрация залечивающих свойств макета слоистого компози-
ционного материала при испытаниях на пробой и порез (Залетова и др., 2021)

Из листов разработанного ССКМ были изготовлены макеты на-
дувных камер, которые подвергались испытаниям при пробое высо-
коскоростным объектом, имитирующим воздействие микрометеоро-
ида, в нормальных условиях и в вакууме. При испытаниях в вакууме
надувные макеты располагались внутри специально подготовленной
вакуумной камеры напротив направления вылета металлического
шарика диаметром 1 мм,двигающегося со скоростью около 0,5 км/с.
Повреждения, полученные от сквозного пролёта металлического ша-
рика, залечивались за время менее 1 с.

Литература

- Блошенко А. В., Дубинин В. И., Залетова И. А. и др.* Самозалечивающиеся ма-
териалы для решения функциональных задач в космической технике
// Вестн. НПО имени С. А. Лавочкина. 2023. № 1(59). С. 30–44.
- Залетова И. А., Ситников Н. Н., Высотина Е. А., Мащенко В. И.* Композици-
онный слоистый самозалечивающийся материал для надувных разворачи-
ваемых элементов конструкций космических аппаратов // 45-е Академ.
чтения по космонавтике. В 4 т. М., 2021. С. 391–393.
- Колобков А. С., Малаховский С. С.* Самозалечивающиеся композиционные
материалы (обзор) // Тр. ВИАМ. 2019. № 1. С. 47–54.
- Ситников Н. Н., Хабибуллина И. А., Ризаханов Р. Н.* Композиционный сло-
истый самозалечивающийся материал (варианты). Патент 2710623 С1
(RU). Заявитель и патентообладатель АО ГНЦ «Центр Келдыша»; опубл.
30.12.2019. Бюл. № 1.11.
- Ситников Н. Н., Хабибуллина И. А., Мащенко В. И. и др.* Слоистые самозалечи-
вающиеся композиты с внутренним функциональным слоем на основе
боросилоксана // Перспективные материалы. 2020. № 4. С. 11–23.
- Pernigoni L., Lafont U.* Self-healing materials for space applications: overview
of present development and major limitations // CEAS Space J. 2021. V. 13.
P. 341–352.
- Skolnik N. L., Putnam Z. R.* Evaluation of Dual Purpose Goop as a Candidate for
Self-Healing Thermal Protection System Applications // AIAA SciTech Forum.
2020. V. 1. P. 1–11.

LAYERED SELF-HEALING MATERIALS WITH INNER VISCO-FLOWABLE FILLER FOR SPACE EQUIPMENT

I. A. Zaletova¹, N. N. Sitnikov¹, R. N. Rizakhanov¹, I. I. Yurchenko¹, O. A. Lukyanova²

¹ State Scientific Center of the Russian Federation "Keldysh Research Center", Moscow, Russia

² Yuri Gagarin Cosmonaut Training Center, Star City, Moscow region, Russia

Keywords: self-healing materials, polymer materials, layered composite materials, space technology, space factors

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПКК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Л. М. Зеленый, Д. С. Зарубин

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: пилотируемые космические комплексы, космические исследования, МКС

Создание и эксплуатация пилотируемых станций создаёт «локомотивный» эффект для решения разнообразных по составу задач, которые призваны обеспечить освоение космоса человеком и использование результатов космической деятельности на Земле.

Наряду с вопросами обеспечения присутствия человека в космосе, международной интеграции, а также развития коммерческой составляющей, проведение научных исследований представляется одним из наиболее важных направлений целевого использования для пилотируемых космических комплексов (ПКК).

Богатый опыт организации научных исследований получен в результате создания и эксплуатации орбитального комплекса «Мир». Сегодня эта работа успешно проводится на российском сегменте Международной космической станции (МКС), в том числе, в рамках широкой и уникальной международной кооперации. Научное сообщество поддерживает недавнее решение «Роскосмоса» и агентств-партнёров о продлении сроков эксплуатации МКС.

Завтрашний день науки на ПКК связан с созданием новой Российской орбитальной станции (РОС) на высокой широте и, безусловно, с развитием работ по лунной тематике в России и мире.

Станции для науки стали лабораториями с возможностями, сочетание которых уникально: 1) собственно проведение исследований в космосе; 2) участие человека; 3) длительная временная база для космических исследований.

Изучение солнечно-земных связей (СЗС) на ПКК включает в себя вопросы оптических атмосферных явлений естественного и техногенного происхождения, потоков микрочастиц на околоземных орбитах, радиозондирование верхних слоёв атмосферы, мониторинга плазменно-волновых процессов и другие. Размещение будущей станции РОС на орбите с высоким ($96,8^\circ$) наклоном расширяет диапазон исследований СЗС в части взаимодействия станции с потоками плазмы магнитосферы, галактическими и солнечными космическими лучами.

Исследования Земли из космоса на ПКК вносят весомый вклад в развитие ДЗЗ, как научного направления. Ключевые задачи включают в себя:

- 1) отработку перспективной аппаратуры в режиме космического эксперимента, в том числе, для последующего масштабирования на автоматических КА;
- 2) создание и отработку новых методов измерений и обработки их результатов. Высокое наклонение будущей станции также увеличит возможности для исследований по направлению дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) за счёт возможности наблюдения всей земной поверхности, включая полярные регионы, и кратности орбиты — пролёт над одной и той же территорией каждые 3–5 сут.

Выполнение медико-биологических исследований уже сегодня обеспечило возможность постоянного присутствия человека в кос-

Зеленый Лев Матвеевич — научный руководитель, академик РАН
Зарубин Дмитрий Сергеевич — ведущий инженер, zarubinds@cosmos.ru

мосе. Дальнейшие исследования станут важным этапом подготовки пилотируемого освоения дальнего космоса, включая создание посещаемых налунных научных станций и полёты космонавтов на Марс.

В докладе рассматриваются задачи, вопросы организации, эффективности и перспектив проведения научных исследований на ПКК.

THE USE OF MANNED SPACE COMPLEXES FOR SCIENTIFIC RESEARCH

L. M. Zelenyi, D. S. Zarubin

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Keywords: manned space complexes, space research, ISS

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА МКС

В. К. Ильин, С. В. Поддубко, С. А. Харин, Ю. А. Морозова

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: МКС, экзобиология, космические эксперименты

Исследование выживания микроорганизмов и изменений, происходящих с ними в космическом пространстве, представляется одним из наиболее важных вопросов в космической науке. От результатов, полученных в данной области исследований, зависит не только здоровье космонавтов в долгосрочных космических миссиях, но и безопасность Земли в целом. В настоящей работе описывается ряд экспериментов, проводимых на борту Международной космической станции (МКС) и посвящённых изучению микроорганизмов в условиях космического полёта.

Одна из основных целей освоения космоса заключается в изучении эволюционного развития небесных тел — планет, лун, комет и т. д. — для ответа на ряд важных естественнонаучных вопросов: каковы законы формирования и развития планет; как возникла жизнь во Вселенной и существует ли она за пределами Земли; есть ли предпосылки для его зарождения и развития на других небесных телах. Парадоксально, но само развитие космонавтики может поставить под угрозу эту дорогостоящую исследовательскую программу — из-за потенциально необратимых изменений в естественном эволюционном развитии небесных тел — если мы не предпримем меры по предотвращению загрязнения космоса земными формами жизни.

Гораздо более серьёзную опасность представляет возможность заражения Земли внеземными возбудителями или болезнетворными микроорганизмами, занесёнными возвращающимися космическими кораблями с другой планеты или из космоса. В этом контексте чрезвычайно важно понять, способны ли земные микроорганизмы, неизбежно загрязняющие космическую технику, сохранять жизнеспособность в космическом пространстве в течение длительного времени и какие изменения с ними происходят в этих условиях. Получение таких данных представляет не только естественнонаучный интерес, но и неопределимое практическое значение для разработки концепции планетарной защиты, основанной на необходимости предотвращения перемещения форм жизни, поскольку включает в себя разработку строжайшего биологического контроля и оценку потенциальной патогенности внеземных субстратов, доставляемых на Землю космическими кораблями. Учитывая это, важнейшим направлением исследований становится обеспечение планетарного карантина или, в широком смысле, планетарной защиты. Наличие устойчивых форм жизни может стать причиной крайне нежелательного антропогенного распространения земных организмов на другие небесные тела и, наоборот, заражения Земли инопланетными формами.

В настоящее время в рамках российской научной программы проводятся космические исследования покоящихся форм организмов, принадлежащих к различным таксономическим группам.

Ильин Вячеслав Константинович — ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, заведующий отделом, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ilyin@imbp.ru

Поддубко Светлана Викторовна — ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией, заместитель заведующего отделом, кандидат биологических наук, poddubko@imbp.ru

Харин Сергей Александрович — ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, charin@imbp.ru

Морозова Юлия Алексеевна — научный сотрудник, morozova@imbp.ru

Например, в рамках проекта «Биориск» (российский эксперимент) на внешней оболочке Международной космической станции (МКС) уже проводятся эксперименты Expose-R (эксперимент ЕКА с участием России).

Однако данные этих экспериментов не позволят в полной мере оценить биологические риски с точки зрения как решения вопросов планетарной защиты, так и подготовки медицинского и биологического обеспечения межпланетных миссий человека. Это связано с тем, что условия на околоземной орбите существенно отличаются от тех, в которых придётся жить и работать экипажам и сопровождающим организмам — не в последнюю очередь по уровню и спектрам радиационного воздействия и магнитным характеристикам. По этой причине нам необходимо изучать реакцию биологических объектов в широком таксономическом спектре.

Ещё одно важное направление исследований — поиск жизни за пределами Земли, поиск ответа на фундаментальный вопрос об уникальности или типичности явления биологических форм жизни во Вселенной. В обозримом будущем поиск жизни за пределами Земли будет вестись на небесных телах с условиями, пограничными для существования белковой жизни, а также допускающими длительную жизнеспособность в состоянии глубокого покоя. Для обнаружения присутствия жизни в таких условиях могут потребоваться принципиально иные технологии, нацеленные на поиск покоящихся форм.

Следует отметить, что не только микроорганизмы, но и организмы, находящиеся на более высоких ступенях развития в эволюционной цепочке, могут демонстрировать ту или иную форму покоя, обеспечивающую их выживание в экстремальных условиях. Не будет преувеличением сказать, что практически все живые существа обладают способностью периодически замедлять свою жизнедеятельность. По-видимому, в регуляции механизмов покоя участвуют особые внутренние факторы (например, биологические часы), что позволяет поставить вопрос об управлении этими механизмами как внутри отдельных организмов, так и на уровне экосистем. Перспективные возможности сигнального управления адапционными процессами у организмов, принадлежащих к различным таксономическим группам филогенетических линий — от бактерий до млекопитающих и высших растений, представляют значительный интерес для экзобиологии. Этот интерес определяет несколько направлений изучения реакции живых систем на космическую среду с помощью экспериментов вне космических аппаратов. Наиболее эффективным элементом алгоритма астробиологического поиска могла бы стать возможность пробуждения спящих форм адекватными сигналами. Данные, полученные в последние десятилетия в области исследования естественных местообитаний, свидетельствуют о длительном выживании организмов, находящихся в состоянии глубокого покоя в самых экстремальных условиях. Проект «Биориск» предоставляет уникальную возможность оценить наличие биологического вещества в образцах почвы при воздействии на околоземной орбите. Таким образом, проект будет решать ряд актуальных экзобиологических проблем, касающихся как определения возможности сохранения жизнеспособности различных организмов во время длительного межпланетного полёта, так и поиска жизни на других планетах.

Эксперимент «Биориск»

Российский государственный научный центр — Институт биомедицинских проблем РАН (ИМБП) разработал программное обеспечение и оборудование для космического эксперимента «Биориск», обеспечивающее возможность длительного воздействия различных микроорганизмов в трёх контейнерах на внешней оболочке Международной космической станции.

Первым этапом работы было определение возможности сохранения жизнеспособности тест-культур микроорганизмов при длительном (сравнимом с миссией «Земля – Марс – Земля») воздействии в космическом пространстве, а также оценка воздействия космических факторов по биологическим объектам применительно к проблеме планетарного карантина.

Впервые установлена выживаемость некоторых микроорганизмов на внешней стороне космического аппарата, в космическом полете, сопоставимом по срокам к длительности полёта на Марс (18 мес). Установлено, что у большинства выживших штаммов срабатывает защитно-приспособительный механизм, заключающийся в том, что микробные культуры проявляют высокую устойчивость к противомикробным препаратам после пребывания в экстремальных условиях открытого космоса.

В результате сравнительных электронно-микроскопических исследований послеполётных штаммов бактерий и грибов выявлен ряд особенностей ультраструктуры клеток, которые в некоторой степени объясняют наблюдаемые количественные и качественные изменения на популяционном и функциональном уровнях. Наиболее существенные изменения жизнеспособности спор выявлены у спорообразующих палочек (вид *B. subtilis*) после воздействия на внешнюю оболочку МКС, что совпало с результатами электронно-микроскопических исследований, выявивших нарушения функции деления и синтеза клеточной стенки в этих бактериях. Они показали нестандартное деление клеток, в частности, появление множественности перегородок, что становится косвенным показателем того, что после пребывания в космическом пространстве происходит нарушение функционирования группы генов, отвечающих за процессы деления клеток.

В настоящее время проводится второй этап эксперимента «Биориск» с использованием более широкого перечня биологических объектов, в ходе которого покоящиеся формы животных (сухие зародыши низших ракообразных, сухая икра рыб, сухие личинки хирономид) и семена высших растений подвергаются воздействию факторов околоземного космического пространства. По результатам, полученным после доставки первых двух контейнеров на Землю, впервые было показано, что не только споры микроорганизмов, но и спящие формы других организмов, находящихся на более высоких уровнях развития (семена высших растений, личинки комаров, яйца низших ракообразных) сохраняют жизнеспособность при длительном пребывании (18 мес) в экстремальных условиях космического пространства.

В будущих экспериментах в составе оборудования необходимо будет иметь датчики для оценки возможных колебаний температуры в местах установки контейнеров; это позволит оценить влияние этого фактора на жизнеспособность организмов и провести наиболее точный их отбор для дальнейших экспериментов. Также необходимо предусмотреть термозащиту контейнеров для предотвращения перегрева чашек, содержащих биологические объекты. Наконец, очень важно оценить влияние ультрафиолетового излучения на биологические объекты, а конструкция существующего оборудования не позволяет это сделать. Третий этап эксперимента «Биориск» будет проводиться на том же оборудовании с использованием аналогичных биологических объектов (микроорганизмы, семена растений, личинки и яйца насекомых, ракообразные), однако спектр биологических проб будет расширен за счёт включения непатогенных бактерий и грибов.

Помимо научных задач третьего этапа эксперимента «Биориск», будут решаться задачи, связанные с обеспечением карантина Земли. Анализ результатов воздействия биологических объектов в эксперименте «Биориск» позволит более полно оценить объём необходимых

наблюдательных мероприятий, поскольку позволит получить новые данные о потенциальных проявлениях (пределах) фенотипической адаптации и генотипических изменений у различных биологических объектов. Также проводится сравнительный анализ влияния на них космических условий на околоземной орбите и по маршруту межпланетных полётов, которые существенно различаются по уровню и спектрам радиационного воздействия, магнитным характеристикам и т. д.

Эксперимент «Плазида»

Что касается частоты передачи генетических факторов, то она существенно не изменилась. Последующие исследования в рамках эксперимента «Плазида» на российском сегменте МКС позволили прийти к более детальным выводам с использованием аппаратуры «Рекомб-К» (производства компании «БиоТехСис»). Так, отмечено, что частота передачи внехромосомных факторов наследственности грамположительных палочек, определяющих устойчивость к антибиотикам, увеличилась в среднем в 10 раз. Указанные особенности не затрагивали грамотрицательную флору.

В то же время сегрегационная устойчивость плазмидных коинтегратов, образовавшихся в результате исследований *in vitro*, выполненных в условиях космического полёта, значительно выше в условиях космического полёта. То есть коинтеграты генов, определяющие множественную лекарственную устойчивость, сформированные в условиях космического эксперимента на МКС, оказываются более устойчивыми по сравнению с полученными в контрольных условиях.

Данное обстоятельство выступает фактором риска, поскольку есть основания предполагать достаточно интенсивное формирование штаммов с признаками госпитализма в условиях длительного космического полёта пилотируемых космических кораблей, осталась неизменной и на низком уровне.

Эксперимент «Тест»

Выполнение данного эксперимента Центральным научно-исследовательским институтом машиностроения совместно с ИМБП выявило возможность присутствия микробных сообществ в неактивном состоянии на внешней поверхности МКС. Дальнейшие исследования показали термотолерантность видов бацилл *Bacillus*, которые планируется включить в экзобиологический эксперимент «Метеорит» в ходе беспилотной миссии «Бион-М».

Перспективы

Перспективная программа экзобиологических экспериментов, проводимых на МКС, ориентирована на изучение возможности присутствия микробов в составе пыли на траектории орбитальной космической станции (эксперимент «Ловушка») и оценку скафандра, как фактора переноса микробных загрязнений от внешней поверхности к местам обитания станции. В то время как выход в открытый космос (эксперимент Эпискаф).

MICROBIOLOGICAL EXPERIMENTS ON THE ISS

V. K. Ilyin, S. V. Podubko, S. A. Kharin, Yu. A. Morozova
Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: ISS, exobiology, space experiments

ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОСМОНАВТОВ В КЭ «ТАЙМЕР» НА МКС

Н. Е. Исиков¹, И. М. Ананьевский¹, М. Ю. Беляев², Н. Н. Болотник¹,
О. Н. Волков², С. Е. Якуш¹

¹ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН
Москва, Россия

² Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: Международная космическая станция, космические эксперименты, операторские возможности космонавтов, методика обработки видеоизображений движений космонавта

Эксперимент «Таймер» посвящён комплексному исследованию Международной космической станции (МКС) как технической среды при проведении операторами научных исследований и служебных операций (Беляев и др., 2011, Belyaev et al., 2012). Постановщик эксперимента — ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва». Научный руководитель эксперимента — доктор технических наук М. Ю. Беляев (ПАО «РКК «Энергия»). Конечными потребителями результатов эксперимента и участниками КЭ «Таймер» являются различные организации: Институт медико-биологических проблем РАН, Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского и др.

В рамках эксперимента велись исследования, направленные на разработку методов определения специфических параметров движений космонавтов в условиях невесомости.

Нарушения сенсомоторных функций в системе двигательного управления оператора становятся постоянным и закономерно наблюдаемым феноменом в условиях реальной микрогравитации. В исследованиях, проводимых во время и после длительных космических полётов, было показано, что космонавты испытывают затруднения при выполнении точностных двигательных задач, снижается точность воспроизведения дозированных и дифференцирования близких по величине мышечных усилий, увеличивается время реализации двигательных реакций (Газенко, 1990, Grigoriev, 1992, Kozlovskaya et al., 1981). Указанные изменения вносят существенный вклад в операторские возможности космонавтов, которые, безусловно, должны учитываться при разработке программы полёта экипажей.

Для формирования достоверных представлений об особенностях операторских возможностей человека в условиях невесомости требуется получение количественных данных о характеристиках движений различного рода — отдельных сегментов тела в пространстве, друг относительно друга и движений тела человека при совершении рабочих операций. Наиболее удобным способом получения таких данных представляется видеорегистрация на борту российского сегмента (РС) МКС различных видов операторской деятельности.

Исиков Николай Евгеньевич — ведущий инженер, кандидат технических наук, isikov@ipmnet.ru

Ананьевский Игорь Михайлович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, профессор, anan@ipmnet.ru

Беляев Михаил Юрьевич — главный специалист, доктор технических наук, профессор, mikhael.belyaev@rsce.ru

Болотник Николай Николаевич — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, bolotnik@ipmnet.ru

Волков Олег Николаевич — главный специалист, oleg.n.volkov@rsce.ru

Якуш Сергей Евгеньевич — директор, доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, yakush@ipmnet.ru

Для видеофиксации действий космонавта как на Земле, так и на борту РС МКС использовались два камкордера GoPro HERO 3, которые крепились в перпендикулярных друг другу плоскостях. Камкордер GoPro — это широкоугольная видеокамера GoPro, для видеоизображений которой характерна радиальная дисторсия — искажения изображения типа «рыбий глаз» (искажение линзы). Устранение эффекта рыбьего глаза осуществляется программой GoPro Studio. После устранения искажений прямых линий видеофайлы считываются в автоматическом режиме программой предварительной обработки, которая подготавливает видеофайл для оцифровки с видеокадров координат маркеров, установленных на теле космонавта, свободно распространяемой программой Tracker 4.11.0 (<https://physlets.org/tracker/>).

На первом этапе эксперимента была проведена видеосъёмка деятельности операторов при проведении ими различных видов научных исследований: медицинских экспериментов, экспериментов по наблюдению Земли, технических экспериментов.

Оказалось, что для целей анализа характеристик двигательной активности космонавта при помощи видеоданных наилучшим образом подходят периодические движения, совершаемые с большой амплитудой. Для таких движений возможна не только оцифровка и получение траекторий движения маркеров, но и их содержательный анализ.

Поэтому на втором этапе выполнения эксперимента был разработан комплекс специализированных заранее определённых (стандартных) движений: наклоны вперёд, приседания, подъём и опускание туловища на носках, наклоны головы, подъём руки на 90°. Была также откорректирована программа эксперимента для проведения видеофиксации оператором комплекса специализированных движений как до полёта, так и во время полёта космонавта три раза за экспедицию в её начале, в середине и в конце. После чего проводилось сравнительное моделирование движений в условиях космического полёта с движениями в земных условиях.

Для облегчения и ускорения обработки видеоизображений на втором этапе эксперимента на борт МКС доставили в качестве маркеров сертифицированные для использования на борту МКС электроды ЭКГ, которые в отражённом свете лучше видны на видеокадрах.

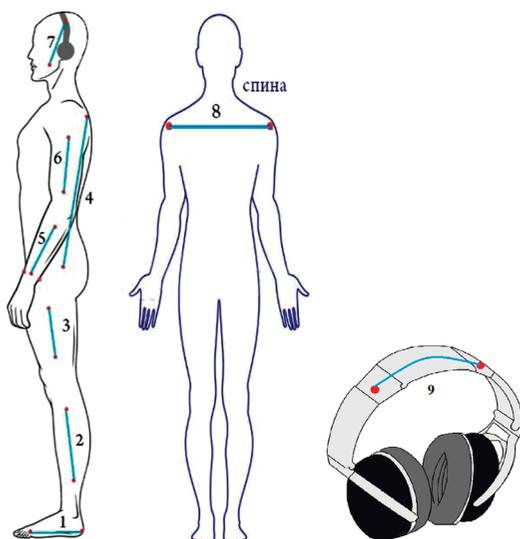


Рис. 1. Места расположения маркеров

На рис. 1 представлена схема размещения маркеров на теле оператора: по два маркера устанавливались на каждый исследуемый сегмент тела оператора (выше и ниже сустава), расстояние между маркерами измерялись космонавтами и их значения передавались на Землю для анализа.

Полученная от космонавтов информация о расстояниях между маркерами позволяла определить масштаб пересчёта координат маркера из системы координат видеокadra в систему координат многозвенной математической модели.

Проведённый анализ показал, что более информативными стали не реализации координат маркеров, а вычисленные по ним с учётом коррекции масштаба реализации углы поворота сегментов относительно друг друга. Полученные реализации углов численно дифференцируются для определения скоростей и ускорений изменения углов поворота сегментов. При необходимости численно дифференцируются и реализации координат маркеров для определения их скоростей и ускорений.

Кинематические характеристики движения космонавта определялись на его многозвенной математической модели при задании реальных расстояний между осями суставов сегментов тела и полученных реализаций углов, угловых скоростей и ускорений сегментов его тела.

Построена динамическая модель элементов опорно-двигательного аппарата человека в форме уравнений Лагранжа второго рода. Методом обратных задач динамики рассчитывались усилия в суставах конечностей космонавта по кинематическим характеристикам движений, полученных из видеокadров. Рассчитанные при динамическом анализе реализации моментов в суставах разных космонавтов при выполнении специализированных движений на орбитальном комплексе (ОК) РС МКС и в Центре подготовки космонавтов (ЦПК) позволяют выяснить силовые нагрузки суставов, характерные для выполнения различных движений, определить индивидуальные особенности выполнения одних и тех же движений разными космонавтами. Проблемой является задание масс-инерционных характеристик сегментов тела конкретного космонавта.

Результатом эксперимента «Таймер» стала разработанная методика обработки видеоизображений движений космонавта при выполнении им работ в условиях невесомости и наземных условиях (Бронников и др., 2022а, б) и временные характеристики выполнения операторами специализированных движений. Проведённый анализ времени выполнения космонавтами движений на борту МКС показал существенное влияние микрогравитации на опорно-двигательный аппарат космонавта.

Эксперимент позволяет изучить специфику деятельности операторов в космическом полете. Оценка работоспособности космонавтов в длительных полётах может быть использована при разработке будущих межпланетных полётов к Луне и Марсу.

Литература

- Беляев М. Ю., Бронников С. В., Волков О. Н. и др. Комплексное изучение деятельности операторов на МКС в эксперименте «Таймер» // Тр. 46-х Чтений К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Калуга, 13–15 сент. 2011. Казань, 2012. С. 74–78.
- Бронников С. В., Беляев М. Ю., Волков О. Н. и др. (2022а) Способ определения воздействия невесомости на двигательную активность находящегося на борту космического аппарата оператора. Патент № RU 2777 477 С1, опубл. 04.08.2022, бюл. № 22.
- Бронников С. В., Беляев М. Ю., Волков О. Н. и др. (2022б) Способ мониторинга воздействия невесомости на двигательную активность находящегося на борту космического аппарата оператора». Патент № RU 2777 476 С1, опубл. 04.08.2022, бюл. № 22.

- Газенко О. Г., Григорьев А. И., Егоров А. Д.* Реакции организма человека в космическом полёте. М.: Медицина, 1990. 288 с.
- Belyaev M. Yu., Bronnikov S. V., Petrov V. M., Sekerzh-Zenkovich S. Ya.* Integrated study of the ISS as an environment for human-operator 'life and activities // Proc. Intern. Astronautical Congress. IAC. 63rd Intern. Astronautical Congress. 2012 P. 4078–4082.
- Grigoriev A. I., Egorov A. D.* General mechanisms of the effect of weightlessness on the human body // Advances in Space Biology and Medicine. 1992. V. 2. P. 1–42.
- Kozlovskaya I. B., Kreydich Yr. V., Rakhmanov A. S.* Mechanisms of the effects of weightlessness on the motor system of man // The Physiologist Magazine. 1981. V. 24. No. 6. P. 59–61.

STUDYING THE MOVEMENT OF ASTRONAUTS IN THE SPACE EXPERIMENT "TIMER" ON ISS

**N. E. Isikov¹, I. M. Ananievski¹, M. Yu. Belyaev², N. N. Bolotnik¹, O. N. Volkov²,
S. E. Yakush¹**

¹ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

² S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: International Space Station, space experiments, operator capabilities of cosmonaut, methods of processing video images of cosmonaut movements

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РОССИЙСКОМ СЕКМЕНТЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (НА ПРИМЕРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА «МАГНИТНАЯ ФАБРИКАЦИЯ»)

Н. В. Казинский

АО «Организация «Агат», Москва, Россия

Ключевые слова: пилотируемый космический комплекс, коммерческая целевая работа, космический эксперимент

Головная экономическая научно-исследовательская организация космической отрасли АО «Организация «Агат»

Акционерное общество «Организация «Агат» является головной экономической научно-исследовательской организацией ракетно-космической промышленности с 1973 г. АО «Организация «Агат» — участник практически всех национальных и международных космических программ.

В настоящее время АО «Организация «Агат» принадлежит головная роль в системных исследованиях экономических проблем, связанных с развитием, разработкой и производством ракетно-космической техники, технико-экономическим обоснованием федеральных космических программ, проведением независимой экономической экспертизы проектов вновь создаваемых и модернизируемых средств ракетно-космической техники.

Основные направления деятельности АО «Организация «Агат»:

- Ценообразование.
- Коммерческие эксперименты на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС).
- Стратегическое развитие.
- Техничко-экономическое обоснование ракетно-космической техники (ТЭО РКТ).
- Управление интеллектуальной собственностью.
- Цифровая трансформация.
- Центр независимой судебной экспертизы.

В целях рационального использования ресурсов РС МКС, повышения эффективности её целевого использования и упрощения процедур подготовки и проведения космических экспериментов (КЭ) АО «Организация «Агат» по заказу Госкорпорации «Роскосмос» проводит работы по предварительному отбору и подготовке коммерческих целевых работ (ЦР) для проведения космических экспериментов на РС МКС.

В направлении «Коммерческие эксперименты» на РС МКС АО «Организация «Агат» реализует сопровождение коммерческой целевой работы (КЦР): проводит работы по анализу рынка, осуществляет поиск и привлечение потенциальных постановщиков, осуществляет общее сопровождение от подачи заявки постановщиком до участия в коммерциализации результатов.

В ходе сопровождения также проводит экспертизы реализуемости, технико-экономического обоснования, согласовывает техническое задание на эксперимент и оформляет трёхстороннее соглашение о зонах ответственности сторон и объёмах участия.

РС МКС — уникальная платформа для проведения научных и исследовательских экспериментов в условиях микрогравитации по многим направлениям

На сегодняшний день МКС представляет собой уникальную платформу для проведения передовых научных исследований в условиях экстремальных состояний, практически недостижимых на Земле (микрогравитация, высокая и низкая температура, космический вакуум, высокий уровень космического излучения и др.), а также возможности для продолжительного наблюдения за поверхностью и атмосферой Земли. Благодаря результатам проведённых исследований за 25-летний период существования станции, сделано много прорывных разработок, а полученные результаты приводят к открытию новых перспективных технологий.

Многоцелевой лабораторный модуль «Наука»

Модуль предназначен для наращивания технических и эксплуатационных возможностей российского сегмента Международной космической станции. Он позволит значительно нарастить объём проводимых экспериментов на МКС.

Благодаря проводимой работе по сокращению сроков подготовки российских научных экспериментов и их реализации возникла необходимость в дополнительном пространстве для проведения научных экспериментов в российском сегменте, что и удалось воплотить с помощью многофункционального лабораторного модуля «Наука».

В модуле предусмотрено большое количество универсальных рабочих мест под исследовательскую и научную аппаратуру, что даёт возможность разместить больше уникального оборудования для проведения разного рода экспериментов

Планирование космических экспериментов

За планирование космических экспериментов на РС МКС отвечает Долгосрочная программа целевых работ (ДПЦР) на РС МКС.

ДПЦР определяет основные направления исследований и перечень КЭ или ЦР на пилотируемых космических комплексах (ПКК) на весь период функционирования ПКК.

ДПЦР даёт представление о целях, задачах исследований и экспериментов на пилотируемом космическом комплексе, предназначена для долгосрочного планирования научных исследований и ЦР на ПКК и является основой для разработки этапной программы научно-прикладных исследований и целевых работ (ЭтП), планирования наземной подготовки, бортовой реализации и анализа результатов КЭ и ЦР, проводимых на ПКК с использованием пользовательских ресурсов.

Ежегодно актуализируемая программа сейчас насчитывает более 150 космических экспериментов. Структурно делится на три основных содержательных раздела, в которых, в свою очередь, эксперименты распределены на типы.

В соответствии с Положением о порядке планирования и проведения ЦР на РС МКС (Положение..., 2021) ЦР реализуются в рамках трёх разделов ДПЦР:

- научно-фундаментальные исследования (раздел НФИ);
- технологии освоения космического пространства (раздел ТОКП);
- практические задачи и образовательные мероприятия (раздел ПЗиОМ).

Коммерческие целевые работы размещаются в разделе ПЗиОМ. Общим назначением экспериментов, проводимых на РС МКС, является получение научного результата, который может быть выражен как в материальной, так и не материальной формах.

В соответствии с терминологией, принятой в ракетно-космической отрасли (СТО..., 2021), коммерческая целевая работа — это целевая работа, реализация которой осуществляется при полном или частичном финансировании за счёт средств, привлекаемых вне рамок федеральных целевых программ, координацию которых осуществляет Уполномоченный орган по космической деятельности.

По-другому термин «КЦР» можно определить, как «целевая работа с внебюджетным финансированием».

Жизненный цикл коммерческих целевых работ

Жизненный цикл КЦР отличается от общего числа проводимых целевых работ и состоит из четырёх основных этапов:

- программная интеграция,
- наземная подготовка,
- бортовая реализация,
- анализ результатов и оформление итоговых отчётных документов.

В целях упрощения проведения коммерческих целевых работ на РС МКС ведутся работы в следующих направлениях:

- создание оператора коммерческих целевых работ,
- создание и развитие рынка коммерческих космических экспериментов,
- снижение законодательных, нормативных, административных и иных барьеров для потенциальных постановщиков,
- изменение порядка подготовки и реализации коммерческих целевых работ на МКС,
- применение принципов проектного управления,
- изменение порядка проведения анализа результатов работ и подготовки итоговых документов.

Для упрощения доступа на МКС научным организациям и коммерческим структурам, а также для интенсификации исследований, выполняемых на коммерческой основе, за последние три года Госкорпорацией «Роскосмос» проведена работа по актуализации соответствующей нормативной документации, утверждён ряд новых нормативных документов.

Таким образом, созданы необходимые условия в части нормативного регулирования для наращивания объёма коммерческих целевых работ на пилотируемых космических комплексах.

Участники выполнения коммерческих целевых работ

Реализация КЦР проводится под контролем Госкорпорации «Роскосмос» при участии АО «Организация «Агат», АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», ПАО «РКК Энергия».

Все участники при выполнении КЦР взаимодействуют на линейном уровне в контуре входящих в Госкорпорацию головных предприятий отрасли.

Каждый постановщик КЦР подавая заявку на проведение исследования на РС МКС заключает соглашения с Госкорпорацией «Роскосмос» и АО «Организацией «Агат» для решения любых практических, материально-технических, технических и/или правовых вопросов, связанных с этим проектом.

Документы будут включать в себя: информацию с подробным изложением аспектов содержания проекта, план работы и ответственность каждой из сторон на каждом этапе проведения исследования: на этапе программной интеграции, разработки аппаратного и программного обеспечения, наземных испытаний и проверки, предполётных работ на стартовом объекте на этапе наземной подготовки,

процедур проведения экспериментов на орбите на этапе бортовой реализации, анализа и публикации результатов эксперимента, финансирования проекта и таких правовых аспектов, как, например, интеллектуальная собственность, конфиденциальность, принятие рисков, урегулирование споров и применение любых других соответствующих вопросов ответственности.

Эксперимент «Магнитная фабрикация»

В марте 2023 г. с использованием аппаратуры «3Д-Биопринтинг Солюшенс» на МКС была реализована ещё одна коммерческая целевая работа «Магнитная фабрикация».

Постановщиком выступило Частное учреждение Лаборатория биотехнологических исследований «3Д-Биопринтинг Солюшенс». При этом постановщик выразил готовность обеспечить финансирование работ по созданию и интеграции научной аппаратуры на борт МКС, а Госкорпорация «Роскосмос» обеспечила подготовку экипажа, доставку научной аппаратуры на борт МКС, выполнение эксперимента и возврат его результатов на Землю.

Проблематика отсутствия модельных кристаллов уникального размера и чистоты для реализации возможности их изучения, а также актуальность разработки эффективной противовирусной терапии послужили основой для постановки задачи по исследованию возможности управляемого формирования и фабрикация трёхмерных структур в условиях микрогравитации.

На первом этапе проводилось исследование процесса управляемой кристаллизации нуклеокапсидного и RBD-белков различных штаммов коронавируса в магнитном биопринтере. В ходе исследования изучались возможности управляемого формирования и фабрикация трёхмерных структур в условиях микрогравитации из органических и неорганических материалов.

Кюветы с результатами эксперимента были возвращены в спускаемом аппарате пилотируемого корабля «Союз-МС-19», укладка в составе шести кювет с соблюдением температурного режима доставлена в Москву и передана постановщику для дальнейших исследований на Земле.

Результатом КЦР стало изучение влияния магнитных полей и условий микрогравитации космоса на кристаллизацию биологически и терапевтически значимых белков, и их комплексов с различными лигандами.

Научная аппаратура для проведения эксперимента — магнитный 3Д-биопринтер «Орган.авт» находится в составе оборудования на борту РС МКС. Потенциальные области применения в условиях РС МКС очень обширны.

С учётом оптимизации процедур и параллельного проведения работ, от постановки задачи до возврата результатов эксперимента прошло около четырёх месяцев.

Успешный опыт реализации коммерческой целевой работы «Магнитная фабрикация» — это пример эффективного сотрудничества постановщика совместно с участниками целевой работы.

Такого результата удалось достичь в том числе благодаря новым требованиям к программной интеграции и наземной подготовке коммерческих целевых работ.

Участие в коммерческой целевой работе

Ключевыми моментами для инициации процедуры подготовки и проведения коммерческой целевой работы выступает подача заявки постановщиком и представление научно-технического обоснования эксперимента, а также подписание соглашения о объёме участия (вкладах сторон) и последующем использовании результатов.

Оператор КЦР на договорной основе оказывает сопровождение и общее руководство процессом подготовки и проведения эксперимента.

Стороны закрепляют зоны ответственности, планируют вклад каждой из сторон для подготовки и проведения эксперимента и фиксируют способы и условия дальнейшего использования результатов интеллектуальной деятельности (РИД), планируемых к получению в результате проведения КЦР.

В зависимости от научной новизны, актуальности технологии и востребованности результатов эксперимента в ракетно-космической отрасли вклады сторон могут варьироваться как по трудоёмкости, так и по стоимости работ. Например, в случае с экспериментом «Магнитная фабрикация», постановщик обеспечил финансирование работ по созданию и интеграции научной аппаратуры на борт МКС, а Госкорпорация «Роскосмос» обеспечила подготовку экипажа, доставку научной аппаратуры на борт МКС, выполнение эксперимента и возврат его результатов на Землю. При этом результаты интеллектуальной деятельности, полученные в ходе эксперимента, будут закреплены между сторонами в равных объёмах, согласно достигнутым соглашениям.

На сегодняшний день на борту МКС реализуются 11 совместных целевых работ, проводимых на основе частичного финансирования за счёт средств, привлекаемых вне рамок Федеральной космической программы России на 2016–2025 гг. Исследования проводятся в различных областях от фундаментальной науки до образовательных проектов.

Также возможно участие Оператора КЦР в коммерциализации результатов, полученных в ходе реализации КЦР в разных вариантах взаимодействия — от реализации коммерческих проектов на основе результатов до создания совместной организации.

На сегодняшний день на борту российского сегмента МКС находится более 30 комплексов научной аппаратуры и оборудования, готового к использованию при проведении космических экспериментов (https://www.roscosmos.ru/media/img/2020/katalog.na_5.pdf).

С помощью этого оборудования можно осуществлять различные физико-химические, биологические, биотехнологические и медицинские эксперименты; изучать подстилающую поверхность Земли и космическое излучение; исследовать реакцию органов человека на факторы космического полёта и определённые условия; создавать новые материалы; испытывать различные инновационные методики медицинского обеспечения.

Заключение

Международная космическая станция предоставляет предприятиям, предпринимателям и исследователям платформы для проведения своих исследований и тестирования техники в космосе. Возможности станции для исследований, разработок и производства на низкой околоземной орбите увеличились. Поддержка Госкорпорации «Роскосмос» исследователей в разработке и демонстрации новых технологий позволит продвинуться вперёд возможно и новым направлениям, например, производству в космосе и коммерческим исследованиям и разработкам. МКС помогает стимулировать рост космической отрасли в целом. Это наиболее экономически эффективная и доступная лаборатория для разработки, тестирования и эксплуатации технологий, которые способствуют прогрессу в важнейших областях на благо человечества.

Литература

Положение о порядке планирования и проведения целевых работ на Международной космической станции (Положение ЦР-МКС), утверждённое

приказом Госкорпорации «Роскосмос» и Российской академии наук, 2021.
СТО ГК «Роскосмос» 1033–2021 «Целевые работы коммерческие космические. Порядок подготовки и проведения». 2021.

EXPERIENCE IN CONDUCTING SCIENTIFIC EXPERIMENTS ON THE RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION (ON THE EXAMPLE OF THE EXPERIMENT “MAGNETIC FABRICATION”)

N. V. Kazinskiy

General Director of JSC “Organization “Agat”

Keywords: manned space complex, commercial target work, space experiment

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ МИКРОСПУТНИКОВ В ИНФРАСТРУКТУРЕ ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

С. И. Климов¹, Л. М. Зеленый¹, А. А. Петрукович¹, В. Н. Ангаров¹,
О. Л. Вайсберг¹, М. В. Веселов¹, А. М. Садовский¹, А. А. Скальский¹,
В. А. Грушин¹, Д. И. Новиков¹, Л. А. Осадчая¹, Н. А. Эйсмонт¹,
В. В. Летуновский¹, А. В. Костров², Я. Лихтенбергер³, Я. Надь⁴

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия

³ Университет имени Лоранда Этвёша, Будапешт, Венгрия

⁴ Научно-исследовательский центр физики имени Вигнера, Будапешт,
Венгрия

Ключевые слова: научно-образовательные микроспутники, космическая погода, атмосферно-ионосферные связи, атмосферная грозовая активность, высокоэнергичные процессы в атмосфере Земли, транспортно-пусковой контейнер

Запуск в 2002 г. изготовленного в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) российско-австралийского научно-образовательного микроспутника «Колибри-2000» (вес 20,5 кг) с использованием инфраструктуры российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) стал первым шагом в реализации научно-образовательных школьных микроспутников (Klimov, Tamkovich, 2005). В данном проекте участвовали школы Обнинска, Москвы (Россия) и Сиднея (Австралия). Несмотря на малые размеры и вес, «Колибри-2000» (рис. 1) имел 3,6 кг научной аппаратуры,

Климов Станислав Иванович – ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор, sklimov@iki.rssi.ru

Зеленый Лев Матвеевич – научный руководитель, доктор физико-математических наук, академик РАН, профессор, lzelenyi@iki.rssi.ru

Петрукович Анатолий Алексеевич – директор, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, a.petrukovich@cosmos.ru

Ангаров Вадим Николаевич – главный конструктор проекта, angarov@tarusa.ru

Вайсберг Олег Леонидович – главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор, olegv@iki.rssi.ru

Веселов Михаил Викторович – ведущий инженер, mveselov@cosmos.ru

Садовский Андрей Михайлович – учёный секретарь, кандидат физико-математических наук, a.sadovski@cosmos.ru

Скальский Александр Александрович – старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, skalsky@iki.rssi.ru

Грушин Валерий Аркадьевич – старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, vgrushin@iki.rssi.ru

Новиков Денис Игоревич – ведущий конструктор, dnovikov@iki.rssi.ru

Осадчая Людмила Алексеевна – ведущий инженер, osadchaya@iki.rssi.ru

Эйсмонт Натан Андреевич – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, neismont@rssi.ru

Летуновский Валерий Владимирович – начальник сектора, lvv@skb.kp.tarusa.ru

Костров Александр Владимирович – заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор, kstr@ipfran.ru

Лихтенбергер Янош – руководитель отделения, профессор, lityi@sas.elte.hu

Надь Янош – руководитель отдела, nagy.janos@wigner.hu

изготовленной в ИКИ РАН и Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ, которая позволяла проводить достаточно широкий спектр научно-образовательных исследований как в сфере «классической» космофизики, так и по изучению космической погоды, атмосферно-ионосферных связей и т. д., а также решать задачи космического образования (рис. 2).

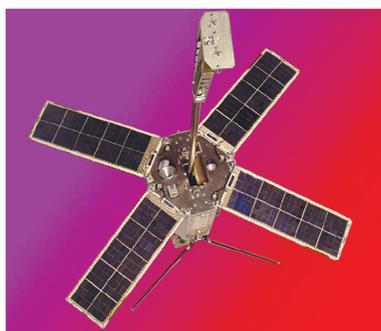


Рис. 1. Стенд демонстрации выхода «Колibri-2000» из транспортно-пускового контейнера на выставке МАКС-2003



Рис. 2. Семинар австралийских и российских школьников «Научные и технологические задачи проекта «Колibri-2000» в школе Равенсвуд, Сидней, Австралия, 2000 г.

Данные «Колibri-2000», в частности, показали, что в области приэкваториальных широт регулярно регистрируются возрастания потоков электронов, появление которых вблизи экватора может быть связано с грозовой активностью (Григорян и др., 1995).

Проведённые на микроспутнике «Чибис-М» с помощью комплекса научной аппаратуры «Гроза» (рис. 3) научно-методические исследования в широком диапазоне электромагнитных процессов, связанных с атмосферными грозовыми разрядами, свидетельствуют о значимости полученных результатов для потребителей текущей информации о состоянии электрической системы «ионосфера – атмосфера», а также для исследователей атмосферного электричества (Зеленый и др., 2015а, б). Это может способствовать развитию относительно нового раздела науки: «атмосферно-ионосферное электричество», учитывая, что ионосфера является важным интерфейсом в процессах взаимодействия системы «солнечный ветер – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – литосфера».

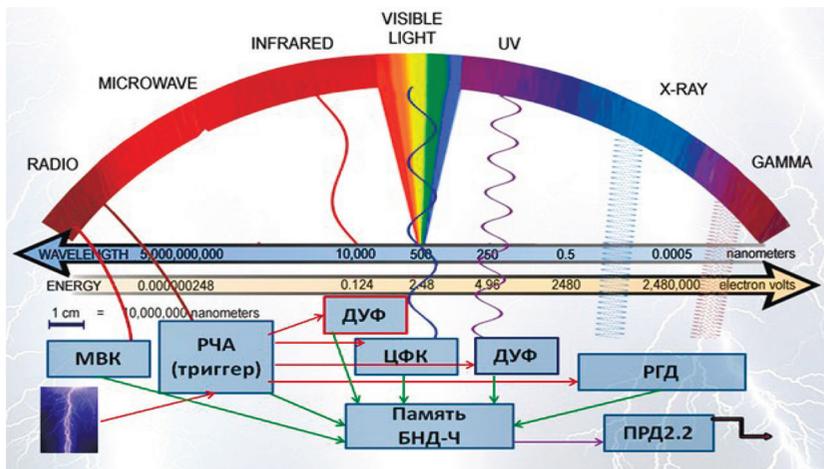


Рис. 3. «Чибис-М». Структурная схема КНА «Гроза» (Зеленый и др., 2015б)

Развивая компетенцию микроспутников, интегрированных в инфраструктуру Российского сегмента МКС и выводимых транспортным грузовым кораблём «Прогресс» на автономную орбиту высотой 500–600 км, ИКИ РАН провёл 03.04.2019 защиту эскизного проекта составной части опытно-конструкторской работы «Аппаратурный комплекс «Трабант». Представлен метод исследования ионосферы с помощью одновременно выводимых двух экземпляров микроспутников «Трабант» (2020–2024) для изучения:

- механизмов возникновения и динамики ионосферных неоднородностей в зависимости от активных процессов на Солнце и на Земле — космической погоды;
- закономерностей изменений плазменно-волновых и электромагнитных параметров в ионосфере природного и техногенного характера в широком динамическом и частотном диапазонах.

В режиме мониторинга (временное разрешение в десятки секунд) регистрируются длинные ряды однотипных данных, отражающих «правильную» статистику наблюдений. Высокочастотные режимы (волновая форма) включаются на отдельных участках орбиты, создавая максимально эффективную диагностику событий — это реализация идеи case study, однако платой за высокую информативность этого режима становится потеря картины явлений в целом.

Двухточечные измерения микроспутников «Трабант» (рис. 4) (Angarov et al., 2018) будут обеспечивать многопараметрные плазменно-волновые исследования на широком спектре детерминированных пространственных параметров (приблизительно от 0,1 до 100 км) (Kostrov et al., 2019).

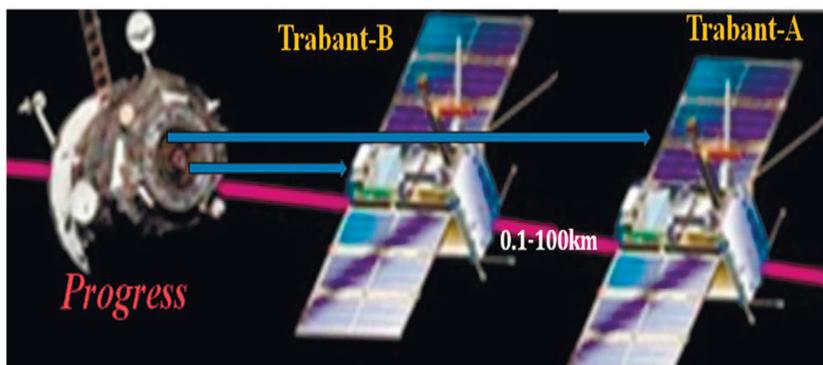


Рис. 4. Схема одномоментного выхода из транспортно-пускового контейнера двух микроспутников (~65 кг) «Трабант-А» и «Трабант-Б» после отделения транспортно-грузового корабля «Прогресс» от МКС и поднятия на орбиту ~600 км

В настоящей работе рассматриваются организационно-методические и технологические вопросы реализации научно-исследовательских микроспутников на новом этапе, основываясь, в первую очередь, на целевых работах, включённых в «Долгосрочную программу целевых работ, планируемых на РС МКС (ДПЦР)»:

- «Исследование природы высотных молний и сопутствующих им процессов в атмосфере и ионосфере Земли на базе микроспутника «Чибис-АИ» с использованием грузового корабля «Прогресс» (Целевая работа «Чибис-АИ» (Долгоносов и др., 2016));
- «Мониторинг окружающей космической среды электромагнитно-чистыми микроспутниками, интегрированными в инфраструктуру Международной космической станции» (Целевая работа «Трабант») (Klimov et al., 2019).

Следует также принять во внимание ориентацию «Роскосмоса» на создание новой Российской национальной орбитальной служебной станции РОСС (<https://naukatehnika.com/rossijskaya-kosmicheskaya-stanciya-gross.html?noredir=true>), имеющей более высокое, чем у МКС наклонение орбиты (~52°), что будет способствовать охвату всей территории России, включая полярные области (Мозгов и др., 2018).

Литература

Григорян О. Р., Климов С. И., Кузнецов С. Н., Савин С. П. Приэкваториальная зона: постоянные и переменные электрические поля, энергичные частицы // Междунар. симп. «Спутниковые исслед. ионосфер. и магнитосфер. процессов»: тез. докл. М., 1995. С. 5.

Долгоносов М. С., Л. М. Зеленый, Готлиб В. М. и др. Перспективы исследований высокоэнергичных процессов в атмосфере земли: «Чибис-АИ» и «Обстановка 2.1» // 11-я Ежегод. конф. «Физика плазмы в солнечной системе»: сб. тез. 15–19 февр. 2016, ИКИ РАН. 2016. С. 204.

Зеленый Л. М., Климов С. И., Ангаров В. Н. и др. (2015а) Проект микроспутник «Чибис-М»: Опыт создания и реализации // Исслед. солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках: материалы науч. сессии Секции солнечно-земных связей Совета по космосу РАН / под ред. чл.-кор. РАН А. А. Петруковича. Сер. «Механика, управление и информатика» М.: ИКИ РАН, 2015. С. 91–118.

Зеленый Л. М., Климов С. И., Ангаров В. Н. и др. (2015б) Космический эксперимент «Микроспутник» на Российском сегменте меж-

дународной космической станции // Косм. техника и технологии. 2015. № 3(10). С. 26–37.

Мозгов К. С., Носикова Н. С., Ренский С. И. и др. Исследование влияния грозовой активности на околоземное космическое пространство // Космонавтика и ракетостроение. 2018. Вып. 5(104). С. 148–161.

Angarov V. N., Dolgonosov M. S., Zelenyi L. M., Klimov S. I. Microsatellites as a part of the International Space Station Russian Segment infrastructure // 1st Intern. Aerospace Symp. “The Silk Road”. Dolgoprudny, Moscow Region, Russia, MIPT, 6–8 Dec. 2018.

Klimov S. I., Afanasyev Yu. V. Results of in-flight operation of scientific payload on micro-satellite “Kolibri-2000” // Acta Astronautica. 2005. V. 56. Iss. 1–2. P. 99–106.

Klimov S. I., Tamkovich G. M. Aerospace education program realization by means of the micro-satellite // Acta Astronautica. 2005. V. 56. Iss. 1–2. P. 301–306.

Klimov S. I., Vaisberg O. et al. Spatial-Temporal Study of Plasma-Waves and Ionospheric Parameters using Microsatellites // 4th COSPAR Symp. Nov. 4–8, 2019, Herzliya, Israel. 2019. 368. D.1(3). P. 34.

Kostrov A., Galka A., Yanin D. et al. New diagnostics to measure the density and wave processes in the ionospheric plasma on board of microsatellite Trabant // 4th COSPAR Symp. Nov. 4–8, 2019, Herzliya, Israel. 2019. A1. P. 52.

EXPERIENCE AND PROSPECTS FOR IMPLEMENTING RESEARCH MICROSATELLITES IN ORBITAL STATION INFRASTRUCTURE

S. I. Klimov¹, L. M. Zeleny¹, A. A. Petrukovich¹, V. N. Angarov¹, O. L. Vaysberg¹,
A. M. Sadovsky¹, A. A. Skalsky¹, V. A. Grushin¹, A. O. Osadchaya¹, D. I. Novikov¹,
N. A. Eismont¹, V. V. Letunovsky¹, A. V. Kostrov², Ja. Lichtenberger³, Ja. Nagy⁴

¹ Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

² A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

³ Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary

⁴ Wigner Research Centre for Physics, Budapest, Hungary

Keywords: scientific and educational microsatellites, space weather, atmospheric-ionospheric coupling, atmospheric thunderstorm activity, high-energy processes in the Earth’s atmosphere, transport and launch container

«УФ АТМОСФЕРА» (MINI-EUSO) — МОНИТОРИНГ ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ЗА ЧЕТЫРЕ ГОДА НА БОРТУ МКС

П. А. Климов¹, А. А. Белов^{1,2}, С. А. Шаракин¹, М. Ю. Зотов¹

От имени коллаборации JEM-EUSO Collaboration

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им.

Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Ключевые слова: УФ-излучение, транзиентные атмосферные явления, метеоры

В августе 2019 г. на борт российского сегмента МКС (РС МКС) была доставлена новая научная аппаратура — «УФ атмосфера» (Mini-EUSO). Научная аппаратура представляет собой широкоугольный линзовый телескоп с высоким временным разрешением (Capel et al., 2018) и предназначена для исследования пространственно-временной структуры ультрафиолетового (УФ) излучения ночной атмосферы Земли. В ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) возможно наблюдение разнообразных процессов, в первую очередь связанных с возбуждениями линий азота, содержащегося в атмосфере Земли. Это позволяет исследовать как объекты астрофизической природы по флуоресцентному свечению развивающегося в атмосфере каскада (космические лучи, релятивистские пылинки и пр.) так и внутриатмосферные процессы: грозовые явления (молниевые разряды в нижней атмосфере, транзиентные световые явления), квазистационарное свечение верхних слоёв под действием околоземной космической радиации, например полярные сияния. Важным практическим аспектом представляется мониторинг антропогенного/техногенного свечения. Вследствие этого космический эксперимент «УФ атмосфера» становится многофункциональным и может решать целый ряд задач в разных областях науки. Основной особенностью научной аппаратуры стало высокое временное разрешение (2,5 мкс), которое позволяет регистрировать объекты, двигающиеся в атмосфере на релятивистских скоростях (Belov et al., 2018; Capel et al., 2019).

Эксперимент проводится с помощью широкоугольного детектора (телескопа), устанавливаемого во время сеанса эксперимента на иллюминатор № 9 служебного модуля РС МКС. За четыре года работы аппаратуры на борту проведено более 90 успешных сеансов (рис. 1).

Один из наиболее интересных объектов, регистрируемых в космическом эксперименте «УФ атмосфера» — высоко атмосферные транзиентные явления типа ELVES (*англ.* Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources). Они представляют собой расширяющиеся светящиеся кольца, длительность свечения которых не превышает 1 мс, а максимальный диаметр может достигать 700 км и более! Такое свечение возникает на высоте около 90 км, когда сферический фронт электромагнитной волны

Климов Павел Александрович — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, pavel.klimov@gmail.com

Белов Александр Андреевич — научный сотрудник, кандидат технических наук, aabcad@gmail.com

Шаракин Сергей Александрович — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, sharakin@mail.ru

Зотов Михаил Юрьевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, zotov@eas.sinp.msu.ru

от электрического разряда в тропосфере достигает ионосферы (рис. 2). Благодаря высокому временному разрешению детектора «УФ атмосфера» удалось выяснить, что структура таких событий может быть куда более сложной. Так, встречаются «многократные ELVES» (с двумя и даже тремя кольцами свечения), а сами кольца могут быть не симметричными в виду неравномерного распределения энергии. Всё это говорит о комплексных процессах, участвующих в их появлении — сложных внутриоблачных и межоблачных разрядах, приводящих к генерации цепочки электромагнитных импульсов, нагревающих ионосферу Земли. Регистрация и исследования таких явлений позволяют использовать их как своеобразный зонд для процессов в глубине атмосферы и внутри облаков. Геометрия события (зависимость радиуса кольца свечения от времени и расположение породившего его электромагнитного разряда) может быть восстановлена по характерному профилю сигнала в каждом из каналов фотоприёмника, в поле зрения которого попадает транзитное свечение (рис. 3).

Детектор «УФ атмосфера» способен регистрировать различные трековые события, например, метеоры. За время работы прибора уже зарегистрировано порядка 10 тыс. событий, имеющих характерную для метеора кривую свечения и «след» на фокальной поверхности прибора. По этим данным удалось получить статистическое распределение метеоров по яркости и их скорости прихода. Во многих случаях обнаружение сигналов метеоров представляет собой нетривиальную задачу, поскольку их яркость может быть существенно ниже, чем свечение окружающего УФ-фона. Если на первых этапах отбор проводился относительно простым пороговым триггером, то затем на основе этих событий удалось разработать алгоритмы поиска треков на основе нейросетевого подхода, который позволил распознать в экспериментальных данных значительное число относительно тусклых метеоров. Эта методика будет в дальнейшем развиваться и использоваться для проверки и дополнения результатов, получаемых в рамках традиционного подхода. Кроме этого, благодаря тому, что разработанные нейронные сети обладают простой архитектурой, возможна их реализация в бортовой электронике последующих орбитальных экспериментов (on-flight триггер).

Проект «УФ атмосфера» содержит ряд технологических задач, помимо научных. В первую очередь, это тестирование прототипа большого детектора космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ). Разработанный в рамках коллаборации JEM-EUSO, этот прибор представляет собой миниатюрный (в масштабе примерно 1:10) аналог детектора космических лучей предельно высокой энергии (КЛ ПВЭ). В аппаратуре «УФ атмосфера» используется оптическая схема и электроника, разрабатываемая для будущих космических миссий КЛПВЭ (Klimov et al., 2022), JEM-EUSO (JEM-EUSO Collaboration et al., 2015) и РОЕММА (*англ.* Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) (Olinto et al., 2021). Несмотря на то, что регистрация тусклого свечения широкого атмосферного ливня (ШАЛ) КЛ ПВЭ при таких размерах прибора мало вероятно, на такой установке возможно отработать как аппаратуру, так и алгоритмы регистрации и реконструкции параметров трековых событий типа ШАЛ. Более того, детальное исследование пространственно-временной структуры УФ-излучения атмосферы позволяет качественно оценить пороги регистрации КЛ ПВЭ, время экспозиции прибора, и, соответственно, его научный потенциал — число ожидаемых частиц высокой энергии.

Космический эксперимент «УФ атмосфера» продолжается на борту МКС уже практически четыре года. За это время проведено более 90 успешных сеансов измерений, зарегистрированы свечения атмосферы различной природы: от свечения городов и грозových областей до загадочных коротких УФ-вспышек неизвестной пока природы (Bacholle et al. 2021; Casolino M. et al. 2023).



Рис. 1. Широкоугольный телескоп «УФ атмосфера» в процессе наземной подготовки (*слева*), научная аппаратура «УФ атмосфера» на борту МКС в процессе монтажа (*справа*)

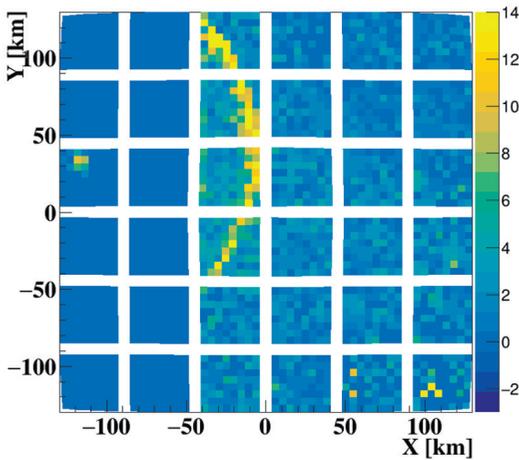


Рис. 2. Событие типа ELVES, зарегистрированное 26 мая 2020 г. (часть фотоприёмника ввиду значительной засветки от молниевых разряда автоматически переключилась в режим пониженной чувствительности)

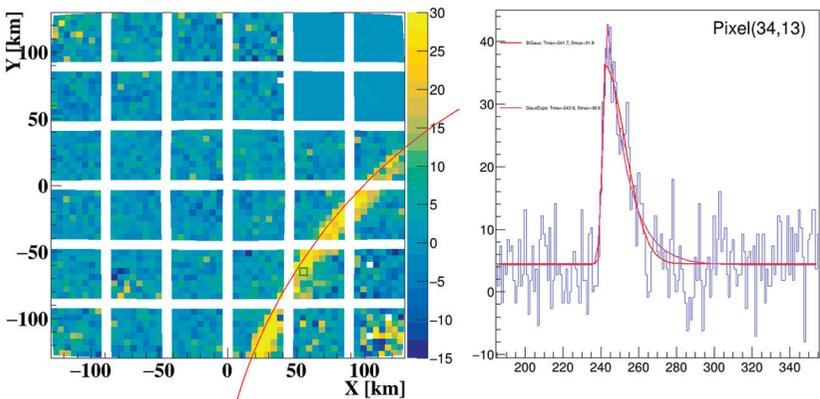


Рис. 3. Пример реконструкции события типа ELVES, зарегистрированного 5 декабря 2019 г. Приведён типичный сигнал одного из пикселей (*справа*) (указан зелёным квадратиком на карте каналов *слева*) и две его аппроксимации. Распределение пиков сигналов по полю зрения позволяет с высокой точностью определить положение породившего свечение электромагнитного импульса (красная дуга соответствует восстановленному положению фронта волны в момент 250)

Для исследования их происхождения необходим дальнейший набор статистики, чтобы понять, с чем они связаны, в каких областях преимущественно наблюдаются и какой механизм их появления.

Следующим большим шагом в развитие этой методики исследования станет расположение научной аппаратуры за пределами станции. Это позволит обеспечить его непрерывную работу и увеличить в разы время экспозиции. Такой проект прорабатывается на сегодняшний день — ВАТТ (высококочувствительный атмосферный телескоп-трансформер). Реализация проекта «УФ атмосфера» является важным шагом при разработке астрофизических обсерваторий космических лучей предельно высоких энергий следующего поколения (проекты «КЛПВЭ», РОЕММА).

Литература

- Bacholle S., Barrillon P., Battisti M. et al.* Mini-EUSO mission to study Earth UV emissions on board the ISS // *The Astrophysical J. Supplement Series*. 2021. V. 253. No. 2. Article 36. DOI 10.3847/1538-4365/abd93d.
- Belov A., Bertaina M., Capel F. et al.* The integration and testing of the Mini-EUSO multi-level trigger system // *Advances in Space Research*. 2018. V. 62. No. 10. P. 2966–2976. DOI: 10.1016/j.asr.2017.10.044.
- Capel F., Belov A., Casolino M. et al.* Mini-EUSO: A high resolution detector for the study of terrestrial and cosmic UV emission from the International Space Station // *Advances in Space Research*. 2018. V. 62. No. 10. P. 2954–2965. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.030>.
- Capel F., Belov A., Cambiè G. et al.* Mini-EUSO data acquisition and control software // *J. Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*. 2019. V. 5. No. 4. Article 044009.
- Casolino M., Barghini D., Battisti M. et al.* Observation of night-time emissions of the Earth in the near UV-range from the International Space Station with the Mini-EUSO detector // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 284. Article 113336. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113336>.
- JEM-EUSO Collaboration, Adams J. H.-Jr., Ahmad S., Albert J.-N. et al.* The JEM-EUSO mission: An introduction // *Experimental Astronomy*. 2015. V. 40. P. 3–17. OI: 10.1007/s10686-015-9482-x.
- Klimov P., Battisti M., Belov A. et al.* Status of the K-EUSO Orbital Detector of Ultra-High Energy Cosmic Rays // *Universe*. 2022. V. 8. No. 2. Article 88. <https://doi.org/10.3390/universe8020088>.
- Olinto A. V., Krizmanic J., Adams J. H. et al.* The POEMMA (probe of extreme multimessenger astrophysics) observatory // *J. Cosmology and Astroparticle Physics*. 2021. V. 2021. No. 06. Article 007. DOI 10.1088/1475-7516/2021/06/007.

UV ATMOSPHERE (MINI-EUSO) — MONITORING OF ATMOSPHERE EMISSION WITH HIGH TIME RESOLUTION. RESULTS OF WORK FOR 4 YEARS ON BOARD THE ISS

P. A. Klimov¹, A. A. Belov^{1,2}, S. A. Sharakin¹, M. Yu. Zotov¹

On behalf of the JEM-EUSO Collaboration

¹ Skobeltsyn Institute of Nuclear Research, Moscow State University, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Keywords : UV-emission, transient luminous events, meteors

ЗАДАЧИ РОССИЙСКОЙ ПРОГРАММЫ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТОВ

С. К. Крикалёв

Государственная корпорация «Роскосмос», Москва, Россия

Ключевые слова: пилотируемая космонавтика, Российская орбитальная станция, многоцелевой научный модуль, освоение Луны

Российская пилотируемая космонавтика вправе гордиться своими достижениями. Достаточно упомянуть первый полёт человека в космос, первый выход в открытое космическое пространство, первую орбитальную станцию и много других приоритетных достижений, перечень которых занял бы не одну страницу. Если на заре космонавтики, полёты Юрия Гагарина, Алексея Леонова, Валентины Терешковой и других первопроходцев освоения космоса демонстрировали возможности человека совершать космические полёты, то с развитием технологий, совершенствованием космической техники, цели и задачи российской пилотируемой программы видоизменялись в соответствии с логикой развития космонавтики. От одноместных кораблей «Восток» мы перешли к многоместным «Восходам». Затем появились корабли «Союз», которые обеспечивали возможность сближения и стыковки, что открывало новые возможности развития программы. Затем появилась серия станций «Салют», где каждая новая станция давала новые возможности (второй стыковочный узел, система дозаправки...). Космический полёт перестал быть самоцелью, а основной целевой задачей стало проведение исследований, направленных на получение новых научных данных. В последние годы всё больше внимания в программе уделяется практическим вопросам, таким как отработка уникальной научной аппаратуры и новых методик её применения, демонстрация новых критически важных технологий, а также работам, результаты которых имеют высокий внедренческий потенциал и непосредственное практическое применение в повседневной жизни на земле.

Сегодня российская пилотируемая космонавтика находится на пороге нового этапа своего развития. Уже достаточно хорошо изучены особенности функционирования пилотируемых систем на средних широтах. Российские учёные и инженеры космической отрасли приобрели необходимый опыт создания современных космических аппаратов и систем. Российские космонавты и службы обеспечения космического полёта имеют лучшие в мире навыки работы. Госкорпорации «Роскосмос» доступны все необходимые технологии для того, чтобы отправлять в космос непрофессиональных космонавтов, туристов и специалистов непрофильных отраслей. Это открывает путь к более широкому использованию низких околоземных орбит и освоению новых областей космического пространства за их пределами. Современные цели и задачи российской пилотируемой космонавтики устанавливаются, исходя именно из этих, новых возможностей.

Сейчас мы уже переходим от освоения низких околоземных орбит к их практическому использованию. Основной текущей задачей остаётся повышение эффективности использования российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). В частности, в ближайшие 5–7 лет планируется в полном объёме задействовать инфраструктуру нового многофункционального лабораторного модуля «Наука» (МЛМ) для достижения максимальной результатив-

Крикалёв Сергей Константинович — лётчик-космонавт, исполнительный директор по пилотируемым программам

ности программы целевых работ. Параллельно идёт проектирование новой Российской орбитальной станции (РОС). График работ построен таким образом, чтобы по завершению программы МКС, ориентировочно в 2028–2030 гг., РОС уже была готова к функционированию в орбитальном полёте. Предполагается, что РОС станет форпостом для движения российских космических средств за пределы низких околоземных орбит (НОО). Станция будет иметь открытую архитектуру, что позволит сравнительно быстро менять её конфигурацию в соответствии текущим требованиям.

К пилотируемому освоению Луны ГК «Роскосмос» приступит, когда будут созданы и отработаны необходимые для этого средства. Наиболее важные из них — ракета-носитель сверхтяжёлого класса (РН СТК) линейки «Ангара», лунный пилотируемый корабль и лунный посадочно-взлётный комплекс. Работы по этим средствам уже ведутся. Ожидается, что в полном объёме они будут завершены в начале 2030-х гг. Также весьма важно предварительно произвести рекогносцировку на лунной поверхности робототехническими средствами и выбрать наиболее подходящий участок для высадки экипажей и создания на нём, в более далёком будущем, посещаемой лунной базы с научно-производственными полигонами. Задачи изучения Луны с целью подготовки будущих пилотируемых экспедиций включены в программу исследований Луны автоматическими космическими аппаратами «Луна-25» — «Луна-28». Развитие лунного направления российской программы пилотируемых космических полётов во многом будет зависеть от успехов этих миссий.

Российская космическая промышленность имеет все возможности для того, чтобы реализовать намеченные планы самостоятельно. В то же время, российская пилотируемая программа открыта для международного сотрудничества. Накопленный за десятилетия опыт проведения совместных работ даёт основание полагать, что участие международных партнёров в российской пилотируемой программе будет продуктивным и взаимовыгодным.

В целом можно констатировать, что российская программа пилотируемых полётов, реалистична, достаточно амбициозна и сбалансирована в отношении целей задач и ресурсных возможностей.

TASKS OF THE RUSSIAN MANNED SPACE FLIGHT PROGRAM

S. K. Krikalev

State Corporation Roscosmos, Moscow, Russia

Keywords: manned cosmonautics, Russian orbital station, multipurpose scientific module, lunar exploration

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ СПУСКА МАЛОГО СПУСКАЕМОГО АППАРАТА ДЛЯ ДОСТАВКИ НАУЧНЫХ ГРУЗОВ С МКС

В. В. Корянов, М. Н. Ваюта, А. С. Кухаренко

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия

Ключевые слова: малый спускаемый аппарат, спуск в атмосфере, краевая баллистическая задача, орбитальные станции, баллистический анализ

Основная цель создания малого спускаемого аппарата (МСА) состоит в обеспечении доставки малых научных грузов с Международной космической станции (МКС) с учётом соблюдения температурного режима и пределов допустимых перегрузок. Наряду с этим необходимо увеличить точность посадки аппарата и обеспечить снижение перегрузок на участке спуска в плотных слоях атмосферы. Помимо этого, к аппарату предъявляются требования к габаритам, что обусловлено тем, что запуск МСА планируется производить из шлюзовой камеры многофункционального лабораторного модуля «Наука» российского сегмента (РС) МКС, либо с борта Российской орбитальной станции. Также в работе решается краевая баллистическая задача по попаданию в отведённый район посадки.

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений развития отечественной и заграничной космонавтики стало создание малых капсул для доставки полезного груза из околоземного пространства. Условие микрогравитации на орбитальных станциях позволяет проводить большое количество уникальных экспериментов, которые невозможно провести на Земле. Однако в ряде случаев встаёт необходимость срочной доставки результатов экспериментов на поверхность Земли с их дальнейшим изучением на предприятиях и в научно-исследовательских институтах. Исследования на МКС — это не только эксперименты, но и производство, которое будет использоваться в ближайшем будущем. Губительными факторами для результатов экспериментов выступают: долгое хранение на борту станции, необходимость поддерживать заданные параметры среды во время транспортировки (температура, влажность), испытываемые кратковременные перегрузки во время спуска не более чем 6 ед. (Иванов, Лысенко, 2016). В результате учёные на Земле могут получить из космоса уже пришедшие в негодность бесценные образцы научных экспериментов. Эти проблемы могло бы решить использование малых спускаемых капсул, хранимых на борту орбитальных станций до востребования и независимых от существующего грузопотока. Поэтому создание малого спускаемого аппарата (МСА) становится перспективной задачей.

Проектируемый МСА относится к области аэрокосмической техники и может быть использован при создании возвращаемых с орбиты автономных автоматических капсул многократного применения (Миненко и др., 2021).

Корянов Всеволод Владимирович — кандидат технических наук, доцент, доцент, vkoryanov@bmstu.ru

Ваюта Максим Николаевич — студент, maxim.vayuta@gmail.com

Кухаренко Андрей Сергеевич — аспирант, kuharenko-as@mail.ru

Обзор аналогов

Разрабатываемый аппарат имеет множество аналогов в ракетно-космической технике РФ и иностранных космических агентствах. Среди них можно выделить несколько особенно интересных с точки зрения конструкции и компоновки аппаратов.

Аппараты серии «Бион»

Аппараты серии «Бион» (Карфидов, 2021а) предназначены для проведения в орбитальном полете фундаментальных и прикладных исследований по космической биомедицине и биотехнологии с возвращением результатов экспериментов на Землю. На космический аппарат «Бион» возможна установка дополнительной полезной нагрузки снаружи спускаемого аппарата, которая может отделяться от космического аппарата для автономного полёта. Исследования на космическом аппарате «Бион» проводились с использованием уникальной научной аппаратуры и различных биообъектов, стоящих на различных уровнях биологической организации: одноклеточные организмы, культуры тканей, низшие и высшие растения, насекомые, рыбы, амфибии, черепахи, белые лабораторные крысы, обезьяны. Всего в космосе побывало более 37 видов биообъектов.

При спуске полезная нагрузка испытывала большие перегрузки и совершала неуправляемый спуск, что затрудняет поиск аппарата после приземления. Большие размеры капсулы не позволят использовать и хранить её на МКС. Выбор подобных типов капсул не рационален для доставки предполагаемых грузов с орбитальных станций.

Капсула для транспортировки биологических грузов НТВ-R/HSRC

Капсула НТВ-R типа «Аполлон» (Карфидов, 2021б), разработанная японским аэрокосмическим агентством JAXA, имела диаметр 0,84 м и высоту 0,63 м и предназначалась для возврата экспериментальных образцов с модуля «Кибо» МКС и демонстрации базовой технологии разработки возвращаемого транспортного средства. Требования к температуре полезной нагрузки (в пределах 4 ± 2 °С в течение 3,5 дней) выполнялись с помощью технологии пассивного аккумулярования тепла с использованием вакуумной двухслойной изоляции на основе COTS в шахматном порядке.

Капсула осуществляла торможение в атмосфере при помощи одного парашюта, уложенного кольцом вокруг полезной нагрузки. Полезная нагрузка размещалась в теплоизолированном контейнере, поддерживающем оптимальные условия для её сохранности в процессе транспортировки. На аппарате располагались восемь двигателей стабилизации и ориентации. Капсула была покрыта теплоизоляционным материалом, разработанным японскими инженерами. Аппарат производил посадку на воду, откуда впоследствии транспортировался на борт корабля обслуживающей командой. Линейный размер области посадки варьировался от 0,5 до 12 000 км. Недостатками данного аналога представляется большой разброс размеров области падения, длительный процесс с момента посадки до извлечения полезной нагрузки, высокая масса термостатирующего контейнера в 30 кг для полезной нагрузки из-за большого количества термозащитных слоёв и отделение капсулы от модуля «Конотори» за отсутствием специального пускового устройства для неё на МКС.

Проектируемый МСА имеет сегментальную форму с углом стенки 11° с диаметром миделя 500 мм и длиной 500 мм и обладает массой 60 кг. Данные габариты и масса обусловлены особенностью эксплуатации шлюзовой камеры, установленной на РС МКС.

Математическая модель

Орбитальный участок движения МСА исследовался с помощью системы дифференциальных уравнений в оскулирующих элементах, имеющих вид (Эльясберг, 1965):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{da}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot \frac{2a}{1-e^2} \left\{ S e \sin \vartheta + T \frac{p}{r} \right\}, \\ \frac{de}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left\{ S \sin \vartheta + T \left[\left(1 + \frac{r}{p} \right) \cos \vartheta + e \frac{r}{p} \right] \right\}, \\ \frac{dw}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left[-S \frac{\cos \vartheta}{e} + T \frac{1}{e} \left(1 + \frac{r}{p} \right) \sin \vartheta - W \frac{r}{p} \operatorname{ctg} i \cdot \sin u \right], \\ \frac{d\Omega}{dt} &= W \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot \frac{r}{p} \cdot \frac{\sin u}{\sin i}, \\ \frac{di}{dt} &= W \sqrt{\frac{p}{\mu}} \cdot \frac{r}{p} \cos u, \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left[\frac{\mu}{r^2} + S \frac{\cos \vartheta}{e} - T \frac{1}{e} \left(1 + \frac{r}{p} \right) \sin \vartheta \right], \end{aligned} \right.$$

где S ($\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$) — проекция возмущающего ускорения на радиальное направление; T ($\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$) — проекция возмущающего ускорения на касательное направление; W ($\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$) — проекция возмущающего ускорения на бинормальное направление; $\mu = 3,98602 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2}$ — гравитационный параметр Земли.

Причём:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \vartheta}, \quad u = w + \dots$$

Как было сказано выше аппарат начинает своё движение с орбиты МКС, поэтому в качестве исходных данных берутся параметры орбиты МКС.

Кинематические уравнения составлены в сферической скоростной системе координат (СК) (Шалыгин, 2006), вращающейся вместе с Землёй. Выбор подобной СК обоснован тем, что при переходе от кеплеровых элементов к параметрам движения в связанной системе координат СК требуются минимальные вычисления, что уменьшает вычислительную ошибку и время, затрачиваемое на расчёт.

В сферической земной СК положение аппарата определяется сферическими координатами r , φ , λ , а вектор скорости задаётся величиной скорости V , углом наклона θ к плоскости местного горизонта и углом курса η (т. е. углом между проекцией вектора скорости на плоскость местного горизонта и местной параллелью). Векторы ускорения и равнодействующей внешних сил \mathbf{F} проектируются на направления касательной к траектории $\boldsymbol{\tau}_0$, нормали к траектории \mathbf{n}_0 , лежащей в плоскости, содержащей векторы \mathbf{r} и \mathbf{V} , и нормали к указанной плоскости \mathbf{k}_0 .

Дифференциальные уравнения поступательного движения центра масс в данной системе выглядит следующим образом (Шалыгин, 2006):

$$\left\{ \begin{array}{l} m\dot{V} = F_{\tau} + F_{\tau}^{\text{коп}} + F_{\tau}^{\text{пер}} - mg_{\tau}, \\ mV\dot{\theta} = F_n + \frac{mV^2 \cos \theta}{r} + F_n^{\text{коп}} + F_n^{\text{пер}} - mg_n, \\ mV \cos \theta \dot{\eta} = F_k - \frac{mV^2 \text{tg} \varphi \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos \eta}{r} + F_k^{\text{коп}} + F_k^{\text{пер}} - mg_k, \\ \dot{r} = V \sin \theta, \\ \dot{\varphi} = \frac{V \cos \theta \cdot \sin \eta}{r}, \\ \dot{\lambda} = \frac{V \cos \theta \cdot \cos \eta}{r \cos \varphi}, \end{array} \right.$$

где m (кг) — масса МСА; F_{τ}, F_n, F_k (Н) — проекции аэродинамических сил на соответствующие направления; $F_{\tau}^{\text{коп}}, F_n^{\text{коп}}, F_k^{\text{коп}}$ (Н) — проекции силы Кориолиса на соответствующие направления; $F_{\tau}^{\text{пер}}, F_n^{\text{пер}}, F_k^{\text{пер}}$ (Н) — проекции переносной силы на соответствующие направления; g_{τ}, g_n, g_k ($\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$) — проекции ускорения силы тяжести на соответствующие направления; φ (рад) — широта; λ (рад) — долгота.

Математическая модель движения на орбитальном и атмосферном участке составляется для решения краевой баллистической задачи по попаданию в заданный район падения для нескольких вариантов расположения первоначальных плоскостей орбиты МКС, отличающихся только по долготе восходящего узла. Следует отметить, что в данном случае будет только два целевых параметра (широта и долгота точки падения) и шесть варьируемых параметров в общем случае (три координаты точки начала схода с орбиты и три компоненты вектора скорости тормозного импульса), вследствие чего необходимо решить краевую баллистическую задачу по двум параметрам, а затем провести оптимизацию по остальным параметрам.

В первом приближении рассматривается выдача импульса в касательном и бинормальном направлениях, не приводящим к изменению угла наклона траектории. Это обусловлено тем, что для изменения наклона и долготы восходящего узла переходной орбиты необходимо выдать импульс скорости по нормали к плоскости первоначальной орбиты (Дмитриевский и др., 1991). В силу приведенных рассуждений начальные значения долготы восходящего узла и истинной аномалии можно исключить из числа варьируемых параметров, отнеся их к начальным данным. Однако стоит отметить, что от величины истинной аномалии будет напрямую зависеть величина тормозного импульса, поэтому в последующих работах будет рассмотрено решение задачи оптимизации по критерию величины импульса. Таким образом, в данной работе рассматривается решение двухпараметрической краевой баллистической задачи по параметрам абсолютной величины тормозного импульса и приращению начального угла курса. Краевая баллистическая задача решается методом секущих (Решение..., 2013).

Решение краевой баллистической задачи было реализовано в среде программирования Visual Studio 2019 на языке C++.

Заключение

Была составлена математическая модель движения МСА на орбитальном и атмосферном участках, а также решена двухпараметрическая краевая баллистическая задача по попаданию в заданный район посадки. Полученные результаты показывают, что максимальная перегрузка на атмосферном участке не превышает 3 ед., что удовлетворяет основному требованию, предъявляемому к проектируемому

аппарату. Разработанное программно-математическое обеспечение можно использовать для дальнейшего решения задач оптимизации.

Литература

- Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н., Богодистов С. С.* Внешняя баллистика: учеб. для студентов вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1991. 640 с.
- Дубошин Г. Н.* Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1968. 800 с.
- Иванов Н. М., Лысенко Л. Н.* Баллистика и навигация космических аппаратов: учеб. для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 523 с.
- Карфидов В. Ю.* (2021а) Космонавтика: краткий справ. В 6-ти т. Т. 1. Космонавтика СССР/России. Люберцы, 2021, 768 с.
- Карфидов В. Ю.* (2021б) Космонавтика: краткий справ. В 6-ти т. Т. 2. Космонавтика США. Люберцы, 2021. 872.
- Миненко В. Е., Майорова В. И., Павлюченко В. А. и др.* Авторотирующий спускаемый аппарат для доставки малых научных грузов с орбитальных комплексов // 45-е Академ. чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сб. тез. В 4-х т. Т. 3. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021.
- Решение нелинейных уравнений: методические указания к лабораторной работе / М-во образования и науки Российской Федерации; Волгогр. гос. архитектур.-строит. ун-т; сост. Н. Н. Потапова, О. М. Забродина. Волгоград: ВолгГАСУ, 2013.
- Шалыгин А. С.* Баллистика космических аппаратов: учеб. пособие. СПб.: БГТУ, 2006. 129 с.
- Эльясберг П. Е.* Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М., 1965, 540 с.

BALLISTIC ANALYSIS OF DESCENT TRAJECTORIES OF A SMALL LANDER FOR DELIVERY OF SCIENTIFIC CARGO FROM THE ISS

V. V. Koryanov, M. N. Vayuta, A. S. Kukharenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: small reentry vehicle, atmosphere reentry, boundary ballistic problem, orbital stations, ballistic analysis

МЕТОДЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И РЕЗУЛЬТАТЫ АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМА В АВИАЦИОННЫХ КАБИНАХ

Г. Н. Кузнецов, Д. А. Смагин

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: шумы внутри вертолётов и космических аппаратов, подавление шумов и дискретных составляющих активными методами и техническими средствами

Авиационные и космические аппараты считаются одними из систем, наиболее насыщенных техническими средствами, возбуждающими в лётных кабинах, рабочих отсеках, салонах и других внутренних помещениях достаточно мощные широкополосные и узкополосные шумы, отрицательно воздействующие на работоспособность лётного состава. Внутри летательных аппаратов имеется много источников, каждый из которых характеризуется своей пространственно-частотно-временной структурой звукового поля. Возможности применения пассивных технических средств ограничиваются массо-габаритами, необходимыми для подавления указанных шумов, особенно на низких частотах. В связи с этим, как нам представляется, альтернативы применению активных методов, предназначенных для снижения шумов внутри летательных аппаратов, не существует. Как следствие, в разных странах выполняются исследования и разработки методов и технических средств активного гашения (САГ). В связи с этим можно отметить большие успехи применения методов активного гашения в различных транспортных средствах — авиационных, железнодорожных, автомобильных, а также в метро.

В настоящее время разработаны самые различные методы и средства активного гашения, но, в основном, они базируются на применении либо алгоритмов деструктивной интерференции, либо согласованном с падающей волной управлении импедансом приёмно-излучающих модулей. Оптимальное управление проводится преимущественно сигналами, принятыми датчиками, расположенными в непосредственной близости от источника, шумы которого необходимо подавить. В этом случае, в зависимости от поставленной задачи, имеется принципиальная возможность создания локальной «зоны тишины» или подавления шума во всем объёме рабочего помещения. Обе задачи требуют применения большого числа разнесённых в пространстве приёмных и излучающих блоков, но вторая — дополнительно — требует анализа пространственно-частотной (амплитудно-фазовой) структуры сигналов, особенно на резонансных частотах.

Для обучения системы активного гашения и её адаптации к сформированному звуковому полю рекомендуется устанавливать непосредственно вблизи источников шума векторно-скалярные датчики, которые не только регистрируют спектрально-корреляционные характеристики сигналов, но и позволяют дать описание пространственного распределения мощности звукового поля. Если внутри лётной кабины или салона обитаемого космического аппарата располагается несколько разнесённых в пространстве источников шума, то управляющие датчики должны устанавливаться вблизи каждого источника, а контрольные датчики — в зоне, где операторы или лётчики должны выполнять работы. В случае применения скалярных датчиков с целью регистрации направления, с которого

Кузнецов Геннадий Николаевич — заведующий отделом, кандидат физико-математических наук, профессор, skbmortex@mail.ru

Смагин Дмитрий Анатольевич — ведущий инженер, zsystems@yandex.ru

приходят звуковые сигналы, рекомендуется применять пространственно-распределённую объёмную многоканальную приёмную антенну. В этом случае также можно сформировать представление о пространственном распределении звукового давления и колебательной скорости и определить характеристики обратных связей, необходимых для активного гашения. Анализ пространственно-частотно-временной структуры звукового поля позволяет выполнить идентификацию моделей передаточных функций и сформировать управляющие команды.

Решение задачи в любом варианте существенно усложняется, если допустить, что внутри этих объёмов находятся перемещающиеся по пространству «импедансные поверхности», например, пилоты или операторы. Установлено, что при малых объёмах зоны тишины даже перемещение головы лётчика искажает пространственную структуру поля, изменяет характеристики передаточных функций и влияет на эффективность гашения. Как следствие, даже при эффективных методах настройки и управления изменяются неконтролируемым образом задержки излучённых сигналов относительно принятых, и происходит рассогласование результатов обучения с локальными управляющими командами. В результате рассогласования команд управления и реальной структуры звукового поля снижается величина активного гашения, а в пределе возможно самовозбуждение системы и шумы могут даже возрасти.

Достоинством таких стационарных систем представляется возможность применения достаточно крупногабаритных излучателей, что позволяет ослаблять широкополосные и узкополосные сигналы, в том числе на низких звуковых и инфразвуковых частотах. Недостатки — большой вес и энергопотребление, а также сложность настройки.

Более простым вариантом решения задачи может оказаться создание автономной малогабаритной и лёгкой САГ, устанавливаемой непосредственно на плечах или на корпусе (теле) оператора с малогабаритными акустическими блоками, закреплёнными непосредственно в зоне головы. Если такое устройство перемещается вместе с оператором по отсеку МКС или по объёму внутри авиационного салона, то оно проводит активное гашение в любой зоне, где оператор находится. Особенно удобным такой метод при заданной эффективности снижения шумов может оказаться в обитаемых космических аппаратах, поскольку в условиях невесомости вес устройства САГ будет минимальным, а габариты можно сделать удобными как для работы в разных зонах и с различными приборами, так и для отдыха. При использовании такой конструкции автономной САГ непосредственно на операторе должны устанавливаться как малогабаритные акустические датчики и излучатели, принимающие и подавляющие шум, так и аналого-цифровые блоки аппаратуры, выполняющие приём и обработку, в частности, инвертирование и излучение сигналов в зону ушей. Отметим, что такая аппаратура может устанавливаться в отсеках космических аппаратов или в лётной кабине вертолётчика для активного гашения локальных источников или крепиться на спинку рабочего кресла для обеспечения локального комфорта и отдыха (создания зоны тишины).

Ниже применительно к летательным аппаратам обсуждаются некоторые экспериментальные результаты ослабления внутренних шумов с использованием малогабаритных систем активного гашения. Результаты получены в Научном центре волновых исследований Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН (ИОФ РАН) и в Научной организации ООО «Акустические системы калибровки Программирование».

На рис. 1 и 2 приведён макет кабины вертолётчика и результаты активного гашения. Активное гашение обеспечивается управлением сигналов с использованием спецвычислителя активного гашения

(СВАГ). Величина гашения дискретных составляющих в среднем не менее 8 дБ, полосового шума не менее 5–6 дБ. Гашение обеспечивается локально — в кабине, но только в зоне с диаметром 0,7–1,0 м, т. е. вблизи рабочего места пилота. При размещении разработанной аппаратуры вблизи кресла пассажира наблюдаются аналогичные результаты.

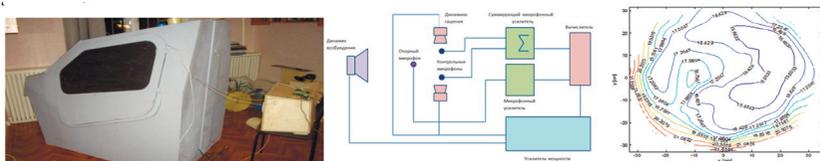


Рис. 1. Макет кабины вертолета, блок-схема размещения акустических элементов и аппаратуры (слева направо). Величины ослабления тонального сигнала на частоте 110 Гц в зоне 0,7×0,7 м (горизонтальное сечение) указаны непосредственно на рисунке

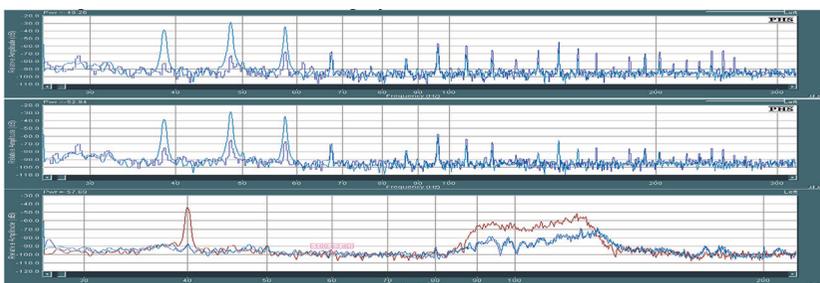


Рис. 2. Спектры тональных и шумового сигналов от внешнего источника до и после гашения. Голубой или красный цвет — до гашения, синий — после. Частота возбуждения указаны на горизонтальной шкале

На рис. 3 и 4 приведены результаты активного гашения низкочастотных сигналов внутри помещения, имитирующего салон вертолѐта. В одном углу помещения установлен источник шума, в другом — сабвуфер, настроенный на резонансные частоты помещения.



Рис. 3. Схема расположения в замкнутом объеме первичного источника (ПИ) (слева), активного поглотителя и измерительного микрофона (mic). Аналого-цифровое устройство управления — специвычислитель активного гашения (СВАГ) (в центре). Вторичный источник с датчиками звукового давления и колебательного ускорения (справа)

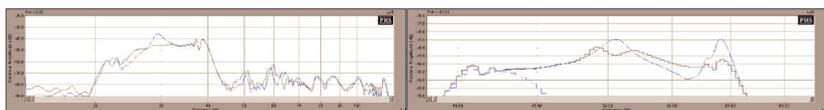


Рис. 4. Частотный отклик помещения до (голубой цвет) (слева) и после (зелёный или чёрный) (справа) включения активного поглотителя, настроенного на частоты 30 и 50 Гц

На рис. 5 и 6 приведены результаты гашения шумов локального малогабаритного источника, на рис. 7 — крупногабаритного объёмного источника, размещённого в кожухе

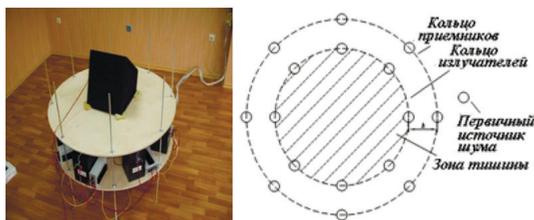


Рис. 5. Макет устройства для активного гашения локального источника и схема размещения приёмников и излучателей

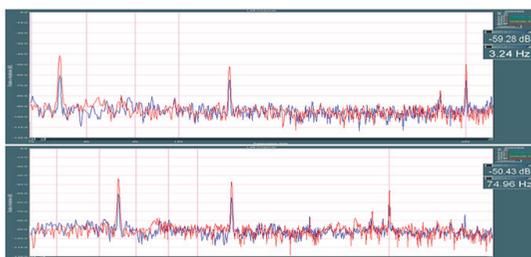


Рис. 6. Дискретные спектры сигнала до гашения (красные линии) и после гашения (синие)

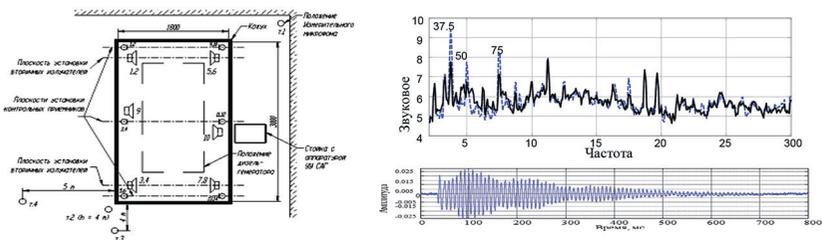


Рис. 7. Схема расположения объёмного источника, размещённого в поглощающем кожухе и элементов САГ, установленных внутри кожуха (слева). Спектр и временная реализация шумов до гашения (пунктир) и после гашения (сплошная линия) (справа)

На рис. 8 изображена локальная САГ, которая может устанавливаться на спинке кресла оператора или при уменьшении массогабаритов — на его плечах.

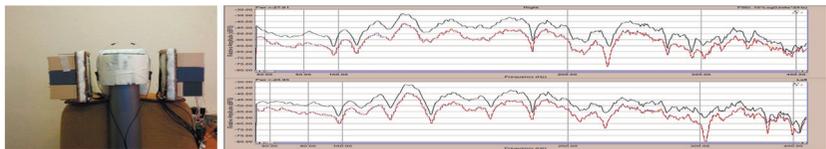


Рис. 8. Двухканальная САГ с имитатором головы оператора в центре (слева). Результаты активного гашения (красные линии — после гашения, чёрные — до гашения) (справа)

В результате экспериментальных исследований в лабораторных и полунатурных условиях, выполненных в ИОФ РАН (Кузнецов и др., 2012, 2014, 2015; Пудовкин и др., 2013, 2016, 2019; Kuznetsov et al., 2011) подтверждена возможность реального подавления низ-

кочастотного широкополосного шума на величину не менее 4–6 дБ и узкополосных составляющих на величину 8–15 дБ. Отработана технология идентификации моделей передаточных функций, разработаны робастные алгоритмы активного гашения, созданы физические основы для применения адаптивных алгоритмов активного гашения, которые могут «подстраиваться» к изменению режима излучения исходного шумового поля. Разработаны и испытаны малогабаритные и высокоэффективные СВАГ и приборы контроля режима активного гашения, которые в автоматизированном режиме в случае появления нештатной ситуации отключают САГ или переводят её в ждущий режим (обеспечивается отсутствие самовозбуждения). Для отработки в натуральных условиях активных методов и технических средств гашения представляется целесообразным выполнить целевую НИОКР, которая должна закончиться космическим экспериментом и созданием научно-технического базиса для штатных бортовых средств РС МКС и перспективных программируемых контроллеров автоматизации (ПКА). В итоге должен быть разработан, изготовлен и испытан малогабаритный многофункциональный лётный образец САГ.

Заключение

Из анализа характеристик шумов внутри МКС следует вывод о необходимости применения методов подавления шумовых полей внутри рабочих отсеков. Полученные в результате разработки и испытаний технические характеристики систем активного гашения позволяют уже в настоящее время прогнозировать достижение указанных выше значений активного гашения в случае применения аппаратуры с энергопотреблением не более 300–400 Вт и весом не более 8–10 кг. Разработанные комплекты аппаратуры для активного гашения наиболее мощных акустических составляющих должны обеспечивать экологическую безопасность и оптимальный рабочий режим пилотов и космонавтов. Они могут устанавливаться в лётных кабинах пилотов, рабочих отсеках и каютах космонавтов, а также в зонах отдыха и локального комфорта (создания режима тишины).

Литература

- Кузнецов Г. Н., Кириухин А. В., Михайлов С. Г. и др.* Проблемы и предварительные результаты испытания систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной средах // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 4. № 3. С. 93–107.
- Кузнецов Г. Н., Михайлов С. Г., Смагин Д. А., Кириухин А. В.* Результаты исследования систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной среде // *Науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия РАО»*: сб. тр. СПб., 2014.
- Кузнецов Г. Н., Пудовкин А. А., Кутаков С. И.* Результаты исследования активного гашения широкополосного шума внутри магистрального воздуховода // *Науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия РАО»*: сб. тр. СПб., 2015.
- Пудовкин А. А., Кузнецов Г. Н., Кутаков С. И.* Гашение акустического шума в воздуховодах как реализация стандартной задачи управления // *Материалы Всерос. научно-техн. конф. «Метрология гидроакустических измерений»*. 25–27 сент. 2013, Менделеево. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. Т. 2. С. 27–33.
- Пудовкин А. А., Кузнецов Г. Н., Кутаков С. И., Майзель А. Б.* Активное гашение широкополосного шума на выходе воздуховода в рабочее помещение // *Науч. конф. «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXVII сессия РАО»*: сб. тр. СПб., 2014.
- Пудовкин А. А., Кешков Д. И., Китанов М. Ю. и др.* Экспериментальная оценка величины активного гашения широкополосного шума, проникающего в рабочее помещение // *Докл. научно-практ. конф. «Гидроакустика»*. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2016. С. 360–371.

Пудовкин А. А., Кешков Д. И., Китанов М. Ю. и др. Поглощение шума при его активном гашении в воздуховоде // Тр. 32-й сессии Рос. акуст. об-ва. М., 2019.

Kuznetsov G. N., Mikhailov S. G., Pudovkin A. A., Smagin D. A. Physical modeling of active cancellation of low-frequency sound signals // Physics of Wave Phenomena. 2011. V. 19. No. 3.

METHODS, TECHNICAL MEANS AND RESULTS OF ACTIVE ATTENUATION OF BROADBAND NOISE IN AIRCRAFT CABINS

G. N. Kuznetsov, D. A. Smagin

Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

Keywords: noises inside helicopters and spacecraft, noise suppression and discrete components by active methods and technical means

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕСОВ В КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ДУБРАВА» НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А. В. Кузьмин¹, Ю. П. Батырев²

¹ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, Королёв, Московская обл., Россия

² Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищи, Московская обл., Россия

Ключевые слова: мониторинг лесов, космический эксперимент, научная аппаратура, МКС

Начиная с 2016 г. на борту Международной космической станции (МКС) проводится космический эксперимент (КЭ) «Дубрава», постановщиком которого выступает Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана) (Московский государственный университет леса — на момент начала разработки программы эксперимента). Цель проведения КЭ заключается в отработке методов инвентаризации лесов и лесохозяйственной деятельности, определении воздействия на лесной покров природных и техногенных факторов с борта МКС с использованием визуально-инструментального и спектрометрического мониторинга, а также гиперспектральной и инфракрасной аппаратуры на последующих этапах эксперимента после её доставки на МКС.

Основные задачи космического эксперимента «Дубрава»:

- отработка метода совместного визуально-инструментального наблюдения и спектрометрического измерения лесных экосистем в целях обеспечения создания специализированной гиперспектральной бортовой аппаратуры и разработки технологии гиперспектрального космического мониторинга лесов;
- определение наиболее значимых дешифровочных и спектральных признаков деградации лесных экосистем и отработка методов их измерения, в том числе для выявления и оценки:
 - а) площадей лесных насаждений, повреждённых вредителями и болезнями;
 - б) погибших насаждений и площадей, пострадавших в результате пожаров и других природных воздействий;
 - в) площадей насаждений, повреждённых в результате антропогенных воздействий и неблагоприятной экологической ситуации;
 - г) величины зарастания полей лесными массивами;
 - д) ряда таксационных характеристик лесных насаждений;
 - е) класса пожарной опасности лесов.
- отработка автоматизированных методов оценки площадей лесонасаждений, пострадавших в результате природных и антропогенных воздействий и неблагоприятной экологической ситуации;
- отработка методов дистанционного мониторинга для определения количественных и качественных оценок биоразнообразия лесов.

Кузьмин Александр Валериевич — инженер, aleksandr.kuzmin34@rsce.ru

Батырев Юрий Павлович — доцент, кандидат технических наук, batyrev@mgul.ac.ru

В задачи МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана для КЭ «Дубрава» входят:

- разработка заявок на проведение работ по тематике КЭ экипажами МКС и их передача в Центр управления полётами (ЦУП-М) (через Ракетно-космическую корпорацию (РКК) «Энергия»);
- осуществление научного обоснования цели и постановка задач эксперимента, а также методическое руководство при разработке программы и методики эксперимента и плана реализации его результатов;
- совместная с РКК «Энергия» разработка программно-методической документации и необходимые экипажу информационно-справочные материалы по эксперименту;
- разработка автоматизированных рабочих мест для планирования эксперимента и обработки полученных результатов;
- обработка аэрокосмических снимков лесных экосистем;
- моделирование развития экосистемы с использованием соответствующего программного обеспечения по результатам обработки информационных материалов, возвращённых на Землю;
- участие в разработке материалов научных отчётов и методики взаимодействия экипажей МКС;
- организация проведения мероприятий по практическому использованию результатов выполненного КЭ;
- разработка материалов и выпуск экспресс-отчётов в качестве ответственного исполнителя
- разработка и реализация мероприятий по совершенствованию существующей базы данных с учётом полученных результатов космического эксперимента.

Научная аппаратура, входящая в состав российского сегмента МКС и используемая для КЭ «Дубрава», включает в себя следующие приборы:

1. Фотоспектральная система (ФСС) с рабочим спектральным диапазоном 350–1050 нм (Беляев, 2011); видеоспектральная система (ВСС) — используется для проведения измерений характеристик отражённого излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн от 400 до 950 нм.

В настоящее время для съёмки земной поверхности используется ВСС (Беляев и др., 2015а, б, 2019а). Характеристики видеоспектральной системы обеспечивают максимальную расчётную разрешающую способность фотоизображения на местности порядка 10 м/пиксель, при этом охват территории одним снимком составляет 36,9×28,5 км (Беляев и др., 2016).

Для классификации по спектральным сигнатурам можно использовать хорошо известные алгоритмы контролируемой и неконтролируемой классификации, такие, например, как метод *k*-средних и широкий диапазон метрик, включая расстояние Евклида, косинусную меру или максимального правдоподобия (Байеса). Также спектрметрические данные позволяют рассчитывать разнообразные вегетационные индексы: NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (*англ.* Soil Adjusted Vegetation Index), MSAVI (*англ.* Modified Soil Adjusted Vegetation Index), EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index) (Малышева, 2012).

2. Цифровые фотоаппараты Nikon D3X, Nikon D800E и Nikon D5 с телеобъективами SIGMA AF 300-800 F/5.6 и AF-S Nikkor 600mm f/4 с телеконверторами Nikon TC-15E и Nikon TC-20E (Беляев и др., 2014а, б).

3. Система ориентирования видеоспектральной аппаратуры (COVA), предназначенная для установки внутри МКС на иллюминаторах её служебного модуля (СМ) и многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ) (Беляев и др., 2018).

Использование платформы наведения СОВА позволяет проводить съёмку и спектрометрирование объектов исследования по трассе полёта в зоне подстилающей поверхности при углах визирования от -30 до $+30^\circ$ от надира. В результате, по сравнению с использованием жёстко закреплённых на кронштейне приборов, в режиме автоматической съёмки резко увеличивается доступная для наблюдений площадь земной поверхности, приближаясь к возможностям «ручной» съёмки экипажем (причём автоматическая съёмка может проводиться в любое время бортовых суток). Использование платформы наведения СОВА позволяет планировать съёмку множества объектов в рамках одного сеанса. При этом появляется прикладная задача оптимального управления платформой наведения, которая может быть решена с использованием методов комбинаторной оптимизации (Беляев, 1984, 2019).

4. На втором этапе КЭ (с 2024 г.) планируется использование новой научной аппаратуры (НА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) — НА «Гиперспектрометр». Прибор представляет собой переносной гиперспектральный комплекс с камерами видимого и ближнего инфракрасного диапазона, а также панхроматической камерой для наведения (Беляев и др., 2019б).

В дополнение к существующей научной аппаратуре предполагается использование НА радиометр инфракрасный высокого разрешения, а также вспомогательного оборудования СОВА. Разработка данных приборов выполняется в рамках КЭ «Ураган».

Особый интерес представляет адаптация известных и хорошо рекомендовавших себя методов искусственного интеллекта для решения широкого спектра задач обработки получаемых в рамках КЭ «Дубрава» снимков. Прежде всего это задачи обнаружения объектов, классификации или семантической сегментации и повышение качества исходных снимков на основе нейросетей и алгоритмов машинного обучения. В настоящий момент возможности применения алгоритмов глубокого обучения исследуются на космическом факультете МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана в части оценки принадлежности пикселей снимков к уже заранее определённым классам (Андряинов и др., 2022; Митрофанова и др., 2022; Muller et al., 2020).

Планирование сеансов наблюдения объектов исследования космического эксперимента «Дубрава» с учётом специфики станции, ограничений, влияющих на планирование сеансов съёмок изучаемых объектов, особенностей имеющейся на борту и перспективной научной аппаратуры осуществляется следующим образом:

1. Составление списка потенциальных объектов съёмки по заявкам участников космического эксперимента.

2. Моделирование баллистических условий и анализ доступности объектов с учётом естественных ограничений и исходных данных по объектам от участников эксперимента.

3. Ранжирование доступных объектов с присвоением большего приоритета объектам, на которых запланированы научные и полевые работы участников космического эксперимента;

4. Моделирование условий проведения сеансов и составление заявки с исходными данными для планирования недельного интервала съёмок.

5. Окончательная фильтрация списка объектов в ходе формирования плана полёта.

6. Разработка исходных данных для создания радиограммы.

7. Согласование радиограммы и её отправка на борт.

8. Экспресс анализ результатов съёмки, смена приоритетности объектов наблюдений при необходимости для использования при составлении следующей заявки на проведение съёмок.

Для формирования базы геопространственных данных КЭ «Дубрава» и проведения анализа результатов ДЗЗ была выбрана

геоинформационная система Quantum GIS (QGIS) — свободная кроссплатформенная геоинформационная система для создания, редактирования, визуализации, анализа и публикации геопространственной информации с открытым исходным кодом.

Результаты КЭ «Дубрава» используются также в образовательных целях. В планировании сеансов съёмки и обработке получаемых данных активное участие принимают студенты МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана. Результаты КЭ используются в учебно-методических материалах, курсах лекций, лабораторных работах.

Литература

- Андрянов Н. А., Дементьев В. Е., Ташлинский А. Г. Обнаружение объектов на изображении: от критериев Байеса и Неймана — Пирсона к детекторам на базе нейронных сетей EfficientDet // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 1. С. 139–159. — DOI: 10.18287/2412-6179-СО-922.
- Беляев М. Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Изд-во «Машиностроение», 1984. 264 с.
- Беляев М. Ю. Некоторые результаты летных испытаний фотоспектральной системы ФСС // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 264–272.
- Беляев М. Ю. Проблемы управления при проведении экспериментов на Международной космической станции // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018): сб. тр. 6-й Международ. науч. конф., посвященной 85-летию Ю.А. Гагарина / под ред. А. А. Львова, М. С. Светлова. 2019. С. 7–16.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др. (2014а) Летная отработка исследовательской аппаратуры «Фотоспектральная система» на борту Российского сегмента Международной космической станции // Косм. техника и технологии. 2014. № 1. С. 22–28.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др. (2014б) Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 27–39. DOI: 10.7868/S0205961414060013.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваяев Д. Ю. и др. (2015а) Изучение с борта российского сегмента Международной космической станции в рамках программы «Ураган» катастрофических явлений, вызывающих экологические проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1. С. 71–79.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваяев Д. Ю. и др. (2015б) Особенности проведения и использования результатов съемки земной поверхности, выполняемой экипажами российского сегмента МКС // Косм. техника и технологии. 2015. № 1. С. 17–30.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Сармин Э. Э. и др. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // Косм. техника и технологии. 2016. № 2. С. 70–79.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Боровихин П. А. и др. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Косм. техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 70–80.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Катковский Л. В. и др. (2019а) Классификация водных объектов по спектрам, измеренным с борта МКС в космическом эксперименте «Ураган» // Современные проблемы дистанционно-зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 201–208. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-201-208.
- Беляев М. Ю., Коротков Д. М., Кузьмичев А. С. и др. (2019б) Дистанционное зондирование Земли с российского сегмента МКС с использованием перспективной научной аппаратуры «Гиперспектрометр» // Материалы 17-й Всерос. открытой конф. «Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН. 2019. С. 508.
- Мальшиева Н. В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М.: Изд-во МГУЛ. 2012. 154 с.

Митрофанова Е. Ю. Поиск объектов на изображениях с использованием TensorFlow Object Detection // Информатика: проблемы, методы, технологии: сб. тр. конф. 2022. С. 680–687.

Muller M. U., Ekhtiari N., Almeida R. M., Rieke C. Super-resolution of multi-spectral satellite images using convolutional neural networks // ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020. V. V-1-2020. P. 33–40. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-1-2020-33-2020>.

FOREST RESEARCH IN SPACE EXPERIMENT “DUBRAVA” ONBOARD THE RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION

A. V. Kuzmin¹, Y. P. Batyrev²

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

² Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytischki, Russia

Keywords: forest monitoring, space experiment, scientific equipment, International Space Station

ПЛАНИРУЕМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С НАУЧНОЙ АППАРАТУРОЙ «ГИПЕРСПЕКТРОМЕТР» КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «УРАГАН» НА РОССИЙСКОМ СЕКМЕНТЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А. В. Кузьмин¹, А. С. Кузьмичев²

¹ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, Королёв, Московская обл., Россия

² Московский физико-технический институт, Москва, Россия

Ключевые слова: космический эксперимент, научная аппаратура, Международная космическая станция

На борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) в рамках космического эксперимента (КЭ) «Ураган», постановщиком которого выступает ПАО «РКК «Энергия», проводится дистанционное зондирование различных явлений и объектов, исследуются вулканы, ледники, лесные пожары, акватории и другие объекты. Эксперимент предполагает постоянное развитие и повышение качества получаемых данных. С 2016 г. в рамках государственного контракта с ГК «Роскосмос» РКК «Энергия», Московский физико-технический институт (МФТИ) и АО «НПО «Лептон» ведут разработку уникальной научной аппаратуры «Гиперспектрометр». Заложенные характеристики прибора не уступают известным зарубежным аналогам. Прибор представляет собой переносной гиперспектральный комплекс с камерами видимого и ближнего инфракрасного диапазона, а также панхроматической камерой для наведения (Беляев и др., 2019).

Прибор обеспечивает получение и обработку гиперспектральных изображений подстилающей поверхности одновременно двумя гиперспектральными камерами: видимого диапазона и ближнего инфракрасного (ИК) диапазона. Эта информация предназначена для исследования спектральных свойств различных наземных образований, а также для автоматического поиска и идентификации объектов. Гиперспектральные камеры могут формировать изображения подстилающей поверхности во множестве спектральных каналов. В зависимости от поставленной задачи, для конкретного сеанса съёмки космонавт может выбирать рабочие каналы из общего множества каналов спектрального разложения.

Программное обеспечение прибора может связываться с информационной системой РС МКС и получать от неё баллистическую информацию о положении и ориентации МКС во время съёмки, которую привязывает к сохраняемой видеоинформации. В дальнейшем можно проводить на борту анализ сохранённых видеоданных программным обеспечением прибора и передавать их для дальнейшей обработки на Земле.

С помощью научной аппаратуры «Гиперспектрометр» планируется решение следующих задач:

- мониторинг природных катастроф;
- геологические, почвенные, климатологические, гидрологические исследования;
- изучение изменений земельного покрова;
- оценка состояний лесных угодий;
- оценка состояния сельскохозяйственных посевов;

Кузьмин Александр Валериевич — инженер, aleksandr.kuzmin34@rsce.ru

Кузьмичев Александр Сергеевич — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, kuzmichev.as@mipt.ru

- поиск и оценка концентрации различных минералов на обнажённых участках почвы;
- обнаружение загрязнения растительности и воды нефтью, мазутом и т. д., а также определение нанесённого этими факторами ущерба;
- построение карт концентрации хлорофилла в приповерхностных водах;
- обнаружение участков наркотических растений среди другой растительности и т. д.

В состав научной аппаратуры входят: аппаратный модуль, специальный иллюминаторный кронштейн и вычислительно-управляющий модуль. Внешний вид прибора в сборе приведён на рис. 1.

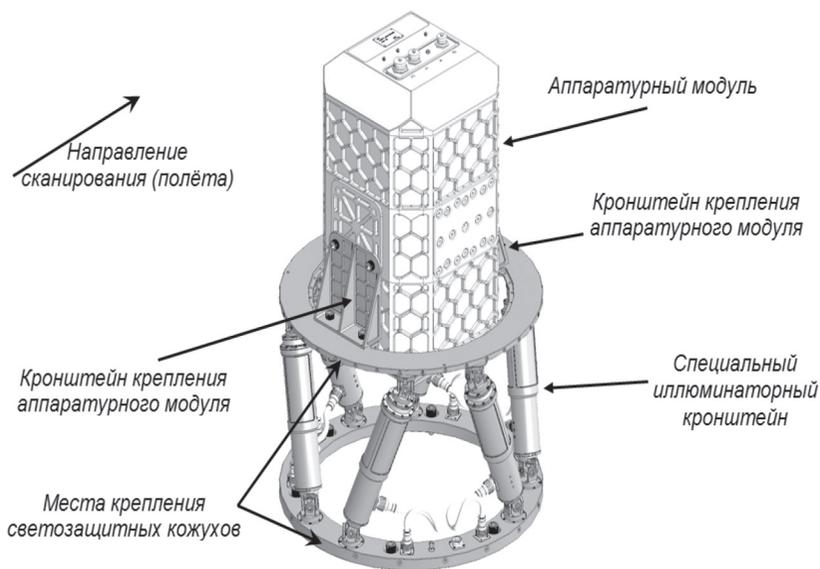


Рис. 1. Научная аппаратура «Гиперспектрометр» в сборе

Основу изделия составляет аппаратный модуль, в котором находятся камеры. В рабочем положении оптические оси камер направлены через иллюминатор № 9 МКС в сторону поверхности Земли. Съёмка происходит сканирующим способом, движением МКС по орбите вместе с прибором относительно Земли.

Направление оси визирования камер аппаратного модуля можно изменять в пределах нескольких градусов с помощью специального иллюминаторного кронштейна. Он представляет собой платформу наведения с электроприводом. Специальный иллюминаторный кронштейн содержит светозащитный кожух для защиты космонавта от попадания ультрафиолетового излучения через иллюминатор.

Специальный иллюминаторный кронштейн представляет собой конструкцию типа гексапод с электроприводом и обеспечивает:

- отклонение от симметричного положения на угол не менее 5° по двум осям,
- поворот вокруг своей оси на угол не менее $\pm 25^\circ$,
- фиксирование установленной ориентации,
- измерение своей ориентации.

Специальный иллюминаторный кронштейн крепится на фланец иллюминатора № 9. Аппаратный модуль устанавливается на подвижный (верхний) фланец специального иллюминаторного

кронштейна. Крепление иллюминатора, специального иллюминаторного кронштейна и аппаратного модуля между собой производятся кронштейнами крепления и винтами. Обработка заданных углов отклонений совершается электроприводами специального иллюминаторного кронштейна по команде от программного обеспечения вычислительно-управляющего модуля. Контроль и сравнение фактического положения специального иллюминаторного кронштейна с заданным осуществляет программное обеспечение вычислительно-управляющего модуля по информации, полученной от электроприводов специального иллюминаторного кронштейна.

Вычислительно-управляющий модуль представляет собой загрузочный жёсткий диск с установленными на нём программным обеспечением и операционной системой, осуществляя:

- управление аппаратным модулем и специальным иллюминаторным кронштейном;
- приём данных с камер аппаратного модуля и информации обратной связи с специального иллюминаторного кронштейна;
- приём навигационно-баллистических данных РС МКС через локальную вычислительную сеть;
- формирование файлов, содержащих как данные, полученные с камер аппаратного модуля, так и навигационно-баллистические метаданные;
- отображение на экране персонального компьютера в реальном времени панхроматических изображений, получаемых с камер аппаратного модуля;
- загрузку гиперспектральных данных, полученных с гиперспектральных камер видимого и ближнего ИК диапазона;
- отображения гиперспектральных данных для выбранных каналов в виде изображения;
- отображение спектров выбранных областей в виде графиков;
- проведение различных процедур обработки гиперспектральных данных;
- отображение результатов обработки;
- сохранение результатов обработки и информации о применённых процедурах обработки.

Электрическое питание научной аппаратуры осуществляется от источника постоянного напряжения 27 В. Максимальная общая мощность потребления в режиме наведения может достигать 250 Вт. В режиме съёмки потребление аппаратного модуля не более 11 Вт, потребление специального иллюминаторного кронштейна отсутствует.

С помощью научных приборов КЭ «Ураган» к настоящему времени уже получено большое количество ценной информации, на основе которой проводилось изучение ледников (Колка, Медвежий, Бивачный и др.), наводнений, вулканов, возникающих пожаров и т.д. Разработаны специальные методы, позволяющие эффективно планировать и проводить наблюдения с МКС, а также оценивать развитие некоторых потенциально опасных и катастрофических явлений и процессов. По результатам выполненных исследований опубликовано более 100 научных статей, получены десятки патентов. Доставка на борт РС МКС нового прибора «Гиперспектрометр» позволит расширить исследования в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения. Отработанные в космическом эксперименте «Ураган» технические средства и методы будут использованы при создании автоматизированных спутниковых систем мониторинга и контроля земной поверхности (Беляев, 2021).

В настоящее время научная аппаратура «Гиперспектрометр» успешно прошла стадию комплексных испытаний на стенде РС МКС в ПАО «РКК «Энергия» и готова к доставке на

РС МКС. Специалистами Центра подготовки космонавтов (ЦПК) им. Ю.А. Гагарина совместно с МФТИ и ПАО «РКК «Энергия» проводится подготовка космонавтов к работе с прибором. В 2024 г. предполагается его доставка на борт РС МКС и начало стадии лёгных испытаний.

Литература

- Беляев М. Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107.
- Беляев М. Ю., Виноградов П. В., Десинов Л. В. и др. Идентификация источника океанских кольцевых волн около острова Дарвин по фотоснимкам из космоса // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2011. № 1. С. 70–81.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваяев Д. Ю., Легостаев В. П. Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса // Изв. РАН. Энергетика. 2013. № 4. С. 75–90.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др. Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6.
- Беляев М. Ю., Вikelьски М., Лампен М. и др. (2015а) Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на российском сегменте МКС // Косм. техника и технологии. 2015. № 3. С. 38–51.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваяев Д. Ю. и др. (2015б) Аппаратура и программно-математическое обеспечение для изучения земной поверхности с борта российского сегмента Международной космической станции по программе «Ураган» // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1. С. 63–70.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваяев Д. Ю. и др. (2015в) Изучение с борта российского сегмента Международной космической станции в рамках программы «Ураган» катастрофических явлений, вызывающих экологические проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1. С. 71–79.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Боровихин П. А. и др. (2018а) Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Косм. техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 69–78.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Иванов Д. А. и др. (2018б) Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть I. Методика для спектров // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 213–222.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Иванов Д. А. и др. (2018в) Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть II. Методика для изображений и результаты применения // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 223–234.
- Беляев М. Ю., Коротков Д. М., Кузьмичев А. С. и др. Дистанционное зондирование Земли с российского сегмента МКС с использованием перспективной научной аппаратуры «Гиперспектрометр» // Материалы 17-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН. 2019. С. 508.
- Беляев М. Ю., Вепплер Й., Вikelьски М. и др. Отработка технологии контроля перемещения животных на Земле с помощью научной аппаратуры, установленной на РС МКС // 27-я Санкт-Петербургская междунаро. конф. по интегрированным навигац. системам: сб. препринтов. СПб., 2020. С. 9–17.
- Котляков В. М., Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Юрина О. А., Съемка Земли из космоса: задачи, проблемы, перспективы // Ракетно-космическая техника. Серия XII. Вып. 1–2: сб. ст. / под ред. В. П. Легостаева, М. Ю. Беляева. Королев, 2011. С. 181–205.
- Belyaev M. Yu., Dessinov L. V., Karavaev D. Yu. Specifics of conducting and using imagery of the earth's surface performed by the Russian ISS crew // 64th Intern. Astronautical Congress. 2013. IAC-13. B3.5.7. Article 3744.

Belyaev M. Yu., Cheremisin M. V., Esakov A. M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment // 69th Intern. Astronautical Congress (IAC). Bremen, Germany, 1–5 Oct. 2018 / Intern. Astronautical Federation (IAF). 2018. V. IAC-18-F1.2.3. P. 1–9.

**PLANNED RESEARCH WITH SCIENTIFIC EQUIPMENT
“HYPER SPECTROMETER” IN SPACE EXPERIMENT “URAGAN” ONBOARD THE
RUSSIAN SEGMENT OF THE INTERNATIONAL
SPACE STATION**

A. V. Kuzmin¹, A. S. Kuzmichev²

¹ S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

Keywords: space experiment, scientific equipment, International Space Station

ДИНАМИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТНО-СИЛОВЫХ КАЧЕСТВ МЫШЦ КОСМОНАВТОВ ПОСЛЕ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЁТА НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ РЕАБИЛИТАЦИИ

Т. Б. Кукоба, К. С. Киреев, М. М. Харламов

Центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина
Звёздный Городок, Московская обл., Россия

Ключевые слова: космонавт, космический полёт, максимальная произвольная сила мышц, силовая выносливость, реадаптация, реабилитация

Дефицит механической нагрузки на опорно-двигательный аппарат человека во время космического полёта (КП) вызывает множество перестроек, включая снижение сократительных свойств мышц. По возвращении в земную гравитационную среду это приводит к ухудшению функций мышц и физической работоспособности, возможные последствия которых будут усугубляться во время исследовательских миссий (Ade et al., 2016). Показано, что после КП у большинства космонавтов сила мышц бедра и голени снижается (Кукоба, Фомина, 2017; Кукоба и др., 2013; Фомина, Кукоба, 2019; Trappe et al., 2009). Скоростно-силовые качества мышц (ССКМ) в достаточной степени определяют уровень физической работоспособности. Показано, что у одних членов экипажей после завершения КП физическая работоспособность снижается значительно, у других изменения не столь выражены, а изредка наблюдается даже увеличение силы мышц (Кукоба и др., 2013; Fomina et al., 2014). До настоящего времени определение ССКМ ног космонавтов после КП осуществлялось российскими специалистами на 4–5-е и 11–14-е сутки реадаптации (Кукоба и др., 2013), а иностранными специалистами на 7–9-е и 19-е сутки после КП (English et al., 2015; Trappe et al., 2009). К указанному времени не у всех обследованных космонавтов происходит восстановление изучаемых показателей до предполётного уровня (Фомина, Кукоба, 2020).

На сегодняшний день нет полного понимания о периоде и особенностях восстановления ССКМ космонавтов.

В докладе приводятся результаты исследования, выполняемого с целью определения динамики восстановления ССКМ космонавтов после КП на разных этапах реабилитации.

Начиная с 66-й экспедиции на Международную космическую станцию, на разных этапах реабилитации специалистами Центра подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина проводится контроль состояния нервно-мышечного аппарата космонавтов по результатам изокинетического тестирования.

Изокинетическое тестирование позволяет:

- оценить потери максимальной произвольной силы и силовой выносливости мышц ног космонавтов на срочном этапе реадаптации;
- определить эффективность всех этапов реабилитации, включая санаторно-курортный этап, для восстановления указанных качеств;

Кукоба Татьяна Борисовна — ведущий научный сотрудник, кандидат педагогических наук, доцент, T.Kukoba@gctc.ru

Киреев Кирилл Сергеевич — заместитель начальника управления, начальник отдела, кандидат медицинских наук, K.Kireyev@gctc.ru

Харламов Максим Михайлович — начальник, кандидат экономических наук, M.Kharlamov@gctc.ru

- внести коррекцию в программу реабилитации на основе индивидуальной реадaptации нервно-мышечного аппарата;
- оценить динамику восстановления скоростно-силовых качеств мышц ног на поздних этапах реадaptации (через шесть месяцев после КП);
- выработать рекомендации по коррекции восстановления скоростно-силовых свойств мышц ног космонавтов.

В исследовании приняли участие пять космонавтов, одна из которых женщина. Продолжительность КП составила от 157 до 195 сут. Для одного космонавта это был третий КП, остальные выполнили первый КП. Возраст космонавтов составил от 39 до 52 лет.

В процессе изокинетического тестирования оценка ССКМ осуществлялась с использованием силового динамометра Cybex на основе регистрации моментов силы мышц ног космонавтов. Тестирование проводили на начальном этапе реабилитации трижды: на 7-е, 16-е и 23-е сутки после КП. После санаторно-курортного этапа реабилитации — на 75-е и на 180-е сутки реадaptации к условиям Земли после КП. Максимальную произвольную силу (МПС) мышц голени оценивали на угловых скоростях 0 и 30 град/с, выполнялось по пять сгибаний и разгибаний стопы в голеностопном суставе, регистрировали максимальное значение. МПС мышц бедра регистрировали при выполнении пяти сгибаний и разгибаний в коленном суставе, на угловых скоростях 0 и 60 град/с, регистрировали максимальное значение. Силовую выносливость мышц бедра определяли на угловой скорости 180 град/с при выполнении 22 сгибаний и разгибаний в коленном суставе.

Для каждого из исследуемых показателей рассчитывали: среднее значение (X), стандартное отклонение (σ). При анализе динамики показателей учитывали процентное изменение параметра, полученного на разных этапах реадaptации. Процентное изменение параметра рассчитывали по формуле:

$$\Delta p = (p_2 - p_1) / p_1 \times 100 \%,$$

где p_1 — значение параметра при первом тестировании после КП; p_2 — значение параметра при последующем тестировании в процессе реабилитации.

Оценка достоверности различий значений, полученных на разных этапах реадaptации, осуществлялась на основе применения непараметрического метода описательной статистики — критерия Вилкоксона, расчёты проводили в программе Statistica 10.

Анализ полученных данных показал, что динамика восстановления силы и силовой выносливости мышц ног космонавтов после КП гетерохромная и разнонаправленная. Гетерохронность проявилась в разном приросте в разное время изучаемых показателей. Наибольший прирост к 184-м суткам реадaptации в сравнении с 6-ми сутками после КП выявлен в МПС бедра как в изометрическом, так и в изокинетическом режиме мышечного сокращения (рис. 1). При этом наибольшая сила мышц бедра по большинству показателей отмечалась на начальном этапе реабилитации, на 23-и сутки после КП.

Второй по величине прирост МПС выявлен в мышцах голени при тыльном и подошвенном сгибании стопы в изокинетическом режиме мышечного сокращения (рис. 2).

Третий по величине прирост выявлен в силовой выносливости мышц бедра (рис. 3). Наименьший по величине прирост выявлен в МПС мышц голени изометрическом режиме мышечного сокращения, МПС при подошвенном сгибании на 180-е сутки реадaptации была меньше на 22 % в сравнении 6-ми сутками после КП ($P = 0,04$).

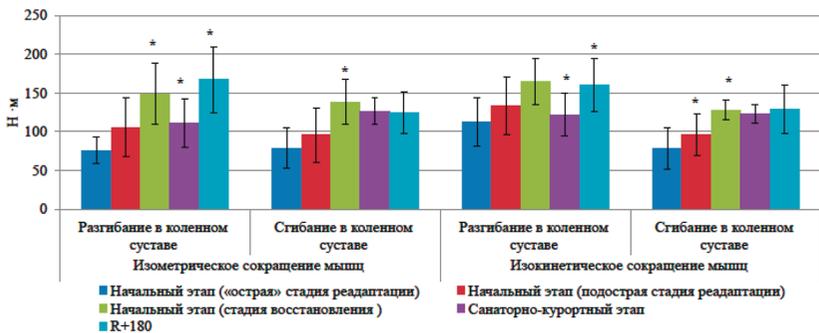


Рис. 1. Динамика максимальной произвольной силы мышц бедра космонавтов на разных этапах реабилитации; * — различия достоверны в сравнении с предыдущим этапам реабилитации при $P < 0,05$

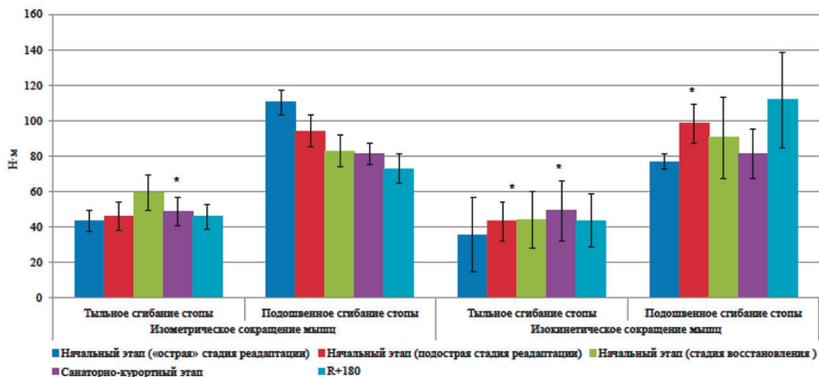


Рис. 2. Динамика максимальной произвольной силы мышц голени космонавтов на разных этапах реабилитации; * — различия достоверны в сравнении с предыдущим этапам реабилитации при $P < 0,05$

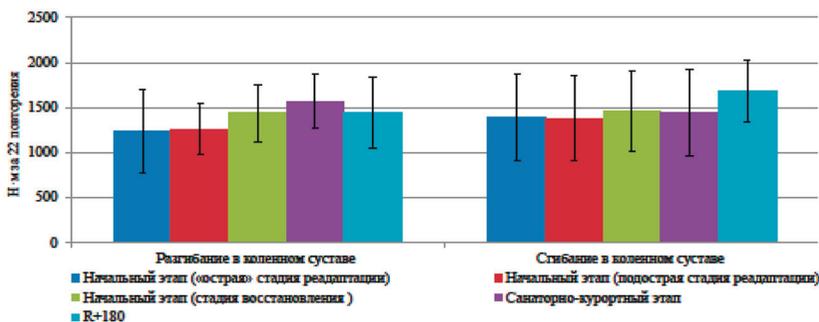


Рис. 3. Динамика силовой выносливости мышц бедра космонавтов на разных этапах реабилитации

Разнонаправленность динамики восстановления ССКМ проявилась в том, что одни показатели снижались, в то время как другие увеличивались. МПС мышц бедра увеличивалась на начальном этапе по всем изучаемым показателям, после санаторно-курортного этапа реабилитации снижалась, к 180-м суткам реадaptации увеличивалась по всем показателям, кроме силы сгибателей коленного сустава при изометрическом режиме сокращения мышц (см. рис. 1).

Максимальная произвольная сила мышц голени в изометрическом режиме сокращения при тыльном сгибании стопы увеличивалась на начальном этапе реабилитации, снижалась ($P = 0,04$) после

санаторно-курортного этапа на 14 %, и продолжала снижаться на 180-е сутки реадaptации, практически возвращаясь к значениям, полученным на начальном этапе реабилитации в «острый» период реадaptации.

При *подошвенном сгибании стопы* в изометрическом режиме сокращения мышц на всём протяжении исследования отмечалось снижение МПС на каждом этапе реабилитации. При *тыльном сгибании стопы* в изокинетическом режиме сокращения мышц МПС увеличивалась на начальном этапе ($P = 0,03$), увеличивалась после санаторно-курортного этапа ($P = 0,04$), незначительно снижалась на 180-е сутки реабилитации. При *подошвенном сгибании стопы* в изометрическом режиме сокращения МПС увеличивалась к 14-м суткам реабилитации ($P = 0,03$), снижалась к 23-м суткам и продолжала снижаться после санаторно-курортного этапа, увеличиваясь на 180-е сутки реабилитации.

Силовая выносливость мышц бедра *при разгибании колена* увеличивалась до санаторно-курортного этапа, на 180-е сутки реабилитации выявлено снижение показателя на 8 %. Силовая выносливость мышц бедра *при сгибании колена* практически не менялась, прирост показателя по сравнению со значениями, полученными на 6-е сутки после КП, выявлен к 180-м суткам реадaptации на 21 %.

Таким образом, в целом за период исследования положительная динамика отмечается в отношении МПС мышц бедра до санаторно-курортного этапа, затем наблюдается её снижение. Силовая выносливость разгибателей бедра хорошо восстанавливается к 75-м суткам после КП, сгибатели восстанавливаются медленнее. По МПС мышц голени не выявлено определённой тенденции. Необходимо продолжать исследования для определения направленности и скорости изменений скоростно-силовых качеств мышц ног космонавтов после длительных КП.

Литература

- Кукоба Т. Б., Фомина Е. В. Аксиальное нагружение различной интенсивности при резистивной тренировке космонавтов как метод профилактики гипогравитационных нарушений // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2017. Т. 51. № 1. С. 18–23.
- Кукоба Т. Б., Бабич Д. Р., Фомина Е. В. Изменения максимальной произвольной силы после длительных космических полетов. Новые подходы к изучению классических проблем // *Материалы 7-й Всерос. с международ. участием шк.-конф. по физиологии мышц и мышечной деятельности*. 2013. М.: Графика-Сервис, 2013. С. 106.
- Фомина Е. В., Кукоба Т. Б. Восстановление силы мышц ног космонавта после длительного космического полета с использованием силового тренажера для частичной компенсации гравитационной разгрузки // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2019. Т. 53. № 5. С. 11–16.
- Фомина Е. В., Кукоба Т. Б. Особенности динамики послеполетных изменений скоростно-силовых качеств мышц космонавтов в зависимости от величины «весового» нагружения во время миссии // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2020. Т. 54. № 5. С. 23–28.
- Ade C. J., Broxterman R. M., Craig J. C. et al. Prediction of Lunar-and Martian-based intra-and site-to-site task performance // *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2016. V. 87. No. 4. P. 367–374. DOI: 10.3357/AMHP.4399.2016.
- English K. L., Lee S. M. C., Loehr J. A. et al. Isokinetic strength changes following long-duration spaceflight on the ISS // *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2015. V. 86. No. 12. P. A68–A77. DOI: 10.3357/AMHP.EC09.2015.
- Fomina E., Lysova N. Y., Kukoba T. B. Ways to optimize the joint action of locomotion and resistance training in extended missions with allowance for individual profiles of cosmonauts // *Proc. Intern. Astronautical Congress. IAC*. 2014. P. 44–48.

Trappe S., Costill D., Gallagher Ph. et al. Exercise in space: human skeletal muscle after 6 months aboard the International Space Station // *J. Applied Physiology*. 2009. V. 106. No. 4. P. 1159–1168. DOI: 10.1152/jappphysiol.91578.2008.

DYNAMICS OF RECOVERY OF COSMONAUTS MUSCLE VELOCITY AND STRENGTH AFTER SPACEFLIGHT AT DIFFERENT STAGES OF REHABILITATION

T. B. Kukoba, K. S. Kireev, M. M. Kharlamov

Yuri Gagarin Cosmonaut Training Center, Star City, Moscow region, Russia

Keywords: Cosmonaut, space flight, maximum arbitrary muscle strength, strength endurance, readjustment, rehabilitation

ТАРГЕТНЫЙ ПРОТЕОМНЫЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ КРОВИ КОСМОНАВТОВ, СОБРАННЫХ ВО ВРЕМЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТОВ

И. М. Ларина¹, А. С. Кононихин^{1,2}, А. Г. Бржозовский^{1,2}, Д. Н. Каширина¹, Л. Х. Пастушкова¹, Ю. И. Смирнов¹, Е. Н. Николаев²

¹ Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

² Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Ключевые слова: космический полёт, космонавты, протеомика, масс-спектрометрия, высушенные пятна крови

Космический полет (КП) воздействует на организм человека комплексом факторов экстремального характера, таких как микрогравитация, ускорение, космическое излучение. Их влияние определяет процессы адаптации, молекулярные механизмы которой до конца не изучены и по-прежнему остаются актуальными для исследования на всех этапах длительных полётов на Международной космической станции (МКС). Из-за определённых технических, логистических и экономических ограничений (в том числе вызванных невесомостью) выявление изменений в организме, происходящих во время пребывания космонавта на МКС, остаётся сложной задачей.

Одним из доступных методов представляется анализ протеома образцов высушенных пятен крови (DBS), т. е. образцов биологического материала, собранного непосредственно в ходе полёта. Микроотбор предусматривает получение небольшого объёма крови (~40 мкл), достаточного для омиксных исследований. Набор инструментов для этой процедуры прост, мал и удобен в использовании на борту. Образцы DBS стабильны в стандартных условиях окружающей среды в течение многих лет и содержат тысячи анализов, которые можно элюировать для последующего анализа.

Глубокий анализ протеома крови может способствовать открытию новых данных и механизмов адаптивного ответа человека на условия КП. Наша группа ранее демонстрировала изменения протеомного состава после длительных (169–199 дней) миссий на МКС, но анализировались только образцы, собранные до и после космического полёта. Целью настоящего исследования было применение метода анализа протеома крови с использованием метода микроотбора DBS для изучения динамики физиологического ответа на условия КП на молекулярном уровне. Таргетная протеомика, основанная на масс-спектрометрии с использованием стандартных пептидов в виде внутренних стандартов, меченых стабильными изотопами (SIS), позволила провести точную количественную оценку 200 белков крови

Ларина Ирина Михайловна — заведующая лабораторией, ведущий научный сотрудник, доктор медицинских наук, профессор, irina.larina@gmail.com

Кононихин Алексей Сергеевич — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, konoleha@yandex.ru

Бржозовский Александр Геннадьевич — научный сотрудник, кандидат биологических наук, a.brzhozovskiy@skoltech.ru

Каширина Дарья Николаевна — старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, daryakudryavtseva@mail.ru

Пастушкова Людмила Ханифовна — ведущий научный сотрудник, доктор биологических наук, lpastushkova@mail.ru

Смирнов Юрий Игоревич — заведующий лабораторией, старший научный сотрудник, yusmirnov@imbrp.ru

Николаев Евгений Николаевич — полный профессор, руководитель лаборатории масс-спектрометрии, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент, e.nikolaev@skoltech.ru

космонавтов. Насколько нам известно, это первое протеомное исследование высушенных пятен крови для мониторинга адаптивных реакций космонавтов во время длительного космического полёта.

Образцы DBS были собраны у семи космонавтов (мужчины, возраст: $47 \pm 5,3$ года) до, во время и после продолжительных (169–199 дней; один из космонавтов участвовал в годовой миссии) полётов на МКС. Циклограмма исследования включала сбор капиллярной крови дважды до полёта (за 45–60 и за 20–30 сут до старта), трижды во время космического полёта (на 5–7-е сутки пребывания на борту МКС, на 3-й и 6-й месяцы полёта), и четырежды после полёта (на 1-е, 7-е, 14-е и 30-е сутки после приземления). Для годовой миссии дополнительно во время полёта сеансы отбора крови проводили на 9-й и 12-й месяцы пребывания на МКС. Все испытуемые предоставили письменное информированное согласие на участие в эксперименте ОМИКи-СПК. Исследование одобрено Комиссией по биоэтической этике Института медико-биологических проблем РАН (6 марта 2020 г.), Комиссией Российской Федерации по делам ЮНЕСКО и Многосторонней комиссией по экспертизе научных исследований с участием человека (*англ.* Human Research Multilateral Review Board — HRMRB), NASA.

Капиллярную кровь получали путём пункции фаланги безымянного пальца автоматическим скарификатором. С помощью автоматической пипетки отбирали 40 мкл крови и помещали на специальный ватман для сушки. Пятна крови сушили на фильтрах при температуре окружающей среды (19–26 °C) в течение 2–3 ч, а затем помещали в пакет с застёжкой-молнией. Сбор капиллярной крови проводили утром натощак. Фильтры были возвращены на Землю на борту российского космического корабля «Союз».

Пробы пятен крови проходили стандартную пробоподготовку, включающую экстрагирование белков, восстановление, алкилирование, осаждение и трипсинолиз. Таргетный количественный анализ с мониторингом множественных реакций (LC-MRM MS) проводили с использованием синтетических внутренних стандартов, меченых стабильными изотопами (SIS), и натуральных синтетических протеотипических пептидов (NAT) для измерения соответствующих белков в DBS.

Все образцы были проанализированы в двух повторах с помощью системы, состоящей из хроматографа ExionLC™ UHPLC (*англ.* Thermo Fisher Scientific, США), соединённым с трёхквардупольным масс-спектрометром SCIEX QTRAP 6500+ (SCIEX, Торонто, Онтарио, Канада). ВЭЖХ-разделение проводили на колонке Acquity UPLC Peptide BEH (C18, 300 Å, 1,7 мкм, 2,1×150 мм, 1/уп.) (Waters, США) с градиентным элюированием. Подвижная фаза А представляла собой 0,1 % муравьиной кислоты в воде; подвижная фаза Б представляла собой 0,1 % муравьиной кислоты в ацетонитриле. Разделение проводили при скорости потока 0,4 мл/мин с использованием 53-минутного градиента от 2 до 45 % подвижной фазы В. Масс-спектрометрические измерения проводили с использованием метода сбора данных MRM. Параметры источника ионизации электрораспылением (ESI) были следующими: напряжение ионного распыления 4000 В, температура 450 °C, расход газа-источника ионов 40 л/мин.

Для количественного анализа данных LC-MRM MS использовали программное обеспечение Skyline Quantitative Analysis (версия 20.2.0.343, Вашингтонский университет).

Статистический анализ выполнялся на Python (3.7.3) с использованием следующих пакетов: SciPy, Seaborn, Matplotlib и Pandas. Достоверные различия в концентрации белков в группах испытуемых оценивали с помощью U-критерия Манна-Уитни и размера эффекта d Коэна. Для статистического анализа рассматривались только белки, идентифицированные в ≥ 70 % образцов любой группы, что со-

кратило набор данных с 200 до 127 белков. Поскольку пропущенные значения часто представляют собой измерения с низким содержанием, значения Nan были заполнены распределением Гаусса с параметрами сдвига вниз 0,4 и ширины 0,2 от среднего значения для каждой группы. Коэффициент корреляции тау Кендалла использовался для оценки корреляции между признаками. В качестве метода уменьшения размерности для визуализации закономерностей кластеризации в протеомных данных DBS использовалась аппроксимация и проекция равномерного многообразия (UMAP). Белок-белковые взаимодействия анализировали с использованием базы данных STRING.

Таргетный протеомный анализ был выполнен для 58 образцов DBS, собранных у семи российских космонавтов во время длительного космического полёта. Статистический анализ показал, что протеомные данные были неоднородными: так, мы не смогли обнаружить каких-либо белков, которые присутствовали бы у всех космонавтов и имели значительные вариации концентрации на этапах КП. Конституциональные особенности космонавтов и различные условия КП для каждого из них оказались, очевидно, более значимыми факторами, что отразилось на индивидуальном протеомном профиле. С целью выявления белковых биомаркеров физиологического стресса, связанного с приземлением и взлётом, все образцы были разделены на две группы: группа 1 представляла собой «стрессовое» состояние (пробы взяты сразу после взлёта и приземления); группа 2 представляла «спокойное» состояние (пробы, взятые в состоянии максимально устойчивой адаптации как в космосе, так и на земле: перед полётом, через 6 мес полёта и последняя проба в периоде ремиссии после приземления). Мы использовали тест Манна-Уитни (p -value < 0,05) для сравнения концентраций белков между этими группами и размер эффекта d Коэна ($d > 0,8$). Взлёт и посадка изменяли концентрации девяти белков. Аннотации по базе данных GO выявила участие этих белков в регуляции активности ферментов, а также в антиоксидантной активности.

Два белка, важные для организации внеклеточного матрикса, Люмикан и Фибулин-1, положительно регулировались стрессом. Возможно, перегрузки при взлёте и посадке способствовали повышению уровня этих белков в крови.

Негативная регуляция стрессом наблюдалась для белков, связанных с липидным и углеводным обменом: аполипопротеина F, цинк-альфа-2-гликопротеина и резистина. Аполипопротеин F является одним из наиболее важных регуляторов транспорта холестерина. Цинк-альфа-2-гликопротеин стимулирует деградацию липидов в адипоцитах. Резистин — это гормон жировой ткани, который ингибирует способность инсулина стимулировать поглощение глюкозы. Во время космического полёта, особенно длительного, воздействие микрогравитации приводит к ряду изменений патофизиологической направленности, среди которых метаболические изменения. По-видимому, стресс во время взлёта и приземления вносит свои коррективы в метаболические процессы, но необходимы более тщательные исследования.

В результате воздействия стресса взлёта и посадки также снижалось содержание белка 3, связывающего инсулиноподобный фактор роста (IGFBP-3), который посредством взаимодействия с IGF регулирует клеточные процессы, такие как пролиферация клеток, апоптоз и дифференцировка. Также негативная регуляция стрессом наблюдалась для белков, защищающих клетки от окислительного стресса путём детоксикации пероксидов: глутатионпероксидазы 3 и пероксиредоксина-1, что, возможно, снижает устойчивость клеток к окислительному стрессу и может иметь негативные последствия для организма, особенно в условиях космического полёта.

Чтобы идентифицировать дополнительные белки-маркеры стресса, мы проанализировали динамические изменения концен-

трации белков во время космического полёта. Целью было найти белки, концентрация которых монотонно меняется после воздействия (взлёта или приземления). Предложена простая модель экспоненциального затухания концентрации белка после воздействия стрессового фактора (взлёт и приземление). Таким образом, была выявлена панель из 15 белков, концентрация которых монотонно менялась (значение Кендалла $<0,05$) после воздействия (взлёта или приземления). Пересечение обеих белковых панелей, упомянутых выше, привело к получению окончательного списка из 18 белков крови, которые были связаны с факторами КП, такими как взлёт и приземление. Панель включает два белка плазмы (люмикан и белок 3, связывающий инсулиноподобный фактор роста), которые ранее упоминались в других исследованиях как связанные с космическим полётом. Таким образом, впервые проведённое протеомное исследование высушенных пятен крови, собранных непосредственно во время полёта, позволило выявить динамику адаптивных реакций космонавтов во время длительного космического полёта.

TARGETED PROTEOMIC ANALYSIS OF COSMONAUT BLOOD SAMPLES COLLECTED DURING LONG-TERM SPACE FLIGHTS

I. M. Larina¹, A. S. Kononikhin^{1,2}, A. G. Brzhozovsky^{1,2}, D. N. Kashirina¹,

L. H. Pastushkova¹, Yu. I. Smirnov¹, E. N. Nikolaev²

¹ Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

² Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

Keywords: space flight, cosmonauts, proteomics, mass spectrometry, dried blood spots

ЭКСПЕРИМЕНТ «БТН-НЕЙТРОН»: НАБЛЮДЕНИЕ ЗА НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТОЙ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В ОКРЕСТНОСТИ МКС

М. Л. Литвак, И. Г. Митрофанов, Д. В. Головин,

М. И. Мокроусов, А. Н. Пеков

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: МКС, БТН, ГКЛ, нейтрон, радиационный фон, доза

Введение

Проведение измерений нейтронного и гамма-фона позволяет получить необходимые экспериментальные данные для оценки вклада вторичной (нейтронное и гамма-излучение) компоненты радиационного фона в полную дозу и соответственно учитывать это при создании радиационной защиты экипажа и аппаратуры как во время работы на орбите Земли (на Международной космической станции (МКС)), так и во время длительного межпланетного полёта.

Эксперимент «БТН-Нейтрон» позволяет решать такую задачу на борту Российского сегмента (РС) МКС за счёт измерения потоков нейтронов в широком диапазоне энергии, начиная от тепловых нейтронов (малые доли электронвольт) и до нейтронов с энергиями порядка 10 МэВ. Первая концепция эксперимента была предложена Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) в 1997 г. (Третьяков и др., 2010). Она была оптимизирована после 2002 г., когда состоялся запуск американской миссии «Марс-Одиссей» (*англ.* Mars Odyssey) к Марсу, в состав которой вошёл компактный нейтронный спектрометр ХЕНД (*англ.* High Energy Neutron Detector — HEND), разработанный в ИКИ РАН и предназначенный для глобального картографирования нейтронного альbedo и поиска подповерхностного водяного льда (Литвак и др., 2017, 2022; Третьяков и др., 2010). По данным прибора ХЕНД был обнаружен водяной лёд в приполярных районах Марса выше 60° ю.ш./ 60° с.ш, проведены наблюдения сезонного цикла Марса и сезонных шапок Марса, получены оценки вклада нейтронного компонента фона на перелёте к Марсу и на орбите Марса (Litvak et al., 2007, 2021; Mitrofanov et al., 2001). Учитывая крайне успешный опыт наблюдений на Марсе, а также тот факт, что в процессе разработки прибора ХЕНД на Земле остался его запасной лётный образец, было решено использовать его качестве детекторного блока аппаратуры БТН-М1 для проведения первого этапа КЭ «БТН-Нейтрон». Такой подход позволил не только оптимизировать время и затраты на подготовку эксперимента, но и предоставил уникальную возможность проводить синхронные измерения нейтронного фона и солнечной активности на околоземной и марсианской орбитах.

Космический эксперимент «БТН-Нейтрон» начался в конце 2006 г., когда на внешней поверхности российского модуля «Звезда» космонавтом РФ Михаилом Тюринным и астронавтом США Майклом Лопес-Алегррия (*англ.* Michael Eladio López-Alegría) была установлен детекторный блок аппаратуры БТН-М1 (Третьяков и др., 2010).

Литвак Максим Леонидович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, профессор РАН, litvak@iki.rssi.ru

Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом, доктор физико-математических наук, mitrofanov@np.cosmos.ru

Головин Дмитрий Васильевич — младший научный сотрудник, golovin@np.cosmos.ru

Мокроусов Максим Игоревич — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, mokromax@np.cosmos.ru

Пеков Алексей Николаевич — ведущий инженер, pekov@np.cosmos.ru

Основные научные задачи эксперимента «БТН-Нейтрон»

Нейтронный фон на МКС возникает как вторичное излучение в результате взаимодействия заряженных частиц высоких энергий с ядрами химических элементов, входящих в состав атмосферы Земли и присутствующих в материалах орбитальной станции. Первичным излучением становятся протоны галактических космических лучей (ГКЛ), солнечных космических лучей (СКЛ), и протоны, захваченные в радиационных поясах Земли.

Известно, что поток ГКЛ меняется во времени за счёт солнечной модуляции в ходе 11-летнего солнечного цикла. При спокойном солнце в солнечную систему проникают частицы ГКЛ меньших энергий и в результате этого возрастает поток как первичного, так и вторичного излучения (Usoskin et al., 2005). С увеличением активности Солнца поток ГКЛ падает, но зато увеличивается количество сильных солнечных протонных событий. Таким образом, по вариациям нейтронного потока можно отслеживать вариации потока ГКЛ и понимать насколько они повторяют друг друга. Измеряя спектральную плотность нейтронов, можно переходить от величины нейтронного потока к мощности эффективной дозы по нейтронам, и оценивать, как она меняется во времени и какой вклад даёт в полную дозу (с учётом дозы от заряженных частиц).

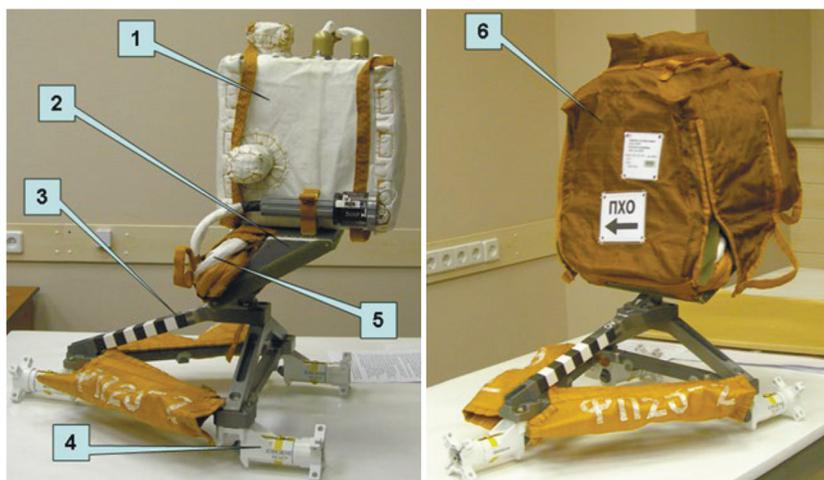


Рис. 1. Внешний детекторный блок эксперимента «БТН-Нейтрон» в сборе перед отправкой на МКС: 1 — детекторный блок, 2 — ферма, 3 — кронштейн, 4 — быстросъёмные замки, 5 — кабели, 6 — временный защитный чехол

Нейтронный фон меняется не только во времени, но и в пространстве. При пролёте областей, где наблюдаются неоднородности магнитного поля Земли, возникают повышенные потоки заряженных частиц, что соответственно приводит к повышенному вторичному фону нейтронов и гамма-квантов. Такие условия наблюдаются в окрестности магнитных полюсов Земли и при пролёте Южно-атлантической магнитной аномалии (ЮАМА), где нижняя граница внутреннего радиационного пояса с захваченными протонами опускается до высоты около 200 км.

Таким образом, можно сформулировать следующие научные задачи эксперимента «БТН-Нейтрон»:

1. Непрерывное наблюдение за переменностью нейтронного потока в окрестности МКС в широком спектральном диапазоне от надтепловых до быстрых нейтронов. Эта задача подразумевает поиск вариаций фона на разных временных масштабах, начиная

от орбитальной переменности и заканчивая долгопериодическими изменениями, связанных с одиннадцатилетним солнечным циклом.

2. Поиск пространственной переменности нейтронного потока при пролёте МКС над разными участками земной поверхности, включая пролёты над экваториальными районами, ЮАМА, и на высоких геомагнитных широтах.
3. Мониторинг нейтронного фона во время сильных солнечных протонных событий и солнечных вспышек, поиск и регистрация солнечных нейтронов.
4. Переход от измерений спектральной плотности нейтронного потока к оценке мощности нейтронной компоненты радиационной дозы снаружи МКС с последующим сопоставлением с измерениями радиационной дозы от заряженных частиц и построением глобальной карты (в рамках широт, внутри которых летает МКС) радиационной дозы и мониторингом её переменности во времени.

Результаты

Эксперимент «БТН-Нейтрон» предоставляет уникальные данные наблюдений, так как аппаратура работает непрерывно уже более 15 лет, что покрывает конец 23-го солнечного цикла (до декабря 2008 г.), полностью 24-й солнечный цикл, и начало 25-го солнечного цикла (с декабря 2019 г.). Самый большой перерыв в работе был связан отказом служебного прибора БСПН (блок синхронизации с полезными нагрузками) в июле 2019 г., который обеспечивает выдачу кода бортового времени МКС и временным выходом из строя в период с 24 октября 2020 г. по 16 июля 2021 г. служебной телеметрической системы ТМИ БИТС2-12 (бортовая информационно-телеметрическая система), которая обеспечивает на МКС передачу на Землю научных данных. Временная дорожка полученных данных позволяет наблюдать солнечную модуляцию потока ГКЛ и соответственно долгопериодические вариации нейтронного потока для разных фаз солнечного цикла. Для таких наблюдений наибольший интерес представляют пролёты МКС над высокоширотными областями с низкой жёсткостью геомагнитного обрезания (ЖГО). Это параметр, который характеризует возможность проникновения космических заряженных частиц в магнитосферу и атмосферу Земли (см. например (Gerontidou et al., 2021; Shea et al., 1986)). В окрестности магнитных полюсов, из-за дипольной конфигурации магнитного поля Земли, заряженные частицы, составляющие низкоэнергетичную часть спектра ГКЛ, двигаясь вдоль силовых линий, могут проникать на высоты, где летает МКС. Поток этих частиц больше всего меняется из-за солнечной модуляции, а значит длительное наблюдение за величиной нейтронного потока при пролёте этих областей даёт возможность изучать долгопериодические вариации ГКЛ и понимать, как они влияют на поток вторичных частиц, рождённых в верхней атмосфере Земли и конструкции самой орбитальной станции.

На рис. 2 (верхний график) показан временной профиль темпа счета нейтронов в окрестности магнитных полюсов Земли, зарегистрированный аппаратурой «БТН-нейтрон» за весь период наблюдений до июня 2023 г. Хорошо видно, что представленный временной профиль существенно меняется во времени, демонстрируя периодические вариации (до двух раз между минимумом и максимумом) в соответствии с фазами солнечного активности, которые определяются по значению параметра, связанного с подсчётом количества солнечных пятен (число Вольфа). Динамика этого параметра показана на нижнем графике рис. 2. Начало и конец солнечного цикла характеризуются минимальной солнечной активностью, поэтому в эти периоды поток ГКЛ внутри Солнечной системы достигает максимума, одновременно приводя к увеличению потока вторичных нейтронов. За весь период наблюдений было зарегистрировано два

максимума потока нейтронов: с сентября 2009 г. по апрель 2010 г. и с августа 2018 г. по август 2021 г. Кроме этого на временном профиле хорошо виден минимум нейтронного потока в конце 2014, начале 2015 гг. и приближение ко второму минимуму летом 2023 г., что соответствует временным интервалам наиболее активного Солнца. На рис. 2 (средний график) для сравнения также показан профиль нейтронного потока, зарегистрированный одним из наземных нейтронных мониторов, находящимся в университете Oulu, Финляндия (см., <https://www.nmdb.eu/station/oulu/>). Эта локация тоже находится на высоких широтах с ЖГО < 1 ГВ и поэтому обладает высокой чувствительностью для регистрации переменности потока ГКЛ. Хорошо видно, что в части крупномасштабной переменности орбитальных и наземных нейтронные мониторы хорошо повторяют друг друга.

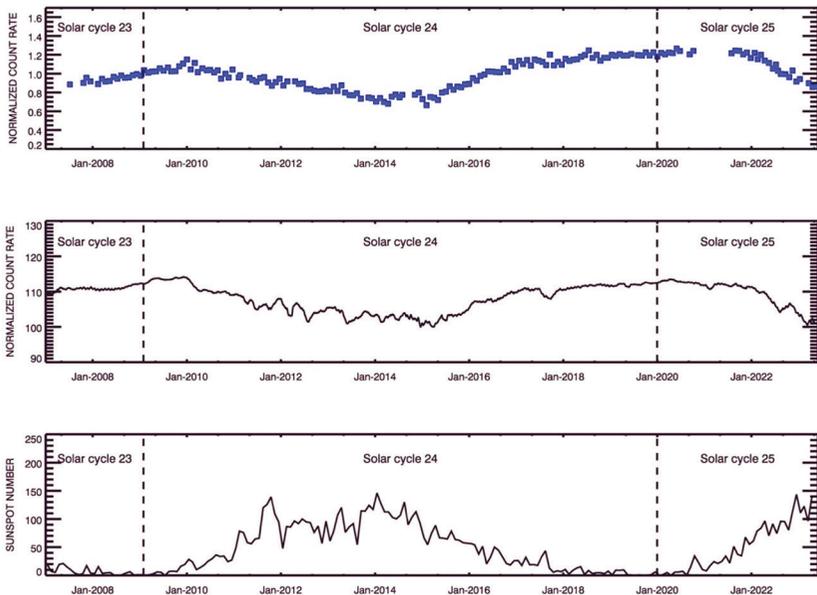


Рис. 2. Временные профили нейтронного потока по данным эксперимента «БТН-Нейтрон» (синий цвет, верхний график), наземного нейтронного монитора Oulu (средний график) и солнечных пятен (нижний график)

Необходимо отметить, несколько важных наблюдений: 1) нейтронный сигнал инерционен и существенно запаздывает по сравнению с динамикой солнечных пятен (от нескольких месяцев до года); 2) есть различия в мелкомасштабной переменности появления солнечных пятен и переменности нейтронного потока на орбите и на поверхности; 3) солнечные циклы отличаются друг от друга.

По данным измерений «БТН-Нейтрон» можно восстановить спектральную плотность нейтронного потока и от неё перейти к оценке эффективной дозы по нейтронам. В соответствии с научными задачами 1, 2 и 4 мы оценили мощность эффективной дозы нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности МКС для разных периодов времени и пролётов над разными участками поверхности. На рис. 3 представлена карта мощности эффективной дозы для нейтронов, построенная за период минимума солнечной активности (2019–2020) и соответствующая максимуму нейтронного потока. В табл. 1 также приведены средние значения нейтронной компоненты радиационной дозы, полученные для различных областей для периодов в окрестности максимума (октябрь 2022 г. – март 2023 г.) и минимума (октябрь 2019 г. – апрель 2020 г.) солнечной активности в ходе 25-го солнечного цикла.

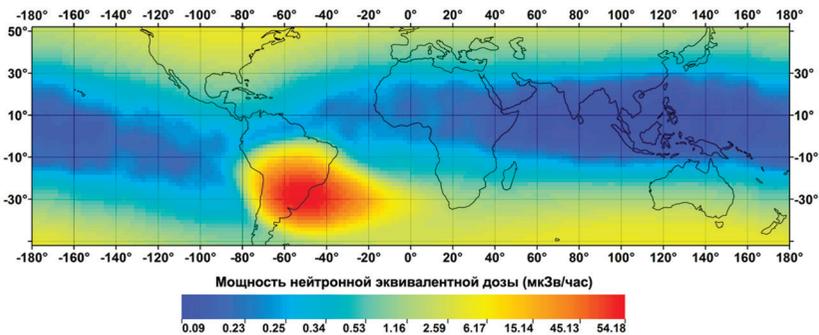


Рис. 3. Карта мощности эффективной дозы по нейтронам, полученная по данным эксперимента «БТН-Нейтрон» для минимума солнечного цикла

Таблица 1. Оценки мощности нейтронной компоненты радиационной дозы для максимума и минимума солнечной активности (25-й солнечный цикл) при пролёте МКС над различными областями

Область на карте	Доза, мкЗв/ч	
	Октябрь 2019 г. – апрель 2020 г.	Октябрь 2022 г. – март 2023 г.
Экваториальная	0,206±0,0001	0,208±0,002
Северная приполярная	2,17±0,02	1,50±0,02
Южная приполярная	2,30±0,02	1,71±0,01
ЮАМА	28,9±1,0	24,1±1,0

Из рис. 3 и табл. 1 хорошо видно, что максимальная переменность (от 1,5 раз, учитывая, что максимум солнечной активности в 25-м солнечном цикле еще не наступил) зафиксирована при пролёте северных и южных высокоширотных областей в окрестности магнитных полюсов Земли, а максимальная абсолютная величина дозы (в 50–100 раз выше, чем на экваторе) наблюдается при пролёте ЮАМА.

Литература

- Третьяков В. И., Митрофанов И. Г., Головин Д. В. и др. Первый этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента Международной космической станции // Косм. исслед. 2010. Т. 48. № 4. С. 293–307.
- Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Головин Д. В. и др. Наблюдение пространственных и временных вариаций спектральной плотности нейтронного потока вне российского сегмента Международной космической станции по данным космического эксперимента «БТН-Нейтрон» // Косм. исслед. 2017. Т. 55. № 2. С. 116–130.
- Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Нурждин И. О. и др. Долгопериодические вариации нейтронной компоненты радиационного фона в окрестности международной космической станции по данным космического эксперимента «БТН-Нейтрон» // Косм. исслед. 2022. Т. 60. № 3. С. 206–217.
- Mitrofanov I. G., Anfimov D., Kozyrev A. et al. Maps of Subsurface Hydrogen from the High Energy Neutron Detector, Mars Odyssey // Science. 2001. V. 297. P. 78–81. DOI: 10.1126/science.1073616.
- Litvak M. L., Mitrofanov I. G., Kozyrev A. S. et al. Long-term observations of southern winters on Mars: Estimations of column thickness, mass, and volume density of the seasonal CO₂ deposit from HEND/Odyssey // J. Geophysical Research. 2007. V. 112. Article E03S13. DOI: 10.1029/2006JE002832.

- Litvak M.L., Mitrofanov I. G., Sanin A. B. et al.* Observations of neutron radiation environment during Odyssey cruise to Mars // *Life Sciences in Space Research*. 2021. V. 29. P. 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.03.003>.
- Usoskin I. G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G. A., Mursula K.* Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951–2004 // *J. Geophysical Research*. 2005. V. 110. Article A12108. DOI: 10.1029/2005JA011250.
- Shea M. A., Smart D. F.* Estimating cosmic ray vertical cutoff rigidities as a function of the McIlwain L-parameter for different epochs of the geomagnetic field // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1986. V. 48. P. 200–205.
- Gerontidou M., Katzourakis N., Mavromichalaki H. et al.* World grid of cosmic ray vertical cut-off rigidity for the last decade // *Advances in Space Research*. 2021. V. 67. P. 2231–2240. DOI: 10.1016/j.asr.2021.01.011.

THE BTN-NEUTRON EXPERIMENT: OBSERVATION OF THE NEUTRON COMPONENT OF THE RADIATION BACKGROUND IN THE VICINITY OF THE ISS

M. L. Litvak, I. G. Mitrofanov, D. V. Golovin, M. I. Mokrousov, A. N. Pekov
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Keywords: ISS, BTN, GCR, neutron, radiation background, dose

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО НАПРАВЛЕНИЮ «ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА» НА РС МКС

Е. А. Лупян¹, В. П. Саворский^{1,2}

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

Ключевые слова: исследования Земли из космоса, дистанционное зондирование Земли, долгосрочная программа целевых работ (ДПЦР)

Введение

Долгосрочная программа целевых работ (ДПЦР) по направлению научных фундаментальных исследований (НФИ) «Исследования Земли из космоса» на Российском сегменте (РС) Международной космической станции (МКС) включает измерения со станции собственного и отражённого излучения Земли в широком диапазоне электромагнитных волн — от видимого до сверхвысокочастотного (СВЧ).

Основные задачи, которые ставятся при выполнении проектов в области исследований Земли из космоса на РС МКС, включают

- 1) *совершенствование* существующих, разработка и создание новых (перспективных) *измерительных приборов* и систем контроля, в рамках отработки новой научной аппаратуры (НА);
- 2) *совершенствование методического обеспечения* при проведении экспериментальных исследований;
- 3) *развитие новых методов* обработки, долговременного хранения результатов аэрокосмических и наземных наблюдений, а также обмена данными;
- 4) *развитие новых информационных технологий*, обеспечивающих широкополосный доступ к данным, результатам их обработки и инструментам их анализа, в том числе в режиме удалённого доступа через системы специализированных интерфейсов.

Результаты и текущее состояние целевых работ по направлению «Исследования Земли из космоса»

За 20 лет реализации программы (с 2003 г.) секцией 3 Координационного научно-технического совета (КНТС) «Исследования Земли из космоса» было рекомендовано к включению в ДПЦР 22 проекта, из них 4 космических эксперимента (КЭ) были успешно завершены, 4 находятся в стадии бортовой реализации, 6 — в стадии наземной подготовки, 9 проектов в 2021 г. выведены из ДПЦР до начала бортовой реализации. В рамках КЭ «Ураган» наряду с бортовой реализацией проводится наземная подготовка дополнительной научной аппаратуры СОВА-2, «Гиперспектрометр», «Радиометр инфракрасный высокого разрешения» (РИВР), поэтому этот проект включён в статистику и как реализуемый проект, и как проект, находящийся на этапе наземной подготовки.

В рамках ДПЦР за весь период проведения целевых работ на РС МКС по направлению «Исследования Земли из космоса» были завершены следующие КЭ:

- «Диатомея» — исследование устойчивости географического положения и конфигурации границ биопродуктивных акваторий Мирового океана, наблюдаемых экипажами орбитальных станций»;

Лупян Евгений Аркадьевич — заместитель директора, доктор технических наук, evgeny@d902.iki.rssi.ru

Саворский Виктор Петрович — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, savor@inbox.ru

- РУСАЛКА (ручной спектральный анализатор компонент атмосферы) — отработка методики определения содержания углекислого газа и метана в атмосфере Земли с борта по данным спектрометра ближнего ИК-диапазона;
- «СВЧ-радиометрия» — исследование характеристик подстилающей поверхности, океана и атмосферы по данным СВЧ-радиометра РК-21-8;
- «Сейнер» — исследование характеристик подстилающей поверхности, океана и атмосферы по данным СВЧ-радиометра РК-21-8.

Наиболее значимые результаты, позволившие оценить пространственно-временную изменчивость важнейших высокопродуктивных акваторий Северной и Южной Атлантики, Чёрного и Азовского морей, получены в рамках КЭ «Диатомея». Важными представляются и результаты КЭ «Сейнер», которые дали возможность определить формы, структуры и морфометрические характеристики цветоконтрастных образований в заданных биопродуктивных районах океана, в частности, установить высокий потенциал биопродуктивности южной части Тихого океана.

Текущие целевые работы, выполняемые на РС МКС, включают КЭ «Дубрава», «Сценарий», «Ураган», «Терминатор». В рамках этих работ проводятся наблюдения Земли из космоса с использованием фотоаппарата, видеокамеры, аппаратуры ФСА, ВСА и СОВА-1, «Икарус». Наиболее значимые результаты в 2020-2023гг получены с помощью аппаратуры «Икарус» при наблюдении путей миграции животных. В рамках КЭ «Терминатор» на борту реализуются спектрометрические наблюдения.

Планируемые на борту РС МКС в период с 2025 по 2028 г. целевые работы включают реализацию КЭ «Дриада», «Микроволновик», «Скаттерометр-L», «Ураган» (с использованием НА СОВА-2, «Гиперспектрометр» и РИВР), а также КЭ «Мониторинг-ДТР». В настоящее время НА для указанных КЭ находится в стадии наземной подготовки. При этом особо необходимо отметить уникальность разрабатываемой в рамках проектов «Дриада», «Микроволновик», «Скаттерометр-L» научной аппаратуры, а также высокие метрические характеристики НА СОВА-2, «Гиперспектрометр» и РИВР, подготавливаемых в рамках КЭ «Ураган».

Один из курируемых ранее секцией 3 КНТС «Исследования Земли из космоса проектов», а именно проект «Напор-мини РСА», переведён в настоящее время (с 2020 г.) в направлении «Технологии освоения космического пространства» (ТОКП). Часть НА этого проекта (система оптических телескопов — СОТ) в 2014 г. была доставлена на борт РС МКС. Аппаратуру СОТ в 2015–2016 гг. использовали для проведения орбитальных наблюдений.

В 2021 г. из ДПЦР выведены 9 проектов КЭ: «Ветер», «Климат», «Конвергенция», «Метрад», «МКС-Глонасс», «МКС-РСА(Р)», «Ракурс», «Радиолокатор», «Фон». По всем этим проектам (кроме КЭ «Метрад») в рамках наземной подготовки были разработаны эскизные проекты. Разработанные при подготовке эскизных проектов «Конвергенция», «МКС-Глонасс», «МКС-РСА(Р)», «Ракурс», «Радиолокатор» проектные решения секцией 3 КНТС было рекомендовано использовать при подготовке НА для установки на Российской орбитальной станции (РОС).

Указанные КЭ выведены из состава ДПЦР, в основном, из-за того, что не представлялось возможным завершить подготовительные работы к 2025 г. с тем, чтобы реализовать экспериментальные программы этих экспериментов к 2028 г., т. е. к планируемому сроку окончания работы МКС.

Анализ проблем проведения целевых работ по направлению «Исследования Земли из космоса»

Анализ трудностей, возникающих в процессе наземной подготовки проекта и их бортовой реализации, показал, что они являются следствием:

- чрезмерной длительности наземной подготовки КЭ, вызванной в большинстве случаев излишне растянутыми сроками согласования контрактных документов, а также частыми и непредсказуемыми изменениями сроков и объёмов финансирования;
- отсутствия при постановке проекта описания ожидаемых целевых результатов в том виде, который даёт возможность оценить степень достижения поставленных целей при реализации КЭ;
- низкой пропускной способности каналов передачи собранной экспериментальной информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на наземные пункты приёма, что существенно снижает оперативность получаемых в рамках КЭ результатов;
- малой доступности результатов КЭ, поскольку за исключением данных фоторегистрации природных объектов, полученных в рамках КЭ «Ураган» и представленных на сайте «Vega-Science» (уникальная научная установка (УНУ) «BS ИКИ-Мониторинг», <http://sci-vega.ru/>), результаты КЭ, проводимых и завершённых на РС МКС, доступны только в виде обобщающих научных публикаций.

Кроме этого, анализ позволил выявить следующие проблемы, влияющие на достоверность и репрезентативность результатов ЦР, в том числе связанные с отсутствием:

- системы конкурсного отбора ЦР по целевым задачам Федеральной космической программы (ФКП);
- координации КЭ на РС МКС с планами работ на российских автоматических космических аппаратах (АКА);
- обязательств по публикации и обеспечению открытого доступа к результатам научных и прикладных исследований (НПИ);
- специализированного портала актуальной информации о ходе бортовой реализации КЭ и о полученных при этом результатах.

Пути повышения эффективности использования результатов ЦР (КЭ), реализуемых на РС МКС

Для повышения эффективности использования результатов, получаемых в рамках КЭ, проводимых на РС МКС по направлению «Исследования Земли из космоса», по нашему мнению, необходимо осуществить следующие мероприятия:

- создать систему представления доступа к данным, получаемым в результате экспериментальных орбитальных наблюдений,
- кардинально расширить доступ к информации о получаемых в рамках КЭ результатах,
- расширить число экспериментов, в которых данные МКС используются совместно с данными, получаемыми с использованием АКА,
- повысить оперативность постановки экспериментов, т. е. существенно снизить сроки наземной подготовки НА для КЭ,
- создать на МКС (а в перспективе и на РОС) набора штатной НА для проведения «стандартных» наблюдений с обеспечением возможности пользоваться этой НА для широкого круга

российских научно-исследовательских коллективов, в том числе для проведения непосредственных наблюдений.

Выводы

Значительный эффект, способствующий повышению результативности ЦР по направлению «Исследования Земли из космоса», приведёт к устранению проблем, приводящих к трудностям при проведении наземной подготовки и орбитальной реализации КЭ. Прежде всего, это касается мер, препятствующих чрезмерной длительности подготовки КЭ.

Необходимо также реализовать меры, повышающие эффективность и достоверность результатов КЭ. При их осуществлении появится возможность превратить данные КЭ по направлению «Исследования Земли из космоса» и результаты из обработки в информационный ресурс, доступный для эффективного использования в научных исследованиях и для практического использования.

Полученный опыт проведения КЭ на РС МКС следует учесть при планировании дальнейших работ на МКС, а также при разработке и проведении экспериментов на РОС.

RESEARCHES IN THE DIRECTION “RESEARCH OF THE EARTH FROM SPACE” ON THE RS ISS

E. A. Loupian¹, V. P. Savorskii^{1,2}

¹ Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

² Kotel’nikov Institute of Radio-engineering and Electronics RAS, Fryazino, Russia

Keywords: research of the Earth from space, remote sensing of the Earth, long-term program of targeted work (LTPTW)

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «СОЛНЦЕ – ТЕРАГЕРЦ»

В. С. Махмутов¹, М. В. Филиппов¹, А. А. Квашнин¹, О. С. Максумов¹,
М. В. Разумейко¹, С. В. Мизин¹, С. В. Соков¹, О. Ю. Криволапова²,
А. Г. Гайфутдинова²

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, терагерцевое излучение, оптическая система

Введение

Солнце является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частоты и энергии. В настоящее время проводятся наземные и внеатмосферные наблюдения излучения практически по всему солнечному спектру за исключением излучения терагерцевого диапазона, которое почти полностью поглощается земной атмосферой. Космический эксперимент «Солнце – Терагерц» на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) направлен на измерение излучения Солнца в терагерцевом диапазоне на частотах 10^{12} – 10^{13} Гц (Калинин и др., 2021). Главная цель эксперимента — получение, впервые, данных о терагерцевом излучении Солнца: солнечных активных областей и солнечных вспышек одновременно на восьми частотах в диапазоне 0,4–12,0 ТГц. Измерения на нескольких частотах позволяют наблюдать и изучать процессы, происходящие в различных слоях солнечной атмосферы. Эти данные необходимы для выяснения природы солнечной активности, определения физического механизма ускорения заряженных частиц на Солнце и других астрофизических объектах. А также эти измерения позволяют определить физические характеристики и положение источника терагерцевого излучения в солнечной атмосфере, установить вклад теплового тормозного излучения и синхротронного излучения ускоренных электронов в наблюдаемом излучении и др.

Разрабатываемая аппаратура (рис. 1) представляет собой набор восьми детекторов, чувствительных к излучению различной частоты: 0,4; 0,8; 1,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0 и 12,0 ТГц.

Махмутов Владимир Салимгереевич — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, makhmutv@sci.lebedev.ru

Филиппов Максим Валентинович — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, mfilippov@frtk.ru

Квашнин Александр Александрович — инженер 1-й категории, kwalex@yandex.ru

Максумов Осман сары оглы — ведущий инженер-электроник, omaks10@yandex.ru

Разумейко Михаил Викторович — ведущий инженер, razumeikomv@lebedev.ru

Мизин Сергей Витальевич — программист 1-й категории, кандидат физико-математических наук, mizinsv@lebedev.ru

Соков Сергей Витальевич — инженер 1-й категории, кандидат педагогических наук, доцент, sergey1988@list.ru

Криволапова Ольга Юрьевна — кандидат технических наук, главный специалист, olga.krivolapova@rsce.ru

Гайфутдинова Анастасия Григорьевна — инженер 1-й категории, anastasiya.gayfutdinova@rsce.ru

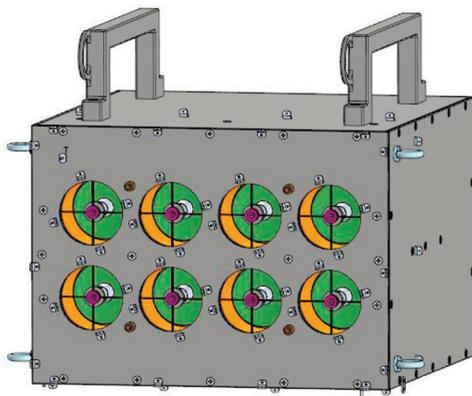


Рис. 1. Лицевая панель научной аппаратуры (НА) «Солнце – Терагерц». Показаны входные окна восьми частотных каналов

В состав каждого детектирующего канала входят:

- оптический телескоп (Квашнин и др., 2021), концентрирующий излучение на оптоакустическом преобразователе (ОАП) через систему фильтров и оптический прерыватель;
- система последовательных фильтров, пропускающая излучение в заданном частотном диапазоне для каждого детектирующего модуля, обеспечивая таким образом селективность;
- оптический прерыватель, модулирующий излучение на входном окне приёмника с частотой 10 или 20 Гц (Филиппов и др., 2023);
- ОАП, входящий в состав приёмника излучения.

Блок электроники НА «Солнце – Терагерц» представляет собой совокупность электронных плат: платы усилителей, драйверы оптических прерывателей, плата электроники, плата питания, автоматическая система обеспечения теплового режима (АСОТР).

Плата питания вырабатывает вторичные напряжения для питания электронных схем НА.

Платы усилителей (по одной на каждый приёмник) устанавливаются в приёмники и предназначены для усиления и фильтрации сигналов ОАП.

Драйверы оптических прерывателей предназначены для возбуждения и поддержания колебательного процесса в оптических прерывателях.

Плата электроники предназначена для измерения (преобразования сигналов приёмников в цифровой вид), их предварительной обработки, хранения и передачи на борт МКС.

Старт космического эксперимента «Солнце – Терагерц» запланирован на 2024–2025 гг. НА будет установлена на внешней поверхности служебного модуля МКС на двухосной платформе наведения (ДПН), которая позволит ориентировать прибор на Солнце с точностью до 12 угл. мин. ДПН смонтирована на универсальном рабочем месте (УРМ-Д) по IV плоскости служебного модуля.

Телескопы

Схема отдельного канала регистрации терагерцевого излучения показана на рис. 2. Входное излучение с помощью большого вогнутого зеркала и малого выпуклого зеркала формируется в узкий поток излучения, поступающий на вход прерывателя и фильтрующей системы детектора. Далее излучение, сформированное в заданном частотном интервале, поступает на входное окно приёмника терагерцевого излучения.

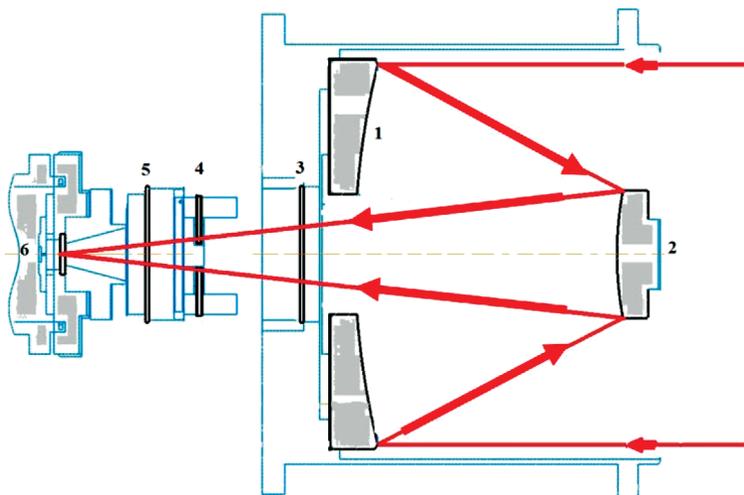


Рис. 2. Упрощённая схема детектора: 1 — большое вогнутое зеркало с центральным отверстием; 2 — малое выпуклое зеркало телескопа. Система фильтров (3, 5) состоит из отрезающего (LPF 23.1) и полосового фильтров (BPF). Между фильтрами установлен оптический прерыватель (4); 6 — входное окно приёмника терагерцевого излучения

С целью обеспечения дополнительного рассеяния излучения в видимом диапазоне спектра, зеркала проходят специальную обработку поверхности:

- притирка на шаблонах с водой и порошком Al_2O_3 с зернистость от 600 до 1200 ед.,
- обезжиривание,
- промывка в деионизованной воде (длительная с ультразвуком),
- травление в растворе NaOH,
- промывка в деионизованной воде,
- осветление в растворе HNO_3 ,
- промывка в проточной воде,
- промывка в деионизованной воде;
- сушка.

Итоговое качество оптической поверхности регулируется длительностью процесса травления в растворе NaOH.

Приёмники излучения

Использованные в приёмниках излучения ОАП GC-1P (производства ООО «Тидекс») относятся к классу неселективных неохлаждаемых приёмников. Спектральная чувствительность ОАП зависит от характеристик входного окна. Входное окно ОАП GC-1P изготавливается из полиэтилена высокой плотности (HDPE).

Система фильтров

В состав оптического тракта детектора входит система фильтров, которая состоит из следующих компонентов:

- отрезающий фильтр, предназначенный для пропускания терагерцевого излучения и блокирования коротких волн;
- полосовой фильтр, формирующий требуемую полосу пропускания детектора в терагерцевом диапазоне.

В качестве отрезающего используются фильтры LPF 23.1 (производства ООО «Тидекс»), по одному отрезающему фильтру на каждый

детектор. Отрезающие фильтры устанавливаются непосредственно на корпус телескопа, перед оптическим прерывателем.

Для выделения необходимой полосы пропускания используются полосовые резонансные фильтры BPF (производства ООО «Тидекс»), которые устанавливаются непосредственно на корпус приёмников (перед входным окном ОАП).

Таким образом сформированы восемь детектирующих каналов, максимум спектральной чувствительности которых приходится на частоты: 0,4; 0,8; 1,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0 и 12,0 ТГц.

Оптические прерыватели

При использовании ОАП ячейка Голея необходимо модулировать входное излучение, чтобы избежать вхождения прибора в режим насыщения. Для прерывания потока излучения используются резонансные оптические прерыватели (*англ.* resonant fork chopper), состоящие из двух подвижных лопаток, приводимых в движение переменным магнитным полем.

Оптические прерыватели представляют собой камертон, на концах ножек которого прикреплены лопатки из светопоглощающего материала. К основанию оптического прерывателя прикреплены катушки индуктивности, а напротив них расположены постоянные магниты. Вследствие возникновения переменного магнитного поля в одной из катушек начинает колебаться противопоставленная ей лопатка, которая, в свою очередь, вызывает колебания второй лопатки, чья катушка индуктивности является обратной связью.

Плата электроники

Плата электроники предназначена для измерения (преобразование сигналов приёмников в цифровой вид), их предварительной обработки, хранения и передачи на борт МКС.

В основе платы лежит 32-разрядный микроконтроллер 1986VE94Т, обладающий 16-канальным 12-разрядным встроенным АЦП. Восемь каналов задействованы для измерения сигналов приёмников и восемь каналов для измерений сигналов датчиков температуры (терморезисторов), встроенных в корпуса приёмников.

Структура сохраняемых и передаваемых на борт данных

Для промежуточного хранения данных на плате электроники установлены две микросхемы (основная и резервная) статической ОЗУ 1645РУ1А, ёмкостью 1 Мбит.

Данные за период 1 с формируются в кадры. Содержимое одного кадра данных приведено в таблице.

Содержимое одного кадра данных

Название	Назначение	Ед. измерения	Размер, байт
Frame_ID	номер кадра	ед.	4
Time_sec	секунды, прошедшие с 00:00:00, 6 января 1980 г.	с	4
Time_nsec	наносекунды	нс	4
Temp	температура приёмника	дискретный код АЦП	2×8
Amp	размах сигнала приёмника		2×8×10
V_avg	сигнал приёмника (среднее за кадр)		2×8
ASOTR_status	состояние системы АСОТР	ед.	1×10

Примечание: АЦП — амплитудно-цифровой преобразователь.

Общий объём полезной информации на один кадр составляет 214 байт, т. е. 18,48 Мбайт за сутки.

Литература

Калинин Е. В., Филиппов М. В., Махмутов В. С. и др. Исследование характеристик детектора терагерцового излучения для научной аппаратуры «Солнце – Терагерц» // Косм. исслед. 2021. Т. 59. № 1. С. 3–8.

Квашнин А. А., Логачев В. И., Филиппов М. В. и др. Оптическая система прибора для измерения солнечного терагерцового излучения // Косм. техника и технологии. 2021. № 4(35). С. 22–30, DOI: 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-4-22-30.

Филиппов М. В., Махмутов В. С., Максумов О. С. и др. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов // Косм. техника и технологии. 2023. № 1(40). С. 30–40.

SPACE EXPERIMENT “SUN – TERAHERTZ”

V. S. Makhmutov¹, M. V. Philippov¹, A. A. Kvashnin¹, O. S. Maksumov¹,
M. V. Razumeyko¹, S. V. Mizin¹, S. V. Sokov¹, O. Yu. Krivolapova², A. G. Gayfutdinova²

¹ P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

² S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: Sun, solar flares, terahertz emission, optical system

ВТОРОЙ ЭТАП КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «БТН-НЕЙТРОН» НА БОРТУ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ: АППАРАТУРА БТН-М2

**М. И. Мокроусов, И. Г. Митрофанов, А. А. Аникин, Д. В. Головин,
Н. Е. Карпушкина, А. С. Козырев, М. Л. Литвак, А. Н. Пеков, А. Б. Санин,
В. И. Третьяков**

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: МКС, нейтронный спектрометр, гамма спектрометр, безопасность экипажа

Как показали последние исследования на борту различных космических аппаратов, единственной из нерешённой технической проблемой пилотируемых межпланетных полётов на данный момент является высокий радиационный фон межпланетного пространства, который, как например в случае пилотируемой миссии на Марс, может оказаться критически опасным для экипажа. Работы по данной тематике ведутся во всех космических агентствах. Одним из таких космических экспериментов является «БТН-Нейтрон», аппаратура которого устанавливается на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). Основным результатом работы стало создание аппаратуры БТН-М2 для создания эффективной радиационной защиты на борту перспективных пилотируемых космических аппаратов, создания инженерной модели радиационного фона как внутри, так и снаружи МКС, и для регистрации гамма-лучей и нейтронов во время солнечных вспышек и космических гамма-всплесков (КГВ).

Нейтронная компонента радиационного фона в окрестности МКС возникает в результате взаимодействия заряженных частиц (протоны из радиационных поясов, заряженные частицы галактических и солнечных космических лучей) с веществом, из которого состоит МКС. Создание постоянно действующей лунной базы и подготовка будущих экспедиций к Марсу активно обсуждается различными космическими агентствами. Как показывают последние исследования, одной из важнейших задач была и остаётся задача обеспечения радиационной безопасности экипажа в условиях дальнего космоса. И если при работах на орбите Земли (при невысоких наклонениях орбит — ниже 60°) этот вопрос частично решён благодаря экранированию космических лучей земной магнитосферой, то в условиях межпланетных перелётов и работах в радиационных по-

Мокроусов Максим Игоревич — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, mokromax@iki.rssi.ru

Митрофанов Игорь Георгиевич — заведующий отделом, доктор физико-математических наук, mitrofanov@np.cosmos.ru

Аникин Артём Александрович — электроник, a.anikin@np.cosmos.ru

Головин Дмитрий Васильевич — младший научный сотрудник, golovin@np.cosmos.ru

Карпушкина Наталья Евгеньевна — ведущий технолог, karpushkina@np.cosmos.ru

Козырев Александр Сергеевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, kozyrev@mx.iki.rssi.ru

Литвак Максим Леонидович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, mlitvak.iki@gmail.com

Пеков Алексей Николаевич — ведущий инженер, pekov@np.cosmos.ru

Санин Антон Борисович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, anton.sanin@gmail.com

Третьяков Владислав Иванович — заместитель директора, vladtr@mx.iki.rssi.ru

ясах Земли безопасность экипажа напрямую зависит от окружающей радиационной обстановки.

Основные цели второго этапа эксперимента «БТН-Нейтрон» были определены следующим образом:

- Исследование радиационно-защитных свойств различных материалов для разработки эффективной радиационной защиты на борту перспективных космических аппаратов и для создания радиационных убежищ для будущих пилотируемых экспедиций на Луну и Марс;
- Создание инженерной модели радиационного фона нейтронов как внутри гермоотсеков РС, так и снаружи в различных условиях полёта МКС на околоземной орбите по данным БТН-М1 и БТН-М2.
- Регистрация гамма-лучей и нейтронов во время солнечных вспышек и солнечных протонных событий (совместно с БТН-М1);
- Регистрация событий НГВ и измерение спектров гамма-лучей этих событий, проверка гипотезы о наличии у части НГВ компоненты нейтронного излучения;
- Регистрация космических гамма-всплесков.

При разработке второго этапа эксперимента была использована концепция, хорошо себя зарекомендовавшая на первом этапе эксперимента «БТН-Нейтрон»: за основу берётся уже разработанный и прошедший лётные испытания прибор, к которому разрабатывается «оболочка» для адаптации интерфейсов с бортом РС МКС. В данном случае в качестве детекторной части был использован нейтронный и гамма-спектрометр МГНС (*англ.* меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр) для Европейской миссии «БепиКоломбо», отличие заключается лишь в том, что для задач регистрации космических и земных гамма вспышек была использована электроника спектрометра с быстрой обработкой сигнала, также заимствованная от лётного образца прибора АДРОН-ЛР российской миссии «Луна-Глоб» («Луна-25»).

Одной из важнейших новых частей конструкции прибора стали съёмные экраны, которые содержат внутри себя сборки материалов для исследования их защитных свойств от нейтронного излучения. В процессе проведения эксперимента с аппаратурой БТН-М2 предполагается довозка на РС МКС второй серии экранов с другими вариантами защитных материалов, разработанными на основе результатов эксперимента с первой серии экранов.

Фотография всей аппаратуры БТН-М2 в сборе с защитными экранами приведена на рис. 1. Общая блок-схема электроники прибора БТН-М2 показана на рис. 2.



Рис. 1. Аппаратура БТН-М2

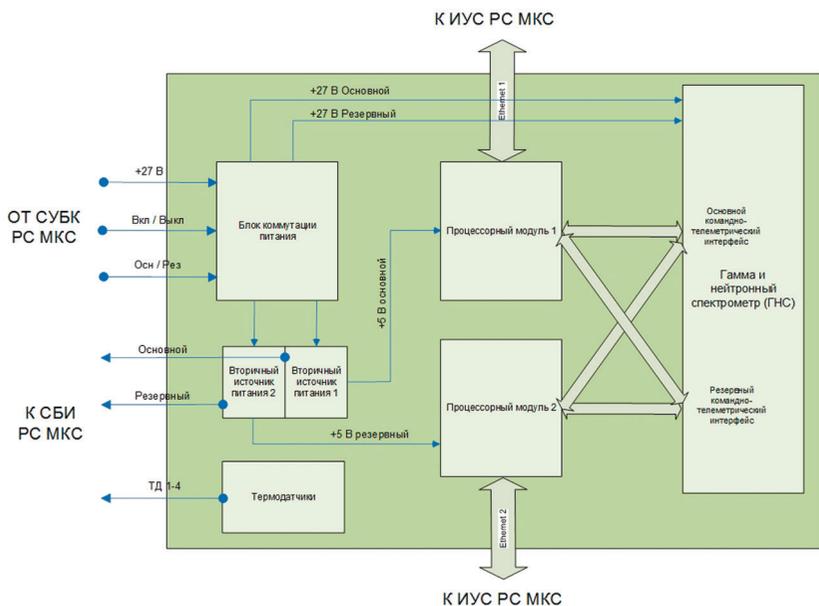


Рис. 2. Блок-схема электроники прибора БТН-М2

Аппаратура БТН-М2 представляет собой дублированное устройство с двумя полукомплектами, один из которых находится в холодном резерве. Подача первичного питания (+27 В) и переключение полукомплектов электроники производится подачей релейных команд от системы управления бортовым комплексом (СУБК) РС МКС. Подтверждение работы первого или второго полукомплекта соответственно, а также мониторинг тепловых режимов прибора проводится системой бортовых измерений (СБИ) РС МКС. Обмен командной и телеметрической информацией реализован с помощью резервированного интерфейса Ethernet 10/100 Мбит. Для переключения на резервный полукомплект электроники прибора необходимо физическое переключение интерфейсного кабеля на резервный разъем средствами экипажа МКС. Сводные характеристики аппаратуры БТН-М2 приведены ниже.

Характеристики аппаратуры БТН-М2

Габаритные размеры	266×450×480 мм
Масса	не более 42 кг (вместе с защитными экранами)
Потребляемая мощность	не более 15 Вт
Напряжение питания	15–50 В Пусковой ток не более 700 мА
Рабочий температурный диапазон	–40...+50 °С
Командно-телеметрический интерфейс	Ethernet 10/100 mbit
Объем телеметрической информации	не более 4 Мбайт/сут
Количество команд	не более 5 команд/сут
Объем внутренней памяти	2 Гбайт
Место установки	ПГО 1 МЛМ РС МКС, УРМ-В, узкая модуль-полка
Радиационная стойкость	не менее 5 крад
Назначенный ресурс	не менее 35 000 ч
Вероятность безотказной работы	не менее 0,9

На данный момент лётный образец аппаратуры БТН-М2 проходит полный цикл приёма-сдаточных испытаний (ПСИ). Начало

работы штатного образца аппаратуры (ШО) на борту модуля МКС «Наука» запланировано на 2024 г.

Второй этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» с комплексом аппаратуры БТН-М1 вне гермоотсека модуля «Звезда» и БТН-М2 в гермоотсеке модуля «Наука» позволит:

- Измерить потоки нейтронов и широком диапазоне энергий вдоль различных направлений внутри и вне гермоотсека МКС в различных геомагнитных условиях орбитального полёта МКС как во время спокойного Солнца, так и в условиях солнечных вспышек или протонных событий.
- Изучить поглощающие характеристики различных защитных экранов от вторичного нейтронного на борту МКС. Данные, полученные в условиях полёта на высоких геомагнитных широтах или в области Южно-Атлантической магнитной аномалии, позволят экспериментально воспроизвести условия на межпланетном космическом аппарате под воздействием галактических космических лучей.
- Измерить энергетические спектры потоков вторичных гамма-лучей вдоль разных направлений внутри гермоотсека МКС в различных геомагнитных условиях орбитального полёта МКС во время спокойного Солнца или в течение солнечных вспышек или протонных событий.
- Измерить потоки и энергетические спектры гамма-лучей от солнечных вспышек, наземных гамма-вспышек (НГВ) и космических гамма-всплесков с предельно высоким временным разрешением; проверить гипотезу о возможном спорадическом нейтронном излучении земной атмосферы во время НГВ.

THE SECOND STAGE OF BTN-NEUTRON SPACE EXPERIMENT ONBOARD THE RUSSIAN SECTION OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION: THE BTN-M2 INSTRUMENT

**M. I. Mokrousov, I. G. Mitrofanov, A. A. Anikin, D. V. Golovin, N. E. Karpushkina,
A. S. Kozyrev, M. L. Litvak, A. N. Pekov, A. B. Sanin, V. I. Tretyakov**
Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Keywords: ISS, neutron spectrometer, gamma spectrometer, crew safety

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «ИЗГИБ»

М. И. Монахов¹, Т. В. Матвеева¹, Д. М. Аюкаева¹, М. Ю. Беляев^{1,2}

¹ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, Королёв, Московская обл., Россия

² Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищи, Россия

Ключевые слова: микрогравитационная обстановка, микровозмущения, акселерометр, ориентация, датчик конвекции, тросовая система

С целью изучения условий для экспериментов на Международной космической станции (МКС) и транспортных грузовых кораблях (ТГК) «Прогресс» и отработки новых технологий, обеспечивающих лучшие условия выполнения исследований, был организован эксперимент «Изгиб». Постановщик КЭ «Изгиб» ПАО «РКК «Энергия», научный руководитель доктор технических наук М. Ю. Беляев. Для исследований микрогравитационной обстановки на МКС в эксперименте использовались данные, получаемые от штатных бортовых датчиков угловых скоростей и акселерометров, размещённых на борту российского сегмента (РС) МКС, а также от акселерометров MAMS (*англ.* Microgravity Acceleration Measurement System) и SAMS (*англ.* Space Acceleration Measurement System), находящихся в зоне американского сегмента (АС) МКС.

В эксперименте были получены значения микроускорений, возникающих при стыковках и расстыковках с МКС космических аппаратов различных типов, при проведении коррекций орбиты МКС, при изменении ориентации станции, на фоне занятий экипажа физическими упражнениями (Беляев и др., 2007). Выполненные исследования показали, что микрогравитационная обстановка на борту РС МКС не является благоприятной для проведения работ и исследований, чувствительных к микроускорениям. Это связано с тем, что центр масс МКС находится на американском сегменте, а многие бортовые системы, создающие микроперегрузки, размещены на РС МКС.

Поэтому для проведения исследований в области микрогравитации было предложено использовать ТГК «Прогресс» после выполнения ими своих основных функций (Беляев, Матвеева, 2014б; Беляев и др., 2017, 2018; Belyaev et al., 2018; Matveeva et al., 2014), поскольку они обладают ещё значительными ресурсами и могут быть использованы для выполнения экспериментов после отстыковки от МКС. В эксперименте «Изгиб» исследовались параметры движения ТГК «Прогресс» в различных режимах автономного полёта ТГК с целью определения и оптимизации условий выполнения исследований на его борту (Матвеева и др., 2017). Задавая различные режимы полёта (определённые ориентации и закрутки ТГК), можно получить микроперегрузки задаваемой величины и направленности, что необходимо для выполнения конкретных технологических процессов (Беляев и др., 2010).

Монахов Михаил Иванович — ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, mihail.monahov@rsce.ru

Аюкаева Диана Маратовна — ведущий инженер, diana.ayukaeva@rsce.ru

Беляев Михаил Юрьевич — научный руководитель, доктор технических наук, профессор, mikhail.belyaev@rsce.ru

Матвеева Татьяна Владимировна — заместитель начальника отдела, начальник сектора, tatiana.v.matveeva@rsce.ru

Поскольку на ТГК отсутствует экипаж и бортовые системы жизнеобеспечения, микроперегрузки на нём оказываются значительно ниже, чем на РС МКС. Особенно благоприятными для выполнения КЭ в области микрогравитации оказываются пассивные режимы ориентации ТГК, не требующие энергетических затрат для их поддержания. Однако их практическое использование потребовало разработки способов управления, позволяющих обеспечить устойчивый неуправляемый полёт ТГК и достаточный приход электроэнергии.

Для выполнения задач эксперимента «Изгиб» в части изучения процессов конвекции использовалась научная аппаратура «Дакон-М», разработанная для исследований конвективных течений, вызванных малыми инерционными силами на РС МКС. Эта научная аппаратура является усовершенствованным вариантом аппаратуры «Дакон», успешно прошедшей лётные испытания на станции «Мир» (Аюкаева и др., 2019).

В развитие КЭ «Изгиб» и на основе полученного опыта были инициированы работы по созданию следующей версии датчика конвекции — «Дакон-П» для проведения экспериментов на ТГК «Прогресс» с использованием режимов закрутки ТГК на Солнце в автономном полёте, что позволяет обеспечить необходимый приход электроэнергии и требуемые значения микроускорений для изучения процесса конвекции.

Грузовые корабли «Прогресс» позволяют также выполнить много других уникальных исследований и экспериментов. Это, например, исследования с научной аппаратурой «Космический трал», которая может быть размещена в отделяемой на тросе от ТГК «Прогресс» капсуле (Беляев и др., 2014). С помощью НА «Космический трал» предполагается исследовать верхние слои атмосферы и получить данные о её ионном составе, провести мониторинг электромагнитных излучений, выполнить измерения температуры и электронной концентрации плазмы. При отделении спускаемого модуля от ТГК на кабеле-тросе могут быть исследованы маятниковые, поперечные и продольные колебания кабель-троса, темп снижения орбиты спускаемого модуля. При изучении верхних слоёв атмосферы и ионосферы с помощью тросовой системы возможна отработка технологии развёртывания тросовой системы и передача информации с помощью оптического волокна, обеспечивающего наибольшую защиту передаваемой информации от внешних электромагнитных полей.

Полученные в процессе выполнения КЭ «Изгиб» результаты могут быть использованы, кроме того, для перспективного модуля, на котором будет возможно выполнять технологические процессы в автономном полёте с многократными стыковками со станцией.

Эффективность отрабатываемых в КЭ «Изгиб» технологий, применяемых научных методов и научной аппаратуры подтверждается большим количеством патентов, успешными обсуждениями результатов КЭ на представительных форумах и публикациями в научных и научно-технических изданиях (около ста публикаций).

Литература

- Аюкаева Д. М., Бабушкин И. А., Беляев М. Ю. и др. Эксперименты по изучению конвективных течений с аппаратурой «Дакон-П» на транспортном грузовом корабле «Прогресс» // Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 1. С. 7–17. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-7-17.
- Беляев М. Ю., Брюханов Н. А., Рябуха С. Б. и др. Микровозмущения, возникающие в процессе эксплуатации Российского сегмента МКС // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 1(46). С. 121–129.
- Беляев М. Ю., Брюханов Н. А., Бабкин Е. В. и др. Способ управления ориентацией космического аппарата с неподвижными панелями солнечных батарей при выполнении экспериментов на орбитах с максимальной длитель-

ностью теневого участка. Патент на изобретение № 2457158. № заявки 2010139068 от 22.09.2010.

Беляев М. Ю., Матвеева Т. В. (2014а) Способ управления ориентацией космического аппарата при проведении экспериментов с научной аппаратурой по изучению конвекции. Патент на изобретение № 2581281. № заявки 2014112742 от 01.04.2014.

Беляев М. Ю., Матвеева Т. В. (2014б) Способ зондирования верхней атмосферы. Патент на изобретение № 2567998. № заявки 2014112734 от 01.04.2014.

Беляев М. Ю., Карасев Д. В., Матвеева Т. В. Использование грузовых кораблей «Прогресс» для проведения экспериментов // Тр. 51-х Науч. чтений К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Калуга, 20–22 сент. 2016. Казань, 2017. С. 28–39.

Беляев М. Ю., Карасев Д. В., Матвеева Т. В., Рулев Д. Н. Грузовые корабли «Прогресс» в программах орбитальных станций (к 40-летию первого в мире полета грузового корабля к орбитальной станции) // Косм. техника и технологии. 2018. № 1. С. 85–101.

Матвеева Т. В., Беляев М. Ю., Сазонов В. В. Способ определения тензора инерции космического аппарата. Патент на изобретение № 2587663. № заявки 2014143692 от 30.10.2014.

Матвеева Т. В., Беляев М. Ю. Управление транспортными грузовыми кораблями «Прогресс» при проведении экспериментов // 24-я Санкт-Петербургская международ. конф. по интегрированным навигационным системам. 29–31 мая 2017. С. 52–55.

Babushkin I. A., Belyaev M. Yu., Glukhov A. F. et al. Experiments with the DAKON-M Convection Sensor // Cosmic Research. 2017. V. 55. No. 4. P. 263–269.

Belyaev M. Yu., Matveeva T. V., Monakhov M. I. et al. Modes of Uncontrolled Rotational Motion of the Progress M-29M Spacecraft // Cosmic Research. 2018. V. 56. No. 1. P. 54–67.

Matveeva T. V., Belyaev M. Yu., Tsvetkov V. V. Challenges and Perspectives of Transport Cargo Vehicles Utilization for Performing Research in Free Flight // Acta Astronautica. 2014. V. 94. P. 139–144.

RESULTS OF THE SPACE EXPERIMENT IZGIB

M. I. Monakhov¹, T. V. Matveeva¹, D. M. Ayukaeva¹, M. Yu. Belyaev^{1,2}

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

² Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytischki, Russia

Keywords: microgravity environment, micro-disturbances, accelerometer, orientation, convection sensor, cable system

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ В ОТКРЫТОМ КОСМОСЕ

А. И. Никифоров¹, В. В. Блинов¹, Д. Н. Придачин¹, О. П. Пчеляков¹,
Л. В. Соколов¹, К. Б. Фрицлер¹, В. М. Владимиров², С. Н. Кулинич²,
К. А. Древин², С. В. Кулик²

1 Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
Новосибирск, Россия

2 ООО НПФ «Электрон», Красноярск, Россия

Ключевые слова: эпитаксия, космос, полупроводниковые структуры, оборудование

Работа посвящена описанию разработки оборудования для проведения эксперимента по выращиванию полупроводниковых наногетероструктур в условиях орбитального полёта Международной космической станции (МКС). Показаны преимущества проведения технологического процесса в глубоком вакууме для получения новых тонкоплёночных материалов с уникальными свойствами. Обсуждаются особенности автоматизированной установки для молекулярно-лучевой эпитаксии в космосе.

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений космического полупроводникового материаловедения представляется разработка наукоёмких технологий, связанных с использованием глубокого и чистого вакуума, образующегося в открытом космосе вблизи орбитальных станций при использовании эффекта «молекулярного экрана». К таким технологиям в первую очередь относится молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) с тигельными источниками молекулярных пучков. Промышленная реализация метода МЛЭ убедительно показала, что он выступает лучшим методом получения многослойных эпитаксиальных структур с гладкостью границ на атомарном уровне, прецизионно заданной толщиной слоёв, составом и профилем легирования. Работы по созданию специализированной технологической установки МЛЭ для эксплуатации в кильватерной области молекулярного защитного экрана (МЗЭ) в условиях орбитального полёта космических аппаратов направлены на преодоление физических ограничений наземных вакуумных технологий. Эти ограничения связаны с высокой сложностью дальнейшего улучшения до-

Никифоров Александр Иванович — заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук, nikif@isp.nsc.ru

Блинов Виктор Владимирович — ведущий инженер, bww@isp.nsc.ru

Придачин Дмитрий Николаевич — ведущий инженер, dnp@isp.nsc.ru

Пчеляков Олег Петрович — заведующий отделом, доктор физико-математических наук, pch@isp.nsc.ru

Соколов Леонид Валентинович — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, sokolov@isp.nsc.ru

Фрицлер Константин Бернгардович — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, kbf@isp.nsc.ru

Владимиров Валерий Михайлович — генеральный директор, доктор физико-математических наук, vlad@ksc.krasn.ru

Кулинич Сергей Николаевич — заместитель генерального директора, kulinich@ksc.krasn.ru

Древин Константин Александрович — начальник сектора, drevin_konstantin@mail.ru

Кулик Сергей Владимирович — начальник сектора, kulick@ksc.krasn.ru

стигнутых на сегодняшний день в наземных установках предельных параметров откачных средств и чистоты вакуумной среды. Кроме того, в сравнительно небольших по размерам наземных вакуумных объёмах неизбежно влияние эффекта накопления распыляемых материалов и примесей на развитой поверхности стенок и вакуумной оснастки. Неконтролируемое реиспарение этих материалов в процессе эпитаксии делает невозможным решение таких важных задач, как получение особочистых, высокосовершенных и однородных по площади многослойных гетероструктур с резкими межслоевыми границами на основе полупроводниковых соединений. На кремниевых пластинах большого диаметра такие эпитаксиальные структуры могли бы сыграть роль альтернативных универсальных подложек. Разработка и реализация этого нового поколения полупроводниковых структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии приведёт к революционным изменениям всей элементной базы отечественной электроники. На основе таких структур предполагается также изготавливать изделия полупроводниковой техники, в том числе для высокоэффективных преобразователей солнечной энергии и термофотоэлектрических генераторов.

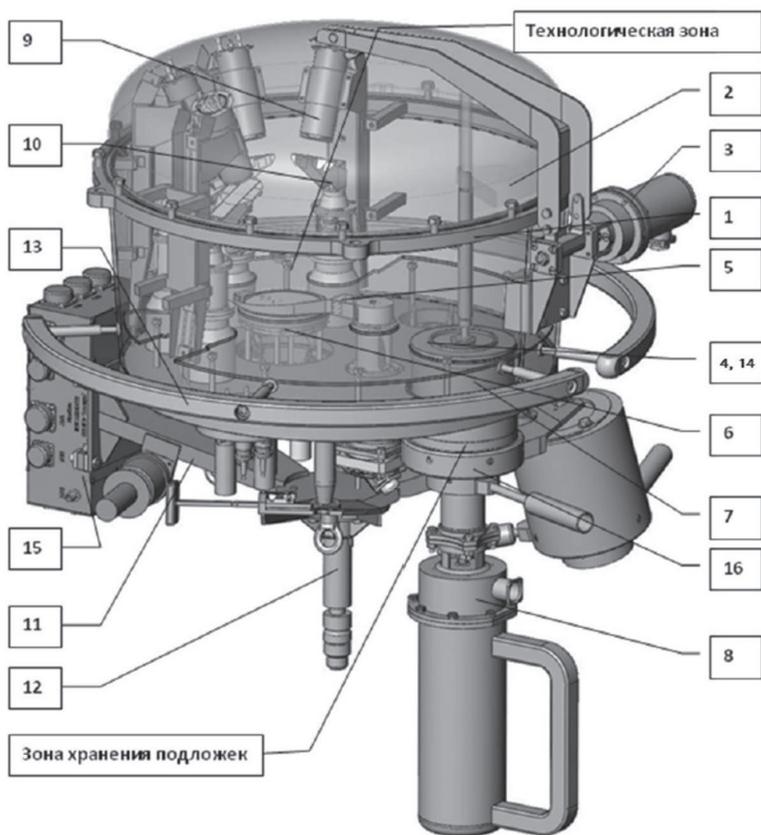


Рис. 1. Конструкция установки МЛЭ

Конструкция макета установки МЛЭ в закрытом состоянии для транспортировки представлена на рис. 1. Камера (1) и крышка (2) с приводом поворота (3) обеспечивают герметичность камеры. Для обезгаживания камеры используется система прогрева (4) до 150 °С. Перед транспортировкой вакуумно-механической аппаратуры МЛЭ на российский сегмент МКС крышку (2) крепят болтами к камере (1) и отжигают при давлении не выше 10–3 Па, после чего заполняют

сухим азотом. Для проведения технологического процесса в камере размещены технологические узлы: кассета с шестью подложками диаметром 75 мм (7) и приводом перемещения (8), нагреватель подложек (6), размещённые на одинаковых расстояниях от манипулятора (5). Это обеспечивает передачу подложек (14) из зоны хранения кассеты (7) на нагреватель (6) и обратно в кассету поворотом манипулятора на 180°. Создание молекулярных пучков и управление ими осуществляется молекулярными источниками (МИ) (9) и индивидуальными заслонками (10). Температура нагревателя может контролироваться термодарами или по току в спирали нагревателя. Управление рабочими параметрами технологической оснастки осуществляется блоком драйверов и контроллеров (15), расположенном на траверсе (11). Устройство (12) служит для стыковки установки МЛЭ с адаптером на внешней поверхности МКС. После проведения процесса роста на шести подложках возможна замена кассеты с приводом (7, 8) с помощью байонетного соединителя (16). Поручень (13) служит для проведения работ с установкой МЛЭ в открытом космосе. Технологический цикл работы задаётся блоком управления и сбора информации, размещённым на МЛМ.



Рис. 2. Внешний вид опытного образца установки МЛЭ

Автоматическое управление технологическим процессом при проведении космического эксперимента по выращиванию тонкоплёночных структур осуществляется блоком управления и сбора информации, а технологические режимы обеспечивает блок драйверов и контроллеров. В его функции входит: установка подложки в технологическую позицию, фиксация номера обрабатываемой подложки, нагрев, измерение температуры нагревателя подложки, управление заслонкой подложки; управление режимами работы МИ при выращивании эпитаксиальных структур, управление заслонками МИ. На рис. 2 приведён внешний вид опытного образца установки МЛЭ.

Для уменьшения паро- и газоотделения из металлов в процессе эксперимента (вносящих загрязнения в выращиваемую структуру), конструкция установки МЛЭ должны быть отожжены (предварительный отжиг до 450 °С на земле и отжиг непосредственно перед экспериментом до 150 °С).

В ходе космического эксперимента проводится проверка функционирования аппаратуры. По окончании проверки начинается процесс роста эпитаксиальной структуры. Подложка с заданным номером выставляется на технологическую позицию, тигли молекулярных источников и нагреватель подложек разогреваются до рабочей температуры, заслонки МИ управляют молекулярными потоками.

Создан научно-технический задел для освоения нового направления космической деятельности — промышленного производства новых высококачественных полупроводниковых материалов в условиях орбитального полёта, где принципиально возможно получение продукции (монокристаллов и гетероэпитаксиальных структур) более высокого качества, чем в земных условиях. Спроектирован и изготовлен опытный образец установки МЛЭ для проведения экспериментов по получению полупроводниковых гетероструктур в космосе.

Научное обоснование базовых технологий промышленного производства на орбите разработано при участии Российской академии наук в лице Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН). Научное оборудование разработано и изготовлено ИФП СО РАН, ООО НПФ «Электрон» и ПАО «РКК «Энергия».

EQUIPMENT FOR GROWING SEMICONDUCTOR STRUCTURES BY MOLECULAR BEAM EPITAXY IN OUTER SPACE

A. A. Nikiforov¹, V. V. Blinov¹, D. N. Pridachin¹, O. P. Pchelyakov¹, L. V. Sokolov¹, K. B. Fritzler¹, V. M. Vladimirov², S. N. Kulinich², K. A. Drevin², S. V. Kulik²

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Research and Production Company "Electron", Krasnoyarsk, Russia

Keywords: Epitaxy, space, semiconductor structures, equipment

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА БОРТУ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МКС И ПЕРСПЕКТИВНОЙ РОС

О. И. Орлов, О. В. Котов, Ю. И. Смирнов

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: медико-биологические эксперименты, РС МКС, РОС

Преемственность научной программы медико-биологических исследований на РС МКС и РОС

Начиная с 2001 г. на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), реализуется национальная программа российских научных медико-биологических исследований с целью совершенствования системы медицинского обеспечения пилотируемых космических полётов, а также получения знаний, которые внесут свой вклад в решение фундаментальных проблем наук о жизни.

За 20-летний период развёртывания и эксплуатации МКС на российском сегменте завершено более 57 медико-биологических экспериментов, медико-биологические исследования составляли более 40 % и, традиционно, являются самым крупным разделом программы научных исследований на РС МКС

В результате проведённых исследований на РС МКС получены научные результаты, направленные:

- на сохранение в целом здоровья и работоспособности экипажей в космических полётах различной продолжительности;
- получение объективных новых научных данных о механизмах адаптивных реакций основных функциональных систем организма человека на различных этапах длительных космических полётов;
- получение новых данных в области космической физиологии (сердечно-сосудистой системы, сенсорных систем, двигательной сферы, метаболизма, психофизиологических реакций и работоспособности и др.), обеспечивающие развитие системы медицинской безопасности длительных космических полётов.

Результатом реализации программы медико-биологических экспериментов на борту РС МКС представляется приоритет России в создании и совершенствовании системы медицинского обеспечения орбитальных пилотируемых полётов различной продолжительности.

Получаемые при реализации программы данные вносят большой вклад в изучение фундаментальных вопросов гравитационной физиологии и биологии. Дополняемая результатами наземных исследований и исследований на беспилотных аппаратах серии «Бион», фундаментальная часть программы формирует научно-технический задел для последующих прикладных исследований по совершенствованию системы медицинского обеспечения.

По мере завершения эксплуатации РС МКС представляется необходимым сохранить преемственность и продолжить программу медико-биологических исследований на Российской орбитальной станции (РОС), актуализировав направления исследований через механизм Совета

Орлов Олег Игоревич — директор, академик РАН, doc@imbp.ru, orlov@imbp.ru

Котов Олег Валерьевич — заместитель директора, кандидат медицинских наук, лётчик-космонавт РФ, o.kotov@imbp.ru

Смирнов Игорь Юрьевич — заведующий лабораторией, yusmirnov@imbp.ru

по космосу РАН, научно-технического совета и координационного научно-технического совета «Роскосмос».

Приоритеты научной программы медико-биологических исследований на РОС

Дальнейшее развитие программы должно быть направлено на создание системы медицинского обеспечения пилотируемых полётов за пределы магнитосферы Земли, освоения Луны и пилотируемой миссии к Марсу.

Основная цель содержания этих работ заключается в разработке опережающего задела по медико-биологическому обеспечению здоровья и работоспособности экипажей и создании необходимой научной базы, а также развитию на её основе необходимых медицинских технологий в интересах перспективных пилотируемых миссий. Прежде всего, речь идёт о воздействии галактического излучения, гипомагнитной среде, а также высокой степени автономности миссий за пределы НОО.

В настоящее время научно-технический задел по данному направлению формируется в рамках научно-исследовательской работы ГК «Роскосмос» «Отработка технологий освоения космического пространства и совершенствования медико-биологического обеспечения дальних полётов в космос», инициативной международной программы «Сириус», формируемой совместно с Объединённым институтом ядерных исследований (Дубна) программой работ на установке NICA (англ. Nuclotron based Ion Collider fAcility), ПФНИ (Программы фундаментальных научных исследований) и ряда других проектов.

Для решения задач будущих межпланетных полётов РОС выступает уникальной космической лабораторией, предполагающей не только проведение исследований, но и отработку предлагаемых технологий в ходе реальных космических полётов, моделирующих отдельные условия межпланетных космических миссий.

Технологические преимущества РОС для задач медико-биологических исследований

Открытая архитектура РОС даёт возможность разработки и ввода в эксплуатацию модулей, предназначенных для решения задач в области космической биологии и медицины. Прежде всего ставится вопрос о создании медицинского модуля, в котором возможно объединение задач профильных исследований и медико-биологического обеспечения. Технология трансформируемых модулей, как показали предварительные проработки с РКК «Энергия», может обеспечить развёртывание в составе РОС центрифуги короткого радиуса для исследований по проблеме искусственной гравитации, что обеспечит мировой приоритет России по данному направлению.

Возможность развёртывания в околостанционном пространстве свободноплетающих объектов открывает перспективу создания КА для медицинских и биотехнологических исследований (прототипом может служить проект «ОКА-Т»).

Возможность более интенсивных исследований на внешней стороне станции позволит активнее развернуть работы по радиационной безопасности применительно к межпланетной тематике, а также по направлению астробиологии и планетарного карантина.

Таким образом, закладываемые в платформу РОС технологические решения позволят обеспечить мировой приоритет развития медико-биологического направления исследований в стратегической перспективе.

Народно-хозяйственное значение

Очевидно, что основной областью внедрения результатов исследований представляется совершенствование медицинского обеспечения

здоровья и работоспособности космонавтов в полёте и после возвращения на Землю. Результаты исследований, выполняемых в рамках космической программы, используются в системе здравоохранения в клинической, профилактической и реабилитационной практике, а также находят применение в экстремальной, спортивной, военной и ряде других направлений медицины. Многие разработки, например, системные проекты «Клиника здорового человека» и «Центр физического здоровья» ещё ждут возможности практической реализации. С 2002 г. только ИМБП получено более 150 охранных документов на интеллектуальную собственность. В период с 2002 по 2020 г. институт принял участие в 73 российских и 44 зарубежных выставках и салонах инновационной направленности.

В настоящее время отработка космических технологий для задач практического здравоохранения ведётся ИМБП с кооперацией в рамках Национального центра мирового уровня «Павловский центр «Интегративная физиология — медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям стрессоустойчивости».

Программа РОС должна стать катализатором развития технологий обеспечения перспективных космических программ и их опережающего внедрения в интересах охраны здоровья граждан России.

Международное значение

Научная программа медико-биологических исследований на МКС стала одной из точек консолидации усилий международной научной общности, развития тесной научной кооперации в рамках совместно реализуемых на МКС экспериментов, привлечения технологических и финансовых инвестиций, интенсификации научных исследований. В настоящее время в силу геополитических процессов МКС теряет эти преимущества. *Именно РОС, как национальная платформа, может сформировать собственные привлекательные условия для организации совместной работы с агентствами и организациями дружественных стран, имеющими амбиции в освоении и использовании космического пространства.* Возможности расширения использования РОС в предстоящий период эксплуатации видятся, в том числе, в реализации комплексной программы полётных и наземных модельных экспериментов. Такая программа, имеющая большой инновационный потенциал, уже начинает практически реализовываться создаваемым на базе ИМБП РАН центром по разработке системы медицинского обеспечения межпланетных космических полётов.

BIOMEDICAL EXPERIMENTS ON BOARD THE RUSSIAN SEGMENT OF THE ISS AND PROSPECTIVE ROS

O. I. Orlov, O. V. Kotov, Yu. I. Smirnov

Institute of biomedical problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: biomedical experiments, RS ISS, ROS

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ БИОПРИНТИНГА В КОСМОСЕ (КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «МАГНИТНЫЙ 3D-БИОПРИНТЕР»)

С. В. Петров, Е. В. Кудан, А. А. Левин, В. А. Миронов, Ю. Д. Хесуани
Лаборатория биотехнологических исследований "3D Bioprinting Solutions", Москва, Россия

Ключевые слова: трёхмерная биопечать, биоприנטер «Орган.Авт», исследования на МКС, магнитная левитация

Технология формативной биопечати направлена на создание трёхмерных тканеинженерных и иных конструктов за счёт левитации неорганических соединений и/или живых объектов в акустическом или магнитном поле. При этом само поле выполняет функции временной физической поддержки для материалов, подлежащих сборке и последующему слиянию.

Для реализации технологии магнитной фабрикации в условиях невесомости на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) специалистами компании "3D Биопринтинг Солюшенс" была разработана специальная научная аппаратура 3Д-МБП, состоящая из магнитного биоприנטера «Орган.Авт» и набора многофункциональных прозрачных кювет (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид научной аппаратуры 3Д-МБП

Серия экспериментов доказала перспективность и научную важность предложенного подхода для создания тканевых эквивалентов органов человека, получения устойчивых биоплёнок бактерий, а также изучения процессов синтеза минеральных компонентов костей и кристаллизации органических молекул. Это позволит разработать инновационные способы лечения, включающие продукты тканевой инженерии и лекарственные средства нового поколения. По своей сути технология магнитной фабрикации является мультиплатформенной и позволяет проводить широкий спектр исследований (рис. 2).

В ходе космических экспериментов с помощью биоприנטера «Орган.Авт.» был выполнен целый ряд исследований.

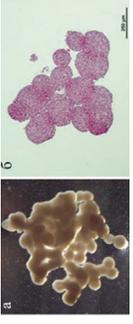
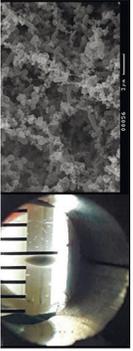
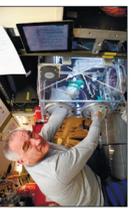
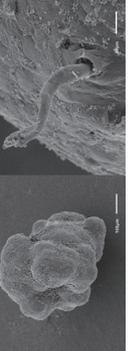
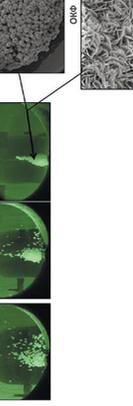
Петров Станислав Владимирович — главный конструктор, 666Online@mail.ru

Кудан Елизавета Валерьевна — заведующая лабораторией, доктор биологических наук, koudan1980@gmail.com

Левин Александр Александрович — инженер, levin.alexandr.stankin@gmail.com

Миронов Владимир Александрович — научный руководитель, кандидат медицинских наук, vladimir.vichugov54@gmail.com

Хесуани Юсеф Джоржевич — исполнительный директор, кандидат медицинских наук, usefhesuani@yandex.ru

<p>1. Тканеинженерные конструкции хряща человека и шиловидной железы крысы. Проведённые анализы подтвердили жизнеспособность и естественную морфологию клеток внутри конструкций</p>		
<p>2. Трёхмерные бактериальные агрегаты. Полученные агрегаты (биоплёнки) состояли из клеток и выделяемого ими внеклеточного матрикса. Анализ жизнеспособности бактерий в составе агрегатов, сформированных в Космосе, выявил их повышенную резистентность к антибиотикам по сравнению с контрольной группой на Земле</p>		
<p>3. Кристаллы белка. С помощью программируемой магнитоседиментации были получены кристаллы белка лизоцима размерами до 1,2 мм, что значительно превосходило максимальные размеры кристаллов лизоцима, полученные на Земле</p>		
<p>4. Тканеинженерные конструкции из мышечных клеток. Проведённые анализы подтвердили жизнеспособность и естественную морфологию клеток внутри конструкций и было замечено начало образования волокнистой структуры как у натурального мяса</p>		
<p>5. Перекристаллизация фосфатов кальция. Полученные конструкции представляли собой фазу октакальцийфосфата, использующегося в регенеративной медицине для замещения дефектов кости. В данный момент проходят исследования по использованию полученного материала для регенерации дефектов костей черепа у лабораторных животных (крыс)</p>		

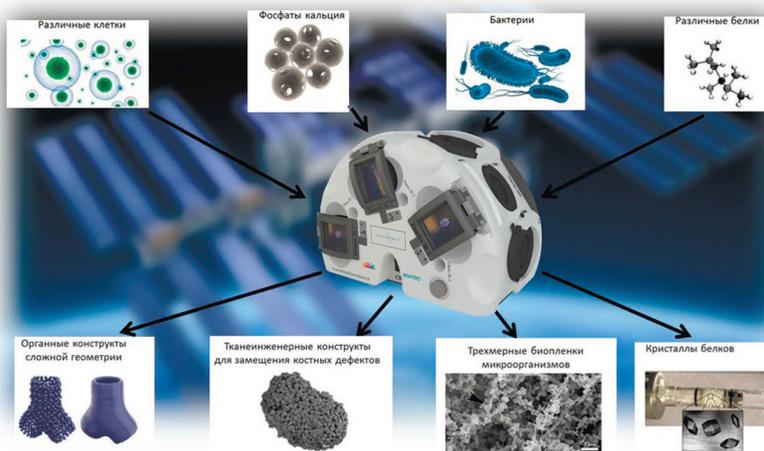


Рис. 2. Мультиплатформенность технологии

Проведённые работы были высоко оценены международным научным сообществом и по результатам данных работ были выпущены ряд научных статей в высокорейтинговых журналах.

Следующим шагом в исследованиях разрабатываемой технологии биофабрикации станет интеграция в конструкцию аппаратуры специальных устройств для создания стоячих акустических волн. При помощи комбинированного поля можно будет получать конструкции более сложных форм — трубчатой и/или разветвлённой.

Литература

- Parfenov V.A., Khesuani Y.D., Petrov S.V. et al.* Magnetic levitational bioassembly of 3D tissue construct in space // *Science Advances*. 2020. V. 69(29). Article eaba4174. DOI: 10.1126/sciadv.aba4174.
- Parfenov V.A., Mironov V.A., Koudan E.V. et al.* Fabrication of calcium phosphate 3D scaffolds for bone repair using magnetic levitational assembly // *Scientific Reports*. 2020. V. 10(1). Article 4013. DOI: 10.1038/s41598-020-61066-1
- Parfenov V.A., Petrov S.V., Pereira F.D.A.S. et al.* Scaffold-free, Label-free, and Nozzle-free Magnetic Levitational Bioassembler for Rapid Formative Biofabrication of 3D Tissues and Organs // *Intern. J. Bioprinting*. 2020. V. 6(3). Article 304. DOI: 10.18063/ijb.v6i3.304.
- Domnin P., Arkhipova A., Petrov S. et al.* An In Vitro Model of Nonattached Biofilm-Like Bacterial Aggregates Based on Magnetic Levitation // *Applied and Environmental Microbiology* j. 2020, V. 86(18). Article e01074-20. DOI: 10.1128/AEM.01074-20.

DEVELOPMENT OF BIOPRINTING TECHNOLOGIES IN SPACE (SPACE EXPERIMENT “MAGNETIC 3D BIOPRINTER”)

S. V. Petrov, E. V. Kudan, P. A. Karalkin, F. D. A. S. Pereira, V. A. Parfenov, A. A. Levin, S. S. Karshieva, V. A. Mironov, Yu. D. Hesuani
3D Bioprinting Solutions”, Moscow, Russia

Keywords: three-dimensional bioprinting, bioprinter “Organ.Auth”, research on the ISS, magnetic levitation

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА РОССИЙСКО-ЕВРОПЕЙСКОЙ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЕ «ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ-4» НА БОРТУ МКС — ЦЕЛИ, АППАРАТУРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

О. Ф. Петров¹, А. В. Зобнин¹, А. М. Липаев¹, В. Н. Наумкин¹, А. Д. Усачев¹, М. Х. Тома², М. Кречмер²

¹ Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

² Первый Институт физики Гиссенского университета им. Ю. Либиха Гиссен, Германия

Ключевые слова: МКС, космический эксперимент, пылевая плазма, плазменный кристалл, газовый разряд

Пылевая плазма представляет собой смесь «обычной» плазмы и частиц конденсированной дисперсной плазмы — пылинок. Здесь мы ограничимся рассмотрением пылинок микронного размера, 1–10 мкм — микрочастиц. Находясь в плазменном объёме, микрочастицы быстро заряжаются до значений $Q \sim 10^3 - 10^4$ зарядов электрона, начинают реагировать на электрические и другие поля, участвуют в зарядовом балансе плазмы, т. е. становятся полноправной компонентой плазмы, как ионы и электроны, а сама плазма называется комплексной. Отличительная особенность пылевой компоненты комплексной плазмы заключается в большом и переменном электрическом заряде микрочастиц и их масса, в миллиарды раз превышающая массу самых тяжёлых ионов. Благодаря высоким зарядам микрочастиц параметр неидеальности пылевой подсистемы достигает сотен единиц, что приводит к широкому спектру интересных физических явлений и делает пылевую плазму уникальным физическим объектом.

В лабораторных условиях наличие силы тяжести значительно затрудняет проведение полноценных экспериментальных исследований комплексной плазмы, которые становятся возможными только для специфических условий — в приэлектродном слое высокочастотного (ВЧ) газового разряда и в стратах разряда постоянного тока (ПТ). Для полноценных экспериментальных исследований необходимо условие микрогравитации. С этой целью в Объединённом институте высоких температур РАН академиком В. Е. Фортовым и профессором А. П. Нефедовым в 1997 г. был инициирован космический эксперимент «Роскосмоса» «Плазменный кристалл», состоящий из целой серии космических экспериментов на орби-

Петров Олег Федорович — директор, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, usachev@ihed.ras.ru, OFPetrov@ihed.ras.ru

Зобнин Андрей Вячеславович — ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, zobnin@ihed.ras.ru

Липаев Андрей Михайлович — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, lipaev@ihed.ras.ru

Наумкин Вадим Николаевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, naumkin@ihed.ras.ru

Усачев Александр Дмитриевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, usachev@ihed.ras.ru

Тома Маркус — профессор Первого института физики Гиссенского университета им. Юстаса Либиха, Германия, Markus.H.Thoma@exp1.physik.uni-giessen.de

Кречмер Михаэль — научный сотрудник, Michael.Kretschmer@exp1.physik.uni-giessen.de

тальной станции «Мир» и Международной космической станции (МКС) на научной аппаратуре (НА) «Плазменный кристалл-1», (ПК-1) «Плазменный кристалл-2» (ПК-2), «Плазменный кристалл-3 Нефедов» (ПК-3 Нефедов) и «Плазменный кристалл-3 Плюс» (НА ПК-3 Плюс). Два последних эксперимента разрабатывались и проводились в сотрудничестве с Институтом внеземной физики Общества им. Макса Планка (*нем.* Max-Planck-Institut für Physik) под руководством профессора Г. Е. Морфилла (*англ.* Gregor E. Morfill). После успешного завершения в 2012 г. работы на научной аппаратуре ПК-3 Плюс исследования пылевой плазмы продолжились с 2015 г. на российско-европейской НА «Плазменный кристалл-4» (НА ПК-4), установленной в лабораторном модуле «Колумбус» на МКС. Главной отличительной особенностью НА ПК-4 стала оригинальная конструкция разрядной камеры и особенности возбуждения комбинированного газового разряда в ней, наличие разнообразных способов воздействия на плазменно-пылевые образования, высокая гибкость экспериментальных процедур и автоматизация процессов при проведении экспериментов на орбите. Основные цели эксперимента: исследование долговременной эволюции плазменно-пылевых структур в комбинированном разряде, структурных переходов и электрореологических эффектов в пылевой подсистеме; исследование особенностей течения вязкой сильно неидеальной плазменно-пылевой жидкости на кинетическом уровне, условия перехода течения из ламинарного режима в турбулентный режим на кинетическом уровне; применение мощного лазерного излучения как для инициирования направленных упорядоченных плазменно-пылевых потоков, так и для «разогрева» и плавления плазменно-пылевых структур; исследование условий формирования и распространения инициированных уединённых и периодических плазменно-пылевых волн, включая ударные плазменно-пылевые волны; создание и исследование плазменно-пылевых структур, удерживаемых не внешней электрической ловушкой, а давлением плазменных потоков и ряда других явлений.

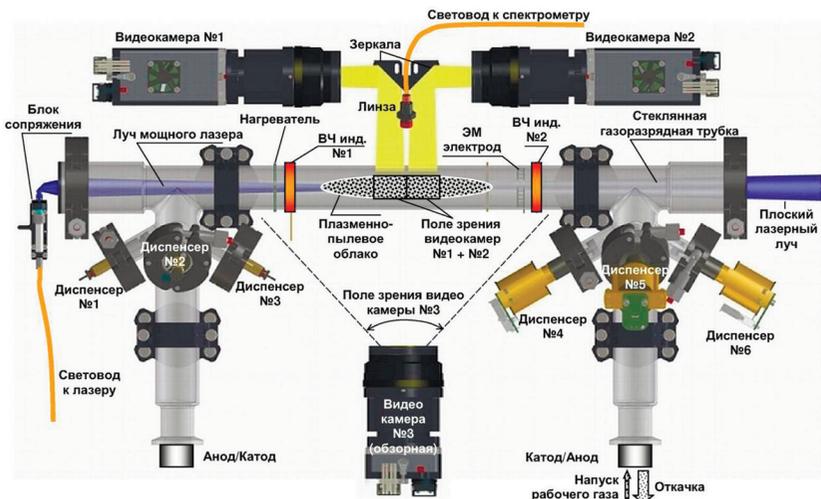


Рис. 1. Схема эксперимента «Плазменный кристалл-4»

Схема устройства газоразрядной камеры НА ПК-4 представлена на рис. 1. Разряд постоянного тока происходит в П-образной стеклянной трубке с общей длиной около 80 см и внутренним диаметром 3 см между двумя цилиндрическими электродами, установленными на концах трубки. Ток разряда может устанавливаться

в диапазоне 0,5–3 мА. Для управления движением пылевых частиц в плазме применяется режим переключения полярности (ПП) разряда с регулируемой скважностью и частотой переключения (до 5 кГц). В качестве плазмообразующих газов используется неон или аргон при давлении от 10 до 250 Па. При этом однородный положительный столб равномерно заполняет все межэлектродное пространство.

В дополнение к основному разряду постоянного тока в экспериментах для удержания и манипуляций с пылевыми частицами могут использоваться два ВЧ-разряда индуктивного типа с частотой 81,36 МГц. Кроме того, в разрядной камере установлен кольцевой электрод с независимым электрическим вводом, который используется, в частности, для возбуждения пыле-акустических и ударных волн. Подача и откачка плазмообразующего газа осуществляется через газовые порты на концах разрядной трубки. В качестве пылевой фракции используются сферические монодисперсные пластиковые микрочастицы пяти различных диаметров — 1,3; 2,6; 3,4; 6,9 и 10,4 мкм. Микрочастицы в необходимом количестве инжектируются в плазму с помощью шести пылевых диспенсеров, установленных на боковых участках разрядной трубки и транспортируются электрическим полем в центральную часть газоразрядной трубки, где и проводятся все исследования пылевой плазмы на аппаратуре ПК-4. Для визуализации пылевых частиц последние подсвечиваются специально сформированным плоским лучом лазера шириной около 100 мкм (лазерным «ножом») и регистрируются двумя видеокамерами с пространственным разрешением 1600×1200 пикселей. Суммарное поле зрения двух видеокамер составляет 44,8×16,8 мм. Имеется возможность перемещать видеокамеры вдоль оси трубки на 100 мм от её центра, а поперечное сканирование лазерным ножом позволяет получить трёхмерную структуру плазменно-пылевого облака. Общий обзор газоразрядной камеры осуществляется третьей видеокамерой одновременно через три светофильтра, два из которых настроены на спектральные линии неона, а третий светофильтр нейтрален. Стабильность параметров плазмы в ходе длительных (до получаса) экспериментов поддерживается диффузионным контактом разрядной камеры в внешней проточной магистрали и контролируется встроенным спектрометром (Pustylnik et al., 2016). Научная аппаратура даёт возможность воздействовать на плазменно-пылевые структуры как электрическими (изменением параметров комбинированного разряда, кольцевым электроманипуляционным (ЭМ) электродом), так и неэлектрическими (мощный лазерный луч, термический манипулятор, газовый поток) способами. С подробным описанием НА ПК-4 можно ознакомиться в публикации (Pustylnik et al., 2016).

За период с введения НА ПК-4 в эксплуатацию в 2015 г. и по настоящее время проведено 17 экспериментальных серий на борту МКС. Получен большой объём экспериментальных данных, на основе которых опубликовано более 20 статей в высокорейтинговых международных журналах. Уже в первом же эксперименте было обнаружено ранее не встречавшееся явление — поперечная ионизационная неустойчивость, выражающаяся в согласованной осцилляции всех микрочастиц в плазменно-пылевом облаке перпендикулярно оси разрядной трубки с частотой около 24 Гц. В рамках предложенной модели был исследован критерий потери устойчивости симметричной конфигурации разряда (Zobnin et al., 2016).

Исследуемая система — положительный столб с плазменно-пылевым облаком — представляется интересным примером комплексной плазмы (Zobnin et al., 2018). Заряд микрочастиц и счётная плотность задаётся параметрами окружающей их плазмы. В тоже время микрочастицы сами влияют на эти параметры. В частности, потери плазмы в пылевом облаке компенсируются за счёт самосогласованного повышения напряжённости электрического поля в плазменно-

пылевом облаке, что приводит к дополнительному разогреву электронов и наблюдаемому повышению светимости плазмы (рис. 2) (Usachev et al., 2018).

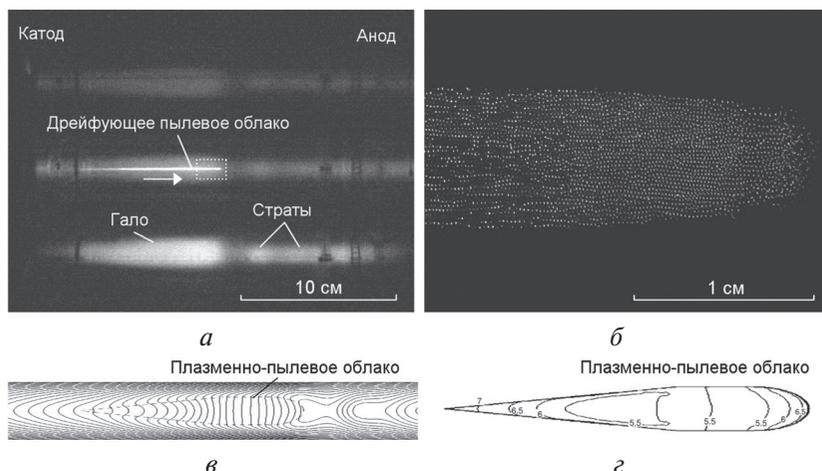


Рис. 2. Самосоорганизованная (комплексная) система положительного столба и плазменно-пылевого облака: *а* — возмущение положительного столба плазменно-пылевым облаком — фотографии разрядной трубки видеокамерой № 3 через 585 нм серый и 703 нм светофильтры калейдоскопической системы, соответственно; *б* — пылевое облако при высоком разрешении из области, обозначенной прямоугольником на первом рисунке и полученной видеокамерой № 2; *в* и *г* — расчёт распределения пространственного электрического потенциала с интервалом 0,5 В и зарядов микрочастиц в тысячах зарядов электронов, соответственно

Цилиндрическая форма разрядной камеры удобна для исследования пыле-акустических волн. Эти волны представляют собой очень интересное явление, которое можно наблюдать невооружённым глазом, так как ввиду большой массы микрочастиц характерная частота таких волн составляет несколько Герц. Наличие режима переключения полярности с регулируемой скважностью позволяет исследовать влияние величины осевого электрического поля на развитие пыле-акустической неустойчивости. При этом очень информативной оказывается техника периодограмм, представляющих собой двумерную визуализацию плазменно-пылевых волн. На рис. 3 показана эволюция плазменно-пылевых волн после переключения полярности разряда (Jaiswal et al., 2018). После такого переключения некоторая область волн оказывается в новых плазменных условиях, что приводит к бифуркации волновых гребней и рождению новых, причём новый гребень появляется между двумя уже существующими.

Дополнительный внутренний электроманипуляционный электрод может быть использован как для возбуждения как периодических плазменно-пылевых колебаний, так и для создания мощных ударных волн (УВ) в пылевой подсистеме (Usachev et al., 2014). В последнем случае, применяя соотношения Гюгоньо на границе разрыва, было определено давление в пылевой подсистеме за фронтом УВ, а с помощью модели однокомпонентной плазмы уточнены параметры взаимодействия пылевых частиц.

В ходе экспериментов было обнаружено, что в процессе нахождения в положительном столбе разряда постоянного тока с переключаемой полярностью (ПТ – ПП) изначально изотропная плазменно-пылевая структура в течение нескольких минут начинает трансформироваться в структуру, состоящую из пылевых цепочек-струн (рис. 4).

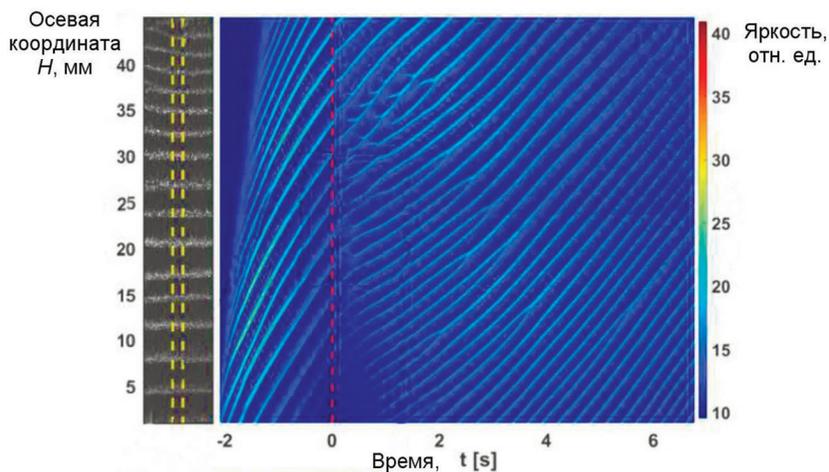


Рис. 3. Бифуркации волновых гребней пыле-акустических волн при переключении полярности разряда в момент времени $t = 0$: *слева* — изображение волны плотности микрочастиц, объединённое с соответствующими изображениями видеокамер № 1 и 2; *справа* — пространственно-временная картина интенсивности (периодикограмма), построенная с использованием соответствующих изображений видеокамер № 1 и 2 (Jaiswal et al., 2018)

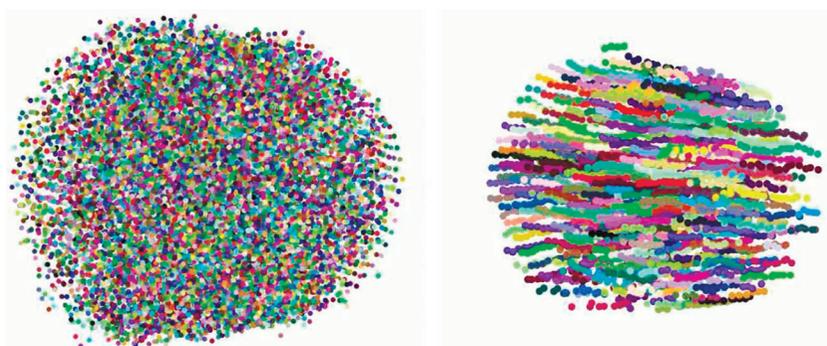


Рис. 4. Формирование струнной плазменно-пылевой жидкости в разряде постоянного тока с переключаемой полярностью: *слева* — изотропная плазменно-пылевая жидкость сразу после вброса микрочастиц; *справа* — струнная плазменно-пылевая жидкость, сформировавшаяся после двух минут нахождения в разряде. Диаметр облака около 10 мм

Физика этого явления связана с образованием биполярных ионных кильватерных следов за микрочастицами в постоянном электрическом поле (Pustylnik et al., 2020). Струны легко могут быть разрушены импульсом разрядного тока. Проведённые объёмные сканирования этих структур лазерным лучом и восстановление их трёхмерной структуры помогли идентифицировать отдельные струны и измерить их размерный спектр. Анализ структурных данных позволяет идентифицировать объёмный жидкоподобный порядок с включением твердотельных струн, выровненных с осевым электрическим полем. Это открывает возможности для новых экспериментов, например, для наблюдений за переходом изотропной жидкости в струнную. Было обнаружено замедление пыле-акустических волн в струнной жидкости (Schwabe et al., 2020).

Наличие мощного лазера в составе НА ПК-4 позволяет легко организовывать и исследовать сдвиговое течение в пылевой подсистеме. Сдвиговой поток создавался в протяжённой суспензии

микрочастиц за счёт приложения силы радиационного давления манипуляционного лазерного луча (рис. 5). Были проанализированы траектории отдельных частиц в потоке, и из них с использованием уравнения Навье – Стокса оценена верхняя граница величины кинематической вязкости комплексной плазмы в диапазоне 0,2–6,7 мм²/с (Nosenko et al., 2020). Эта оценка намного ниже, чем сообщалось ранее исходя из данных наземных экспериментов в трёхмерной комплексной плазме, что может быть связано со струнной структурой пылевой подсистемы. В настоящее время планируется измерение кинематической вязкости в комплексной плазме при переходе от её анизотропного состояния к упорядоченному.

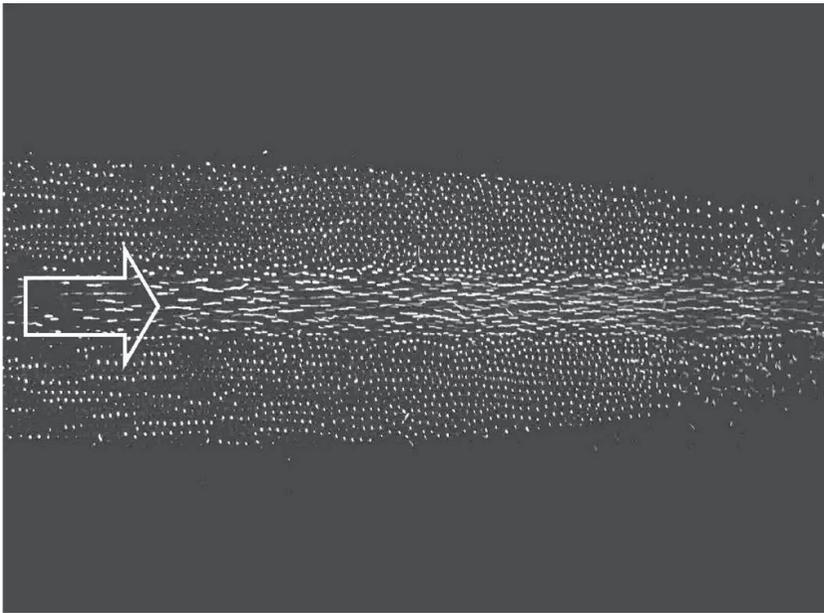


Рис. 5. Сдвиговое течение в пылевой подсистеме. Белая стрелка обозначает лазерный луч

Уникальным научным достижением, полученным на НА ПК-4, стало прямое экспериментальное наблюдение плазменно-пылевой структуры, формируемой не в электростатической ловушке, а при воздействии удерживающих плазменных потоков. Как правило, все пылевые структуры существуют в электростатических ловушках, препятствующих их расширению за счёт кулоновского отталкивания отрицательно заряженных микрочастиц. Роль потенциальной ловушки могут выполнять и плазменные потоки, со всех сторон устремляющиеся на уединённую плазменно-пылевую структуру и рекомбинирующие на ней. В данном случае плазменные потоки формируют эффективное «притяжение» между отрицательно заряженными микрочастицами. Основной проблемой экспериментальной реализации в данном эксперименте выступает требование относительно высокой плотности плазмы $\sim 10^{10}$ см⁻³. Но при такой плотности плазмы сильны и амбиполярные потоки плазмы, которые выносят плазменно-пылевые структуры на стенки камеры. Компромисс был найден в динамическом режиме проведения эксперимента — плотность плазмы резко увеличивалась при наличии плазменно-пылевого сгустка в приосевой области газоразрядной камеры. В этом случае структура со свободной границей успевает сформироваться быстрее, чем она будет выброшена на стенки камеры. Такие кластеры представляют новый класс структур, подлежащих дальнейшим исследованиям.



Рис. 6. Плазменно-пылевой кластер обжимается плазменными потоками, рекомбинирующими на поверхности микрочастиц (слева). Прямое наблюдение плазменно-пылевого кластера, сформированного плазменными потоками на поверхность микрочастиц (справа). Размер кластера около 1 мм

Приведённые и другие данные демонстрируют уникальный научный потенциал НА ПК-4. Полученные данные могут быть использованы как при описании астрофизических объектов (структурные особенности околопланетных колец, заряда и коагуляция пылевых частиц в протопланетных туманностях, плазменно-пылевой окололунной атмосфере), так и при совершенствовании технологических процессов в плазменных технологических и мощных энергетических установках (включая токамаки). Явление конденсации испаряемой подложки в плазменном объёме можно использовать для производства структурированных наноматериалов с заданными составами и свойствами. Плазменная очистка поверхности наночастиц и их пространственная сепарация по размерам создают уникальные технологические преимущества, недоступные другим методам

Авторы благодарят «Роскосмос» и Европейское космическое агентство за техническую помощь в проведении космического эксперимента на научной аппаратуре «Плазменный кристалл-4» на борту МКС. Авторы выражают искреннюю благодарность Хубертусу Томасу и Михаилу Пустыльнику, а также всем членам Международной научно-технической группы по эксплуатации НА ПК-4 (англ. PK-4 Facility Science Team) и космонавтам Центра подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина за сотрудничество и участие в проведении экспериментов на борту МКС.

Литература

- Jaiswal S., Pustynnik M. Y., Zhdanov S. et al. Dust density waves in a dc flowing complex plasma with discharge polarity reversal // *Physics of Plasmas*. 2018. V. 25. Article 083705. <https://doi.org/10.1063/1.5040417>.
- Nosenko V., Pustynnik M., Rubin-Zuzic M. et al. Shear flow in a three-dimensional complex plasma in microgravity conditions // *Physical Review Research*. 2020. V. 2. Iss. 3. Article 033404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.033404>.
- Pustynnik M. Y., Fink M. A., Nosenko V. et al. Plasmakristall-4: New complex (dusty) plasma laboratory on board the International Space Station // *Review of Scientific Instruments*. 2016. V. 87. Article 093505. <https://doi.org/10.1063/1.4962696>.
- Pustynnik M. Y., Klumov B., Rubin-Zuzic M. et al. Three-dimensional structure of a string-fluid complex plasma // *Physical Review Research*. 2020. V. 2. Iss. 3. Article 033314. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.033314>.
- Schwabe M., Khrapak S. A., Zhdanov S. K. et al. Slowing of acoustic waves in electrorheological and string-fluid complex plasmas // *New J. Physics*. 2020. V. 22. Article 083079. DOI 10.1088/1367-2630/aba91b.
- Usachev A., Zobnin A., Petrov O. et al. Externally excited planar dust acoustic shock waves in a strongly coupled dusty plasma under microgravity conditions // *New J. Physics*. 2014. V. 16. Article 053028. DOI 10.1088/1367-2630/16/5/053028.

- Usachev A. D., Zobnin A. V., Shonenkov A. V. et al.* Influence of dust particles on the neon spectral line intensities at the uniform positive column of dc discharge at the space apparatus “Plasma Kristall-4” // IOP Conf. Series: J. Physics: Conf. Series. 2018. V. 946. Article 012143. DOI 10.1088/1742-6596/946/1/012143.
- Zobnin A. V., Usachev A. D., Lipaev A. M. et al.* Transverse ionization instability of the elongated dust cloud in the gas discharge uniform positive column under microgravity conditions // J. Physics: Conf. Ser. 2016. V. 774. Article 012174. DOI 10.1088/1742-6596/774/1/012174.
- Zobnin A. V., Usachev A. D., Petrov O. F. et al.* Two-dimensional positive column structure with dust cloud: Experiment and nonlocal kinetic simulation // Physics of Plasmas. 2018. V. 25. Article 033702. <https://doi.org/10.1063/1.5023297>.

SPACE EXPERIMENT WITH THE RUSSIAN-EUROPEAN APPARATUS “PLASMA KRISTALL-4” ON BOARD THE ISS — AIMS, SEUP AND MAIN RESULTS

**O. F. Petrov¹, A. V. Zobnin¹, A. M. Lipaev¹, V. N. Naumkin¹, A. D. Usachev¹,
M. H. Thoma², M. Kretschmer²**

¹ Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

² I. Physikalisches Institut, Justus-Liebig-Universität, Giessen, Germany

Keywords: ISS, space experiment, dusty plasma, plasma crystal, gas discharge

НАБЛЮДЕНИЯ С МКС АЭРОЗОЛЬНОГО СЛОЯ НА ВЫСОТАХ ОТ 80 ДО 100 км

М. А. Полуаршинов¹, Ю. В. Смирнов¹, А. Н. Беляев²,
С. Ш. Николайшвили², А. Н. Омельченко², А. В. Страхов³

¹ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

² Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова
Росгидромета, Москва, Россия

³ ООО «Научно-производственное предприятие РОБИС», Москва,
Россия

Ключевые слова: аэрозольный слой, мезосфера, нижняя термосфера, рэлеевское рассеяние

Визуальные наблюдения различных эмиссионных и рассеивающих солнечный свет слоистых атмосферных структур (САС) с пилотируемых космических аппаратов проводятся с семидесятых годов прошлого века. Первые фотографии этих слоёв были получены на станции «Салют-7» в начале 1980-х гг. В дальнейшем сравнение данных, полученных на космических аппаратах, с результатами наземных и ракетных измерений свечения ночного неба позволило отождествить наблюдаемые в ночной атмосфере светящиеся слои с областями дискретных атмосферных эмиссий.

Наряду с дискретными эмиссиями, в спектре атмосферного свечения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном спектральных диапазонах присутствует непрерывная спектральная компонента (так называемый континуум), регистрируемая в интервале высот от 70 до 130 км. Результаты измерений показывают, что интенсивность континуума меняется от ночи к ночи и в течение ночи. Имеются сезонные вариации. Измерение спектрального распределения континуума показали существование максимума вблизи 600 нм и уменьшение интенсивности в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. Его интенсивность при измерении с поверхности Земли в среднем составляет 20–30 Рэлей/нм. При этом природа этого излучения до настоящего времени остаётся не ясной.

К рассеивающим солнечный свет слоистым атмосферным структурам относят мезосферные серебристые облака (МСО), которые являются в верхней мезосфере (75–90 км) в приполярных областях летнего полушария. Наиболее благоприятные условия для наземных наблюдений МСО складываются в сумерках, при погружении Солнца под горизонт на 6–12°. В это время его лучи оставляют в тени тропосферу и стратосферу, освещая при этом мезосферу, где на высоте в среднем около 83 км можно наблюдать МСО.

Результаты космического эксперимента (КЭ) «Терминатор», проводимого на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) с февраля 2020 г., будут использованы как для изучения механизмов образования МСО, так и для выяснения физической природы континуума в спектре свечения атмосферы Земли.

Полуаршинов Михаил Андреевич — заместитель начальника отдела, mikhail.poluarshinov@rscce.ru

Смирнов Юрий Викторович — начальник отдела, yury.v.smirnov@rscce.ru

Беляев Алексей Николаевич — заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, belyaev@ipg.geospace.ru

Николайшвили Сергей Шотаевич — научный сотрудник, nikolaishvili@ipg.geospace.ru

Омельченко Александр Николаевич — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, alexom@mail.ru

Страхов Александр Владимирович — начальник отдела, lexand@robis.ru

Научная аппаратура (НА) «Терминатор» состоит из двух комплектов: «Терминатор-Надир» и «Терминатор-Лимб», предназначенных для фоторегистрации САС соответственно в двух случаях: при визировании в надир и на лимб Земли. Каждый из комплектов НА состоит: из четырёх фотокамер с объективами и светофильтрами; блока электроники, осуществляющего передачу изображений от фотокамер в бортовую ЭВМ; соединительных кабелей и поворотного кронштейна для крепления блока фотокамер на иллюминаторе. В фотокамерах комплекта «Лимб» используются светофильтры с шириной спектрального диапазона пропускания 10 нм по уровню 0,5, центрированные на длины волн: 450, 540, 700 и 830 нм, и объективы с полем зрения $38,47 \times 29,35^\circ$. Во всех фотокамерах используется ПЗС-матрица (*сокр.* от «прибор с зарядовой связью») ICX285 компании SONY. При проведении наблюдений блок фотокамер закрепляется с помощью кронштейна на внутренней стороне одного из двух каютных иллюминаторов РС МКС.

В ходе КЭ «Терминатор» при проведении лимбовых наблюдений атмосферы Земли неоднократно регистрировалась ранее неизвестная САС. Накопленный опыт позволил сформулировать условия, необходимые для регистрации с околоземной орбиты данной разновидности САС. Её регистрация возможна в двух случаях. Первый — когда азимут оптической оси регистрирующей аппаратуры совпадает с азимутом на Солнце, зенитный угол которого лежит в диапазоне $105\text{--}110^\circ$. Второй — в полнолуние при наличии лунной подсветки и полном отсутствие солнечной.

Пример фоторегистрации данной САС в первом из перечисленных случаев представлен на рис. 1, где приведены два снимка лимба Земли в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. Снимки были сделаны с экспозицией 1 с в момент, когда географическая широта (φ) и долгота (λ) подспутниковой точки МКС равнялись $\varphi = 37,52^\circ \text{ S}$ и $\lambda = 140,68^\circ \text{ E}$. Азимут оптических осей видеокамер составлял угол $\alpha = -143,79^\circ$. Зенитные углы Солнца и Луны были: $\varphi_{\text{С}} = 122,22^\circ$, $\varphi_{\text{М}} = 91,48^\circ$, а их азимуты: $\alpha_{\text{С}} = -151,17^\circ$, $\alpha_{\text{М}} = -75,71^\circ$, соответственно. Взаимное положение МКС, Земли, Солнца и видимой в сумеречном сегменте ночного небосвода светящейся области схематически показано на рис. 2.

Видимый на снимках лимб Земли обусловлен молекулярным рэлеевским рассеянием солнечного света в средней и верхней стратосфере. При этом яркость лимба убывает с ростом высоты в силу падения с высотой плотности атмосферы.

На приведённых снимках можно также различить выше лимба Земли в высотном диапазоне 80–100 км, некоторую САС, имеющую неоднородную пространственную структуру (см. рис. 1 и 3). Расчёты показывают, что наблюдаемый участок САС не освещён прямым солнечным светом и находится в тени Земли (минимальное значение зенитного угла Солнца для наблюдаемого сектора САС около $103,6^\circ$). При этом рис. 3 демонстрирует явную азимутальную зависимость яркости САС с максимумом, смещённым всего на $\sim 5^\circ$ относительно направления на Солнце.

Последнее обстоятельство свидетельствует в пользу того, что подсветка наблюдаемой САС осуществляется лимбом Земли, как результат рэлеевского рассеяния солнечного света на стратосферных высотах в непосредственной близости от солнечного терминатора. Из-за малой яркости такого источника света, для того чтобы аэрозольный слой был виден на снимках, нам понадобилось увеличить контрастность изображения за счёт растяжения исходной (очень узкой) гистограммы распределения яркости пикселей на весь динамический диапазон видеокамер. В ходе этого наблюдательного сеанса было получено около 270 изображений данной САС в трёх диапазонах длин волн солнечного спектра. Географическая привязка этих изображений, приведена на рис. 4.

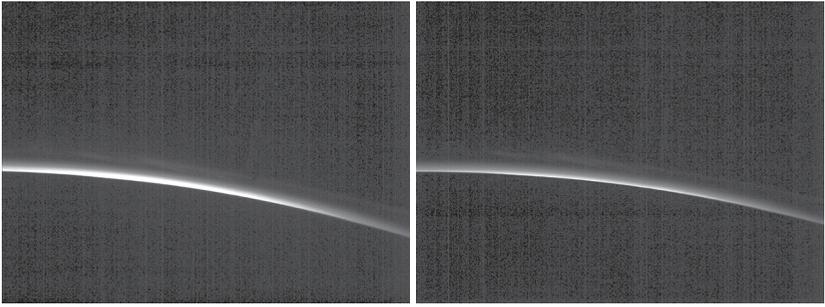


Рис. 1. Снимки (1392×1032 пикселей) атмосферного лимба Земли, полученные с МКС 7 февраля 2022 г. в 13:11:17 UTC (англ. Coordinated Universal Time) с фильтром: 700 ± 5 нм (слева); 830 ± 5 нм (справа)

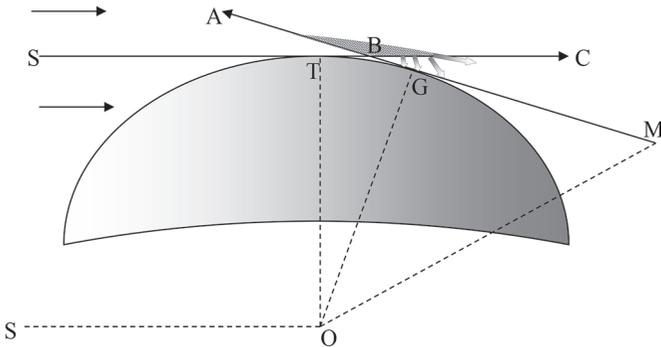


Рис. 2. Схема взаимного расположения МКС, Земли, Солнца и рассеивающей атмосферной области, видимой с МКС. Точка O — центр земной сферы; SC — солнечный луч, касающийся земной сферы в т. T ; OG — радиус земной сферы, проведённый в точку касания G земной сферы и луча зрения MA наблюдателя, находящегося на МКС в т. M . Заштрихованная область внутри угла, образованного лучом зрения MA и солнечным лучом SC , представляет собой область рассеяния солнечного света, формирующая лимб Земли, видимая с МКС. Стрелками обозначен рассеянный этой областью солнечный свет, подсвечивающий как поверхность Земли, так и атмосферные области, находящиеся в её тени

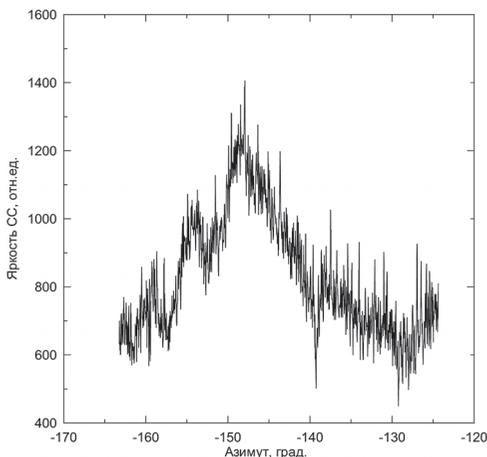


Рис. 3. Зависимость светимости САС от азимута. Пунктиром отмечен азимут на Солнце

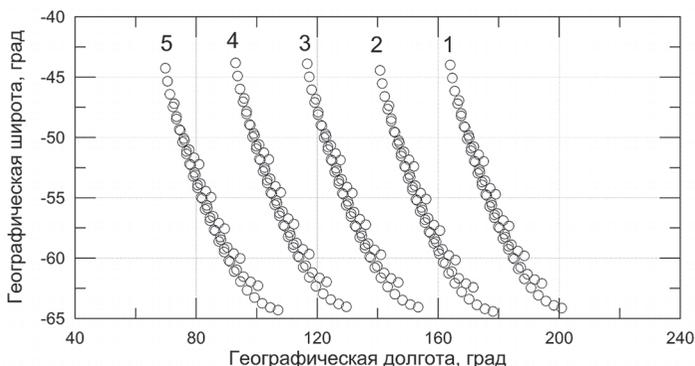


Рис. 4. Географическая привязка изображений САС, полученных в наблюдательном сеансе 07.02.2022. Время съёмки: виток 1 — 10:04:37–10:09:37 UTC; виток 2 — 11:37:37–11:42:37 UTC; виток 3 — 13:10:17–13:15:17 UTC; виток 4 — 14:43:07–14:48:07 UTC; виток 5 — 16:16:07–16:21:07 UTC

Отметим, что в данном наблюдательном сеансе регистрирующая аппаратура включалась на нисходящем витке в момент пересечения орбитальной станцией 35-го градуса южной широты. После чего съёмка лимба Земли шла в автоматическом режиме с интервалом 10 с. Съёмка прекращалась, когда орбитальная станция пересекла широту 35° S в обратном направлении, т.е. на восходящем витке. Анализ полученных фотографий показал, что изображение САС присутствует на всех фотографиях сразу после начала автоматической съёмки до того момента, когда различить САС на фоне всё более яркого лимба Земли становится невозможно. Имея это в виду, можно предположить, что зарегистрированная САС имеет протяжённость планетарного масштаба, по крайней мере, в широтной поясе 47–55° Южного полушария. Анализ полученных изображений показал, что изображение САС присутствует как в видимом, так и в ближнем ИК диапазонах спектра, кроме того, яркость этого слоя растёт в направлении солнечного азимута (см. рис. 3). Из чего можно заключить, что данное свечение не является собственной эмиссией атмосферы, а обязано своим существованием атмосферному аэрозолю, подсвеченному рассеянным солнечным светом.

Примером второго способа регистрации данной разновидности САС могут служить снимки, полученные в ходе лимбового наблюдательного сеанса 30.11.2020, в ходе которого лимб Земли в направлении оптических осей камер отсутствовал, а изображение САС было получено благодаря лунной подсветке (рис. 5).

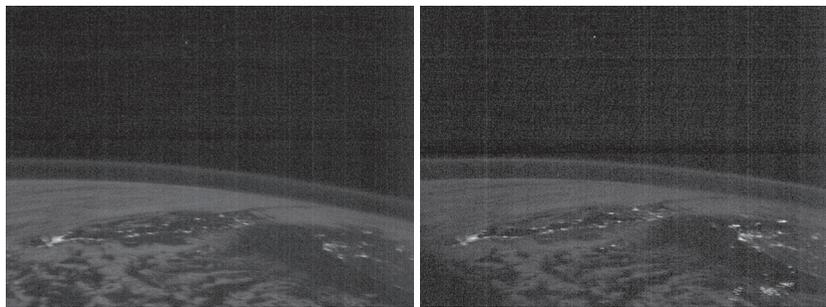


Рис. 5. Снимки (1392×1032 пикселей) САС, полученные с МКС 30.11.2020 в 11:08:05 UTC с фильтром: 700±5 нм (слева); 830±5 нм (справа)

Типичные снимки, полученные в ходе этого сеанса, представлены на рис. 5. Азимут оптических осей камер был -173° , зенитный угол

Солнца 114° , Луны 68° , азимут направления на Солнце был -95° , а на Луну 85° . Их географическая привязка представлена на рис. 6, из которого видно, что наблюдаемая САС регистрировалась на четырёх последовательных витках в широтном поясе $18\text{--}34^\circ$ Северного полушария.

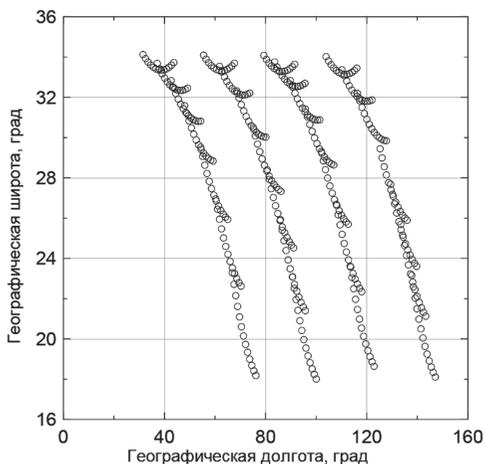


Рис. 6. Географическая привязка изображений САС, полученных в наблюдательном сеансе 30.11.2020

После калибровки фотокамер с фильтрами 700 ± 5 и 830 ± 5 нм, проведённой на РС МКС по звёздам с известной яркостью и температурой, были восстановлены осреднённые высотные фотометрические профили атмосферы исходя из фотоснимков, полученных в ходе наблюдательного сеанса 07.03.2023. Эти профили, приведённые на рис. 7, показывают, что основной вклад в свечение атмосферы в этих диапазонах длин волн даёт слой между высотами 70 и 105 км. Максимумы яркости наблюдаются в интервале высот 87–89 км, а толщина наблюдаемой САС по половинному уровню яркости равна приблизительно 20 км.

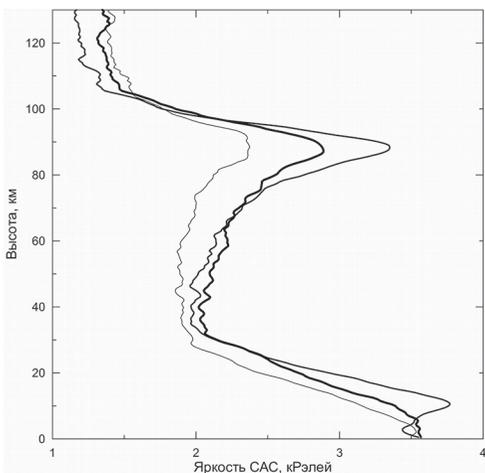


Рис. 7. Высотные профили яркости свечения атмосферы Земли в диапазоне длин волн 700 ± 5 нм (слева) и 830 ± 5 нм (справа). Тонкой, средней и толстой линиями изображены высотные профили, восстановленные по снимкам атмосферы, сделанным 07.03.2023 в 10:43:46 UTC, 13:49:26 UTC и 15:22:26 UTC, соответственно

Приведённые результаты КЭ «Терминатор» указывают на то, что свечение, исходящее от регистрируемого САС, представляет собой дважды рассеянное излучение Солнца. В случае наблюдения в направлении лимба Земли это солнечный свет, предварительно рассеянный атмосферой в области лимба Земли, а затем, перед тем как попасть в объектив фотокамеры, рассеянный аэрозольными частицами, составляющими САС. При лунной подсветке роль лимба Земли выполняет лунная поверхность, отражающая в сторону САС свет, исходящий от Солнца.

Естественным кандидатом на роль аэрозольных частиц, составляющих САС, выступает аэрозоль метеорного происхождения. Известно, что в атмосферу Земли из космоса непрерывно влетает множество твёрдых тел — микрометеороидов (25–1000 мкм) и метеороидов (от 1000 мкм до нескольких метров и более). Большинство из падающих на Землю метеоритов — каменные, остальные — железные и железокремниевые. Имеющиеся на сегодня оценки полного потока вещества, приходящего в атмосферу Земли из космоса, лежат в диапазоне 2–150 кг/год. Таким образом в мезосфере и нижнюю термосферу инжектируется метеорное вещество в виде: атомов/молекул (метеорного пара), капель, сдуваемой с поверхности метеороида расплавленной плёнки и более крупных кусков метеороида, образовавшихся в результате его дробления из-за возникающих в его объёме термонапряжений. Очевидно, что на высотах верхней мезосферы — нижней термосферы накапливается лишь самая лёгкая фракция продуктов абляции метеоров в виде атомов/молекул (метеорного пара). Остальные выводятся в результате гравитационного осаждения. В результате конденсации/полимеризации этих молекул и атомов в атмосфере возникают мельчайшие аэрозольные частицы нанометрового размера, играющие важную роль в гетерогенной химии на мезосферных высотах и в таких атмосферных явлениях как: серебристые облака, полярное летнее мезосферное эхо. Вышесказанное позволяет предположить, что наблюдаемый САС представляет собой некоторую аэрозольную слоистую структуру метеорного происхождения, состоящую из частиц, размер которых составляет несколько нанометров. Эта слоистая структура имеет планетарный характер и постоянно присутствует в диапазоне высот 70–110 км. Рассеянное на этом аэрозольном слое излучение Солнца (уже ранее рассеянное либо в области лимба Земли, либо поверхностью Луны) характеризуется следующими свойствами:

- его спектр является непрерывным, а его форма близка к форме солнечного спектра с максимумом в интервале длин волн 570–620 нм;
- его интенсивность чрезвычайно изменчива в силу зависимости от глубины погружения Солнца под горизонт, фазы Луны, интенсивности потока метеороидов, сгорающих в атмосфере;
- основные характеристики его высотных профилей яркости совпадают с соответствующими параметрами вертикального распределения яркости атмосферы, приписываемой континууму.

Перечисленный набор свойств излучения, исходящего от регистрируемого в КЭ «Терминатор» САС, позволяет идентифицировать его как континуум спектра свечения атмосферы Земли.

AEROSOL LAYER OBSERVATIONS FROM ISS AT ALTITUDES FROM 80 TO 100 km

**M. A. Poluarshinov¹, Yu. V. Smirnov¹, A. N. Belyaev², S. S. Nikolaishvili²,
A. N. Omelchenko², A. V. Strahov³**

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

² Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

³ Scientific-Production Enterprise ROBIS, Moscow, Russia

Keywords: aerosol layer, mesosphere, lower thermosphere, Rayleigh scattering

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ВЫСОКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АФАР КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Г. А. Постол, И. М. Заживихин

АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий», Смоленск, Россия

Ключевые слова: АВИРС, АФАР, радиолокационные изображения, радиолокационное синтезирование апертуры (РСА), радиолокационные системы

Аппаратура высокоэнергетической излучающей радиочастотной системы (АВИРС) предназначена для получения радиоэлектронных портретов (радиолокационных изображений) участков поверхности Земли и для комплексной экспериментальной отработки высокопотенциальных широкополосных многофункциональных антенн с фазированной антенной решеткой (АФАР).

Задачи, решаемые АВИРС:

1. Формирование радиолокационных изображений (РЛИ) поверхности Земли в L- и S-диапазонах частот.
2. Отработка режима мониторинга сигналов в диапазоне частот от 1100 до 2700 МГц в целях контроля излучений земных станций на соответствие заявленным в Международном союзе электросвязи (МСЭ) характеристикам.
3. Отработка режима юстировки и настройки радиоэлектронных средств (РЭС), проведение испытаний на помехозащищённость РЭС.

В рамках выполняемой составной части опытно-конструкторской работы (СЧ ОКР) «Разработка материалов ЭП для аппаратуры высокоэнергетических излучающих радиочастотных систем орбитальной станции КК РОС» разрабатывается аппаратура, устанавливаемая на борту орбитальной станции космического комплекса Российской орбитальной станции (РОС), предназначенная для получения радиоэлектронных портретов (радиолокационных изображений) участков поверхности Земли и для комплексной экспериментальной отработки широкополосных многофункциональных АФАР.

Получение радиолокационных изображений участков земной поверхности обеспечивается при работе АВИРС в режиме РСА.

Область применения АВИРС в режиме РСА определяется возможностью формирования РЛИ поверхности Земли вне зависимости от освещённости, задымлённости и метеоусловий, и включает:

1. Создание и обновление топографических и тематических карт различных масштабов.
2. Построение высокоточных трёхмерных цифровых моделей местности (рельефа) для любых территорий (двух- и многопроходная интерферометрическая обработка радиолокационных данных), в том числе формирование радиолокационных тематических слоёв цифровых карт местности.
3. Мониторинг экологической обстановки водных поверхностей (обнаружение пространственного положения нефтяных разливов на различных водоёмах).

Постол Григорий Алексеевич — руководитель направления, postol.ga@niistt.ru

Заживихин Илья Михайлович — заместитель руководителя направления, zazhivihin.im@niistt.ru

4. Оперативная оценка последствий и ущерба при чрезвычайных ситуациях независимо от погодных и климатических условий.
5. Мониторинг вертикальных смещений (просадок земной поверхности) на территории каменноугольных, нефтяных, газовых и других месторождений.
6. Решение геологических задач по результатам интерферометрической обработки изображений.
7. Мониторинг состояния лесных массивов по результатам поляриметрической радиолокационной съёмки.
8. Выделение и классификация лесных массивов, оценка их площади, выявление вырубок и гарей, оценка лесов по составу пород и по высоте.
9. Оперативное предупреждение паводков и выявление опасных в паводковом отношении районов и оценка их площади.
10. Оценка состояния сельскохозяйственных угодий (полей/посевов) по результатам поляриметрической радиолокационной съёмки.
11. Обнаружение и мониторинг надводных судов, состояния каналов, проливов и узостей.
12. Решение задач в гляциологии по направлениям: оценка ледовой обстановки на Северном морском пути и исследование состояния различных типов ледников.

Актуальность разработки изделия

Одним из основных и крупногабаритных функциональных устройств РСА, обуславливающих её информативные возможности — ширину полосы съёмки и разрешающую способность на РЛИ, является антенно-фидерная система (АФС). В качестве одного из вариантов такой системы выступает РСА на основе АВИРС с отдельной передающей и приёмной фазированной антенной решёткой (ФАР), при этом обеспечивается теоретически неограниченный модернизационный потенциал АФС и РСА в целом, который оперативно и гарантированно реализуется космонавтами в ходе внекорабельной и внутрикорабельной деятельности.

Важная отличительная особенность разрабатываемой РСА — работа в двух диапазонах длин волн: дециметровом (L-диапазон) и сантиметровом (S-диапазон). В дециметровом диапазоне электромагнитные колебания обладают большей проникающей способностью по сравнению с сантиметровым диапазоном. Это позволяет обнаруживать объекты, укрытые снегом, кронами деревьев, в густой растительности и т.п. В то же время в сантиметровом S-диапазоне длин волн получаемые с помощью РСА радиолокационные изображения будут иметь лучшую разрешающую способность и детальность.

Следующее преимущество АВИРС — возможность излучения и приёма сигналов с различной поляризацией. Практически все существующие РСА космического базирования (РСА КБ) работают в режиме линейной поляризации (НН (горизонтально-горизонтальная), VV (вертикально-вертикальная) и их комбинация). Недостатком таких РСА КБ является большая чувствительность к эффекту вращения Фарадея, особенно в L-диапазоне. На этапе приёма эффект Фарадея вызывает рассогласование поляризации, что приводит к ухудшению качества РЛИ, например, приводит к искажению изображения, снижению его контрастности и т.д.

Кроме того, оказалось, что режим круговой поляриметрии содержит больше поляриметрической информации при мониторинге сельскохозяйственных и дикорастущих растений, чем соответствующий режим линейной поляризации.

Двухдиапазонная РСА с круговой поляризацией позволит формировать мультиспектральные поляриметрические, двух(много)проходные интерферометрические и стереоскопические РЛИ, которые

являются исходными данными для тематической обработки изображений на основе текстурно-фрактального анализа, основанного на описании геометрии природных форм с использованием принципов самоподобия и масштабной инвариантности. Исходя из особенностей отображения пространственно-распределённых объектов на двухдиапазонных поляриметрических РЛИ, текстурно-фрактальный анализ позволяет получать информацию о сложно поддающихся количественному описанию структурных и геометрических особенностях текстуры РЛИ — упорядоченности, однородности, внутренней организованности, периодичности. Именно РЛИ, формируемые РСА с круговой поляризацией, позволяют эффективно использовать известные фрактальные признаки (фрактальная размерность и сигнатура, мультифрактальная размерность и сигнатура, направленная фрактальная размерность и сигнатура, лакунарность и спектр мощности фрактальной размерности) сосредоточенных и пространственно-протяжённых антропогенных и природных объектов и реализовать методы вычисления этих фрактальных признаков. В свою очередь, вычисление (применение) различных текстурно-фрактальных признаков, каждый из которых обладает различной дифференцирующей способностью, позволит повысить эффективность тематической обработки даже одного и того же РЛИ при решении ряда практических задач.

Реализация режимов работы РСА

1. Полосовой:
 - маршрутный одночастотный;
 - маршрутный двухчастотный;
 - широкозахватный одночастотный;
 - широкозахватный двухчастотный сканирующий.
2. Стереоскопическая съёмка:
 - одночастотная;
 - двухчастотная.
3. Поляриметрическая съёмка (чётные ЗС излучаются с левой круговой поляризацией, а нечётные — с правой). Чётные и нечётные эхосигналы принимаются одновременно каналами с левой и правой круговой поляризацией:
 - одночастотная;
 - двухчастотная.
4. Видеорадиолокационная съёмка (непрерывная съёмка одной сцены на протяжении 30–40 с с формированием видеоряда кадров, между которыми интервал времени около 50 мс). Реализуется фиксированный набор угловых положений луча, которые последовательно, например, через 50 мс, меняются в течение всей съёмки.
5. Телескопическая съёмка:
 - однокадровая;
 - мозаичная.
6. Интерферометрическая съёмка:
 - продольная (селекция движущихся целей);
 - поперечная двухпроходная съёмка.

Выявление изменений в оперативной обстановке (двух(много)проходная съёмка одного и того же участка через период замыкания трассы) (режим экспериментальный, целесообразно реализовать одно- и двухчастотную съёмку), реализуемой программным обеспечением, через период замыкания трассы может дублироваться любой режим съёмки 1–4.

EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF HIGH-POTENTIAL BROADBAND MULTIFUNCTIONAL SPACE-BASED AFAR

G. A. Postol, I. M. Zazhivihin

JSC Scientific Research Institute of Modern Telecommunication
Technologies, Samara, Russia

Keywords: AVIRS, radar images, radar aperture synthesis (RSA), radar systems

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАТФОРМ ПРИ НАВЕДЕНИИ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ НА НАБЛЮДАЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ С БОРТА МКС

И. В. Рассказов¹, М. Ю. Беляев^{1,2}, П. А. Боровихин¹, Д. Ю. Караваяев¹

¹ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва Королёв, Россия

² Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищи, Россия

Ключевые слова: космический эксперимент, международная космическая станция (МКС), дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), научные исследования

Выполнение многих экспериментов на космических аппаратах (КА) требует наведения используемой научной аппаратуры (НА) на исследуемые объекты (Беляев, 1984). Обычно НА устанавливается жёстко на корпусе КА и наведение чувствительной оси НА на исследуемые объекты, расположенные на Земле или небесной сфере, осуществляется разворотами КА (Беляев, 1984). Подобная схема использовалась и на всех отечественных орбитальных станциях, хотя её применение на станциях, имеющих сложную конфигурацию, потребовало разработки специальной технологии и создания целого комплекса математических программ (Беляев, 1984; Беляев и др., 1988).

Размеры и масса Международной космической станции (МКС) значительно превосходят аналогичные параметры предыдущих орбитальных станций. Наведение на исследуемые объекты НА МКС и подобных крупногабаритных орбитальных станций должно осуществляться с помощью специальных подвижных платформ наведения (ППН). С этой целью в рамках космического эксперимента (КЭ) «Ураган» разработана и доставлена на борт станции система ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА-1), предназначенная для установки на иллюминаторы внутри обитаемого пространства российского сегмента (РС) МКС (Беляев и др., 2018). Она представляет собой платформу, которая позволяет наводить установленную на ней НА по командам от бортового ноутбука. В результате наведение НА на исследуемые объекты может производиться в любое время суток без участия экипажа. В августе 2023 г. на РС МКС доставлена новая модификация ППН — СОВА-2.

Таким образом, возможности проведения экспериментов на станции значительно расширяются, особенно с учётом того, что на МКС теперь используется несколько ППН. Это приводит к усложнению задачи оптимального планирования наблюдений исследуемых объектов.

При планировании съёмки аппаратурой, установленной на платформе СОВА-1, применяется подход, который использовался для различных КЭ ещё на станциях типа «Салют» и затем на станции «Мир» и МКС (Беляев, 1980, 1984; Беляев, Рулев, 1987). При этом в алгоритмах управления ППН СОВА-1 используется модернизированная целевая функция информативности I , значение которой должно быть максимизировано при выборе набора объектов для наблюдений:

Рассказов Игорь Владимирович — инженер, igor.rasskazov1@rsce.ru

Беляев Михаил Юрьевич — научный руководитель, доктор технических наук, профессор, mikhail.belyaev@rsce.ru

Боровихин Павел Александрович — инженер-математик 1-й категории, кандидат технических наук, pavel.borovikhin@rsce.ru

Караваяев Дмитрий Юрьевич — главный специалист, кандидат технических наук, dmitry.karavaev@rsce.ru

$$I = \sum_i P_i \Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_{L-1} \Phi_L.$$

Сомножитель P_i в приведённом выражении под знаком суммирования — оценка приоритета съёмки объекта с порядковым номером i . Остальные L сомножителей — набор функций, позволяющих учесть вклад наблюдений объекта с номером i в общую информативность съёмки с учётом тех специальных критериев, которые выбраны для данного эксперимента. Так, при дневных фотосъёмках земной поверхности, как правило, используются три функции: величина, обратно пропорциональная степени ожидаемой над объектом облачности; оценка освещённости объекта, принимающая максимальное значение при заданной высоте Солнца над местным горизонтом объекта; оценка ожидаемого пространственного разрешения фотографии объекта.

Выбор оптимальной последовательности наблюдений заданных объектов сводится к решению различных вариантов задач маршрутизации транспорта. В частности, при использовании лишь одного комплекта НА используется аналогия с задачей коммивояжёра (Беляев, 1984), которая заключается в нахождении гамильтонова цикла (контур) с минимальной суммой стоимостей проходимых рёбер (дуг) графа.

В настоящее время в рамках космического эксперимента «Ураган» доставлены на борт РС МКС новые комплекты аппаратуры СОВА. Это привело к постановке задачи оптимального планирования наблюдений несколькими комплектами НА. Один из подходов к её решению заключается в том, чтобы использовать возможные программы наблюдений, каждая из которых составлена лишь для одного комплекта. Так, при использовании нескольких ППН СОВА выбираются такие наборы (по числу ППН) сформированных для них отдельно программ наблюдений, которые дают наибольшую суммарную информативность экспериментов. При этом в форме равенств и неравенств задаются ограничения, аналогичные тем, которые применяются для описания задачи маршрутизации транспорта в её «экстенсивной» формулировке, когда основными объектами рассмотрения становятся всевозможные маршруты, из множества которых производится выбор наиболее эффективного набора (Vehicle..., 2014). Решение сформулированной таким образом задачи математического программирования даёт практически важный результат для планирования наблюдений несколькими приборами с орбитальной станции.

Возможна также полная аналогия задачи наблюдений объектов с задачей нескольких коммивояжёров при соблюдении ряда условий: требуется охватить наблюдениями все заданные объекты так, чтобы каждый объект попал в зону наблюдения ровно одного из комплектов НА; сумма всех разворотов, проведённых соответствующими ППН должна быть минимальной; технических ресурсов каждого комплекта должно быть достаточно для наблюдений всех заданных объектов.

Задача нескольких коммивояжёров, в зависимости от условий КЭ, может решаться различными способами — как точными, так и приближенными. Один из общих подходов к её решению состоит в том, чтобы каким-либо способом предварительно свести её к задаче одного коммивояжёра.

Представленные методы реализованы в составе специального программного обеспечения экспериментов на борту Международной космической станции и используются для оптимального планирования и выполнения фотографической и спектрометрической съёмки земной поверхности. Наведение научных приборов может производиться в автоматическом режиме одновременно несколькими поворотными платформами, которые устанавливаются на иллюминаторы внутри обитаемого пространства станции. Кроме того, в съёмке могут участвовать космонавты, которые с помощью специального

аппаратного и программного обеспечения наводят фотоаппараты на заданные цели без использования поворотных платформ. (Беляев и др., 2022а, б, 2023).

Кроме того, в рамках КЭ «Сценарий» предусмотрена возможность наведения научной аппаратуры ППН СОВА исследователем, находящимся на Земле. Для этой цели используется широкополосная система связи (ШСС), установленная на РС МКС.

Широкополосная система связи предназначена для организации обмена большими потоками информации (105 Мбит/с в направлении «борт – Земля» и 6 Мбит/с в направлении «Земля – борт») РС МКС и Центра управления полётами (ЦУП) с использованием многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) «Луч». В одном потоке возможно объединение различных видов информации: телеметрической, телевизионной, голосовой, файловый обмен. Широкополосная система связи, по аналогии с системой орбитального комплекса (ОК) «Мир», включает бортовую и наземную часть.

Исследователь, находящийся на Земле, получает на экране компьютера информацию о полёте станции и изображение подстилающей поверхности. В случае указания выбранного для исследования объекта простым кликом компьютерной мышки, на борт подаётся необходимая команда и ППН с НА разворачивается на наблюдаемый объект и отслеживает его. При этом происходит съёмка и спектрометрирование выбранного объекта. Измерительная информация оперативно по каналу ШСС передаётся на компьютер исследователя, где происходит её обработка.

Литература

- Беляев М. Ю. Оперативное планирование научных экспериментов, проводимых с помощью КА // Косм. исслед. 1980. Т. 18. Вып. 2. С. 235–241.
- Беляев М. Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Изд-во «Машиностроение», 1984.
- Беляев М. Ю., Рулев Д. Н. Оптимизация программы экспериментов при оперативном планировании исследований, выполняемых с КА // Косм. исслед. 1987. № 1. С. 30–36.
- Беляев М. Ю., Зыков С. Г., Манжелей А. И. и др. Математическое обеспечение автоматизированного планирования исследований на орбитальном комплексе «Мир» // Косм. исслед. 1988. Т. 27. Вып. 1. С. 126–134.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Боровихин П. А. и др. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Косм. техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 70–80.
- Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Караваев Д. Ю., Рассказов И. В. (2022а) Наведение научной аппаратуры международной космической станции на наблюдаемые объекты с помощью специальных подвижных платформ // Системный анализ, управление и навигация: тез. докл. 26-й Международ. науч. конф. М., 2022. С. 111–113.
- Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Ветошкин А. М., Караваев Д. Ю., Рассказов И. В. (2022б) Наведение научной аппаратуры МКС на исследуемые объекты с использованием подвижных платформ наведения // Косм. исслед. 2022. Т. 60. № 1. С. 80–89.
- Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Есаков А. М., Караваев Д. Ю., Рассказов И. В. Новые методы управления при наведении научной аппаратуры на наблюдаемые объекты в эксперименте «Ураган» на МКС // 30-я Юбилейная Санкт-Петербургская международ. конф. по интегрированным навигац. системам: сб. материалов конф. СПб., 2023. С. 319–328.
- Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications. 2nd ed. / eds. Toth P., Vigo D. Philadelphia, 2014. 467 p.

THE USE OF PLATFORMS WHEN POINTING SCIENTIFIC EQUIPMENT AT OBSERVED OBJECTS FROM THE ISS

I. V. Rasskazov¹, M. Yu. Belyaev^{1,2}, P. A. Borovikhin¹, D. Yu. Karavaev^{1,2}

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

² Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytischki, Russia

Keywords: Space experiment, International Space Station ISS, Remote sensing of the Earth, Scientific research

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ПАРУС-МГТУ» ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Д. А. Рачкин, В. И. Майорова, С. М. Тененбаум, В. Г. Мельникова
Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия

Ключевые слова: пикоспутник, солнечный парус, крупногабаритные раскрываемые конструкции

«Парус-МГТУ» (Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)) — научно-образовательный космический эксперимент на борту Международной космической станции (МКС), в котором отрабатывается перспективная технология освоения космического пространства — солнечный парус (рис. 1). Основные цели этого эксперимента:

- верификация математической модели процесса развёртывания гелиороторного солнечного паруса;
- тестирование электронного оборудования, изготовленного из стандартных коммерческих электронных компонентов;
- сбор и передача экспериментальных данных на наземные станции;
- использование пикоспутника в качестве экспериментальной установки для учебного процесса в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

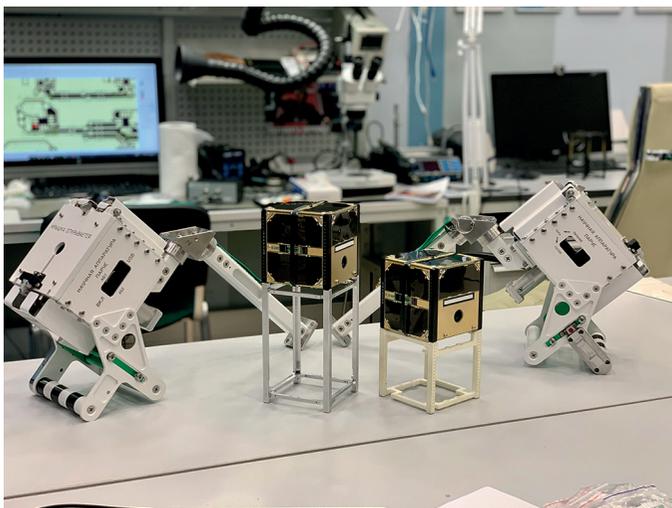


Рис. 1. Аппарат «Парус-МГТУ» и пусковое устройство

Рачкин Дмитрий Анатольевич — начальник Конструкторского бюро «Прорывные космические исследования и технологии», rachkin@bmstu.ru
Майорова Вера Ивановна — руководитель Учебно-научного Молодёжного космического центра, доктор технических наук, профессор, mayorova@bmstu.ru
Тененбаум Степан Михайлович — главный конструктор проекта Конструкторского бюро «Прорывные космические исследования и технологии», tenenbaum@bmstu.ru
Мельникова Валерия Геннадиевна — ведущий инженер Конструкторского бюро «Прорывные космические исследования и технологии», melnikovabg@bmstu.ru

Введение

Явление давления светового излучения было предсказано Дж. Максвеллом на основе его теории электромагнетизма (Maxwell, 1873). Экспериментально этот эффект наблюдался П. Н. Лебедевым в начале 20 века (Lebedew, 1901). Первым исследователем, предложившим использовать давление светового излучения в качестве движущей силы космического спутника, был Ф. Цандер в своих пионерских работах в середине 1920-х гг. (Tsander, 1967). Он изобрёл концепцию солнечного паруса с серией больших плоских зеркал, стабилизированных вращением — гелиороторный солнечный парус («гелиоротор»).

Идеи Цандера были популяризированы Р. Макнилом, который предложил отправить к комете Галлея межпланетную станцию с гелиороторным солнечным парусом (MacNeal, 1967). Эта концепция была отклонена из-за большого технического риска, однако концепция гелиороторного солнечного паруса все ещё находится на рассмотрении различных исследователей и инженеров (Guerrant et al., 2014, 2015; Juang et al., 2013; Wilkie et al., 2014). Достаточно полный обзор разработок и исследований солнечных парусов можно найти в книге К. Макиннеса (McInnes, 2004).

Бескаркасные солнечные паруса, такие как гелиоротор, имеют большие преимущества по сравнению с солнечными парусами на каркасе — их можно легко масштабировать, им не нужна никакая конструкция для поддержки их формы, но они являются гораздо более сложными с точки зрения динамики.

Одной из основных проблем динамики бескаркасных солнечных парусов считается процесс развёртывания. Было проведено несколько экспериментов по созданию и валидации математических моделей динамики бескаркасных солнечных парусов. Одним из таких была серия экспериментов «Знамя» (Райкунов и др., 2009), два из них были проведены в космосе с частичным успехом. В первом — «Знамя-2», был успешно применён прототип солнечного паруса в форме диска, стабилизированного вращением, вблизи космической станции «Мир» на грузовом корабле «Прогресс-М-15» в 1993 г. Второй эксперимент, «Знамя-2.5», был проведён в 1999 г., и он был успешным частично, поскольку на процесс развёртывания солнечного паруса повлияла антенна космического аппарата. Серия экспериментов «Знамя» не была закончена, в стадии разработки находились ещё два эксперимента: «Знамя-3» (http://knts.tsniimash.ru/ru/site/Experiment_q.aspx?idE=156) и «Знамя-СБ» (http://knts.tsniimash.ru/ru/site/Experiment_q.aspx?idE=155).

В 2010 г. Японское аэрокосмическое агентство JAXA (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency) запустило к Венере межпланетный зонд Planet-C с попутным космическим аппаратом под названием IKAROS (*англ.* Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun), который стал первым успешно запущенным межпланетным солнечным парусом (Kawaguchi, Macdonald, 2014; Tsuda et al., 2011; Yamaguchi et al., 2010). Парус на космическом аппарате IKAROS также стабилизируется вращением. Концепцию, отрабатываемую на IKAROS, часто называют «гибридным солнечным парусом», поскольку планируется использовать как световое давление, так и электричество от тонкоплёночных солнечных панелей на солнечном парусе для создания тяги с помощью электрических ракетных двигателей.

Также было проведено несколько экспериментов с каркасными солнечными парусами. Одним из них был космический аппарат Nanosail-D2, запущенный в 2010 г. (Alhorn et al., 2011; Johnson et al., 2011; Katan, 2012), и аналоги этого проекта, космические аппараты LightSail-1 и LightSail-2, которые были успешно запущены в 2015 и 2019 гг. (Ridenoure et al., 2015, 2016). При этом на космическом аппарате LightSail-2 впервые в мире было осуществлено изменение

параметров орбиты за счёт действия солнечного давления на конструкцию паруса.

История космического эксперимента «Парус» МГТУ им. Н. Э. Баумана

Ранние стадии

Разработка космических аппаратов с солнечными парусами началась в МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2009 г. в качестве студенческих проектов. Студенческим коллективом было предложено создать небольшой спутник с вращающимся солнечным парусом, очень похожий по конструкции на гелиоротор, но только с двумя лопастями и без механизма изменения ориентации лопастей солнечного паруса. Первые шаги проекта включали долгий поиск идеологии реализации. Впервые он был представлен на конференции в январе 2010 г. (Попов и др., 2010) в виде концепции двух пикоспутников: одного с двухлопастным солнечным парусом и другого спутника с камерой. «Парусник» должен был раскрутиться и отделиться от более крупного, а после отделения спутник с камерой должен был сделать снимки процесса развёртывания вращающегося солнечного паруса.

Эксперимент на МКС

Задача создания двух спутников была сложнее, чем одного, поэтому было решено изменить способ обеспечения ненулевого кинетического момента космического аппарата. Было рассмотрено использование существующего космического аппарата или спутника, который достаточно велик, чтобы обеспечить разгрузку. После анализа было решено выбрать Международную космическую станцию в качестве базового спутника (Rachkin et al., 2011), а эксперимент провести во время внекорабельной деятельности на российском сегменте МКС, в ходе которого космонавт должен запустить аппарат с помощью специального устройства, обеспечивающего минимальные возмущения угловой скорости при отделении.

В то время основная концепция аппарата была заимствована из идеологии CanSat (Can — жестяная банка, Sat — *сокр.* от Satellite, спутник), поэтому у него был герметичный контейнер с электронным оборудованием на борту и две внешние катушки с алюминизированными полиимидными плёнками толщиной 12 мкм (Dmitriev et al., 2012), для которых был определён коэффициент демпфирования, вошедший в математическую модель развёртывания солнечного паруса (Попов, Тененбаум, 2012). Данный космический эксперимент был успешно включён в долгосрочную программу научных исследований на российском сегменте МКС в 2012 г. в секции «Образование» (Mayorova et al., 2012).

В процессе дальнейшей разработки этого аппарата мы перешли от дизайна CanSat к более распространённому дизайну CubeSat (*англ.* CubeSat ← cube + satellite) (Heidt et al., 2000; Mayorova et al., 2013, 2014a). Одной из сложностей было влияние неопределённостей конструктивных параметров паруса на процесс развёртывания, как это было показано в публикациях (Тененбаум, 2014; Mayorova et al., 2014b), а также другие вопросы (Зимин, Неровный, 2016).

Окончательный проект космического эксперимента «Парус-МГТУ» был готов в 2015 г. после завершения стадии эскизного проектирования в рамках работ по разработке научной аппаратуры для МКС с ПАО «РКК «Энергия» (Mayorova et al., 2015).

Также процесс разработки этого спутника имеет сильную образовательную составляющую, он используется в качестве демонстрационного материала для лекций, лабораторных практикумов и студенческих исследований.

Текущее состояние

В период с 2017 по 2018 г. проведён полный цикл наземной экспериментальной отработки аппаратуры, включая раскрытие солнечного паруса в большой вакуумной камере. В период с 2019 по 2021 г. был изготовлен лётный образец аппаратуры для доставки на борт МКС и проведения космического эксперимента. РКК «Энергия» провела независимую проверку документации на аппаратуру и результатов испытаний с целью обеспечения безопасности экипажа и МКС, а также провела согласования с партнёрами по МКС проведение эксперимента «Парус-МГТУ». Космический аппарат «Парус-МГТУ» вместе с пусковым устройством был доставлен на борт международной станции на грузовом корабле «Прогресс-МС-23» 24 мая 2023 г. Запуск аппарата был выполнен в ходе внекорабельной деятельности РС МКС (ВКД-61) космонавтом Олегом Кононенко 26 октября 2023 г. После запуска аппарат был взят на управление Центром управления полётом МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Эксперимент начнётся внутри станции в герметичном объёме. Космонавты должны проверить оборудование в соответствии с инструкциями, провести необходимые наблюдения за внешним видом пикоспутника, проверить бортовое программное обеспечение с помощью программной утилиты на ноутбуке в российском сегменте. После этого пикоспутник будет помещён внутрь стартового контейнера и сохранен в воздушном шлюзе.

Основная последовательность эксперимента начнётся во время внекорабельной деятельности космонавтов. Пусковое устройство крепится к поручню на российском сегменте МКС. Затем пикоспутник будет включён, космонавт подождёт несколько секунд до завершения инициализации бортового программного обеспечения. В случае неудачных тестов существуют специальные индикаторы, позволяющие прервать эксперимент и вернуть его внутрь станции. После успешных самотестирований, космонавт установит пусковое устройство в правильном направлении и запустит программу запуска пикоспутника, которая запустит маховик внутри аппарата. Затем, после команды с наземного пункта управления, производится нажатие на гашетку пускового устройства и спутник запускается в соответствующем направлении.

После отделения пикоспутник раскроет антенны (рис. 2) радиосвязи и будет ждать несколько секунд, поскольку развёртывание солнечного паруса может повлиять на внешние конструкции МКС. После задержки начнётся процесс развёртывания: маховик замедлится, бобины развернут парус со скоростью, соответствующей математической модели развёртывания (рис. 3). Весь процесс развёртывания продлится две минуты.

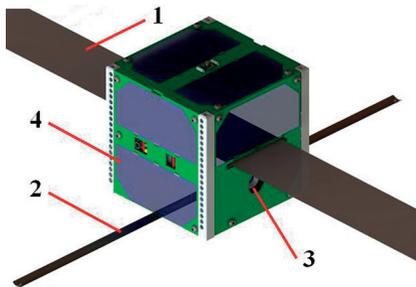


Рис. 2. Пикоспутник «Парус-МГТУ». 1 — солнечный парус, 2 — антенна, 3 — бортовая камера, 4 — солнечный элемент

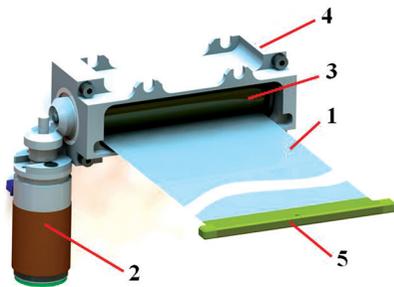


Рис. 3. Бобинный узел. 1 — солнечный парус, 2 — шаговый двигатель, 3 — катушка с парусом, 4 — каркас катушки, 5 — масса наконечника

Процесс развёртывания документируется камерами внутри станции через смотровое окно, с камер на скафандрах, с бортовых камер (видимых и инфракрасных) пикоспутника. Спутник также сохраняет данные об угловом ускорении и скорости процесса развёртывания от бортовых датчиков. После развёртывания спутник передаёт данные на наземные станции МГТУ им. Н. Э. Баумана и партнёров. Есть дополнительные планы по проведению эксперимента по свёртыванию солнечного паруса обратно в бобины.

Основные параметры пикоспутника «Парус-МГТУ» представлены ниже.

Масса	1 кг
Габариты	100×100×115 мм
Размер солнечного паруса	2 лопасти, 50 мм на 5 м каждая
Материал солнечного паруса	полиимид
Радиочастота	437,2 МГц
Позывной	RS2S
Температура хранения пределы	от -40 до +60 °С
Пределы рабочей температуры	от 0 до +20 °С

Дальнейшее развитие

Было предложено использовать эту технологию при дальнейшем развитии спутниковой группировки CubeSat МГТУ им. Н. Э. Баумана. Можно разделить несколько спутников в одной плоскости орбиты, изменив площадь атмосферного сопротивления на низкой околоземной орбите и используя давление светового излучения на орбитах выше 600 км. Возможность управления орбитальными параметрами малого спутника путём изменения площади лобового сопротивления была доказана в ходе полёта аппарата AeroCube-4. Вначале все спутники расположены примерно в одной и той же точке орбиты. Затем первый космический аппарат разворачивает солнечный парус, который изменяет силу лобового сопротивления, что приводит к увеличению фазового угла между спутниками. Когда фазовый угол между первым спутником и группой других спутников увеличивается до соответствующего значения, второй спутник разворачивает свой солнечный парус и так далее. По истечении определённого времени все спутники могут быть рассредоточены по орбите, а все блоки солнечных парусов могут быть отсоединены от спутников или смотаны на бобинах.

Литература

- Зимин В. Н., Неровный Н. А.* Определение эффективной силы светового давления на деформированный роторный солнечный парус. Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. Т. 6. С. 116–129.
- Попов А. С., Тененбаум С. М.* Определение допустимого момента дораскручивания роторного солнечного паруса // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 12. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/1212.0493439>.
- Попов А. С., Рачкин Д. А., Неровный Н. А. и др.* Технологический наноспутник с солнечным парусом // Тр. 34-х Академ. чтений по космонавтике / Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства. М., 2010.
- Райкунов Г. Г., Комков В. А., Мельников В. М., Харлой Б. Н.* Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции. АНО Физматлит. 2009. 448 с.
- Тененбаум С. М.* Математическая модель сматывания нити с катушки // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. Т. 5. С. 102–120.
- Althorn D., Casas J., Agasid E. et al.* NanoSail-D: The Small Satellite That Could! // AIAA/USU Conf. Small Satellites. 2011.

- Dmitriev A., Dmitrieva O., Rachkin D. et al.* Extremely low-cost picosatellite equipment for short-duration missions // 4th European CubeSat Symp. Brussels, 2012.
- Guerrant D., Lawrence D.* Tactics for Heliogyro Solar Sail Attitude Control via Blade Pitching // *J. Guidance, Control, and Dynamics*. 2015. V. 38(9). P. 1–15. <https://doi.org/10.2514/1.G000861>.
- Guerrant D., Lawrence D., Macdonald M.* Heliogyro Attitude Control Moment Authority via Blade Pitch Maneuvers // *Advances in Solar Sailing*. Berlin; Heidelberg: Springer Praxis Books, 2014. P. 667–686.
- Heidt H., Puig-Suari J., Moore A. et al.* CubeSat: A New Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation // *AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2000.
- Johnson L., Whorton M., Heaton A. et al.* NanoSail-D: A solar sail demonstration mission // *Acta Astronautica*. 2011. V. 68(5–6). P. 571–575.
- Juang J.-H., Hung C.-H., Wilkie W.K.* Dynamics of a Slender Spinning Membrane // *J. Astronautical Sciences*. 2013. V. 60(3–4). P. 494–516.
- Katan C.* NASA's Next Solar Sail: Lessons Learned from NanoSail — D2 // 26th Annual AIAA/USU Conf. Small Satellites: Enhancing Global Awareness through Small Satellites. Logan, UT, United States, 2012.
- Kawaguchi J., Macdonald M.* An Overview of Solar Sail Related Activities at JAXA, *Advances in Solar Sailing*. Berlin; Heidelberg: Springer Praxis Books, 2014. P. 3–4.
- Lebedew W.* Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes // *Annalen der Physik*. 1901. V. 311(11). S. 433–458.
- MacNeal R. H.* The Heliogyro: An Interplanetary Flying Machine / Astro Research Corp. Santa Barbara, California, 1967.
- Maxwell J. C.* A treatise on electricity and magnetism. Oxford: Clarendon Press, 1873.
- Mayorova V., Dmitriev A., Nerovnyy N. et al.* ISS — test bed for the future solar sail systems (IAC-12, B3, 3, 10, x14760) // Proc. 63rd Intern. Astronautical Congress. Naples, Italy, 2012. P. 3955–3966.
- Mayorova V., Tenenbaum S., Rachkin D. et al.* Space experiment “BMSTU-Sail” (IAC-13, E2, 4, 9, x18372) // Proc. 64th Intern. Astronautical Congress. Beijing, China, 2013. P. 10157–10165.
- Mayorova V., Popov A., Nerovnyy N. et al.* (2014a) ISS-Based Solar Sail Deployment Experiment “BMSTU-Sail”, *Advances in Solar Sailing*. Berlin; Heidelberg: Springer Praxis Books, 2014. P. 169–182.
- Mayorova V., Popov A., Nerovnyy N. et al.* (2014b) Two-Blade Solar Sail Dynamics, *Advances in Solar Sailing*. Berlin; Heidelberg: Springer Praxis Books, 2014. P. 717–735.
- Mayorova V., Nerovnyy N., Rachkin D. et al.* Current status of BMSTU-Sail space experiment (IAC-15, E2, 4, 5, x30386) // Proc. 66th Intern. Astronautical Congress. Jerusalem, Israel, 2015. P. 10157–10165.
- McInnes C. R.* *Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications*. Springer Science and Business Media, 2004.
- Rachkin D., Tenenbaum S., Dmitriev A. et al.* 2-blades deploying by centrifugal force solar sail experiment (IAC-11, E2, 3, 8, x9437) // Proc. 62nd Intern. Astronautical Congress. Cape Town, South Africa, 2011. P. 9128–9142.
- Ridenoure R., Munakata R., Diaz A. et al.* LightSail Program Status: One Down, One to Go // *AIAA/USU Conf. Small Satellites*, 2015.
- Ridenoure R. W., Munakata R., Wong S. D. et al.* Testing The LightSail Program: Advancing Solar Sailing Technology Using a CubeSat Platform // *J. Small Satellites*. 2016. V. 5(2). P. 531–550.
- Tsander F.A.* From a scientific heritage / Transl. of “Iz Nauchnogo Naslediya”. Moscow: Nauka, 1967. NASA Technical Translation No. TTF-541. Washington DC: NASA, 1967. 104 p. (Цандер Ф. А. Из научного наследия. М.: Наука, 1967. Техн. перевод НАСА: Цандер, Фридрих Артурович (1969). Из научного наследия. Вашингтон, округ Колумбия.)
- Tsuda Y., Mori O., Funase R. et al.* Flight status of IKAROS deep space solar sail demonstrator // *Acta Astronautica*. 2011. V 69(9–10). P. 833–840.
- Wilkie W.K., Warren J., Horta L.G. et al.* Recent Advances in Heliogyro Solar Sail Structural Dynamics, Stability, and Control Research // 2nd AIAA

Spacecraft Structures Conf. 2014. Article AIAA 2015-0431. <https://doi.org/10.2514/6.2015-0431>.

Yamaguchi T., Mimasu Y., Tsuda Y. et al. Trajectory analysis of small solar sail demonstration spacecraft IKAROS considering the uncertainty of solar radiation pressure // Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan. 2010. V. 8(27). P. 37–43.

EDUCATIONAL SPACE EXPERIMENT “BMSTU-SAIL” — PRELIMINARY RESULTS

D. A. Rachkin, V. I. Mayorova, S. M. Tenenbaum, V. G. Melnikova
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: picosatellite, solar sail, large-sized deployable structures

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УЧЁТА УХОДЯЩЕГО ОТ ЗЕМЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРИХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ ОРБИТАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ «АЛЬБЕДО»

Д. Н. Рулев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: российский сегмент Международной космической станции, солнечные батареи, приход электроэнергии, оценка эффективности солнечных батарей, уходящее от Земли излучение, альbedo

При управлении и целевом использовании орбитальных космических аппаратов (КА) возникает задача расчёта величины тока, генерируемого солнечными батареями (СБ) КА, при этом точность расчёта тока СБ влияет на решение исходной целевой задачи. В 2010–2020 гг. на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) выполнен космический эксперимент (КЭ) «Альbedo», в рамках которого осуществлена отработка технологии учёта излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность» при моделировании работы системы электропитания РС МКС (Рулев, 2021; Rulev, Spirin, 2022).

С учётом основных факторов, обуславливающих переменность тока от СБ орбитального КА, для оценки эффективности СБ используем параметр $EF(B_{\text{const}})$, определяемый как ток, который генерируют СБ за счёт освещения лицевой поверхности СБ солнечным излучением эталонной яркости B_{const} под прямым углом к плоскости поверхности СБ. В качестве B_{const} используем значение солнечной постоянной $1360,8 \pm 0,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (Корр, Lean, 2011). Ток СБ рассчитываем как сумму составляющих, генерируемых за счёт освещения лицевой и тыльной сторон СБ излучением Солнца и излучением, уходящим от Земли:

$$I = \frac{B_{\text{тек}}}{B_{\text{const}}} \left\{ \sum_j K_j \left[P_j \cos \alpha_j + K_T P_j^* \cos(\pi - \alpha_j) \right] + \sum_{j,k} K_j \frac{\theta_k d_k \sin h_k}{\pi} \left[P_{jk} \cos \alpha_{jk} + K_T P_{jk}^* \cos(\pi - \alpha_{jk}) \right] \right\},$$

где $B_{\text{тек}}$, B_{const} — текущее и эталонные значения интенсивности солнечного излучения на орбите КА; K_j — коэффициент генерации тока от освещения лицевой поверхности j -го элемента фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) СБ; K_T — коэффициент эффективности тыльной поверхности ФЭП относительно лицевой поверхности ФЭП СБ; P_j , P_j^* — освещённая Солнцем площадь лицевой и тыльной поверхностей j -го элемента ФЭП СБ; α_j — угол между направлением на Солнце и нормалью к лицевой поверхности j -го элемента ФЭП СБ; θ_k — телесный угол, под которым k -я ячейка Земли видна с КА; d_k — коэффициент диффузного отражения k -й ячейки Земли (значение двулучевой функции отражения BRF); h_k — угол высоты Солнца в k -й ячейке Земли; P_{jk} , P_{jk}^* — освещённая излучением от k -й ячейки Земли площадь лицевой и тыльной поверхности j -го элемента ФЭП СБ; α_{jk} — угол между направлением от КА на k -ю ячейку Земли и нормалью к лицевой поверхности j -го элемента ФЭП СБ.

Рулев Дмитрий Николаевич — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, dmitry.rulev@rsce.ru

Интенсивность уходящего от Земли излучения получаем по калиброванным данным видимых каналов спектра аппаратуры геостационарных метеорологических спутников Meteosat и «Электро-Л», а при их отсутствии альbedo ячеек Земли принимаем равным среднему альbedo Земли 0,29 (Stephens et al., 2015).

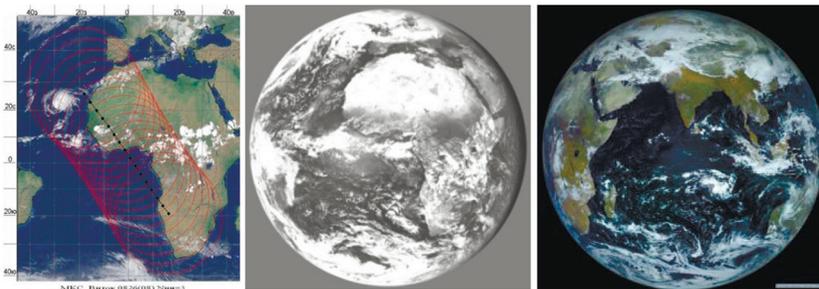


Рис. 1. Линии видимого с орбиты МКС горизонта на поверхности Земли (слева) и изображения каналов видимого диапазона аппаратуры SEVIRI спутников Meteosat (в центре) и аппаратуры МСУ-ГС спутников «Электро-Л» (справа)

Коэффициенты генерации тока находим из условия минимизации отличия расчётного тока СБ от ТМИ

$$\|\mathbf{F}(\mathbf{x})\|^2 = \sum_{i=1}^n (I_i^{\text{ТМИ}} - I_i(\mathbf{x}))^2 \rightarrow \min,$$

где $I_i^{\text{ТМИ}}$ — измеренное значение тока СБ на момент t_i ; $I_i(\mathbf{x})$ — модельное значение тока СБ под воздействием прямого солнечного и уходящего от Земли излучений на момент t_i ; \mathbf{x} — вектор определяемых параметров. Задачу решаем с использованием итерационного метода Ньютона – Гаусса (Гилл и др., 1985).

Для реализации данной расчётной схемы сбор ТМИ тока СБ необходимо выполнять на интервале наличия с метеорологических спутников калиброванных измерений яркости всей видимой с КА освещённой подстилающей поверхности. Для обеспечения определения эффективности тыльной поверхности СБ дополнительно выполняем режим ориентации тыльной поверхности СБ на Солнце. Для обеспечения определения эффективности отдельных СБ по ТМИ суммарного тока СБ режимы ориентации лицевой и тыльной поверхности СБ на Солнце выполняем для необходимого числа различных комбинаций лицевой и тыльной поверхностей разных СБ (Спирин, Рулев, 2022).

Используем следующие модели учёта альbedo Земли при расчёте тока СБ.

А (учёт альbedo Земли путём завышения коэффициентов генерации тока) — расчёт тока СБ только с учётом освещения СБ прямым излучением Солнца, при этом применяются значения коэффициентов генерации тока, завышенные относительно точных фактических значений коэффициентов генерации тока и определяемые из условия получения расчётных значений тока по модели А, максимально близких к значениям тока по модели В;

В (учёт среднего альbedo Земли) — применяются характеристики среднего альbedo Земли ко всем ячейкам поверхности Земли;

С (учёт альbedo ячеек Земли) — к ячейкам поверхности Земли применяются индивидуальные характеристики альbedo;

Д (альbedo Земли равно 0) — расчёт тока СБ только от излучения Солнца с применением фактических значений коэффициентов генерации тока, определённых для моделей В и С.

Модели В и С обеспечивают высокоточный прогноз прихода электроэнергии с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения. Модели А и D обеспечивают прогноз прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полёта КА (модель А даёт ожидаемый приход электроэнергии, модель D даёт гарантированный максимум, не превышающий фактический приход).

Коэффициенты генерации тока для модели А x^A определяются из условия минимизации отличия расчётных токов СБ, полученных по моделям А и В

$$\|F(x^A)\|^2 = \sum_{i=1}^n (I_i^A(x^A) - I_i^B(x^B))^2 \rightarrow \min,$$

где $I_i^A(x^A)$, $I_i^B(x^B)$ — значения тока СБ на момент t_i по моделям А и В; x^B — используемые в модели В фактические значения коэффициентов генерации тока от освещения лицевой и тыльной поверхностей СБ.

На рис. 2 представлены результаты анализа данных замеров тока СБ служебного модуля (СМ) РС МКС в сеансах оценки эффективности СБ СМ за весь период эксплуатации МКС и полученные по результатам выполнения на РС МКС КЭ «Альbedo» значения параметра $EF(B_{const})$ оценки эффективности СБ СМ.

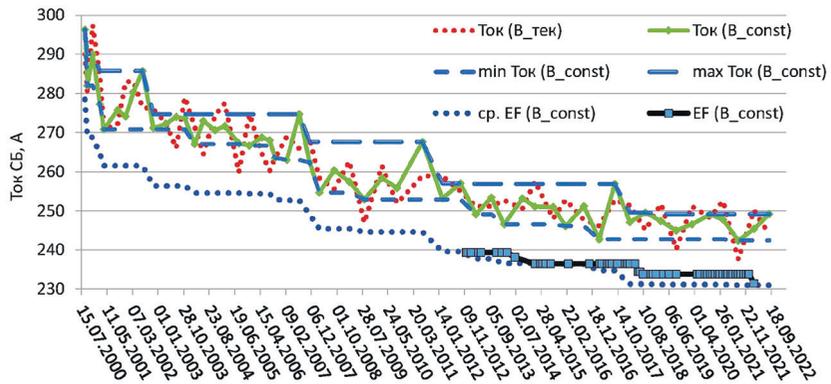


Рис. 2. Результаты анализа данных замеров тока СБ в сеансах оценки эффективности СБ СМ РС МКС за весь период эксплуатации МКС: Ток($B_{тек}$) — данные замера тока СБ (соответствуют текущей яркости Солнца $B_{тек}$); Ток(B_{const}) — ток СБ, пересчитанный к условию освещения СБ световым потоком эталонной яркости B_{const} ; min/max Ток(B_{const}) — нижняя и верхняя границы значений Ток(B_{const}) от начала полёта до текущего момента

На рис. 2 также показан график значений $EF(B_{const})_{cp}$ — среднее оценочное значение параметра эффективности СБ СМ, получаемое путём вычитания из средне-арифметической величины граничных значений min/max Ток(B_{const}) среднего значения составляющей тока СБ, которая генерируется (при штатной ориентации СБ в режиме слежения за Солнцем) за счёт освещения тыльной поверхности СБ уходящим от Земли излучением, с последующим увеличением результата на величину, компенсирующую уменьшение измеренного тока СБ из-за отклонения поступающего на СБ солнечного светового потока от нормали к лицевой поверхности СБ:

$$EF(B_{\text{const}})_{\text{cp}} = \frac{\min \text{Ток}(B_{\text{const}}) + \max \text{Ток}(B_{\text{const}})}{2} \cdot \frac{1 - K_z / 100\%}{\cos \theta_s},$$

где K_z (%) — средняя величина в суммарном токе СБ СМ, измеренном в сеансе оценки эффективности СБ составляющей тока, которая генерируется за счёт освещения тыльной поверхности СБ уходящим от Земли излучением, соответствующим среднему альбедо Земли 0,29, с применением номинального паспортного значения коэффициента относительной эффективности тыльной поверхности СБ СМ $K_T = 0,38$ (для конфигурации РС МКС в составе с многофункциональным лабораторным модулем «Наука» $K_z \approx 7,45\%$); $Q_s = 10^\circ$ — среднее отклонение солнечного светового потока от нормали к лицевой поверхности СБ СМ в сеансе оценки эффективности СБ.

Расчёт $EF(B_{\text{const}})_{\text{cp}}$ выполняется в рамках экспресс-обработки данных выполненного сеанса оценки эффективности СБ СМ и предусматривает расчёт точных значений параметра $EF(B_{\text{const}})$.

Анализ точности моделей С и В в зависимости от шага разбиения поверхности Земли на ячейки показал, что в штатном полёте достаточная точность (среднеквадратическое отклонение СКО $\leq 0,1$ А,

$\max |\Delta I| \leq 0,5$ А) достигается при шаге $\leq 3^\circ$ для модели В и $\leq 2^\circ$ для модели С. При отворотах СБ от Солнца указанная точность достигается с шагом $\leq 2^\circ$ для модели В и с шагом 1° для модели С.

Анализ зависимости точности модели С от состава данных и варианта совместного использования данных по каждой ячейке подстилающей поверхности с двух метеорологических спутников (спутники Meteosat — точки стояния 0 и $41,5^\circ$ в.д., спутники «Электро-Л» — точки стояния $14,5^\circ$ з.д. и 76° в.д.) показал, что наименьшее СКО расчётного тока СБ от данных ТМИ даёт использование осреднённых данных видимых спектральных каналов аппаратуры спутника и осреднённых данных с двух спутников.

Таким образом, в результате реализации КЭ разработана технология учёта уходящего от Земли излучения при анализе результатов проведения сеансов оценки эффективности СБ модулей РС МКС и при прогнозировании прихода электроэнергии от СБ РС МКС; разработаны рекомендации по режимам управления СЭП РС МКС с учётом возможностей генерации электроэнергии под воздействием уходящего от Земли излучения. Получены обоснованные значения сформулированного параметра оценки эффективности СБ СМ, при этом наряду с получением оценки суммарной эффективности СБ СМ представленная методика обеспечивает получение оценок эффективности отдельно для каждой СБ. Использование данного параметра оценки эффективности СБ позволяет осуществлять максимально точный контроль эффективности СБ модулей РС МКС.

Предложенные расчётные схемы позволяют выполнять как высокоточный расчёт прихода электроэнергии от СБ КА с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения, так и расчёт прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полёта. Методология применима для СБ КА на околоземной и окололунной орбите.

Литература

- Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 с.
- Рулев Д. Н. Учет уходящего от Земли излучения в модели системы электропитания российского сегмента Международной космической станции // Изв. РАН. Энергетика. 2021. № 4. С. 90–102.

- Спирин А. И., Рулев Д. Н.* Способ оценки эффективности солнечных батарей системы электропитания аппарата, преимущественно космического. Патент на изобретение РФ № 2784977. Бюл. № 34 от 01.12.2022.
- Kopp G., Lean J. L.* A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38. Article L01706. DOI: 10.1029/2010GL045777.
- Kopp G., Lawrence G., Rottman G.* The Total Irradiance Monitor (TIM): Science results // *Solar Physics*. 2005. V. 230. P. 129–139. DOI: 10.1007/s11207-005-7433-9.
- Rulev D. N., Spirin A. I.* Evolution of the performance monitoring techniques for solar arrays of the service module Zvezda within the ISS Russian segment over the course of its orbital flight // *Acta Astronautica*. 2022. V. 198. P. 680–688. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.06.036>.
- Stephens G. L., O'Brien D., Webster P.J. et al.* The albedo of Earth // *Reviews of Geophysics*. 2015. V. 53. No. 1. P. 141–163. DOI: 10.1002/2014RG000449.

DEVELOPING METHOD FOR TAKING INTO ACCOUNT THE RADIATION COMING FROM EARTH IN SIMULATIONS OF INCOMING ELECTRIC POWER FROM THE SOLAR BATTERIES OF THE ORBITAL SPACE VEHICLE IN SPACE EXPERIMENT “ALBEDO”

D. N. Rulev

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Moscow, Russia

Keywords: Russian Segment of the International Space Station, solar arrays, electric power input, solar array performance estimate, radiation coming from the Earth, albedo

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО АССИСТЕНТА КОСМОНАВТА. КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «АССИСТЕНТ»

Д. Н. Рулев¹, С. И. Ашманов²

¹ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, Королёв, Московская обл., Россия

² ООО «Лаборатория Наносемантика», Москва, Россия

Ключевые слова: голосовой ассистент, темы взаимодействия, условия космического полёта, частотно-акустические характеристики речи, распознавание речи

В настоящее время в рамках космического эксперимента «Ассистент» осуществляется подготовка создания виртуального (голосового) ассистента космонавта. Решаемыми задачами являются (Рулев, 2022):

- разработка и отработка сопровождения в полете программного обеспечения (ПО) виртуального ассистента космонавта, включая тематики: планы работ, бортовые инструкции, логистика и инвентаризация, управление операциями, психологическая поддержка;
- выполнение экспериментальных исследований и отработка учёта влияния условий космического полёта (микрогравитация, зашумлённость, ограниченное пространство, автономность) на частотно-акустические характеристики речи, их идентификацию и распознавание содержания речи.

Виртуальный ассистент предоставляет космонавту удобный интерфейс к различным информационным материалам, документации и базам данных. Потребность в данной технологии обусловлена как существенной нагрузкой на зрительный анализатор в ходе выполнения космонавтом полётной программы, так и большим объёмом используемой на борту информации. В тоже время, в условиях сенсорной депривации и монотонности использование космонавтом аудиальной информации по запросу может составлять существенный резерв психологической поддержки.

Проблематика исследования обусловлена тем, что частотно-акустические характеристики речи могут изменяться в условиях микрогравитации (по-разному при нахождении внутри герметичного отсека КА и в ходе внекорабельной деятельности), в частности, по причине перераспределения жидких сред (которое затрагивает и речевой аппарат), а также космической болезни движения; на распознавание содержания и идентификацию речи существенно влияет повышенная зашумлённость на КА (вследствие работы систем вентиляции) и специфика ограниченного пространства (объёма отсеков КА и/или скафандра) (Лебедева и др., 2020; Рулев, 2022). Фактор автономности космонавта в условиях космического полёта требует, чтобы вычислительное устройство, решающее указанные задачи, располагалось непосредственно на борту КА, с возможностью передачи файлов между Землёй и КА не в режиме реального времени.

Основные зарубежные исследования в данном направлении представлены проектами спутника-робота Astrobeе (реализуется NASA) и спутника-ассистента CIMON (*англ.* Crew Interactive MOBILE Companion), Интерактивный мобильный помощник экипажа, реализуется под эгидой ESA). Спутник-робот Astrobeе оснащается

Рулев Дмитрий Николаевич — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, dmitry.rulev@rsce.ru

Ашманов Станислав Игоревич — генеральный директор, ashmanov@nanosemantics.ai

компьютерной системой, которая должна обеспечить астронавтов возможностью коммуникации друг с другом и предоставлять необходимую справочную информацию по выполняемым работам. Спутник-ассистент SIMON предназначен для взаимодействия с астронавтами с возможностью распознавать голоса и выражения лиц, предполагается, что программное обеспечение спутника будет обеспечивать понимание контекста и поддерживать живой динамичный диалог с космонавтом.

Программное обеспечение ассистента создаётся на базе информационной системы (ИС) для разработки интеллектуальных виртуальных ассистентов Dialog Operating System (Dialog OS) компании ООО «Лаборатория Наносемантика» (<https://docs.dos.nanosemantics.ai>) (Рулев, Ашманов, 2023). Dialog OS включает в себя всю необходимую функциональность для создания и обучения виртуальных ассистентов, позволяющих вести коммуникацию с пользователем в различных текстовых и голосовых каналах. Как профессиональная платформа для создания интеллектуальных голосовых и текстовых роботов/ассистентов в веб-интерфейсе Dialog OS обеспечивает:

- эффективное использование управляемого машинного обучения,
- разработку развёрнутых сценариев диалога,
- работу с произвольными естественными языками,
- визуальный конструктор ответов ассистента,
- инструментарий для разметки намерений и сущностей,
- инструменты коллективной разработки, включая версионирование,
- разработку базы данных, с которыми может работать НЕ программист,
- голосовой ввод сообщений и синтез речи,
- тестирование по ходу разработки,
- управление пользователями и правами.

Информационная модель использования Dialog OS в эксперименте представлена на рис. 1. Входящий запрос от Диалоговой Платформы обрабатывается сервисами, входящими в состав Dialog OS, результатом чего является ответное сообщение, отправляемое в Диалоговую Платформу (Ашманов и др., 2021); информация по обработанному сообщению сохраняется сервисом журналирования в базе данных.



Рис. 1. Информационная модель использования Dialog OS в космическом эксперименте «Ассистент»

В Dialog OS в качестве обучающего материала для построения автоматизированных диалогов используются: наборы примеров входящих запросов (на них обучается нейронная сеть), наборы примеров с разметкой объектов и их наименований (для распознавания сущностей — Named Entities Recognition), наборы правил на специализированном языке Dialog language (DL) — языке для описания правил и эвристик анализа запроса пользователя и формирования ответа

системы. Данные, описанные на языке DL, и наборы примеров запросов для обучения нейросетей формируют Базу знаний виртуального ассистента. Для работы Базой знаний используется специальное программное обеспечение — диалоговый процессор. Диалоговый процессор получает на вход очередную реплику пользователя, а на выходе формирует ответ системы.

Для разработки ПО виртуального ассистента космонавта по темам планов и логистики/инвентаризации предполагается использовать текущие данные суточных планов и системы инвентаризации РС МКС; по темам инструкций и управления операциями — данные текущих бортовых инструкций и текущих операций на РС МКС; по непроизводственной тематике — разнообразными бытовые темы.

В ходе наземной подготовки к полёту (а также после выполнения полёта) будут выполняться наземные сеансы по взаимодействию космонавта с ПО виртуального ассистента космонавта.

В сеансах эксперимента на борту РС МКС космонавт будет эксплуатировать ПО виртуального ассистента и выполнять его оценивание (в соответствии с методикой выполнения эксперимента). Полученные на борту массивы данных будут передаваться на Землю (по линиям связи). С Земли на борт будут передаваться файлы версий ПО виртуального ассистента и данные для работы ПО (исходное ПО — на носителе информации, далее — по линиям связи). По результатам обработки и анализа данных, полученных в сеансах эксперимента, будет осуществляться настройка системы в части обеспечения идентификации и распознавание содержания речи в условиях космического полёта, а также уточняться методика взаимодействия космонавта с ПО виртуального ассистента.

На рис. 2 показан пример расположения на РС МКС бортового компьютера, который планируется использовать для размещения программного обеспечения ассистента космонавта. Если экран компьютера не используется космонавтом для получения иной информации, то на нём предполагается отображать текст диалога с графическим изображением образа ассистента. На рисунке представлен вариант графического изображения ассистента «Лучик», который используется для тестирования разрабатываемого программного обеспечения.

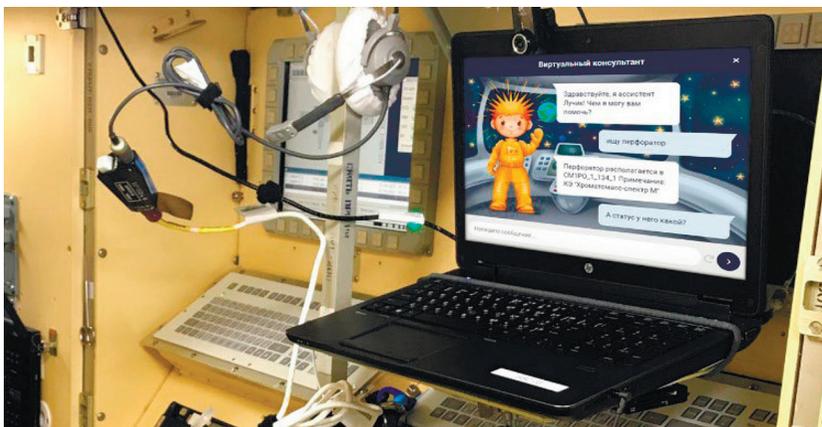


Рис. 2. Пример размещения на РС МКС бортового компьютера с программным обеспечением ассистента космонавта

Решение поставленных в настоящей работе задач позволит подготовить штатное использование голосовых технологий на РС МКС и перспективной космической станции.

Литература

- Ашманов С. И., Сухачев П. С., Зоркий Ф. К.* Способ управления диалогом и система понимания естественного языка в платформе виртуальных ассистентов. Патент на изобретение РФ № 2759090. Бюл. № 31 от 09.11.2021.
- Лебедева С. А., Швед Д. М., Гуцин В. И.* Возможности компьютерного анализа акустических характеристик речи человека-оператора в условиях космического полета // Пилотируемые полеты в космос. 2020. V. 3(36). P. 109–24. <https://doi.org/10.34131/MSF.20.3.109-124>.
- Рулев Д. Н., Швед Д. М., Ашманов С. И.* Разработка виртуального ассистента космонавта // Материалы 57-х Науч. чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. СПб.: Изд-во «Эйдос». 2022. С. 181–185.
- Рулев Д. Н., Ашманов С. И.* Подход к разработке программного обеспечения виртуального ассистента космонавта // Современные проблемы ракетной и космической техники: сб. ст. Казань: Редакционно-изд. центр «Школа», 2023. С. 182–190.

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL ASSISTANT FOR A COSMONAUT. SPACE EXPERIMENT “ASSISTANT”

D. N. Rulev¹, S. I. Ashmanov²

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Moscow, Russia

² Nanosemantics Laboratory LLC, Moscow, Russia

Keywords: voice assistant, interaction tasks, spaceflight environment, speech frequency-acoustic properties, speech recognition

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РЕГУЛЯЦИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ В КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЁТЕ

В. Б. Русанов, Е. С. Лучицкая, А. Г. Черникова, И. И. Фунтова

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: космический полет, космонавты, сердечно-сосудистая система, механизмы регуляции, адаптация

В космическом полёте (КП) наблюдаются характерные изменения вегетативного баланса и активности различных звеньев сегментарного и надсегментарного уровней управления, обеспечивающие процесс адаптации организма к условиям длительной невесомости. Вместе с этим, на каждом этапе полёта формируется тип управления функциональными резервами организма, который во многом определяет вероятную реакцию космонавта в ответ на нагрузку и направленность адаптационной реакции в поддержании гомеостаза. Эти процессы изучались начиная с первых КП.

С началом функционирования Международной космической станции (МКС) была запланирована серия экспериментов, которые выполнялись на российском сегменте. В эту серию вошли пять экспериментов: «Пульс» (2002–2007), «Пневмокард» (2007–2012), «Сонокард» (2007–2012), «Космокард» (2014–2019) и «Кардиовектор» (с 2014 г. по настоящее время). Эти эксперименты имеют общую концепцию и планировались как последовательные этапы изучения регуляторных механизмов и их взаимосвязи со всеми структурными компонентами сердечно-сосудистой системы (ССС). Для количественной оценки приспособительных эффектов системы регуляции в этих экспериментах использовался метод анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР), поскольку показатели ВСР отражают активность различных контуров регуляторного механизма.

Для обобщения полученного объёма данных невозможно использовать стандартные статистические подходы. Это обусловлено сугубо индивидуальным характером адаптационных реакций космонавтов, что связано с наличием различных индивидуальных типов вегетативной регуляции и различиями в программах полётов. Достаточный объём полётных материалов позволяет проводить расчёт средних значений — т. е. выявление общей направленности всей выборки, но на наш взгляд более важным представляется работа по выявлению диагностических критериев для индивидуальной оценки степени адаптации каждого космонавта, поскольку даже в условиях одного космического полёта показатели двух космонавтов, участвующих в нём, существенно различаются.

На основе анализа ВСР в космической медицине был разработан подход к оценке здоровья, сущность которого состоит в том, что здоровье рассматривается как процесс непрерывного приспособления организма к условиям окружающей среды, а мерой здоровья становятся адаптационные (приспособительные) возможности организма.

Русанов Василий Борисович — заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, доцент, rusvb@imbp.ru
Лучицкая Елена Сергеевна — ведущий научный сотрудник лаборатории регуляции кардио-респираторной системы, кандидат биологических наук, elucitskaya@gmail.com

Черникова Анна Григорьевна — старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, anna.imbp@mail.ru

Фунтова Ирина Исаевна — ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, funtova.imbp@mail.ru

Переход от здоровья к болезни связан со снижением адаптационных возможностей организма, с уменьшением способности адекватно реагировать даже на обычные повседневные нагрузки. При этом на границе между здоровьем и болезнью возникает целый ряд переходных состояний, которые зачастую сложно выявить традиционными методами.

При обследовании различных групп лиц с разными функциональными состояниями была разработана математическая модель для оценки функционального состояния организма по данным анализа вариабельности сердечного ритма. Модель представляет собой систему из двух уравнений дискриминантной функции, первое из которых отражает степень напряжения регуляторных систем (СН), второе — их функциональный резерв (ФР). Значения ФР и СН рассматриваются как координаты фазовой плоскости, образующей пространство функциональных состояний.

Для более надёжной и точной идентификации таких переходных состояний был предложен вероятностный подход к оценке ФС, позволяющий определить вероятность различных функциональных состояний и риск перехода из одного в другое

Высокая вероятность означает высокий риск появления определённого события. В нашем случае речь идёт о развитии последовательно донозологических, преморбидных и патологических состояний.

Следует отметить, что присущий каждому космонавту тип регуляции в условиях невесомости сохраняется и в последующих полётах. Это заключение было сделано при анализе материалов.

В рамках перечисленных экспериментов на МКС были проведены исследования по изучению зависимости индивидуальных исходных параметрами вегетативной регуляции и влиянием факторов космического полёта на послеполётную ортостатическую устойчивость с целью прогнозирования возможных реакций организма членов экипажа при возвращении на Землю.

Оказалось, что космонавты, попавшие в группу с низкой ортостатической устойчивостью, имели более высокие показатели спектральных показателей ВСР и низкий индекс централизации при обследовании до полёта. Следовательно, данные предполётного ортостатического тестирования могут быть использованы для прогнозирования снижения ортостатической устойчивости после космического полёта. Дальнейшее изучение этих взаимозависимостей необходимо для прогнозирования возможных ортостатических нарушений у космонавтов ещё до старта.

Ещё одно направление исследований в рамках использования анализа ВСР — оценка зависимости состояния процессов регуляции от статуса в космическом экипаже. Проанализированы члены космических экипажей, проводивших свой полёт в качестве бортинженеров или командиров МКС и показано, что в условиях полёта эти группы достоверно отличаются по большинству показателей ВСР (а именно у командиров более выражены симпатические модулирующие влияния) по сравнению с до полётными данными, когда между группами не было выявлено достоверных отличий.

Принципиально новым направлением использования метода анализа ВСР в космических исследованиях представляется их применение для изучения сна космонавтов. Первый опыт таких исследований был получен ещё в 1990-х гг. при выполнении совместного Российско-австрийского эксперимента «Ночь» на борту орбитальной станции «Мир». В 2000-е гг. был подготовлен и проведён на МКС новый космический эксперимент «Сонокард», а затем эксперимент «Космокард».

Систематические исследования функционального состояния организма во время сна в условиях длительной невесомости проводились впервые, а данные, полученные ночью, в отсутствие рабо-

чих нагрузок и психоэмоционального напряжения, которое всегда присутствуют при выполнении дневных рабочей нагрузки, на наш взгляд, представляют особую ценность.

При обсуждении результатов можно говорить об общих тенденциях на основании средних значений, полученных у всех космонавтов. Достоверным становится снижение частоты дыхания во время длительного 6-месячного пребывания в условиях невесомости, со второго месяце полёта отмечается статистически достоверное уменьшение двигательной активности космонавтов во время сна. Большого внимания заслуживает противофазная динамика показателей спектральной мощности ВСР, что отражает постепенное смещение вегетативного баланса в сторону увеличения активности симпатических влияний и повышение активности подкоркового центра регуляции сосудистого тонуса. Однако у каждого из космонавтов был свой индивидуальный тип реагирования на воздействие факторов длительного космического полёта, что ещё раз указывает на необходимость персонализированного подхода.

Чтобы убедиться в возможности оценки качества сна по показателям вариабельности сердечного ритма на базе клиники профессора А. В. Вейна были проведены специальные сравнительные исследования с использованием общепризнанного клинического метода полисомнографии.

Показана высокая корреляционная взаимосвязь между полисомнографическими данными, такими как индекс сна, длительность стадии быстрого сна, число циклов сна и др., и показателями ВСР, которые характеризуют активность симпатической и парасимпатической ветвей регуляции. Как известно, во время сна усиливается активность парасимпатической системы, которая минимизирует расходование функциональных ресурсов организма и содействует их восстановлению. Защитно-восстановительная функция парасимпатической системы очень важна для людей, выполняющих свою профессиональную деятельность в условиях стрессорного воздействия факторов окружающей среды. Поэтому в дальнейшем результаты анализировались по разностным значениям показателей в начале и в конце периода сна.

Признаками эффективного восстановления являются снижение симпатических модулирующих влияний и рост активности парасимпатической ветви регуляции. В ходе полёта у каждого космонавта отмечалось определённое число ночей с адекватной и с неадекватной динамикой показателей вегетативного баланса. Условно можно оценить качество сна за весь полёт соотношением числа ночей с адекватным изменением вегетативного баланса в процентах к общему числу проведённых исследований. Этот показатель был назван среднополётным показателем качества сна (СПКС). Как показали исследования, среднее значение СПКС для всех обследованных нами членов экипажей МКС составило 77,4 %. Но это лишь средняя цифра. Индивидуальные данные показывают, что эффективность процессов восстановления может быть связана с индивидуальным типом вегетативной регуляции. Следует отметить, что по нашим данным наиболее высоким качеством сна отличались космонавты с доминирующими парасимпатическими влияниями.

Кроме того, нами были проведены исследования возможности использования оценки функционального состояния организма по данным ВСР в ночное время для оценки процессов восстановления после выполнения работ в открытом космосе. Эти работы связаны с большой физической и психоэмоциональной нагрузкой для космонавтов, поэтому важно знать резервные возможности организма перед выходом в космос и после возвращения обратно в станцию. Последнее важно как для оценки степени утомления космонавта и его энергетических затрат на выполнение рабочих операций, так и для определения возможности его последующей внекорабельной деятельности (ВКД).

Исследование проводилось в первую ночь после работы в открытом космосе и сравнивалось с данными, полученными в плановом порядке за 3–10 дней до ВКД. Показано, что функциональное напряжение, обусловленное снижением функциональных резервов организма, возникало у всех космонавтов, но проявлялось в разной степени в зависимости от индивидуальных особенностей. По-видимому, здесь имеет значение запас функциональных резервов, которые постепенно истощаются во время полёта. Возможно, поэтому функциональное напряжение тем выше, чем больше срок пребывания в условиях невесомости.

Показано, что ВКД требует высокого напряжения регуляторных систем и ведут к значительному расходу функциональных резервов. После второго и третьего выхода направленность изменений показателей ВСР аналогична, но изменения более выражены и во многих случаях достоверны. Таким образом, важно отметить, что при повторных ВКД утомление в организме накапливается и каждый последующий выход в открытый космос требует все большего напряжения регуляторных систем.

Результаты исследований на МКС показали, что в условиях длительного действия стрессорных факторов КП происходит постоянная активная работа механизмов регуляции по сохранению стабильности основных жизненно важных систем организма.

Полученные материалы составляют обширную базу данных, которая позволяет говорить об индивидуальном характере адаптационных реакций членов экипажей и необходимости развития персонализированной оценки функционального состояния организма на разных этапах космического полёта.

Этот сам по себе уникальный опыт целенаправленных научных исследований в космосе в течение практически всего периода функционирования МКС заслуживает особого внимания не только из-за полученных ценных научных материалов, но и в плане своих методических подходов, которые могут получить продолжение и развитие в новых космических экспериментах, методах профилактики и медицинского контроля, планируемых на Российской орбитальной станции (РОС).

STUDY OF MECHANISMS OF REGULATION AND FUNCTIONAL STATE OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM IN SPACE FLIGHT

V. B. Rusanov, E. S. Lucitskaya, A. G. Chernikova, I. I. Funtova
Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: space flight, cosmonauts, cardiovascular system, regulatory mechanisms, adaptation

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ЭКИПАЖЕЙ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПИЛОТИРУЕМЫХ ЭКСПЕДИЦИЙ НА МКС

О. О. Рюмин, Ю. А. Бубеев, А. А. Поляниченко, Н. С. Суполкина

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: психофизиологическое сопровождение космонавтов, диагностика состояния, полиэтнический смешанный экипаж

Проблема психофизиологического сопровождения экипажей длительных пилотируемых экспедиций на Международной космической станции (МКС) занимает одно из важнейших мест как в общей системе научных знаний о состоянии психического здоровья и работоспособности человека в условиях необычной среды жизнедеятельности, так и в обеспечении безопасности полётов и сохранении профессионального долготелетия космонавтов. Ныне действующая эффективная система психофизиологического сопровождения космонавтов в полёте за многие годы своего существования развивалась и совершенствовалась в строгом соответствии с динамикой изменения продолжительности и задач пилотируемых миссий (от первых полётов человека в космос до длительных экспедиций на борту орбитальных научных комплексов «Салют», «Мир» и МКС).

Организационно-методическая структура психофизиологического сопровождения космических экипажей МКС служит для предупреждения и профилактики возникновения психоэмоциональных нарушений, контроля за поведением и работоспособностью космонавтов на различных участках полёта с целью обеспечения эффективного и безопасного выполнения его программы. Традиционно анализ психологического состояния космонавта во время полёта осуществляется специалистами группы медицинского обеспечения Главной оперативной группы управления полётом в Центре управления полётами (ГМО ГОГУ ЦУП) и включает три основных направления: психологическое сопровождение экипажа, мониторинг режима труда и отдыха космонавтов, а также психологическую поддержку. Методология, используемая при проведении медицинского контроля, который включает психофизиологический мониторинг состояния человека, определяется не только потребностями контроля состояния здоровья, работоспособности, функциональных резервов, проведения диагностики неблагоприятных состояний и заболеваний в космическом полете, но и в значительной степени техническими возможностями и ограничениями, связанными с дистанционной диагностикой и получением необходимой и достаточной для этой цели клинико-физиологической информации. В конечном итоге эта проблема решается на основе более или менее оптимального компромисса между медицинскими потребностями и техническими возможностями их реализации. В рамках клинико-психологического подхода применяются методы получения информации о состоянии членов экипажа, которые включают фиксацию времени, потраченного на переговоры космонавтов по линии борт – Земля по рабочей и нерабочей тематике, а также её оценку по ряду показателей (эмоциональная сфера, сон, самочувствие, депривационные феномены, профессиональная деятельность, групповое взаимодействие и т. д.).

Рюмин Олег Олегович — заведующий лабораторией, кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, ryumin@imbp.ru

Бубеев Юрий Аркадьевич — заместитель директора, доктор медицинских наук, профессор

Поляниченко Алексей Александрович — младший научный сотрудник

Суполкина Наталья Сергеевна — младший научный сотрудник

На основе анализа этих материалов формируется недельное заключение, которое наряду с заключениями других специалистов группы (по режиму труда и отдыха, психологической поддержке), включается в общее медицинское заключение ГМО о состоянии здоровья каждого члена экипажа МКС на орбите. Следует особо подчеркнуть, что одним из важнейших на данный момент источником диагностических данных остаются переговоры космонавтов и ЦУП, которые оцениваются по отдельным параметрам и требуют больших временных затрат. В будущем при выполнении задач психофизиологического обеспечения перспективных программ для получения большего диапазона психологических данных, осуществления более глубокого анализа психоэмоционального состояния человека во время космического полёта на борту перспективной российской станции РОС, а также вне низких орбит необходимо обеспечить учёт и других информативных параметров. К числу их целесообразно отнести: интенсивность рабочей нагрузки, структурное содержание текущих работ, выполняемых космонавтами, количества и качества отдыха и других. При этом необходимо обеспечить автоматизацию процесса сбора, обработки и анализа исследуемых и оцениваемых параметров для оперативного принятия решения специалистами ГМО ГОГУ непосредственно на своём рабочем месте в ЦУП.

Психодиагностика представляется важным и неотъемлемым элементом сопровождения экипажа МКС. Анализ данных психофизиологического сопровождения всех пилотируемых экспедиций свидетельствует об отсутствии достоверных признаков негативных отклонений со стороны психического здоровья космонавтов. Выработанная психодиагностическая методика, при которой в процессе дистанционного наблюдения активно использовалась информация, полученная по радио- и телеканалам, успешно используется в оперативной работе во время полётов орбитальной станции и позволяет сделать важные диагностические обобщения (Мясников и др., 1986, 2001).

Как показывает накопленный многолетний опыт сопровождения пилотируемых экспедиций МКС, психические изменения, отмечаемые в ходе полётов, малочисленны и однообразны. Ведущее место при этом принадлежит симптоматическим колебаниям настроения и нарушениям сна, особенно процесса перехода ко сну. Наблюдаемые симптомы можно условно определить в группу, так называемых «непсихотических нарушений» с развитием по типу двух невротических синдромов — астенического и эмоциональной лабильности. Следует подчеркнуть, что подобные симптомокомплексы имели преходящий характер, были ситуационно обусловлены и не получали в развитии завершённой клинической формы. К наиболее частым проблемам, которые встречались у космонавтов в процессе экспедиций, можно упомянуть следующие. Во-первых, превышение психофизиологических возможностей, когда отмечается недовольство величиной рабочих нагрузок, плохо спланированным графиком работ и высказываются сожаления по поводу непонимания наземной службой всей полноты реальной ситуации и обстоятельств на борту космического корабля. Всё это может сопровождаться повышенной возбудимостью, раздражительностью, конфликтностью. Во-вторых, возможны разногласия, связанные с проблемой свободного времени. При этом появляется неустойчивость интересов и запросов, понижается предсказуемость реакций на проводимые мероприятия психологической поддержки.

Позитивной особенностью функционирования психики человека в длительных полётах (чаще во второй их половине) можно отметить практически в каждой экспедиции МКС повышенную творческую активность, самостоятельность, проявление полезных инициатив, касающихся более рационального внутреннего рабочего распорядка, очередности выполнения различных видов работ

особенно у повторно летавших космонавтов. Данное явление может иметь особую значимость для организации и подготовки перспективных пилотируемых миссий вне низких орбит.

Рассматривая вопрос психофизиологического сопровождения экипажей МКС следует особо остановиться на одном важном моменте. При оценке адаптации человека в изолированных и ограниченных экстремальных условиях в дополнение к воздействию суровых условий окружающей среды было обнаружено, что социальные и профессиональные аспекты становятся одними из наиболее важных потенциальных факторов стресса, которые могут стать серьёзной проблемой для безопасности и успеха миссии. Социум МКС — это интернациональный экипаж, где люди различных национальностей, имеющие свои психологические и этнопсихологические особенности, долгое время живут и работают в ограниченном пространстве. Появление национальных сегментов в структуре станции, имеющих своих лидеров (при наличии общего командира МКС), привнесло дополнительные осложнения в процесс обеспечения и сохранения устойчивых позитивных отношений между космонавтами по причине искусственного разделения единого экипажа фактически на социумы национальных сегментов. Принципиально сейчас речь могла бы идти только о психофизиологическом сопровождении экипажа российского сегмента (РС) МКС. Однако на наш взгляд правильнее вести речь о сопровождении российских космонавтов при совместном функционировании смешанных экипажей МКС. Опыт такой работы убедительно указывает на прямую связь эффективности деятельности космонавтов на всех этапах с вопросами межнациональных отношений. Нередко эффективность всего комплекса мероприятий, составляющих космическую деятельность в целом, может зависеть от неверного построения межкультурного взаимоотношения со специалистами других народов, вовлечённых в данный процесс. Известно, что основным средством достижения взаимопонимания людей при любых видах деятельности вообще и работы космонавтов в частности служит их общение. В ходе него они проявляют себя и свою компетентность, усваивают общечеловеческий и профессиональный опыт, исторически сложившиеся общественные нормы, ценности, знания и способы деятельности. Именно в общении этническое, расовое, социальное и культурное многообразие мира открывает бесконечные возможности для взаимообогащения людей (культурного, нравственного и профессионального), а космонавту помогает в полной мере осознавать планетарную значимость своей миссии.

Одной из важнейших задач психофизиологического сопровождения длительных полётов, считается сохранение гармонии или эмоционального баланса между партнёрами в смешанном полиэтническом экипаже, т. е. способности его членов контролировать проявление своих чувств, свободно выражать эмоции, одновременно не позволяя им управлять собой. Не допускать развития негативных взаимоотношений в экипаже: от неприятия до ненависти. Чтобы избежать ошибок и противоречий в общении, коммуникации между собой, им нужно постоянно помнить о том, что «другой» — это прежде всего отличающийся от тебя, но не обязательно «чужой» и враждебный. Каждый человек сохраняет свою уникальность и самобытность, но чем глубже он станет понимать, что именно отличает людей друг от друга, тем короче будет путь к взаимопониманию, тем больше откроется возможностей для подлинного равенства в общении, основанного на взаимном уважении права каждого быть самим собой.

Ключевым элементом при этом становится отсутствие доверия, скупость в межличностных контактах и обмене информацией (иногда профессионально-значимой) с партнёрами по экипажу. Опыт психофизиологического сопровождения полётов совместных международных экипажей МКС свидетельствует о наличии на первых

этапах их подготовки проявлений недоверия между космонавтами и астронавтами разных стран, нивелируемых и полностью устранённых по мере увеличения времени совместной работы и числа неформальных контактов, в процессе которых происходит устранение языковых и межкультурных барьеров, повышение уровня межличностного взаимопонимания. При этом необходимо учитывать, что важными рисками, релевантными для командной деятельности, выступают социальная и физическая изоляция, небольшой и однообразный экипаж, задержки связи между экипажем и Землёй, продолжительность полёта и комплексного влияния факторов окружающей среды, каждый из которых влияет на координацию, сотрудничество, психологическое благополучие, командную работу и коллективную безопасность экипажа.

При оценке адаптации человека в изолированных и ограниченных экстремальных условиях, в дополнение к воздействию суровых условий окружающей среды, было обнаружено, что социальные и профессиональные аспекты являются одними из наиболее важных потенциальных факторов стресса, которые могут стать серьёзной проблемой для безопасности и успеха миссии. Социум МКС — это интернациональный экипаж, где люди различных национальностей, имеющие свои психологические и этнопсихологические особенности, долгое время живут и работают в ограниченном пространстве. Появление в структуре и организационном порядке управления полётом национальных сегментов, имеющих своих лидеров (при наличии общего командира МКС), привнесло дополнительные осложнения в процесс обеспечения и сохранения устойчивых позитивных отношений между космонавтами по причине искусственного разделения единого экипажа фактически на социумы национальных сегментов.

Несмотря на это интересы обеспечения безопасности полёта пилотируемых миссий МКС требуют учитывать, что эффективная целенаправленная деятельность даже при таких условиях подразумевает устойчивое взаимодействие их членов, построенное с учётом национально-психологических особенностей людей различных этнических общностей. Ключевым элементом выступает необходимость формирования толерантной этнической среды в процессе подготовки космонавтов и её сохранения в полёте.

В настоящее время особое место занимает вопрос полётов на МКС экипажей частных компаний и включения в экипаж так называемых участников космических полётов (туристов, актёров, учёных и др.). Как показывает анализ результатов психологического сопровождения таких смешанных экипажей, присутствие на борту космонавтов-непрофессионалов возлагает дополнительную нагрузку на основных членов экипажа по контролю за их действиями и состоянием здоровья. При этом медико-психологические риски становятся более значимыми, если космический полёт осуществляется космонавтами-непрофессионалами средних и пожилых возрастных групп, имеющих особенности в состоянии здоровья (Богомолов и др., 2008). Непрофессиональный космонавт в первую очередь должен обладать долговременной мотивацией по выполнению космического полёта, познавательной и творческой активностью, быть целеустремлённым, с достаточно развитыми качествами, такими, как: устойчивость личности к неблагоприятным эмоциональным, социально-психологическим воздействиям, настойчивость, коммуникабельность, самостоятельность, выносливость (Ковинский, 2020). Данные проблемные вопросы постоянно обсуждались специалистами международной рабочей группы контроля за поведением и работоспособностью экипажей МКС (ISS SHBPWG), что способствовало минимизации возникающих рисков межличностных конфликтов в полете.

Таким образом, следует отметить, что психофизиологическое сопровождение экипажей длительных космических экспедиций МКС

имеет большое значение в общей структуре медицинского обеспечения полётов и имеет ряд особенностей.

Экспертиза и диагностика состояния космонавтов во время полёта не претерпели существенных изменений и как в прежнее время (при сопровождении орбитальных станций типа «Салют» и «Мир») основаны на информации с борта космического корабля по каналам радио- и телевизионной связи и биотелеметрии. После анализа поступающей информации выносится экспертное суждение об особенностях психоэмоционального состояния и поведения членов экипажа и их группового взаимодействия. Ведущий специалист (психолог сопровождения экипажа) обобщает эти данные и формулирует интегративную медико-психологическую оценку состояния здоровья за сутки, за неделю и за другие отрезки времени, а также перед выполнением космонавтами особо сложных видов работ, например, внекорабельной деятельности. Одновременно формируется экспертное решение о продолжении полёта по штатной программе или проведении необходимых коррекционно-лечебных и мероприятий психологической поддержки.

Работа поддержана темой РАН № 63.2.

Литература

- Мясников В. И., Усков Ф. Н., Козеренко О. П., Макаров В. И.* Психологическая надежность космонавтов // Результаты медицинских исследований, выполненных на орбитальном научно-исследовательском комплексе «Салют-6» – «Союз». М.: Наука, 1986. С. 186.
- Мясников В. И., Шапошников Е. А., Замалетдинов И. С.* Полетный психоневрологический контроль // Орбитальная станция «Мир». М., 2001. Т. 1. С. 323–324.
- Богомолов В. В., Гончаров И. Б., Богатова Р. И. и др.* Медицинское обеспечение космонавтов-непрофессионалов, совершивших кратковременные космические полеты на Международной космической станции // Авиакосм. и эколог. медицина. 2008. Т. 42. № 1. С. 15–19.
- Ковинский А. А.* Оценка важности психофизических качеств непрофессиональных космонавтов для выполнения ими полетов в космос // Пилотируемые полеты в космос. 2020. Т. 35. № 2. С. 87–98.

PSYCHOPHYSIOLOGICAL SUPPORT OF CREWS OF LONG-TERM MANNED EXPEDITIONS TO THE ISS

O. O. Ryumin, Yu. A. Bubeev, A. A. Polyanichenko, N. S. Supolkina
Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: psychophysiological support of astronauts, diagnostics of the condition, polyethnic mixed crew

СФЕРЫ – ZERO ROBOTICS. ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

А. М. Садовский

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: образование, моделирование, робототехника

Международная космическая станция (МКС) представляет собой уникальную лабораторию, в которой возможно проведение множества научных экспериментов, отработка новых конструкторских решений, разработка новой аппаратуры. В долгосрочной Программе научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на МКС до 2024 г. (<http://knts.tsniimash.ru/ru/site/Programm.aspx?id=1>), существует раздел, посвящённый образованию и популяризации космических исследований, в котором сказано, что «орбитальная станция предоставляет возможность не только наглядно и в простой форме объяснять подрастающему поколению, включая школьников и студентов различных учебных заведений, что мы делаем в космосе, в популярной форме представить достижения космонавтики и где реально эти достижения найдут своё применение, но и стать участниками проведения космических экспериментов».

В рамках школьной программы и дополнительного образования популяризация науки играет крайне важную роль, способствует расширению кругозора и увлечению школьников той или иной областью исследований, последующему притоку их в вузы и впоследствии привлечению молодёжи к научным задачам. В случае исследований космоса такая популяризация больше связана с естественными науками и способствует распространению знаний о физических законах и природных явлениях.

Основные эксперименты, проводимые в рамках этой деятельности на МКС, можно разделить по следующим тематикам: пропаганда и популяризация космических исследований; научно-образовательные и демонстрационные эксперименты; научно-технические образовательные эксперименты; международные космические проекты, реализуемые совместно со странами-партнёрами по МКС.

Один из примеров таких экспериментов — совместный с Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) эксперимент «Сферы», проходивший формально до 2023 г.

Идея проведения экспериментов с мини-роботами в невесомости на борту Международной космической станции была сформулирована в 2009 г. специалистами лаборатории космических систем Массачусетского технологического института (МТИ). Их целью была отработка действий по сбору космического мусора, поиску наиболее экономичных способов маневрирования. Инженеры из МТИ создали сферические аппараты размером с футбольный мяч, которые могли двигаться в невесомости под действием импульсов сжатого газа (<http://ssl.mit.edu/spheres/>). Источником вдохновения для них послужил один из роботов эпопеи «Звёздные войны» — сферический прибор, который рыцари-джедаи использовали для обучения.

В своём английском варианте названия — SPHERES — название спутников расшифровывается как Synchronized Position, Hold, Engage, Reorient Experimental Satellites, т. е. экспериментальные спутники, способные синхронизировать положение, занимать, удерживать его и ориентироваться в пространстве. Сами спутники представляют собой почти сферические тела массой 4,3 кг, диаметром 220 мм и находятся на борту МКС. В качестве «топлива» для спутника ис-

Садовский Андрей Михайлович — ученый секретарь, кандидат физико-математических наук, a.sadovski@cosmos.ru

пользуется сжатый углекислый газ. Энергопитание спутника — автономное, от двух пальчиковых батареек, продолжительность работы — 2 ч. Для контроля положения спутника в автономном полёте используются маяки, расположенные на МКС.

В декабре 2009 г. впервые были проведены соревнования с участием нескольких команд американских школьников, которые должны были сначала управлять виртуальными роботами, а затем реальными мини-роботами SPHERES на борту МКС. В последующие годы к участию в турнире подключились европейские школьники, потом школьники России (с 2014 г.), Австралии, и к 2018 г. общее число команд-участников составило более 250. Эксперимент и соответственно турнир получили название SPHERES-Zero Robotics (<http://zerorobotics.mit.edu/>), где Zero, т. е. ноль, в названии расшифровывается как Zero-G — нулевая гравитация (финал проходит на борту МКС), Zero Cost — нулевая стоимость (участие бесплатно), Zero Configuration — все программируется онлайн.

В рамках программы эксперимента соседствовали два состязания: первое (и основное) — это турнир школьников старших классов (*англ.* Zero Robotics High School Tournament), который проходит каждый год с сентября по декабрь с финалом в январе и в котором участвуют 9–12-е классы (соответствуют нашим 9–11-м); второе — это турнир для средних классов (*англ.* Zero Robotics Middle School Summer Program), т. е. 6–8-х классов.

Чемпионат старшей школы был организован следующим образом: летом, обычно в августе, открывалась регистрация для участия в чемпионате, в начале сентября участникам предлагалась задача для решения и начинался так называемый тестовый период. Регистрация шла практически весь сентябрь и заканчивалась с окончанием тестового периода. Идея тестового периода — дать осознать школьникам сложность задачи и понять их желание работать над ней. В качестве тестовой обычно предлагалась упрощённая задача этого года в рамках двумерной геометрии. При этом для её решения достаточно было написать программу, дающую ненулевой результат, в виртуальной среде, в которой и проходило всё решение задачи. Если внимательно изучить описание задачи, то оказывается, что для получения ненулевого счёта требовалось написать программу, состоящую из всего 1–5 команд. В качестве языка программирования использовался C/C++, а с 2017 г. — Matlab.

В октябре начиналась основная часть турнира — моделирование трёхмерной задачи. Окончательные версии программ «соревновались» между собой в виртуальной среде и по результатам «соревнований» участники получали баллы. В таблице лидеров отбирались 84 команды с самым высоким рейтингом на момент окончания этапа, из которых формировали 28 альянса из трёх команд каждый. Впоследствии альянсы работали совместно до окончания полуфиналов и, если не вылетали, финала. Команды, не попавшие в отбор, приглашались к участию в виртуальных финалах.

Ключевым в организации чемпионата было то, что команды в альянсе должны представлять разные страны (исключения возможны). То есть для наших школьников это была ещё и возможность дополнительной стажировки в английском языке и новые знакомства. Конечно, возникает и дополнительная проблема — разница во времени.

Первые 14 альянсов в соответствии с таблицей лидеров участвовали в финале на МКС, где их программы запускались на реальных устройствах. Альянсы с рейтингом ниже 14 приглашаются для участия в виртуальных финалах.

К участию в виртуальном финале приглашались все команды, участвовавшие в трёхмерном моделировании, которые не попали в полуфинал (в альянсы), и все команды, участвовавшие в полуфинале, но не попавшие в финал. Команды могли выбрать, как участвовать

в виртуальных финалах: в качестве отдельной команды или в альянсах. После закрытия таблицы лидеров виртуальных финалов две команды/альянса с самым высоким рейтингом приглашались к участию в виртуальном финале.

На борту МКС эксперимент выполнялся совместно российским и американским членами экипажа: основным оператором был астронавт НАСА, российский член экипажа оказывал помощь при выполнении работ.

Целью турнира было заинтересовать школьников космическими исследованиями, поэтому спектр задач был огромен. Например, в 2014 г. участники турнира должны были исследовать виртуальный астероид, в 2015 г. задача состояла в добыче информации и сборе остатков от разрушившегося спутника НАСА, причём был конкурент, получение снимков которого представляло едва ли не более важную задачу. Задачей чемпионата 2016 г. стала сборка на орбите из составных частей космических аппаратов для исследований Марса. Задача 2017 г. была посвящена поиску жизни на Энциладе. Цель игры — обнаружить зоны, содержащие самые высокие концентрации микроорганизмов, посредством бурения и сбора биологических образцов при помощи бурения и доставить образцы на станцию, избегая возникающих гейзеров. В 2018 г. был проведён, как оказалось, заключительный турнир, задача была посвящена сбору космического мусора.

Турнир для средних классов проводился каждое лето только в нескольких местах в США, но с 2016 г. был открыт для российских участников. Турнир был очень похож на турнир для старших классов, но существовало несколько принципиальных отличий.

Так же, как и в турнире старшей школы, в программе для средних классов средней школы (далее — программа средней школы) участники создавали программный код, чтобы решить текущую задачу. Задача повторяла задачу предыдущего года для старших классов, но в упрощённой постановке. После нескольких фаз турнира региональные финалисты соревновались в состязании на борту МКС.

Отличия были следующие: программа была рассчитана на пять недель, примерно по 15 ч в неделю, т. е. на смену в летнем лагере в США. Для российских школьников программа была адаптирована для летних городских лагерей в России с длительностью смены три недели. Здесь уже была важна роль учителя. Очевидно, что для школьников 6–8-х классов решить самостоятельно сложную командную задачу невозможно, поэтому в программу входило преподавание необходимой математики, знакомство с физическими явлениями и программирование как таковое.

Для расширения КЭ «Сферы» постоянно проводилась работа по обучению менторов и учителей для проведения турниров в рамках летних лагерей, адаптация программы на летние лагеря на территории России. Такая программа может обеспечить множество путей для профессионального роста учителей, которые поддерживают интерес школьников к естественным наукам и программированию.

К сожалению, в связи с запуском 17 апреля 2019 г. грузовика *Cygnus*, на борту которого были два робота *Astrobee* — аппараты следующего поколения, предназначенные для замены сфер, образовательный эксперимент «Сферы» с американской стороны был заморожен для замены оборудования. По состоянию на сентябрь 2023 г. никаких новых международных чемпионатов не проводилось, спецификации нового оборудования не поступали.

Тем не менее результаты такого эксперимента могут быть востребованы при обучении в рамках проводимых программ Министерства Просвещения и Департамента образования г. Москвы. Будут разработаны методические рекомендации для обучения учащихся, подготовки педагогического состава. Дополнительно такие рекомендации могут оказаться полезными для проекта «Космический класс», про-

водимого совместно «Роскосмосом» и Департаментом образования г. Москвы.

Предполагается следующий план практического использования результатов: подготовка учащихся для разработки прототипов аппаратов, что позволит создать инженерный задел среди обучающихся. Обучение программированию и созданию программ для аппаратов, что даёт дополнительные знания в баллистике, теории алгоритмов, космической физике. Проведение тестового моделирования в виртуальной среде, что даёт понимание корректности работы программ. Проведение конкурса с финалом на Российской орбитальной станции (РОС). Для реализации программы была подана заявка на проведение целевой работы для РОС.

SPHERES – ZERO ROBOTICS. EXPERIENCE AND RESULTS

A. M. Sadovski

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Keywords: education, simulation, robotics

КОСМИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЯМИ КАПЕЛЬНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ-ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

А. А. Сафронов

Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, Москва, Россия

Ключевые слова: капельный холодильник-излучатель, капиллярная гидродинамика, микрогравитация

За последнее десятилетие достигнуты значительные успехи в развитии космической техники. Созданы сети низкоорбитальных спутников, космические буксиры, системы обслуживания спутников в космосе, геостационарный радиолокационный спутник с синтезированной апертурой и т. д. Полноценная реализация подобных и иных значимых проектов невозможна без существенного увеличения мощности энергетических установок (ЭУ) космических аппаратов (КА).

Соответствующая задача напрямую связана с решением задачи эффективного отвода низкопотенциального тепла, которая обычно решается с использованием панельных холодильников-излучателей. Увеличение мощности приводит к неизбежному росту площади излучающей поверхности, массы и метеоритной уязвимости таких устройств.

Для преодоления возникающих ограничений рассматривается концепция капельных холодильников-излучателей (КХИ), функционирование которых основано на радиационном остывании специальным образом сформированного, распространяющегося в космосе и впоследствии улавливаемого капельного потока (Коротеев и др., 2016).

Капельный холодильник-излучатель состоит из генератора капель, свободно распространяющихся и остывающих за счёт лучистого теплообмена капельной пелены, а также уловителя капель. Для успешного функционирования КХИ необходимо согласованное протекание различных процессов в перечисленных выше узлах. Радиационное остывание капель должно быть организовано таким образом, чтобы обеспечивался необходимый для функционирования ЭУ КА перепад температуры рабочего тела. Это достигается за счёт поддержания параметров капельного потока (радиус частиц, скорость, а также геометрические параметры капельной пелены), создаваемого генератором капель, в определённом коридоре значений. Закономерности взаимодействия капельного потока с уловителем ограничивают допустимые значения параметров капельного потока (скорость капель, их концентрация и т. д.). Ограничения на угловую расходимость капельного потока, определяемую закономерностями функционирования генератора капель, а также электризации капельной пелены при взаимодействии с факторами космического пространства, задаются геометрическими размерами уловителя капель. Детализация описанных процессов определяет необходимость введения в рассмотрение новых явлений, которые необходимо учитывать при создании КХИ. Например — формирование жидкой плёнки на внешней поверхности генераторов капель при их включении и выключении, а также взаимодействие истекающих струй с данной плёнкой.

Некоторые из перечисленных процессов возможно исследовать в наземных экспериментах. В частности, в ряде работ (Englehart et al., 1996; Guildenbecher et al., 2021; Mattick, Hertzberg, 1985; Ohta et al., 1988; Takanashi et al., 2019) подробно изучены закономерности ра-

диационного остывания капель. С другой стороны, например, электризация капельного потока при его взаимодействии с космической плазмой на низких орбитах слаба и становится значимой лишь на высоких и геостационарных орбитах (Safronov et al., 2019). Из-за этого закономерности процесса электризации не могут быть изучены при проведении космического эксперимента на борту Международной космической станции (МКС).

Применительно к задаче создания КХИ необходимо проведение космических экспериментов, направленных на изучение гидродинамических капиллярных явлений в генераторе и уловителе капель.

Ранее Российская Федерация провела два космических эксперимента с моделями КХИ: «Пелена-2» (2000) и «Капля-2» (2014). В эксперименте «Пелена-2» доказана возможность создания монодисперсных капельных потоков в условиях микрогравитации и вакуума, а также сбора таких потоков жидкой плёнкой, расположенной на поверхности уловителя капель. Вместе с тем, в эксперименте обнаружено, что при включении генератора капель в условиях микрогравитации на его поверхности формируется жидкая плёнка, препятствующая его штатной работе, и, в связи с этим, «следует уточнить» конструкцию генератора капель, а также «оптимизировать запуск и начальную скорость струй» генератора (Демянко и др., 2001).

В эксперименте «Капля-2» доказана принципиальная возможность замыкания гидравлического контура КХИ. Кроме того, были получены уникальные научные данные — экспериментальные наблюдения в условиях микрогравитации закономерностей отрыва пограничного слоя от вращающегося диска в капиллярном плёночном течении. Вместе с тем выявлено, что одной оптимизации процесса запуска генератора капель недостаточно для его устойчивого функционирования.

На основе полученных научных данных была переработана конструкция генератора капель: вместо генераторов с плоской фильерой был разработан генератор с капиллярными форсунками (Коротеев и др., 2023). Такое устройство позволяет качественно снизить скорость капельного потока в КХИ с величины ~ 10 до ~ 1 м/с, что позволяет качественно улучшить технологичность КХИ (за счёт увеличения диаметра капиллярных отверстий). Наземные испытания таких устройств затруднены влиянием силы тяжести, вносящей «искажения» в его закономерности функционирования. В связи с этим, испытания подобных систем генерации капель проводились на МКС в 2019 г. японскими исследователями (Umemura et al., 2020). Однако в настоящей работе изучался лишь капиллярный распад жидкости с малой вязкостью, в то время как все потенциальные рабочие тела КХИ, обладающие низкой испаряемостью, имеют большую вязкость. Необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований в условиях микрогравитации для изучения закономерностей функционирования генераторов капель с капиллярными форсунками.

На основе научных результатов, полученных в космических экспериментах «Пелена-2» и «Капля-2», разработана концепция ленточно-роторного уловителя капель. Такое устройство за счёт совместного движения собираемой жидкости и ленты-транспортёра позволяет повысить стабильность жидкой плёнки на поверхности уловителя и за счёт этого качественно поднять величину максимального собираемого расхода в сравнении с центробежным уловителем. Вместе с тем, необходимо экспериментальное изучение в натуральных условиях закономерностей функционирования данного устройства, в том числе — закономерностей явления отрыва пограничного слоя от поверхности уловителя в условиях микрогравитации и вакуума.

Литература

- Коротеев А. А., Сафронов А. А., Филатов Н. И.* Влияние структуры капельной пелены на мощность бескаркасных космических излучателей и эффективность энергетических установок // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 5. С. 817–820.
- Mattick A. T., Hertzberg A.* Liquid droplet radiator performance studies // Acta Astronautica. 1985. V. 12(7–8). P. 591–598.
- Ohta K. O., Graf R. T., Ishida H.* Evaluation of space radiator performance by simulation of infrared emission // Applied Spectroscopy. 1988. V. 42. No. 1. P. 114–120.
- Englehart A. N., McConley M. W., Chubb D. L.* Emittance Measurements for a Thin Liquid Sheet Flow // J. Thermophysics and Heat Transfer. 1996. V. 10. No. 3. P. 547–549.
- Takanashi T., Totani T., Shimada T. et al.* Exhaust heat characteristics of single liquid droplet stream for liquid droplet radiator // Thermal science and engineering. 2019. V. 27. Iss. 1. P. 43–52.
- Guildenbecher R. D., Barnard J. J., Grasser T. W. et al.* Evaporation and propagation of liquid drop streams at vacuum pressures: experiments and modeling // Physical Review E. 2021. V. 103. Article 043105.
- Safronov A. A., Filatov N. I., Grigoryev A. L., Bondareva N. V.* Influence of space plasma on the work of the liquid droplet radiator // J. Physics: Conf. Series. 2nd Intern. Conf. Fusion Energy and Plasma Technologies (ICFEPT2019). 7–9 Oct. 2019. Moscow, Russia. 2019. V. 1370.
- Демянко Ю. Г., Колюхов Г. В., Коротеев А. С. и др.* Ядерные ракетные двигатели. М.: ООО «Норма-Информ», 2001. 414 с.
- Коротеев А. А., Сафронов А. А., Филатов Н. И. и др.* Исследование генераторов капель бескаркасных систем теплоотвода в космосе // Косм. техника и технологии. 2023. № 1(40). С. 83–94.
- Umemura A., Osaka J., Shinjo J.* Coherent Capillary Wave Structure Revealed by ISS Experiments for Spontaneous Nozzle Jet Disintegration // Microgravity Science and Technology. 2020. V. 32. P. 369–397.

SPACE EXPERIMENTS WITH LIQUID DROPLET RADIATORS MODELS

A. A. Safronov

Keldysh Research Center

Keywords: Liquid droplet radiator, capillary hydrodynamics, microgravity

НАУЧНАЯ АППАРАТУРА РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА «НАПОР-РТМ»

Д. А. Селезнев

АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий», Смоленск, Россия

Ключевые слова: «Напор-РТМ», аппаратура радиотехнического мониторинга, радар с синтезированной апертурой, космический эксперимент

Научная аппаратура (НА) «Напор-РТМ» разрабатывается в рамках проведения космического эксперимента «Напор-миниРСА», в котором планируется исследование возможностей разработанной аппаратуры для дистанционного зондирования поверхности земли.

НА «Напор-РТМ» предназначена для настройки, калибровки и оценки результатов работы радара с синтезированной апертурой (РСА) «миниРСА». Наземный сегмент — аппаратура радиотехнического мониторинга (РТМ), позволяет производить контроль параметров излучений РСА. Космический сегмент аппаратуры РТМ осуществляет контроль радиоэлектронной обстановки в диапазоне частот от 0,4 до 18 ГГц.

Для корректной работы РСА требуется проведение настройки и калибровки её систем: калибровки угла установки антенной системы, калибровки чувствительности и динамического диапазона приёмных трактов и систем обработки сигнала, оценка диаграммы направленности, формируемой антенной системой.

Для выполнения контрольных функций, настроек и калибровок применяется аппаратура РТМ-Н. Основные задачи, решаемые аппаратурой РТМ-Н:

- регистрация излучения РСА;
- оценка диаграммы направленности антенной системы РСА;
- оценка ориентации диаграммы направленности антенной системы РСА;
- формирование калибровочных сигналов для настройки РСА.

Прогнозируется, что приём сигналов с направления «Земля» будет сопряжён со сложной помеховой обстановкой от различных наземных источников радиосигналов различных систем: связи, радиолокации, передачи данных. Наличие данных сигналов может привести к искажениям радиолокационных портретов, получаемых посредством РСА. Таким образом, актуальной представляется задача регистрации фоновых излучений, формируемых наземными источниками сигналов, для изучения влияния данных сигналов на формируемые радиолокационные изображения. Для решения этой задачи в рамках космического эксперимента разрабатывается аппаратура РТМ-К, устанавливаемая на борту многофункционального лабораторного модуля (МЛМ) совместно с аппаратурой РСА.

Основные задачи, решаемые аппаратурой РТМ-К:

- регистрация сигналов наземных и космических источников;
- определение частотных и временных параметров обнаруженных сигналов;
- запись сигналов и формирование базы данных обнаруженных сигналов.

В состав аппаратуры РТМ-К входят:

- аппаратура РТМ-К наружного размещения в составе:
 - антенно-фидерная система;

- блок обработки радиосигналов;
- блок радиотехнического мониторинга в составе:
 - цифровая вычислительная платформа;
 - модуль накопителей (запоминающее устройство);
- специальное программное обеспечение РТМ-К.

Аппаратура РТМ-Н состоит из трёх одинаковых постов, выполненных на базе автомобиля КАМАЗ-43118. Один пост включает в себя:

- радиопередающее устройство,
- радиоприёмное устройство,
- антенно-фидерную систему,
- систему наведения и автосопровождения,
- цифровую вычислительную платформу,
- автоматизированное рабочее место оператора,
- систему электропитания,
- установочный комплект,
- запасные части, инструменты, принадлежности.

Выбор мобильного шасси для постов аппаратуры РТМ-Н обусловлен необходимостью применения активных транспондеров для калибровки РСА на фоне различных подстилающих поверхностей.

Управление функционированием аппаратуры РТМ-Н и РТМ-К осуществляется посредством циклограмм, формируемых на специальном рабочем месте (СРМ).

СРМ представляет собой совокупность программно-аппаратных средств, обеспечивающих управление аппаратурой РТМ-Н и РТМ-К, сбор, учёт и централизованное хранение научной и телеметрической информации от аппаратуры РТМ-Н и РТМ-К.

Таким образом аппаратура РТМ-Н и РТМ-К выполняет функции настройки, калибровки и контроля РСА в ходе проведения космического эксперимента (КЭ), результаты работы научной аппаратуры позволяют анализировать возможные проблемы при работе РСА. Сведения, собранные НА Напор-РТМ в ходе проведения КЭ, могут быть использованы при доработке и модернизации подобных систем РСА.

SCIENTIFIC EQUIPMENT OF RADIO ENGINEERING MONITORING NAPOR-RTM

D. A. Seleznev

JSC Scientific Research Institute of Modern Telecommunication Technologies, Samara, Russia

Keywords: Napor-RTM, radio monitoring equipment, Synthetic Aperture Radar, space experiment

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «МОНИТОР ВСЕГО НЕБА»

Н. П. Семена

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: наблюдательная астрофизика, космический рентгеновский фон, монитор всего неба, эксперименты на МКС

Задача эксперимента «Монитор всего неба» (МВН) состоит в высокоточном измерении космического рентгеновского фона (КРФ) в диапазоне 6–70 кэВ. Несмотря на то, что большинство рентгеновских обсерваторий пытались его измерить, точность его знания осталась на уровне 15–20 %. (рис. 1).

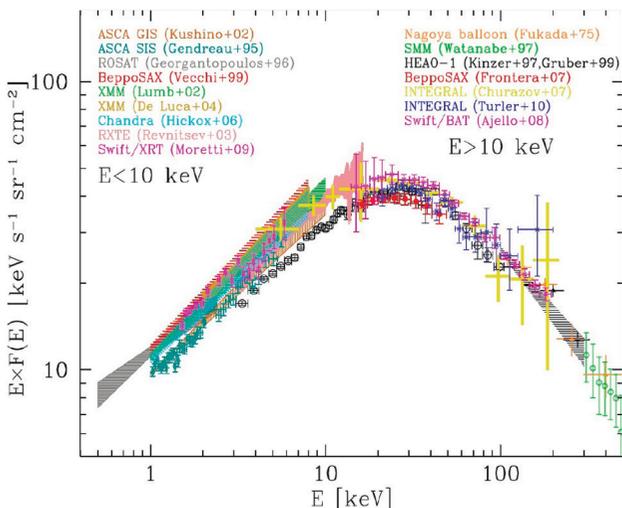


Рис. 1. Результаты измерения спектра КРФ различными астрофизическими обсерваториями

Цель эксперимента — достижение точности измерения КРФ в единицы процентов. Важность данной задачи определяется тем, что поверхностная яркость КРФ содержит в себе излучение всех сколь угодно слабых объектов во Вселенной, даже таких, которые невозможно наблюдать отдельно рентгеновскими телескопами из-за их конечной чувствительности. Это позволяет использовать знание о точном спектре КРФ для решения чрезвычайно значимых астрофизических задач. В частности, результаты измерения КРФ посредством МВН позволят углубить понимание космологической эволюции аккрецирующих сверхмассивных чёрных дыр, выступающей ключевой проблемой современной астрофизики.

Основной проблемой достижения высокой точности измерения стала проблема разделения КРФ и инструментального фона измерительного прибора. Метод измерения, позволяющий решить данную проблему, предложен известным российским астрофизиком Михаилом Геннадьевичем Ревнивцевым. Данный метод состоит в периодическом перекрытии апертуры детекторов вращающимся экраном. Это позволяет определить яркость рентгеновского фона ($S_{СХВ}$) как разницу между сигналом от открытого (S_{open}) детектора и сигналом от закрытого (S_{close}) детектора.

Семена Николай Петрович — доктор технических наук, заведующий лабораторией, semena@iki.rssi.ru

Данный принцип реализован в главной составной части научной аппаратуре МВН — рентгеновском мониторе СПИН-Х1-МВН. Этот монитор содержит четыре CdTe-детектора, работающих в диапазоне 6–70 кэВ, поле зрения которых в 3,2° сформировано трёхслойными (Al-Cu-Sn) коллиматорами. Над полем зрения детекторов размещён вращающийся трёхслойный экран, перекрывающий поле зрения детектора на 30 с в течение каждой минуты (рис. 2).

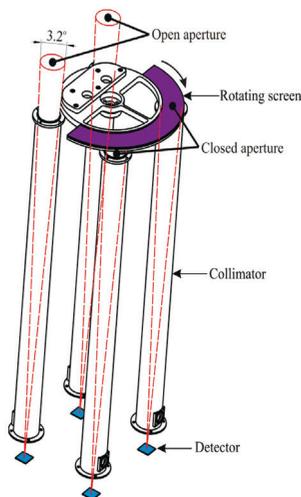


Рис. 2. Основные элементы рентгеновского монитора СПИН-Х1-МВН

Таким образом, поверхностная яркость КРФ, измеряемая четырьмя детекторами ($i = 1, \dots, 4$) определяется следующим образом:

$$S_{\text{СХВ}}(t) = \sum_{i=1}^4 (S_{\text{open}_i} - S_{\text{close}_i}).$$

Монитор будет установлен с зенитной ориентацией на МКС (рис. 3).



Рис. 3. Размещение монитора СПИН-Х1-МВН на МКС

Это позволяет каждые 72 дня покрывать 78,4 % всего неба с различной экспозицией. Предполагается, что монитор будет вести непрерывные наблюдения в течение трёх лет. Трёхлетняя экспозиция показана на рис. 4.

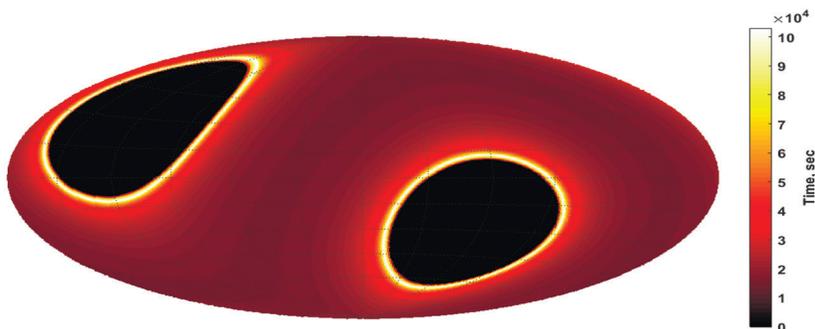


Рис. 4. Карта экспозиции неба рентгеновским монитором СПИН-Х1-МВН за три года в галактических координатах в проекции Хаммера

Имеется ещё одна проблема снижения точности измерения КРФ. Данной проблемой становится внешний рентгеновский фон, не относящийся к КРФ.

Моделирование, проведённое Д. В. Сербиновым и А. Н. Семеной показало, что для минимизации ошибки измерения яркости КРФ, связанной с внешним рентгеновским фоном, необходимо исключить из обзора:

- области высокого радиационного фона при нахождении МКС в околополярной зоне и при пересечении Южно-атлантической аномалии;
- область галактического центра, как источника высокоинтенсивного галактического фона;
- все оставшиеся в поле зрения галактические рентгеновские источники (всего 104) и 3 внегалактических источника.

После этих исключений останется 49 % неба, пригодного для измерения поверхностной яркости КРФ и 40 % времени обзора. Оставшаяся часть неба показана на рис. 5.

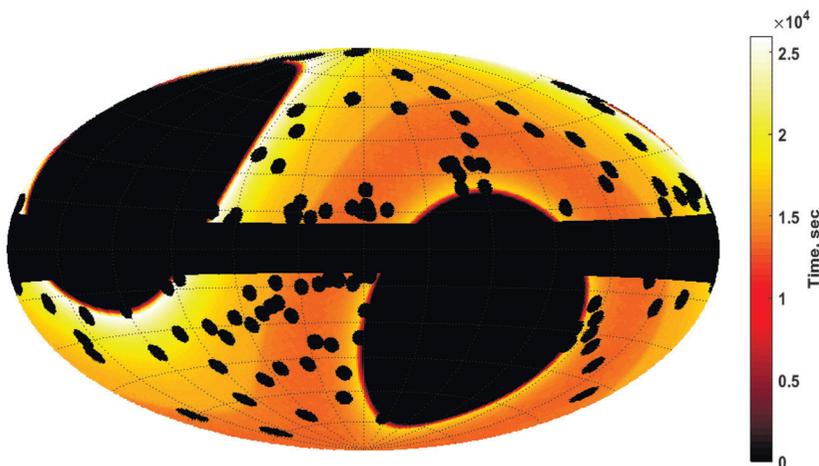


Рис. 5. Поверхность неба, используемая МВН для измерения яркости КРФ

В результате может быть получена расчётная точность измерения КРФ лучше 1 % за три года непрерывных наблюдений (рис. 6).

Кроме рентгеновского монитора СПИН-Х1-МВН в состав научной аппаратуры входит блок управления БУ МВН, размещаемый внутри гермоотсека российского сегмента МКС. Данный блок представляет собой компьютер, управляющий экспериментом в автома-

тическом режиме. Общий вид составных частей аппаратуры представлен на рис. 7, а их характеристики — в табл. 1.

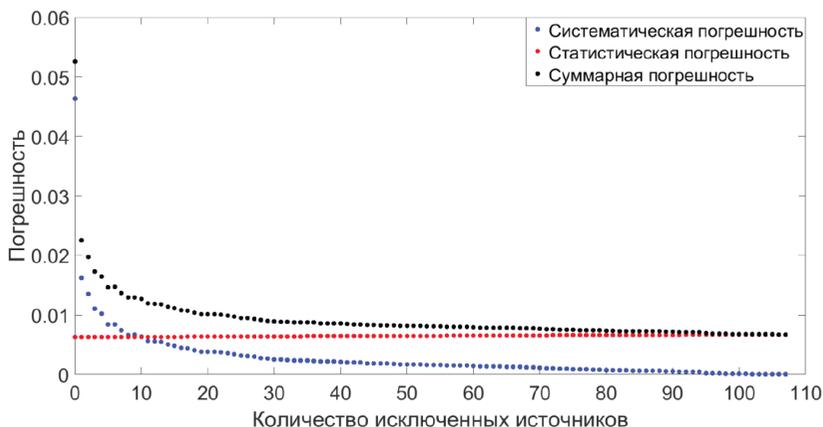


Рис. 6. Зависимость погрешностей трёхлетних измерений поверхностной яркости КРФ от количества исключённых источников, начиная с самого яркого

Таблица 1. Характеристики научной аппаратуры МВН

Характеристики	СПИН-Х1-МВН	БУ МВН
Габариты, мм	940×661×425	222×178,2×130
Масса, кг	51	3,2
Мощность (max), Вт	105	20
Энергетический диапазон, кэВ	6–70	—
Количество детекторов	4	—
Площадь одного детектора, см ²	4,38	
Поле зрения, град ²	8,55	
Процессор	—	AMD George LX800 500 MHz
Оперативная память		256 MB
Энергонезависимая память		2 GB



Рис. 7. Общий вид научной аппаратуры МВН

Структура рентгеновского монитора представлена на рис. 8.

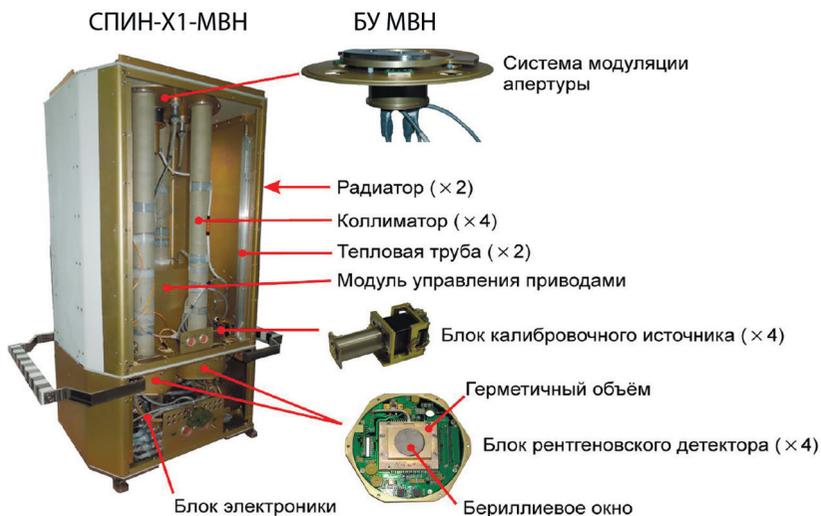


Рис. 8. Структура монитора СПИН-X1-МВН

Ключевыми элементами составных частей научной аппаратуры являются блоки рентгеновских детекторов (сектор В. В. Левина); блок управления БУ МВН и модуль управления приводами (лаборатория М. В. Бунтова); блоки калибровочных источников, система модуляции апертуры и система обеспечения теплового режима (Д. В. Сербинов.). Научная аппаратура в целом создана в лаборатории Н. П. Семены.

В настоящее время лётный образец научной аппаратуры МВН находится в РКК «Энергия» в состоянии готовности для доставки на МКС.

Таким образом, создана аппаратура, предназначенная для проведения научного эксперимента МВН на Международной космической станции, цель которого заключается в измерении поверхностной яркости космического рентгеновского фона с погрешностью в единицы процентов, что намного точнее достигнутой на сегодняшний день погрешности в 15–20 %. Результаты данного эксперимента значительно углубят понимание ряда ключевых задач астрофизики.

MVN (ALL-SKY MONITOR) SPACE EXPERIMENT

N. P. Semena

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Keywords: observational astrophysics, cosmic X-ray background, All Sky Monitor, experiments on the ISS

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЛОР-ОРГАНОВ У КОСМОНАВТОВ МКС В УСЛОВИЯХ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТОВ

Е. Э. Сигалева, О. В. Котов, А. В. Поляков, Э. И. Мацнев,
И. В. Ковачевич, А. Р. Ниязов

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: МКС, заболевания ЛОР-органов, пилотируемый космический полёт

Сохранение здоровья и поддержание высокого уровня работоспособности космонавтов в продолжительном космическом полёте представляется приоритетной задачей клинического направления космической медицины (Гончаров, Ковачевич, 2001). Опыт отечественной пилотируемой космонавтики свидетельствует о важности участия специалистов-врачей различного профиля в медицинском отборе, подготовке и обеспечении безопасности этих полётов. Воздействие на организм космонавта динамических факторов космического полёта, связанных с перегрузками на этапе выведения космического корабля в космическое пространство и возвращением на Землю, влиянием невесомости, других факторов полёта (шум, вибрация, дыхание регенерированным воздухом), предъявляют особые требования к состоянию ЛОР-органов космонавтов. Анатомо-физиологические особенности строения ЛОР-органов человека (наличие воздухоносных полостей среднего уха и придаточных пазух носа, чувствительных к перепадам барометрического давления воздуха, вестибулярного аппарата, обладающего специфической избирательной чувствительностью к воздействию невесомости), диктуют необходимость активного участия ЛОР-специалистов на всех этапах отбора, подготовки и тренировки космонавтов к полёту, проведения соответствующих лечебно-профилактических и saniрующих мероприятий (Мацнев и др., 2015).

Опыт медицинского обеспечения отечественных пилотируемых космических полётов свидетельствует о том, что, несмотря на профессиональный медицинский отбор и предполётный комплекс проведённых профилактических мероприятий, нельзя полностью исключить возможность развития у космонавтов в полёте различных заболеваний ЛОР-органов.

Под влиянием невесомости в космическом полёте у космонавта происходит перераспределение циркулирующего объёма крови в верхнюю половину туловища, что может создавать предпосылки для развития функциональных изменений в различных системах организма космонавта (Григорьев и др., 2001). Индивидуальная реак-

Сигалева Елена Эдуардовна — ведущий научный сотрудник, сурдолог, оториноларинголог, заведующий отделом, доктор медицинских наук, профессор РАН, sigaleva@mail.ru

Котов Олег Валерьевич — заместитель директора, кандидат медицинских наук, космонавт, o.kotov@imbp.ru

Поляков Алексей Васильевич — ведущий научный сотрудник, заведующий отделом, кандидат медицинских наук, apolyakov@imbp.ru

Мацнев Эдуард Иванович — ведущий научный сотрудник, оториноларинголог, заведующий отделением, доктор медицинских наук, профессор, e.matsnev@mail.ru

Ковачевич Ирина Васильевна — ведущий научный сотрудник, кандидат медицинских наук, kovachevich.irina@yandex.ru

Ниязов Арслан Рамилевич — научный сотрудник, врач по авиационной и космической медицине, arn1708@yandex.ru

ция организма на перераспределение крови в краниальном направлении, особенно в раннем периоде адаптации к невесомости, может проявляться в различной степени кровенаполнения слизистой оболочки полости носа и ротоглотки, в повышенной «инъецированности» сосудов барабанной перепонки (Matsnev, 1981).

Известно также, что в течение длительных космических полётов происходит активизация условно-патогенного компонента микрофлоры человека (Victorov et al., 1994), в том числе — микрофлоры ЛОР-органов, что создаёт предпосылки для развития в этих биотопах воспалительных процессов. Наблюдались случаи острой патологии ЛОР-органов (острый катаральный ринит, фарингит, отит) у космонавтов в условиях длительной экспедиции на борту, требующие консультативной и лечебной помощи со стороны специалистов группы медицинского сопровождения.

В условиях длительного космического полёта на фоне снижения показателей местного иммунитета, снижения колонизационной резистентности слизистых оболочек полости рта могут развиваться изменения, предрасполагающие к развитию гингивопатогенной микрофлоры, вызывающей воспалительный процесс (Volozhin et al., 1997).

До сих пор клинические исследования состояния ЛОР-органов и пародонта российских космонавтов ограничивались лишь пред- и послеполётными обследованиями. Эти обследования включали в себя исследования состояния ЛОР-органов космонавтов только в рамках пред- и послеполётных клинико-физиологических исследований.

Реализация пилотируемых космических полётов на орбитальных станциях «Мир» и МКС показала, что у отдельных космонавтов в полёте отмечалось развитие катаральных и аллергических ринитов, ринофарингитов и ларингофарингитов, отитов, наличие серных пробок в наружных слуховых проходах. Диагностика этих заболеваний, как правило, основывалась на оценке субъективных жалоб космонавтов и результатах консультаций специалистов наземной службы медицинского контроля (Богомолов и др., 2020).

В последнее время в ряде случаев для уточнения характера заболеваний ЛОР-органов у космонавтов в полёте была использована специально разработанная бортовая диагностическая медицинская аппаратура. Важным преимуществом использования подобной системы в полёте становится возможность передачи видеоизображения отоскопической картины барабанной перепонки и других ЛОР-органов в службу медицинского контроля и проведения профессиональных консультаций с соответствующими специалистами (Попова и др., 2016). Для оценки состояния космонавтов и назначения адекватной терапии были привлечены консультанты-оториноларингологи. На основе анализа клинической картины и видеоизображений были выявлены следующие заболевания ЛОР-органов космонавтов МКС: острый катаральный отит, тубоотит, наружный отит, острый фарингит.

В результате проведённой дистанционной диагностики, подкреплённой данными бортовых аудиологических исследований (тимпанометрия и аудиометрия в рамках аудиологической программы NASA), и последующей патогенетически обоснованной терапии было проведено своевременное и эффективное лечение, завершившееся полным выздоровлением космонавтов в полёте.

В этой связи, проведение видеоэндоскопического обследования ЛОР-органов у космонавтов в полёте, наряду с разработкой отечественной бортовой программы аудиологического контроля, позволит своевременно и эффективно диагностировать развитие острых воспалительных заболеваний ЛОР-органов и верхних дыхательных путей у космонавта и эффективно осуществлять динамический контроль его состояния в процессе лечения. Кроме того, видеоотоскопия

барабанных перепонок перед осуществлением внекорабельной деятельности и после её завершения позволит оценить возможные осложнения, связанные с нарушением барофункции среднего уха.

Таким образом, использование современных теледиагностических эндоскопических методов передачи видеoinформации в сочетании с современными аудиологическими методами оценки состояния слуха у космонавтов непосредственно в полёте обеспечивает возможность своевременного оказания им специализированной оториноларингологической помощи. Проведение динамического обследования состояния ЛОР-органов у космонавтов в полёте, позволит объективно оценить индивидуальную реакцию членов экипажа в процессе их адаптации к невесомости. Это позволит минимизировать риски для здоровья и жизни членов экипажей в настоящих и будущих длительных пилотируемых космических экспедициях.

Литература

- Богомолов В. В., Поляков А. В., Мацнев Э. И., Попова И. И., Ковачевич И. В., Алферова И. В., Репенкова Л. Г., Сигалева Е. Э. Диагностика и лечение заболеваний ЛОР-органов у российских космонавтов в полетах на орбитальной станции «Мир» и МКС // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2020. Т. 54. № 3. С. 22–27.
- Гончаров И. Б., Ковачевич И. В. Система оказания медицинской помощи космонавтам // *Орбитальная станция «Мир»: Космическая биология и медицина*: В 2-х т. М., 2001. Т. 1. Медицинское обеспечение длительных космических полетов. С. 432–454.
- Григорьев А. И., Орлов О. И., Логинов В. А., Дроздов Д. В., Исаев А. В., Ревякин Ю. Г. Суханов А. А. Клиническая телемедицина. М.: Слово, 2001. 144 с.
- Мацнев Э. И., Сигалева Е. Э., Ефимова Л. Г., Зайченко Б. С. Современные проблемы оториноларингологии в космической медицине: материалы 50-х Науч. чтений памяти К. Э. Циолковского // К. Э. Циолковский и проблемы космической медицины и биологии. Калуга, 2015. С. 173–175.
- Попова И. И., Орлов О. И., Мацнев Э. И., Ревякин Ю. Г. Применение современных средств для визуализации и оценки состояния ЛОР-органов при проведении научных исследований на Российском сегменте Международной космической станции // *Авиацион. и косм. медицина*. 2016. Т. 50. № 1. С. 73–75.
- Matsnev E. I. Otolaryngological problems of space flight proceeding // 12th ORL World Congress. Hungary, Budapest. 1981. P. 419–427.
- Victorov A. N., Ilyin V. K., Policarpov N. A. Peculiarities of interaction within the system “human-microorganisms” in different confined habitats // *Mat. 45th Intern. Astronautical Federation Congress*. Jerusalem, Israel. 1994. P. 113.
- Volozhin A. I. et al. Identification of risk groups of periodontium inflammation under extreme environment // *Mat. 48th Intern. Astronautical Federation Congress*. Turin, Italy, 1997. P. 48.

DIAGNOSTICS AND TREATMENT OF ENT ORGANS DISEASES IN ISS ASTRONAUTS DURING LONG-TERM SPACE FLIGHTS

E. E. Sigaleva, O. V. Kotov, A. V. Polyakov, E. I. Matsnev, I. V. Kovachevich, A. R. Niyazov
Institute for Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: ISS, ENT organs diseases, manned space flight

РАЗРАБОТКА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА БОРТУ РС МКС

Ю. И. Смирнов, Е. Н. Ярманова, В. С. Седлецкий
Институт медико-биологических проблем РАН

Ключевые слова: медико-биологические исследования, научная аппаратура, космический полёт

Разработка научной аппаратуры (НА) для проведения медико-биологических исследований в условиях космического полёта является комплексной задачей, требующей от специалиста достаточно глубоких знаний в области гравитационной физиологии, понимания особенностей протекания физических процессов в условиях невесомости и специфики интеграции научной аппаратуры в состав пилотируемого орбитального комплекса, а также обеспечения создания технического средства, безопасного как для экипажа, так и для космического аппарата.

Научная аппаратура, применяемая при проведении исследований на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) в области космической биологии и физиологии, в большинстве случаев представляет собой комплект или комплекс, состоящий из укладок, обеспечивающих одну из следующих функций:

- проведение исследования в условиях космического полёта,
- доставка расходных материалов на РС МКС,
- возврат на Землю результатов исследования.

Данное деление обусловлено различными факторами, основными из которых являются показатели сохраняемости используемых составных частей изделий (например, срок службы приборов составляет не менее пяти лет, а электродов одноразовых не более трёх лет) и оптимизация грузопотока: в космическом эксперименте (КЭ) ОМИКи-СПК (оценка состояния здоровья и адаптивных резервов человека по сухим пятнам крови методами протеомики, метабономики и липидомики) на борту РС МКС хранилась укладка «Хромато-масс-1» массой 1,0 кг, для выполнения КЭ в течение нескольких лет были доставлены расходные материалы массой 3,6 кг, а возвращено на Землю 1,8 кг.

Научная аппаратура, предназначенная для проведения медико-биологических исследований, может быть отнесена к одной из следующих групп:

- изделия, обеспечивающие регистрацию информации о функционировании систем (органов) человека,
- изделия, обеспечивающие работу с пробами биологических материалов, полученных от человека,
- изделия, обеспечивающие проведение исследований с биологическими объектами,
- изделия, обеспечивающие проведение исследований в области радиационной безопасности экипажа.

Для регистрации физиологической информации на борту РС МКС применялись изделия, реализовавшие 19 различных методов определения изменений в состоянии здоровья и работоспо-

Смирнов Юрий Игоревич — старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, yusmirnov@imbp.ru

Ярманова Евгения Николаевна — заместитель главного конструктора, zhanna@imbp.ru

Седлецкий Владислав Сергеевич — начальник лаборатории, sedletskiy@imbp.ru

способности человека в условиях космического полёта. Уникальные результаты удалось получить в ходе экспериментов «Кардиовектор» и «Сонокард» с использованием одноименной научной аппаратуры, использовавшей метод баллистокардиографии, обеспечивший получение данных о смещении тела человека в невесомости, обусловленные деятельностью сердца.

В связи с тем, что для исследователей представляет большой интерес выявление механизмов адаптации биологических объектов к воздействию комплекса факторов космического полёта на белковом и молекулярном уровне, разработчикам научной аппаратуры ставятся задачи по изготовлению изделий, обеспечивающих либо отбор, консервирование и возврат проб на Землю, либо проведение анализа на борту пилотируемого комплекса.

Для проб, возвращаемых на Землю, критичным становится соблюдение температурного цикла, начиная от консервирования пробы, прошедшей предварительную подготовку, до её получения исследователем на месте посадки спускаемого аппарата. В связи с тем, что в составе спускаемого аппарата транспортного пилотируемого корабля «Союз» нет технической возможности по подключению к бортовой сети активных термостатов, специалистами Института медико-биологических проблем РАН (ГНЦ РФ – ИМБП РАН) была разработана термосумка «Возврат», обеспечивающая спуск на Землю замороженных проб крови. Данное изделие является «срочным» грузом и извлекается из спускаемого аппарата на месте посадки сразу после эвакуации из него экипажа. Также уникальной разработкой ГНЦ РФ – ИМБП РАН является комплект «Хромато-масс-1», обеспечивающий возврат на Землю для последующих исследований методом хромато-масс-спектрометрии сухих пятен крови. Данное изделие успешно использовалось в исследовательских целях в КЭ «Хроматомасс-спектр М» и «ОМИКи-СПК».

При разработке аналитических приборов ключевой сложностью становится отличие поведения газожидкостных смесей в условиях невесомости и гравитации. В связи с этим, большинство изделий, предназначенных для проведения анализа биологических жидкостей на борту РС МКС, используют методы «сухой химии». Данные методы основаны либо на изменении проводимости измерительного поля тест-полоски вследствие химической реакции между химическим веществом, нанесённым на измерительное поле, и определяемым показателем крови (комплект «Лактат-2») или на изменении цвета измерительного поля вследствие химической реакции (комплект «Аккуспорт»).

Биологические исследования на РС МКС связаны со следующими основными сложностями:

- обеспечение безопасности экипажа и пилотируемого комплекса от возможного попадания биологических объектов, используемых жидкостей или газов в атмосферу МКС;
- обеспечение жизнедеятельности биологических объектов;
- проведение инструментальных исследований с биологическими объектами.

Отдельного внимания заслуживает разработанная ГНЦ РФ – ИМБП РАН и использованная на борту МКС в рамках КЭ «Растения» оранжерея «Лада». Помимо значительного объёма знаний в области физиологии растений, разработчиками НА был получен уникальный опыт по решению технологической задачи: создание и эксплуатация питательных сред, входящих в состав корневых модулей оранжереи, в условиях невесомости.

Исследования в области радиационной безопасности, помимо разработки новых средств определения количественного и качественного состава ионизирующего излучения как внутри, так и снаружи пилотируемого комплекса, направлены на разработку

средств защиты экипажа. Положительный результат был показан по результатам эксперимента «Матрёшка-Р» с разработанной ГНЦ РФ – ИМБП РАН «Шторкой защитной», которая размещалась в каюте члена экипажа в служебном модуле РС МКС. В дальнейшем планируется модернизация изделия и его включение в состав штатных средств, обеспечивающих радиационную безопасность экипажа.

Ключевая особенность космических экспериментов на борту РС МКС состоит в том, что его методика реализуется не специалистом, разработавшим эксперимент, а космонавтом. В связи с этим разработчиками научной аппаратуры и постановщиками экспериментов уделяется большое внимание наземной отработке созданных изделий и методики их использования в лабораторных и стендовых условиях с целью выявления возможных операторских ошибок, неоднозначности прочтения инструкции, иных факторов, которые могут привести к потере данных и невыполнению программы космического эксперимента. Также важным элементом реализации бортового эксперимента выступает техническое сопровождение специалистами сеансов КЭ, заключающееся в оперативном выявлении причин неполадок в работе аппаратуры на борту МКС анализом информации, полученной от космонавта, моделирования ситуации на Земле и разработки рекомендаций по устранению возникшей ситуации.

Опыт создания научной аппаратуры для медико-биологических исследований на РС МКС, полученный специалистами ГНЦ РФ – ИМБП РАН, а также потребности исследователей в области гравитационной физиологии ставят перед разработчиками задачу унификации научной аппаратуры, обеспечивающей предоставление исследователю набора инструментов, достаточного для проведения космического эксперимента. Данный подход обеспечит снижение затрат на подготовку космического эксперимента и, следовательно, облегчит доступ широкому кругу исследователей к уникальной лаборатории на низкой околоземной орбите.

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC HARDWARE FOR BIOMEDICAL INVESTIGATIONS ONBOARD RS ISS

Yu. I. Smirnov, E. N. Yarmanova, V. S. Sedletskiy

Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: biomedical investigations, scientific hardware, space flight

ЗАДАЧИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПАО РКК «ЭНЕРГИЯ» С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОГО СЕКМЕНТА ПЛАНИРОВАНИЯ И ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Л. А. Смоленцева, М. Ю. Беляев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: МКС, дистанционное зондирование Земли, спектр, обработка информации, наземные исследования, автоматизация

Необходимость научно-технической поддержки космических исследований впервые появилась на долговременной орбитальной станции (ДОС) «Салют-4», которая была выведена на орбиту 26 декабря 1974 г. На станции было установлено новое научное оборудование — рентгеновский телескоп-спектрометр «Филин», зеркальный рентгеновский телескоп РТ-4, инфракрасный телескоп-спектрометр ИТС-К и другие. На станциях «Салют» была установлена система ориентации и управления движением для решения служебных задач полёта и выполнения экспериментов, которая обеспечивала автоматическую и ручную ориентацию станции, а также её разворот и ориентацию осей станции в заданные точки небесной сферы. Для наведения научной аппаратуры и разворота станции необходимо было делать расчёты моментов времени перехода станции в инерциальную ориентацию, углы разворотов. Расчёты проводились баллистическим Центром министерства обороны. Так как станция не имела возможности дозаправки топливом, для дополнительного изучения небесной сферы телескопами были предложены и разработаны специальные методы выполнения наблюдений в режимах закрутки станции и оперативно создано специальное математическое обеспечение. (Беляев, 1978, 1984, 2020). На станциях «Салют» второго и третьего поколения «Салют-4, -6, -7» для контроля ориентации были установлены датчики контроля ориентации (солнечный датчик и магнитометр), которые позволяли оперативно получать телеметрическую информацию. Расчёт ориентации для теневого части орбиты требовал более сложного решения. Приём и обработка информации проходила в Центре управления полётами рядом с г. Евпатория (ЦУП-Е), который был оснащён ЭВМ М-220. В процессе полёта станции «Салют-4» были разработаны новые способы описания возмущённого движения космического аппарата, методы интегрирования, алгоритмы определения ориентации, которые позволили ускорить процесс оперативной обработки получаемой информации и минимизировать используемый объём оперативной памяти ЭВМ (Беляев, 1974, 1976, 1978, 1984, 2020; Беляев, Семенко, 1976). Станции третьего поколения имели стыковочный узел и позволяли находиться на орбите одновременно двум кораблям «Союз» или одному кораблю «Союз» и грузовому кораблю «Прогресс». Использование грузовых кораблей «Прогресс» за счёт доставки топлива и новой научной аппаратуры позволило расширить возможности проведения научных исследований в космосе.

Для выполнения программы «Союз-Аполлон» в г. Королёв был создан ЦУП-М и управление полётами станций «Салют-6, -7» было решено перенести в г. Королёв. Для обеспечения и оперативно-но управления экспериментами в главной группе управления была организована группа анализа и обеспечения экспериментов. Опыт

Смоленцева Лилия Алексеевна — главный специалист, post@rsce.ru

Беляев Михаил Юрьевич — научный руководитель, Mikhail.Belyaev@rsce.ru

проведения экспериментов на станциях «Салют» позволил создать и отработать технологию проведения космических исследований, наземный комплекс управления экспериментами. Научно-техническая поддержка экспериментов проводилась в ЦУП и параллельно в ПАО «РКК «Энергия». На орбитальном комплексе «Мир», а потом и Международной космической станции (МКС) появились новые возможности научно-технической поддержки экспериментов, в том числе благодаря развитию вычислительной техники, новым каналам связи.

Основные задачи научно-технической поддержки экспериментов:

- планирование экспериментов,
- построение рациональных схем выполнения экспериментов,
- создание математических моделей,
- автоматизированный контроль состояния станции и научной аппаратуры,
- экспресс-анализ научных данных,
- проведение расчётов различной информации для интерпретации результатов экспериментов, получаемой от станции и научной аппаратуры.

ПАО «РКК» Энергия» был организован ряд космических экспериментов на российском сегменте (РС) МКС, в том числе и для отработки технических средств и методов дистанционного зондирования Земли (Беляев, 2021; Беляев и др. 2011, 2014, 2015а, б, 2018б, 2021 ; Belyaev et al., 2018).

На данный момент научная информация по экспериментам приходит по каналам связи в ЦУП, а затем поступает в ПАО «РКК «Энергия». Для оперативного наземного моделирования условий проведения эксперимента, выбора объектов и схемы исследования, проведения экспресс-анализа и предварительной обработки полученных данных в ПАО «РКК «Энергия» создаются автоматизированные рабочие места (АРМ):

- ВСС (видеоспектральная съёмка),
- СОВА,
- «Икарус»,
- «Прогресс»,
- «Фото Ураган»,
- «Среда-МКС»,
- «Вектор-Т»,
- «Моделирование космических экспериментов/целевых работ и полётных операций».

Указанные АРМ, связанные между собой и с ЦУП через сетевое хранилище, были объединены в единый комплекс сопровождения полётов космических аппаратов (КСП КА) для научно-технической поддержки экспериментов ПАО «РКК «Энергия».

В мае 2023 г. в рамках космического эксперимента «Ураган» на борт РС МКС была доставлена новая научная аппаратура видеоспектральной съёмки (НА ВСС), созданная Научно-исследовательским учреждением «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета по техническому заданию ПАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королёва. НА ВСС предназначена для проведения измерений характеристик отражённого излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн от 400 до 950 нм при выполнении мониторинга земной поверхности. Мониторинг реализуется через покадровую съёмку с регистрацией сопутствующих спектров высокого разрешения в каждой точке трёх пространственных полос, расположенных в разных местах поперёк кадра изображения. Съёмка научной аппаратурой ВСС может проводиться вручную, с помощью установочного кронштейна

или с помощью платформы наведения системы ориентации видео-спектральной аппаратуры (ПН СОВА) (Беляев, 2021; Беляев и др., 2018а).

АРМ ВСС обеспечивает анализ спектральных данных, полученных при исследовании земной поверхности с помощью НА ВСС и включает на данный момент в себя программы для моделирования условий проведения эксперимента и для экспресс-обработки данных. С помощью программного обеспечения для экспресс-обработки оператор формирует исходные данные на планирование эксперимента с выполнением спектрометрирования при съёмке земной поверхности, архивирует и анализирует полученные спектральные данные, оперативно принимает решения о целесообразности планирования последующих сеансов измерений, корректирует содержание исходных данных в части оптимизации настроек научной аппаратуры с целью повышения эффективности выполняемых целевых работ на РС МКС и использования ресурсов и полётного времени станции. Программное обеспечение позволяет проводить атмосферную коррекцию и получать функции спектральных альbedo поверхности на основе спектральной базы данных коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), приведённых к поверхности Земли. НА ВСС возможно использовать и для изучения атмосферы Земли.

АРМ СОВА обеспечивает планирование проведения сеансов и разработку исходных данных для НА СОВА совместно с НА ВСС или фотоаппаратурой.

АРМ «Икарус» обеспечивает подготовку исходных данных для планирования и декодирование целевой информации НА «Икарус». НА «Икарус», установленная на РС МКС, получает информацию с тегов, установленных на движущихся живых и условно статичных географических объектах, и передаёт данные на Землю. С помощью АРМ «Икарус» происходит автоматизированная обработка информации, в ПАО «РКК «Энергия» проводится экспресс-анализ и предварительная обработка, далее информация передаётся в Институт географии РАН и другим участникам КЭ.

АРМ «Прогресс» обеспечивает подготовку исходных данных для планирования и анализа целевой информации научной аппаратуры, установленной на транспортном грузовом корабле «Прогресс».

АРМ «Фото Ураган» обеспечивает послесеансный анализ снимков по космическим экспериментам «Ураган», «Сценарий», «Дубрава». На данном АРМ проходит обработка, привязка и анализ полученных снимков с помощью фотоаппаратуры, НА ВСС, ПН СОВА.

АРМ «Моделирование КЭ/ЦР и полётных операций» обеспечивает моделирование для планирования, проведения и обработки результатов космических экспериментов с использованием различной научной аппаратуры.

АРМ «Вектор-Т» обеспечивает анализ баллистико-навигационных данных для КЭ по формированию экспериментальной системы высокоточного прогнозирования движения МКС. В рамках эксперимента, например, изучается движение свободно падающего тела внутри герметичного отсека станции, решаются задачи прогнозирования движения станции по орбите, на основе экспресс-анализа снимков определяется орбита космического аппарата и т. д.

АРМ «Среда-МКС» обеспечивает подготовку исходных данных для планирования и анализ параметров МКС как техногенной среды проведения различных исследований. В рамках эксперимента проводятся исследования колебаний конструкции, вызванные работой двигателей, фоновые возмущения на МКС и возмущения при физических упражнениях экипажа (Беляев и др., 2011, 2013; Завалишин и др., 2010). С помощью анализа фото- и видеосъёмки проводится определение деформации корпуса станции (Завалишин и др., 2010) и решаются другие задачи.

Сетевое хранилище информации обеспечивает хранение исходных данных (баллистических, навигационных и т. д.) о полёте МКС и результатов проведения сеансов космических исследований.

Методы планирования, математические модели, автоматизация контроля состояния научной аппаратуры, МКС, а так же методы экспресс-анализа и технические средства для проведения исследования земной поверхности, отработанные в рамках проведения космических экспериментов, могут быть использованы в дальнейшем при исследовании земной поверхности с помощью автоматизированных спутниковых систем и решении других новых задач.

Литература

- Беляев М. Ю.* Об одном способе описания возмущенного движения спутника // Ученые записки ЦАГИ. 1974. Т. 5. № 6. С. 48–54.
- Беляев М. Ю.* Определение углового положения космического аппарата по данным телеметрических измерений // Ученые записки ЦАГИ. 1978. Т. 9. № 4. С. 115–121.
- Беляев М. Ю.* Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
- Беляев М. Ю.* Технологии проведения космических экспериментов на орбитальных станциях: От станций «Салют» до МКС // Тр. 55-х Чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского: материалы докл. 2020. С. 5–24.
- Беляев М. Ю.* Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107.
- Беляев М. Ю., Семенко В. П.* Об одном способе численного интегрирования дифференциальных уравнений // Косм. исслед. 1976. Т. 14. Вып. 2. С. 300–301.
- Беляев М. Ю., Бабкин Е. В., Рябуха С. Б., Рязанцев В. В.* Микроускорения на Международной космической станции при физических упражнениях экипажа // Косм. исслед. 2011. Т. 49. № 2. С. 167–181.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Рябуха С. Б.* Микровозмущения на Международной космической станции // Научно-техн. журн. «Космическая техника и технологии». 2013. № 3. С. 14–24.
- Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др.* Результаты испытаний фото-спектральной системы на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю. и др.* (2015а) Аппаратура и программно-математическое обеспечение для изучения земной поверхности с борта российского сегмента Международной космической станции по программе «Ураган» // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1. С. 63–70.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю. и др.* (2015б) Изучение с борта российского сегмента Международной космической станции в рамках программы «Ураган» катастрофических явлений, вызывающих экологические проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1. С. 71–79.
- Беляев М. Ю., Викельски М., Лампен М. и др.* (2015в) Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на российском сегменте МКС // Косм. техника и технологии. 2015. № 3. С. 38–51.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Боровихин П. А. и др.* (2018а) Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции. // Косм. техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 69–78.
- Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Иванов Д. А. и др.* (2018б) Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть II. Методика для изображений и результаты применения. // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 223–234.

Завалишин Д. А., Беляев М. Ю., Сазонов В. В. Определение характеристик частот упругих колебаний конструкции МКС // Косм. исслед. 2010. Т. 48. № 4. С. 362–370.

Belyaev M. Yu., Cheremisin M. V. Esakov A. M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment. // 69th Intern. Astronautical Congress (IAC). Bremen, Germany, 1–5 Oct. 2018. Article IAC-18-F1.2.3. P. 1–9.

TASKS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT OF EXPERIMENTS OF THE PJSC RSC ENERGIA BY MEANS OF THE EARTH SEGMENT OF PLANNING AND EXPRESS ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS

L. A. Smolentseva, M. Yu. Belyaev

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: ISS, Earth remote sensing, spectrum, information processing, ground research, automation, remote sensing of the Earth, ISS

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И РОССИЙСКАЯ ОРБИТАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ

В. А. Соловьёв

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Россия

Ключевые слова: пилотируемая космонавтика, орбитальные станции, РОС

Значение пилотируемой космонавтики невозможно переоценить. В ходе пилотируемых программ отрабатывается большинство космических технологий, которые в последствие применяются, в том числе, и для использования автоматических аппаратов.

Проводится широкий спектр научно-прикладных исследований. Отрабатываются подходы, методики и технологии для освоения дальнего космоса. Формируется спрос на новые технические решения, которые затем используются как в космонавтике, так и народном хозяйстве.

Пилотируемая космонавтика — это большой рынок. На сегодняшний день при общем обороте мировой космической индустрии порядка 400 млрд дол. в год на пилотируемую космонавтику приходится порядка 25 %.

Российская пилотируемая космонавтика базируется на функционировании российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), развёртывание которой начато в 1998 г. с запуском блока «Заря». Проект МКС фактически обеспечил сохранение компетенций, созданных в советский период, начиная с 1961 г. от «Востока» до «Мира».

Вклад России в проект МКС составляет около 10 % от суммарных затрат. При этом Россия обладает правами на 30 % ресурсов МКС. По программе МКС получено внебюджетное финансирование, примерно сопоставимое с госбюджетным финансированием.

Сегодня МКС и китайская станция «Тяньгун» представляют основу пилотируемой космической индустрии. В развитие пилотируемой космонавтики США параллельно работают над несколькими проектами пилотируемых околоземных станций («Аксиом» (*англ.* Axiom), «Орбитальный риф» (*англ.* Orbital Reef), «Старлаб» (*англ.* Starlab) и др.). Европейцы работают над своим проектом околоземной станцией «ЭйрбасЛуп» (*англ.* Airbus LOOP).

Большое значение придаётся освоению Луны, где к традиционным лидерам США с их проектом окололунной станции Гейтвей, российско-китайскому партнёрству с международной научной лунной станцией, недавно добавилась Индия.

Пилотируемые орбитальные станции — это опорные точки в освоении космоса у всех ведущих космических держав. В планах освоения космического пространства построение РОС выступает ключевым этапом формирования постоянной орбитальной группировки нового поколения. К 2040-м гг. РОС должна стать базовым инфраструктурным центром для автономных платформ и межорбитальных транспортных аппаратов.

Новая суверенная орбитальная станция, как опорная точка для освоения космического пространства — это:

- исследовательская, экспериментальная и производственная космическая платформа;
- принципиально новый подход к развёртыванию и обслуживанию орбитальных группировок космических аппаратов;

Соловьёв Владимир Алексеевич — генеральный конструктор, заместитель генерального директора, академик РАН

- звено системы национальной безопасности в околоземном пространстве.

Решение указанных задач позволит повысить престиж и сохранить глобальное лидерство России. Благодаря решению 2022 г. о начале работ по проектированию станции в этом году эскизный проект был разработан.

Облик станции сформирован с учётом потребностей ряда ведомств и научных организаций и корпораций (РАН, Минприроды, МЧС, Минсельхоз, Минобороны, ФСБ, Росатом). Это предопределило основные её характеристики: полярную орбиту, состав целевой аппаратуры, требования к энергообеспечению и системам связи, а также состав и конструкцию орбитального комплекса.

Подготовлен Федеральный проект создания РОС (2024–2033). Он поддержан Минэкономразвития, Минобороны и Коллегией ВПК. Проверена и подтверждена готовность всех предприятий кооперации к полномасштабным работам, начиная с 2024 г.

Почему работы нужно начинать в 2024 г.? На это есть несколько причин:

- МКС не отвечает текущим запросам заказчиков в силу своего технического состояния, международного статуса и используемых технологий прошлого века (*80 % оборудования РС МКС работает за пределом ресурса. Более 50 % полезного времени экипаж тратит на ремонт служебного оборудования*).
- Необходимо сохранение ключевых компетенций в конструировании орбитальных модулей, пилотируемых космических кораблей, наземных космических комплексов, управлении полётом пилотируемых космических объектов, что обеспечивается непрерывностью пилотируемой программы.

Продление эксплуатации российского сегмента МКС возможно только до 2028 г. Соответственно, с учётом технологических циклов, необходимо начать работы по РОС с начала 2024 г. В конечном итоге Россия может потерять лидерство и технологический суверенитет в космической индустрии.

Открытая архитектура РОС обеспечит бессрочную эксплуатацию станции и позволит решать широкий спектр задач прикладных и фундаментальных космических исследований.

Станция будет выполнять следующие четыре основных направления целевых работ:

Первое — это отработка новой целевой космической аппаратуры, которая позволит повысить надёжность эксплуатации группировок автоматических спутников. Предусмотренное транспортно-техническое обеспечение станции и универсальные рабочие места на её модулях повысят оперативность испытаний аппаратуры и снизит её стоимость. Сокращение времени испытаний и обслуживания спутников на орбите позволит увеличить срок эксплуатации автоматических аппаратов.

Второе — это интегральное наблюдение Земли. Большая энергетическая мощность позволит разместить на станции весь необходимый набор систем радиолокационного и оптического диапазонов. Интегральное наблюдение Земли в разных диапазонах придаст новое качество результатам наблюдения и анализа данных. Вычислительные мощности РОС при постоянной связи со спутниковыми группировками обеспечат оперативную обработку и передачу информации на Землю.

Третье — РОС как производственная база позволит создавать уникальные материалы, органические и неорганические сверхчистые кристаллы, высокотехнологичные сплавы, имплантаты органов и тканей человека, первичные фармацевтические ингредиенты. Также на РОС возможна сборка крупногабаритных и трансформи-

руемых конструкций, используемых для решения различных космических задач.

Четвёртое — РОС как пилотируемая лаборатория космических исследований по сравнению с МКС позволит расширить области исследования солнечной системы, физики космических лучей, Земли, а также космической биологии и физиологии.

На борту РОС возможно осуществлять хранение, подготовку к запуску и управление группировками малых аппаратов посредством межспутниковой радиолинии, дозаправку и ремонт космических аппаратов.

Совокупность полезных нагрузок, решающих задачи наблюдения и мониторинга позволит проводить на борту станции отработку новых технологий и организовать постоянно действующую лабораторию различного рода экспериментов.

Планируется начать развёртывание РОС с первого научного энергетического модуля (НЭМ) в 2027 г. В 2028 г. планируется выведение узлового и шлюзового модулей РОС, в 2029 г. — выведение базового модуля. Данная минимальная конфигурация 1-го этапа создания РОС позволит начать полноценную научную деятельность на станции.

Начиная с 2032 г. РОС должна быть дооснащена целевыми модулями, в том числе свободноплетающим, которые предназначены для размещения аппаратуры различного назначения.

РОС как элемент системы национальной безопасности и неоспоримое подтверждение статуса космической державы создаст общественное благо для граждан России.

Каждая из услуг, предоставляемых с использованием РОС, даст положительные отраслевые эффекты для отечественной науки, космической индустрии, использования природных ресурсов, транспортной системы страны, включая Северный Морской Путь.

РОС обеспечит новое качество использования околоземного космического пространства. Использование современного многофункционального пилотируемого космодрома «Восточный» для РОС — это гарантия независимости России в области космической деятельности. Ключевое преимущество РОС — открытая архитектура, обеспечивающая непрерывную эксплуатацию станции и позволяющая решать широкий спектр задач прикладных и фундаментальных космических исследований. РОС — это платформа для отработки технологий полётов на Луну и строительства лунной базы и стапель для сборки межпланетного экспедиционного комплекса.

THE STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF MANNED SPACE ASSETS AND THE RUSSIAN ORBITAL STATION

V. A. Solovyov

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: manned cosmonautics, orbital stations, ROS

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕКМЕНТЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

**В. Н. Сычев, В. Р. Алексеев, Т. С. Гурьева, О. А. Гусев, О. Н. Ларина,
М. А. Левинских, С. В. Поддубко, И. Г. Подольский**

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Зоологический институт РАН, Москва Россия

Институт фундаментальной медицины и биологии Казанского
федерального университета, Казань, Россия

Ключевые слова: гравитационная биология, биологические системы жизнеобеспечения, экзобиологические исследования, образовательные эксперименты

Биологические эксперименты на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) условно можно разделить на несколько направлений. Это гравитационная биология, биологические системы жизнеобеспечения (БСЖО), экзобиология и общеобразовательные эксперименты. Космические исследования на борту орбитальных станций позволили увидеть, насколько факторы космического полёта (ФКП) агрессивны по отношению к биологической материи. Конечно, реакция разных организмов на воздействие ФКП будет различаться, но, главное, мы всегда наблюдаем эту реакцию. Воздействие ФКП может и не приводить к пагубным последствиям для организма, всё же биологическая материя способна адаптироваться к неблагоприятным факторам. Однако в каждом конкретном случае необходимо точно оценивать пределы адаптации того или иного биологического объекта. Биологические эксперименты на борту орбитальных станций с различными представителями растительного и животного мира дают возможность исследовать воздействие ФКП на разные уровни биологической организации, что позволяет оценить и минимизировать пагубные последствия воздействия ФКП на организм человека. Исследования в условиях космического полёта биологических объектов, которые могут быть включены в состав БСЖО, отличаются от исследований, которые проводились и проводятся в интересах фундаментальной науки. Это связано с тем, что исследования по проблеме БСЖО включали не только биологические, но и инженерно-технические и технологические исследования. В этих исследованиях решалась двуединая задача — в первую очередь обеспечить исследуемый организм всем необходимым с учётом его функционирования в системе жизнеобеспечения и только после этого смотреть, что же с ним будет происходить в условиях космического полёта при его функционировании в качестве возможного звена системы жизнеобеспечения. Экзобиологические исследования направлены на получение информации о пределах выживания биологической материи в космосе. Объектом исследований стали покоящиеся формы биологической материи, находящейся на разных уровнях биологической организации. Перспективные возможности сигнального управления адаптационными процессами в организмах, принадлежащих к различным таксономическим груп-

Сычев В. Н. — доктор биологических наук, vnsychev@imbp.ru

Алексеев В. Р. — доктор биологических наук, alekseev@yahoo.com

Гурьева Т. С. — кандидат биологических наук, gurieva@imbp.ru

Гусев О. А. — кандидат биологических наук, gaijin.ru@gmail.com

Ларина О. Н. — olarina@imbp.ru

Левинских М. А. — кандидат биологических наук, ritalev@imbp.ru

Поддубко С. В. — кандидат биологических наук, poddubko@imbp.ru

Подольский И. Г. — доктор биологических наук, igorp@imbp.ru

пам в филогенетическом ряду от бактерий до млекопитающих и высших растений, представляют значительный интерес для космической биологии и для медико-биологического обеспечения существования человека в дальнем космосе. Кроме этого, экзобиологические исследования связаны с проблемой биологической угрозы, так как биологическая угроза обуславливается не только возможным проникновением в биосферу Земли инопланетной биологической материи, но и возможной трансформацией собственно земной биологической материи, находящейся в состоянии покоя, при её нахождении в условиях космического пространства и/или в активном состоянии на борту межпланетных космических аппаратов и на напланетных базах.

В таблице представлен перечень экспериментов в области космической биологии, проведённых на борту российского сегмента МКС в течение 25 лет.

Биологические исследования на борту РС МКС

№	Космические эксперименты (КЭ)	Экспедиции на МКС	Время проведения КЭ	Кол-во сеансов КЭ
<i>Гравитационная биология</i>				
1	«Статокония»	МКС-10...-15	2004–2007	6
2	«Регенерация»	МКС-11...-55/56	2005–2018	13
3	«Полиген»	МКС-19/20, -21/22, -23/24, -27/28, -29/30, -34/35, -44/45, -49/50, -53/54	2009–2013, 2015–2018	10
4	«Рефлекс»	МКС-63, -66, -67	2020–2022	5
5	«Цитомеханаариум»	МКС-65/66, -66/67, -67/68/69, -70	2021, 2022, 2023	3
<i>Биологические системы жизнеобеспечения</i>				
6	«Растения-1»	МКС-2, -15, -37/38	2001, 2007, 2013	3
7	«Растения-2»	МКС-5,...-14, -16, -17, -19, -20, -21/22, -22/23, -24/25	2002–2011	18
8	«Аквариум»	МКС-13, -16	2006, 2008	2
9	«Аквариум-АQH»	МКС33/34, -37/38, -41/42	2012, 2014	3
10	«Инкубатор-3»	МКС-70 (план)	2023–2024	1
<i>Экзобиологические исследования</i>				
11	«Биориск-МСН-1»	МКС-15, -16, -18, -21/22	2007–2010	3
12	Expose-R	МКС-18, -25/26	2008–2011	1
13	«Биориск-МСН-2»	МКС-27/28, -31/32, МКС-35/36, -39/40	2011–2014	3
14	Expose-R2	МКС-40/41, -43/44	2014–2016	1
<i>Образовательные КЭ в рамках биологических исследований</i>				
15	«Растения-2 (МикроЛАДА)»	МКС-12, -14, -16, -17	2006, 2007, 2008	4
16	«Ряска»	МКС-60/61	2019	1
17	«Фототропизм»	МКС-66/67	2022	1

Гравитационная биология

КЭ «Статокония». Для выяснения влияния невесомости на структурно-функциональную организацию гравирецептивной системы животных на борту РС МКС были проведены исследования с использованием наземной лёгочной улитки *Helix lucorum*. У улиток *H. lucorum*, находившихся в условиях невесомости, имело место увеличение общего числа и размеров статоконий, и появление большого числа неминерализованных образований в полости статоциста, очевидно ядер (зародышей), для роста новых статоконий. Увеличение общего числа и размеров статоконий и размеров статолитов в невесомости и вместе с тем деструктивное влияние повышенной весомости свидетельствуют о том, что гравитационное поле — значимый фактор абиотической среды, ответственный за формирование «пробной» массы в органе равновесия животного.

КЭ «Регенерация». Выяснение значимости силы тяжести в различных жизненных процессах у земных организмов — парадигма космической биологии. Одной из таких задач представляется изучение возможности восстановления органов и тканей в условиях воздействия ФКП после их повреждения либо полной утраты. В экспериментах использовались планарии *Girardia tigrina*, на которых проводили изучение регенерации целого организма из его фрагментов, а на наземных лёгочных улитках *Helix lucorum* изучали регенерацию глазных щупалец, ноги и наружного скелета (раковины). Результаты, полученные в экспериментах «Регенерация», свидетельствуют о том, что невесомость не является лимитирующим фактором для реализации механизмов регенерации.

КЭ «Полиген». Основная задача эксперимента «Полиген», в котором проводилось экспонирование на борту РС МКС природных популяций и лабораторных линий *D. Melanogaster*, — выявление генетических показателей, определяющих различия устойчивости биологических объектов к возникновению мутаций в условиях космического полёта. Результаты исследований по программе КЭ «Полиген» свидетельствуют о различиях в устойчивости популяций/линий *D. melanogaster* к мутагенному воздействию ФКП.

КЭ «Рефлекс». Изучение изменений поведения модельного биообъекта *Drosophila melanogaster* в результате воздействия условий космического полёта. В частности, исследование локомоторного поведения дрозофил (анализ двигательной активности, тест на негативный геотаксис); определение параметров работы центрального генератора паттерна звукопродукции; определение нейрохимических коррелятов выявленных поведенческих изменений. В результате ФКП привели к повышению активности центральных генераторов моторного паттерна (CPG), причем у личинок эти изменения проявлялись в большей степени, чем у имаго.

Биологические системы жизнеобеспечения

КЭ «Растения-1». Включали три технологических КЭ: «Растения-1 — Массоперенос», «Растения-1 — Лада/МИС» и «Растения-1 — ТермоЛада». В первом эксперименте исследовали скорость распространения влаги в капиллярно-пористых телах; во втором КЭ изучалась скорость диффузии кислорода в увлажнённых капиллярно-пористых телах; в третьем КЭ оценивали эффективность контроля датчиков температуры для функционирования оранжерейных устройств в длительном космическом полете. Результаты, полученные в этих КЭ, позволили отработать алгоритмы водо- и газо-обеспечения высших растений в оранжерее «Лада», а также внести необходимые изменения во вновь создаваемую оранжерею «Лада-2».

КЭ «Растения-2». В КЭ «Оранжерея» на борту орбитального комплекса «Мир» были получены важные результаты, которые показали, что в условиях космического полёта показатели фотосинтетической

активности растений, их морфологические и биометрические характеристики существенным образом не изменяются. Не обнаружено влияния на развитие генеративных органов, образование споро- и гаметоцитов, оплодотворение, формирование зародыша и запасующих веществ семени. Однако не было данных об изменениях в генотипе высших растений. В экспериментах «Растения-2—Лада» основное внимание было направлено на получение информации о состоянии генетического аппарата высших растений в условиях космического полёта. В результате в условиях космического полёта на борту РС МКС впервые было получено четыре последовательных поколения семян генетически маркированной линии гороха. Показано, что характеристики роста и развития растений гороха различных линий при выращивании в течение полного цикла онтогенеза в космической оранжерее «Лада» существенным образом не изменяются по сравнению с наземным контрольным вариантом. Впервые в мире с использованием молекулярного метода RAPD-праймеров (англ. Random Amplified Polymorphic DNA) по 10 маркерам и анализа хромосомных аббераций показано, что у растений, прошедших четыре полных цикла развития в условиях космического полёта, не выявлен генетический полиморфизм, что позволяет говорить об отсутствии влияния факторов космического полёта на генетический аппарат растений в первом—четвертом «космическом» поколениях. Анализ результатов по выращиванию четырёх последовательных генераций гороха линии 131 позволяет говорить о том, что растения могут длительное время, сопоставимое с длительность марсианской экспедиции, выращиваться в условиях космического полёта без потери репродуктивных функций и формировать при этом жизнеспособные семена. Кроме этого, в КЭ «Растения-2—Лада» при исследовании интенсивности экспрессии 20 генов «космического» ячменя было обнаружено, что в условиях космического полёта наблюдался повышенный уровень экспрессии трёх генов, ответственных за оксидативный стресс, что напрямую было связано с высоким содержанием поллютантов в воздушной среде МКС после возобновления строительства станции.

КЭ «Аквариум». После месячной экспозиции на борту РС МКС покоящихся эфипий (эмбриональные клетки в состоянии покоя) рачков дафний при культивировании на Земле установлено достоверное ухудшение параметров жизненного цикла *D. magna*, в частности снижение плодовитости и удлинение времени созревания у особей, экспонированных на МКС. Главное, воздействие ФКП на неактивные эмбриональные клетки проявилось и во второй генерации дафний, вызвав переход от партеногенеза к гамогенезу и появлению в популяции самцов. Данные факт указывает на то, что даже в состоянии диапаузы эмбриональные клетки способны воспринять воздействие ФКП и передать эту информацию потомству.

КЭ «Аквариум-AQN». В рамках данного КЭ проводился российский КЭ с личинками хирономиды. Впервые проведён полногеномный анализ экспрессии мРНК в организмах, реактивированных из состояния криптобиоза в условиях космического полёта, а также анализ протекания метаморфоза у водных насекомых в условиях космического полёта. В результате проведения КЭ было впервые установлено, что реактивация, восстановление метаболизма и активности в личинках хирономиды в невесомости происходит без значительных отличий от такового на Земле. Впервые показана возможность полного цикла метаморфоза водных насекомых в условиях космического полёта и формирования жизнеспособных взрослых особей. В то же время, генетический профиль у реактивируемых личинок был различен в условиях невесомости и в наземном контроле: в условиях космического полёта увеличение экспрессии генов ряда ключевых групп генов происходило со значительным запаздыванием с таковым в контроле. Гены специфичные для криптобиоза (LEA, P1MT и др.)

в отличие от наземного контроля не снижали уровень экспрессии в реактивированных личинках даже через 24 ч.

При проведении российско-японского КЭ на борту МКС экспонировали рыб медака и зебра-фиш. С точки зрения поведения и морфометрии рыбы медака вполне нормально себя чувствовали в космосе, а с точки зрения генетики присутствовали очень значительные отклонения. Причём часто одинаковые каскады генов одинаково реагировали в разных тканях. Особенно важны обнаруженные изменения в кальциевых путях и в путях, связанных с мышечными тканями. Получается, что, несмотря на водную среду и с виду нормальное плавание, космический полет вызывает изменения в генетических путях, которые традиционно считаются «изменяющимися в условиях невесомости у сухопутных животных». С точки зрения поведения и морфометрии рыбы зебра-фиш, как и рыбы медака, вполне нормально себя чувствовали в космосе. Однако в мышечной ткани рыб зебра-фиш из полётной группы отмечены изменения в структуре белых и красных волокон. В тканях глаза рыб зебра-фиш при воздействии ФКП по сравнению с рыбами из контроля произошло снижение объёма стекловидного тела, это привело к уменьшению полости задней камеры, к очаговым изменениям структуры внутренних слоёв сетчатки, образованию складок сетчатки; вакуолизации и сморщиванию хрусталиковых волокон, изменению контуров капсулы хрусталика. Очевидно, что ФКП оказали существенное влияние на рыб зебра-фиш.

КЭ «Инкубатор-3» (план). В серии экспериментов на борту орбитального комплекса «Мир» впервые были получены птенцы птиц японского перепела. Анализ результатов инкубирования яиц перепела, оплодотворённых на Земле, но прошедших весь цикл эмбрионального развития в условиях невесомости, показал, что невесомость не является абсолютным препятствием на пути эмбрионального развития птиц. Однако у части полётных эмбрионов наблюдались множественные морфометрические нарушения, а также были выявлены изменения в гистогенезе отдельных органов и систем, которые чрезвычайно редко встречаются у эмбрионов, развивающихся в условиях гравитации. Это указывает на наличие ФКП, влияющих на процесс эмбрионального развития в условиях невесомости. Для выяснения причин имевших место аномалий развития был создан инкубатор, в котором инкубирование будет проходить одновременно в невесомости и в искусственной гравитации. На борту РС МКС планируется проведение исследований, начиная с 2023 г.

Экзобиологические исследования

КЭ «Биориск-МСН-1» и «Биориск-МСН-2». В КЭ «Биориск-МСН-1» было показано, что после 22-месячной экспозиции на внешней стороне РС МКС покоящиеся формы растений и животных были успешно реактивированы на Земле. КЭ «Биориск-МСН-2» планировался в качестве контрольного КЭ «БиоФобос» в проекте «Фобос-Грунт». В связи с этим длительность экспозиции биообъектов на внешней стороне РС МКС составила 31 мес, как и после 22-месячной экспозиции, покоящиеся формы растений и животных были успешно реактивированы на Земле.

КЭ *Expose-R*. Основным отличием данного КЭ от КЭ «Биориск-МСН» стало воздействие в течение 22 мес на биообъекты солнечного ультрафиолета (УФ). Впервые установлено избирательное действие жёсткого космического ультрафиолетового излучения (с длиной волны от 200 нм) на покоящиеся формы различных биологических объектов. Экспонировавшиеся в космическом пространстве семена высших растений и сухие эмбрионы ракообразных, выжившие в отсутствие ультрафиолета, погибли под его действием, однако личинки хирономиды (*Polypedilum vanderplankii*) частично сохранили свою жизнеспособность и в этих условиях.

КЭ Expose-R2. Отличие данного КЭ от КЭ Expose-R заключалось в установке специальных фильтров, позволяющих снизить интенсивность УФ-излучения в сотни раз. Результаты, полученные при исследовании растений мизуна, в целом показали, что существует возможность выживания сухих семян в условиях открытого космоса и при воздействии УФ-излучения.

Образовательные КЭ в рамках биологических исследований

КЭ «Растения-2». Программа исследований высших растений на борту РС МКС помимо научных задач имела и образовательные цели. Школьники из России, США и Японии, используя специально созданную оранжерею «МикроЛада», проводили наземные контрольные эксперименты одновременно с проведением космических экспериментов на этапах МКС-12, -14, -16 и -17. Школьники из Москвы и Санкт-Петербурга посетили Центр управления полётами в г. Королёв и провели видеоконференцию с космонавтом Валерием Токаревым.

КЭ «Ряска». Цель космического эксперимента состоит в демонстрации учащимся механизмов ориентации в невесомости гравитационно-чувствительных и фоточувствительных растительных органов высших растений на водную и воздушную фазы их среды обитания и изучение сравнительных особенностей реакции растений на эти факторы.

КЭ «Фитотропизм». Цель космического эксперимента заключается в демонстрации влияния спектра светового излучения на жизнеспособность и сравнительные особенности развития высших растений в условиях невесомости.

BIOLOGICAL RESEARCH ON THE RUSSIAN SEGMENT INTERNATIONAL SPACE STATION

**V. N. Sychev, V. R. Alekseev, T. S. Gurieva, O. A. Gusev, O. N. Larina, M. A. Levinskikh,
S. V. Poddubko, I. G. Podolsky**

Biological Problems Institute RAS, Moscow, Russia

Zoological Institute RAS, Moscow, Russia

Kazan Federal University, Institute of Fundamental Medicine and Biology,
Kazan, Russia

Keywords: gravitational biology, biological life support systems, exobiological studies, educational experiments

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БЕЛКОВ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

В. И. Тимофеев^{1,2}, В. Р. Самыгина^{1,2}, К. М. Бойко³, И. П. Куранова^{1,2},
М. В. Ковальчук^{1,2}

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова

³ ФНИЦ «Кристаллография и фотоника РАН» Москва, Россия

³ ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: микрогравитация, белковая кристаллография

Белковые молекулы — это полимеры, которые состоят из аминокислот. Пространственные структуры белков крайне разнообразны. Такое разнообразие позволяет белкам выполнять множество различных функций в живых организмах. Различные белки обладают ферментативной активностью, некоторые белки, например такие как родопсин и йодопсин, выполняют сенсорную функцию. Кроме того, следует отметить, что белки исполняют опорную, двигательную, сигнальную, транспортную и другие функции. Знание пространственной структуры белковой молекулы, с одной стороны, позволяет исследовать механизм её функционирования. С другой стороны, знание пространственной структуры некоторых белков может быть использовано в интересах медицинских и промышленных целей. В настоящее время существуют различные методы определения пространственных структур белков. Появились методики, основанные на глубоком машинном обучении, которые позволяют получать пространственные структуры белков вычислительными методами с относительно высокой точностью. Основными экспериментальными методами исследования пространственных структур белков выступают рентгеноструктурный анализ, ядерно-магнитный резонанс, малоугловое рентгеновское рассеяние и криоэлектронная микроскопия. Наиболее распространённым представляется рентгеноструктурный анализ, который позволяет получать пространственные структуры белков с относительно высоким разрешением. Более 80 % пространственных структур получено методом рентгеноструктурного анализа. Основным ограничением данного метода стала необходимость получения высокосовершенного кристалла белка. Один из методов улучшения качества белкового кристалла — кристаллизация в условиях микрогравитации. Главным образом это связано с отсутствием нежелательных конвекционных потоков, а транспорт единиц роста к кристаллу осуществляется главным образом посредством диффузии. Отсутствие седиментации и сферическая форма диффузионного поля способствует росту изометричных кристаллов. Из-за низкой диффузионности макромолекул при диффузионном массопереносе рост протекает медленно, а скорость контролируется поверхностной кинетикой. Замедленный рост при низком уровне пересыщения способствует присоединению молекул в оптимальной ориентации и увеличивает упорядоченность кристалла.

Тимофеев Владимир Игоревич — младший научный сотрудник, tostars@mail.ru

Самыгина Валерия Ролановна — ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, lera@crys.ras.ru

Бойко Константин Михайлович — старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, kmb@inbi.ras.ru

Куранова Инна Петровна — главный научный сотрудник, доктор химических наук, inna@crys.ras.ru

Ковальчук Михаил Валентинович — президент НИЦ КИ, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Первые работы по кристаллизации белков начались с 1959–1960 гг., когда в Институте кристаллографии РАН (ИК РАН) Б. К. Ванштейном — директором института, была организована лаборатория по разработке методов кристаллизации белков. Неоднократно показано, что кристаллы, выращенные в условиях микрогравитации, имеют лучшее дифракционное качество. ИК РАН имени А. В. Шубникова также принимает участие в этих экспериментах, причём несколько структур установлены при разрешении лучше чем 1 Å. Один из таких белков — пуриинуклеозидфосфорилаза, знание структуры которой может быть полезно для разработки антиопухолевых лекарств. Ещё один яркий пример — белок тимидинфосфорилаза человека, на основе структуры которой идут работы по созданию антираковых препаратов. Знание структуры ряда белков патогенных вирусов позволяет создавать более эффективные и безопасные вакцины. Отдельно следует остановиться на так называемом методе драг-дизайна, или направленного конструирования лекарственных препаратов. В настоящее время в связи с бурным ростом доступных исследователям вычислительных мощностей драг-дизайн с использованием методов молекулярного моделирования представляется перспективным и динамично развивающимся направлением. Основными направлениями молекулярного моделирования в драг-дизайне видятся методы, основанные на знании структуры лиганда и методы, основанные на знании структуры мишени. Один из примеров такого рода мишеней — белок фосфопантетеин аденилилтрансфераза из *M. tuberculosis*. Фосфопантетеин аденилилтрансфераза из *M. tuberculosis* (PPATMt) участвует в пятистадийном биосинтезе коэнзима А из пантотената (витамин В5), цистеина и АТФ. PPATMt катализирует пятую, предпоследнюю стадию этого процесса — обратимый перенос аденилильной группы с АТФ на 4'-фосфопантетеин. Коэнзим А является главным переносчиком ацильных групп во всех живых клетках. В бактериях коэнзим А вовлечён в синтез клеточных стенок. Известно, что патогенная бактерия *M. tuberculosis* весьма устойчива к действию антибиотиков и легко адаптируется к лекарственным препаратам. Поэтому конструирование новых антитуберкулезных лекарств остаётся весьма актуальной задачей. Так как ингибирование PPATMt приводит к гибели патогенной бактерии, PPATMt может служить белком-мишенью для направленного конструирования селективных ингибиторов фермента — потенциальных антитуберкулезных средств.

Одна из актуальных задач современной энзимологии заключается в предсказании природы мутаций, необходимых для направленного изменения специфичности фермента. В настоящее время субстратная специфичность объясняется теорией Кошланда, которая заключается в том, что топология активного центра соответствует топологии субстрата по принципу «ключ — замок». Соответственно, влиять на субстратную специфичность можно, изменяя активный центр с помощью направленного мутагенеза. Таким образом, был получен ряд мутантов ферментов с изменённой специфичностью, имеющих промышленное или медицинское значение.

Одна из работ такого рода, ведущихся на данный момент, может существенно удешевить производство инсулина, применение которого служит основным способом лечения сахарного диабета в настоящее время. Рекомбинантный инсулин производится в микроорганизмах виде проинсулина, который далее расщепляется трипсином и карбоксипептидазой В. Последний фермент отщепляет только положительно заряженные С-концевые остатки, благодаря чему зрелый инсулин не загрязняется укороченными вариантами. Влияние карбоксипептидазы В на цену инсулина достаточно высоко, поэтому актуальной становится задача по замене панкреатической карбоксипептидазы генно-инженерным секретируемым микробным ферментом со специфичностью карбоксипептидазы В. Известно, что

бактериальная карбоксипептидаза Т имеет 30 % гомологии с панкреатической карбоксипептидазой В, и при сходном строении каталитического центра отличается от карбоксипептидазы В только пятью заменами в кармане первичной специфичности активного центра, с чем и связывалась разница в специфичности данных ферментов. Однако полная замена кармана первичной специфичности карбоксипептидазы Т на соответствующие остатки карбоксипептидазы В не изменило ни уровня активности, ни уровня специфичности карбоксипептидазы Т. Следует отметить, что подобные результаты были получены также при сайтнаправленном мутагенезе трипсина, химотрипсина и эластазы, что привело к появлению представлений об аллостерической регуляции селективности монодоменных белков. В настоящее время понимание механизмов реализации специфичности представляется в высшей степени актуальной научной проблемой. Понять эти механизмы — значит научиться создавать ферменты с новыми, заранее заданными свойствами, используя систему разработанных приёмов. Получено рекордное пространственное разрешение для разработки мишенями для разработки лекарственных препаратов: 1) фактора, ингибирующего миграцию макрофагов с разрешением $1,16 \text{ \AA}$ — важного провоспалительного цитокина, медиатора врождённого иммунного ответа; 2) уридинфосфорилазы из *Vibrio cholerae* при разрешении $1,04 \text{ \AA}$, являющейся мишенью для разработки противоопухолевых и антипаразитарных препаратов; 3) мутантной формы бета-лактамазы (инактиватора бета-лактамных антибиотиков) с разрешением $1,2 \text{ \AA}$. Структуры позволили установить более детально конформации остатков активного центра и стали основой для разработки новых ингибиторов к этим белкам — прототипов лекарственных средств.

Установлена также структура с высоким разрешением неорганической пирофосфатазы из *M. tuberculosis*. Белок обеспечивает выживание патогена, структура становится ключом к разработке ингибиторов и соответственно новых противотуберкулёзных средств.

Впервые получена структура кардиотоксина СТХ13 из яда очковой кобры в кристаллической модификации, где функционально-важная петля впервые имеет конформацию, аналогичную мембранно-связанной. Кардиотоксины из яда змей обладают антираковым эффектом. Качество структуры позволило провести расчёты методом молекулярной динамики и установить, что перестройка этой петли важна для встраивания в мембрану. Результат важен для разработки противоопухолевых препаратов на основе токсина.

Впервые получена орторомбическая форма глицеральдегид-3-фосфат-дегидрогеназы человека. Белок играет важную роль в регуляции энергетического обмена, индукции апоптоза и агрегации белков. Обнаружена новая конформация каталитического остатка Cys152, важная для понимания функционирования фермента.

Приведённые выше примеры ярко иллюстрируют важность исследования пространственных структур белков при высоком разрешении.

STUDY OF THE STRUCTURE OF PROTEINS UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS

V. I. Timofeev^{1,2}, V. R. Samygina^{1,2}, K. M. Boyko³, I. P. Kuranova^{1,2},
M. V. Kovalchuk^{1,2}

¹ National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

² Shubnikov Institute of Crystallography FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, Russia

³ FRC of Biotechnology RAS, Moscow, Russia

Keywords: microgravity, protein crystallography

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «О ГАГАРИНЕ ИЗ КОСМОСА»: ИСТОРИЧЕСКИЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Е. А. Титенко¹, С. Н. Самбуров², Е. А. Шиленков¹, Д. Г. Добросердов¹,
Д. М. Зарубин¹, В. К. Оделевский³, О. Г. Артемьев⁴

¹ Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

² Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

³ Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Москва, Россия

⁴ Государственная корпорация «Роскосмос», Москва, Россия

Ключевые слова: радиосеанс связи, изображения, передача данных, космонавтика

Инфраструктура современных радиолюбительских центров (кружков) позволяет проводить сеансы радиосвязи и получать информацию с борта Международной космической станции (МКС). Данные сеансы имеют образовательный и популяризаторский контекст в части пропаганды истории фундаментальных космических достижений и привлечения талантливой молодёжи к космической деятельности и исследованиям.

РКК «Энергия имени С. П. Королёва» в рамках сеансов радиосвязи с 2013 г. совместно Московским авиационным институтом (национальным исследовательским университетом), Юго-Западным государственным университетом организован и проводится космический эксперимент (КЭ) «О Гагарине из космоса». В его рамках осуществляется открытая передача с борта МКС по радиолюбительскому каналу связи на наземные приёмные станции радиолюбителей всего мира серий изображений, посвящённых жизни и деятельности первого космонавта Ю. А. Гагарина, а также текста об истории и профессиональной деятельности космонавтов. Передача изображений и текста проводится с мониторингом качества и количества её приёма участниками-радиолюбителями, что поднимает репутацию России в космической отрасли и обеспечивает объективное распространение информации о первом космонавте планеты без привлечения средств массовой информации.

Широкая географическая аудитория радиолюбительских станций по приёму информации с борта МКС имеет научный интерес для изучения характеристик радиосигнала в различных точках поверхности Земли. Полученные данные используются для составления территориальной карты условий приёма информации из космоса по радиолюбительскому каналу (Атакишев и др., 2020; Щитов, 2022).

В рамках КЭ «О Гагарине из космоса» возможно проведение следующих видов работ:

Титенко Евгений Анатольевич — ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, johntit@mail.ru

Шиленков Егор Андреевич — директор, кандидат технических наук, ub3wcl@yandex.ru

Добросердов Дмитрий Гурьевич — научный сотрудник, кандидат технических наук, steals@mail.ru

Зарубин Денис Михайлович — научный сотрудник, orion-589@yandex.ru

Оделевский Владимир Константинович — доцент, кандидат технических наук, odelevsky@mail.ru

Самбуров Сергей Николаевич — академик РАКЦ, главный специалист, rv3dr@mail.ru

Артемьев Олег Германович — космонавт-испытатель

- передача с борта МКС на SSTV изображений и текста о жизни Ю. А. Гагарина;
- выдача APRS-сигнала и координатной информации о положении МКС в момент трансляции для изучения особенностей радиосвязи;
- ретрансляция голосовой информации с Земли в целях управления и координации деятельности радиолюбителей по приему SSTV;
- ретрансляция станцией МКС голосовой информации и SSTV о Гагарине с Земли;
- обеспечение загоризонтной связи с малогабаритными низкоорбитальными КА с отражением от слоёв ионосферы.

В ходе КЭ «О Гагарине из космоса» с борта МКС передаются цифровые изображения, посвящённые жизни и деятельности первого космонавта планеты Ю. А. Гагарина, его историческому полёту, а также значимым юбилейным и памятным датам космонавтики, например, 160-летию юбилею К. Э. Циолковского, 50-летию полёта человека в космос и др. Передаваемые данные формируются в виде серий из 12 тематических изображений (рис. 1).



Рис. 1. Изображения, передаваемые в рамках КЭ «О Гагарине из космоса»

Кроме передачи изображений, в ходе КЭ проводятся сеансы голосовой связи членов экипажа МКС со школьниками и студентами различных отечественных и зарубежных образовательных организаций (рис. 2). Перед началом сеансов производятся баллистические расчёты траектории МКС (долгосрочный и краткосрочный) для выбора времени и интервала сеанса.

С 2019 г. в рамках КЭ была изменена методика по увеличению времени сеанса связи с МКС и организации удалённого доступа к базовой радиостанции для его проведения. Увеличение продолжительности связи (с 10 до 18 мин) стало возможным благодаря подключению кроме московского центра приёма и обработки информации ещё удалённого доступа в двух наземных радиостанциях приёма — в г. Уфе и г. Курске. По системе удалённого доступа был успешно реализованы сеансы связи с учащимися «Зоринская СОШ» (с. Зорино, Курская обл.) и СОШ № 28 г. Благовещенска (рис. 3, 4). Такой способ позволит проводить сеансы связи МКС с отдалёнными образовательными учреждениями, особенно с северной частью России.

За время реализации КЭ проведено более 70 сеансов связи со школьниками и студентами различных областей и регионов РФ, в том числе: Москва, Санкт-Петербург, Сочи, Калуга, Хабаровск, Рязань, Челябинск, Курск, Томск, Вологда, Уфа, Южно-Сахалинск, Обоянь, Тольятти, Нижний Тагил, Саратов, Владивосток, республика Башкортостан, Мордовия, Татарстан, Чувашия и др.; а также с радиолюбителями зарубежных стран: Франция, Перу,

Эквадор, Бразилия, Аргентина, Уругвай, Япония, Тунис, Таиланд, Австралия, Италия, Нидерланды, Азорские Острова, США, КНР, Великобритания, Индия, Греция, Испания, Болгария.



Рис. 2. Сеанс связи с учащимися Зоринской СОШ, 25.02.2020



Рис. 3. Сеанс связи с учащимися СОШ № 28 г. Благовещенска, 27.09.2021

За период проведения КЭ было передано более 1100 изображений. За период 2022–2023 гг. в рамках экспедиции МКС-68 было проведено 20 сеансов связи. Общие затраты времени на голосовую связь и общение со школьниками составили 695 мин. В таблице показаны образовательные учреждения и длительность сеансов связи в рамках КЭ «О Гагарине из космоса».

В дальнейшем КЭ «О Гагарине из космоса» планируется проводить в интересах развития и пропаганды истории и достижений космонавтики, прежде всего российской космонавтики. Расширение количества наземных станций приёма и организация удалённого доступа к базовой радиостанции позволят проводить сеансы связи

в удалённых образовательных учреждениях. КЭ предполагает расширение числа изображений и тематических серий о космонавтике, а также запись голосовых сообщений о космонавтике на различных языках.

Образовательные учреждения – участники КЭ в 2023 г.

Дата	Операции	Время (мин)
24.01.2023	О ГАГАРИНЕ ИЗ КОСМОСА. Выполнение сеанса радиолобительской связи с «Центром детского (юношеского) технического творчества «Юный автомобилист» г. Нижний Новгород	15
04.02.2023	О ГАГАРИНЕ ИЗ КОСМОСА. Выполнение сеанса радиолобительской связи с учениками г. Азнакаево, республика Татарстан	20
05.02.2023	О ГАГАРИНЕ ИЗ КОСМОСА. Выполнение сеанса радиолобительской связи с СОШ № 2 им. А. В. Суворова ст. Динская	20
13.02.2023	О ГАГАРИНЕ ИЗ КОСМОСА. Выполнение сеанса радиолобительской связи с учениками СОШ № 547 г. Санкт-Петербурга	15
13.03.2023	О ГАГАРИНЕ ИЗ КОСМОСА. Выполнение сеанса радиолобительской связи со студентами Симферопольского колледжа радиоэлектроники, республика Крым	15

Литература

Атакищев О. И., Шиленков Е. А., Фролов С. Н. и др. Автономная интеллектуальная группировка малых космических аппаратов — космический эксперимент «Радиоскаф-5» // Изв. Ин-та инженер. физики. 2020. № 1(55). С. 42–48.

Щитов А. Н. Перспективы освоения ближнего космоса // Вестн. Дипломат. акад. МИД России. Международ. право. 2022. № 4(19). С. 45–56.

SPACE EXPERIMENT “ABOUT GAGARIN FROM SPACE”: HISTORICAL EXPERIENCE AND TRENDS

E. A. Titenko¹, S. N. Samburov², E. A. Shilenkov¹, D. G. Dobroserdov¹, D. M. Zarubin¹, V. K. Odelevsky³, O. G. Artemyev²

¹ Southwestern State University, Kursk, Russia

² S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

³ Moscow Aviation Institute (national research university)

⁴ State Corporation Roscosmos, Moscow, Russia

Keywords: radio communication session, images, data transmission, space

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «РАДИОСКАФ» С БОРТА МКС

Е. А. Титенко¹, С. Н. Самбуров², Е. А. Шиленков¹, С. Н. Фролов¹,
А. Н. Бродский¹, И. Э. Щитов¹

¹ Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

² Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: радиосвязь, группировка, стабилизация, передача данных, радиостанция

Современные малые космические аппараты (МКА) являются высокотехнологичными изделиями, функционирование которых основано на различных физических, механических, энергетических, электронно-вычислительных, приёмо-передающих принципах работы элементов и систем. Можно выделить два основных направления, по которым развиваются МКА. Первое направление считается университетским. Второе — промышленное. Оно инициируется космическими фирмами и агентствами с целью создания серьёзных проектов, в отличие от студенческих имеющих прикладное целевое назначение (Абламейко и др., 2012).

Университетское направление базируется на подходе «Полёт в космос своими руками». Космические аппараты, разработанные по такой идеологии, представляют любительские научно-технические проекты. При их изготовлении используются доступные компоненты, как правило, даже не проходящие сертификации для применения в условиях космоса, при негерметичном исполнении корпуса спутника. Основная экономия имеет три составные части: недорогие комплектующие, дешёвые студенческие рабочие руки и зачастую и бесплатный вывод на орбиту. Различные университетские разработки МКА («Аист», «Бауманец», «Часки», «Танюша», «Ярило» и др.) направлены на приобщение школьников к космическим исследованиям и популяризацию космоса. В них, как правило, полезная нагрузка представляется единственным функциональным блоком — любительским приёмником-передатчиком радиодиапазона для передачи или приёма информационных сообщений с наземных радиостанций. Главным результатом такого подхода становится обучение специалистов через непосредственное участие в практической работе, содержащей все основные этапы реальных проектов. Университетские разработки МКА ориентируются на проведение управляемой приёмо-передачи сообщений в радилюбительском диапазоне (435–438 МГц) (Абламейко и др., 2012; Зарубина, 2021). Кроме того, проведение измерений физических характеристик литосферы, нижних слоёв космоса (давление, температура, радиация и др.) измерение характеристик магнитного поля Земли, представляет инженерное направление разработки МКА. Подобные проекты

Титенко Евгений Анатольевич — ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, johntit@mail.ru

Самбуров Сергей Николаевич — академик РАКЦ, главный специалист, rv3dr@mail.ru

Шиленков Егор Андреевич — директор, кандидат технических наук, ub3wcl@yandex.ru

Фролов Сергей Николаевич — заместитель директора, кандидат технических наук, snfrolov@bk.ru

Бродский Игорь Иосифович — начальник центра

Щитов Алексей Николаевич — научный сотрудник, a.n.schitov@mail.ru

служат источником модификации платформы, состава и функционала бортовых систем для МКА с ориентацией на высокотехнологичные производственные задачи.

Особое место занимают космически эксперименты и организуемые сеансы связи в составе группировки аппаратов, что расширяет зону передачи данных и способствует увеличению время сеанса космической связи.

Среди основных научно-исследовательских направлений в части разработки МКА и проведения экспериментов выделяются (Самбуrow и др., 2020):

- разработка технологий создания малых космических аппаратов формата CubeSat;
- исследование и апробация одноранговой самоорганизующейся сети МКА;
- проведение экспериментов по получению и дешифрированию аэрокосмических изображений природных и техногенных объектов в интересах социально-экономического развития региона (региональные задачи дистанционного зондирования Земли);
- изучение прикладных вопросов передачи и приёма видео- и речевой информации (передача позывных, приветствий на различных языках);
- проведение измерений физических характеристик космоса или характеристик особых участков земной поверхности (электрическая проницаемость, магнитная напряженность);
- проведение экспериментов по стабилизации МКА на орбите;
- разработка модулей и узлов обнаружения и анализа сигналов радиотехнических средств и определения их местоположения.

В рамках проводимого РКК «Энергия» имени С. П. Королёва космического эксперимента (КЭ) «Радиоскаф» Юго-Западным государственным университетом и Рязанским государственным радиотехническим университетом имени В. Ф. Уткина были разработаны и изготовлены 10 малых космических аппаратов для продолжения исследований и совершенствования условий проведения экспериментов в части обеспечения контроля состояния с подвижных объектов. Конструкция МКА содержала полезную нагрузку, имеющую промышленную сферу применения (мониторинг воздушных и морских судов, установление связи со сторонними КА и др.). Все МКА прошли проверки, тестовые испытания и в 2022 г. были доставлены на Международную космическую станцию (МКС), а 22.07.2022 были запущены на орбиту российским космонавтом Олегом Артемьевым и американским астронавтом Самантой Кристоферетти (*итал.* Samantha Cristoforetti) (рис. 1).

Перед запуском космонавт проходит специализированную подготовку по отработке пуска МКА, в том числе на борту МКС (рис. 2).

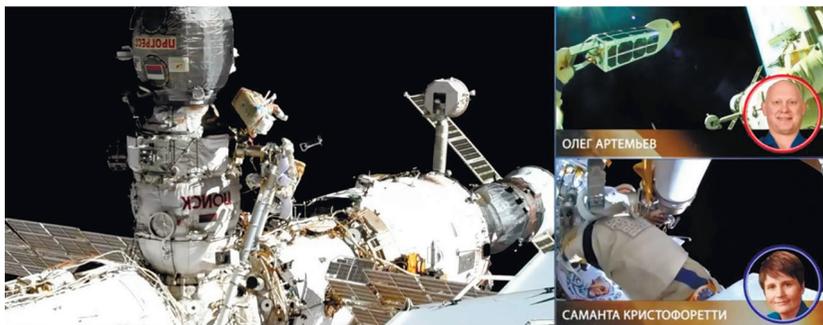


Рис. 1. Внекорабельная деятельность, запуск МКА



Рис. 2. Отработка пуска МКА на борту МКС

Для проведения экспериментов изготовлен электронный модуль сообщений автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В) (Шиленков и др., 2021). Применение средств и технологий АЗН-В обеспечивает сбор данных и дистанционного мониторинга состояния воздушных судов (ВС) в процессе движения. Группировка МКА дополняет наземную сеть стационарных наземных станций приёма сигналов АЗН-В, имеющих неравномерное покрытие на территории России, что не позволяет своевременно получать координаты судов и контролировать их состояние в процессе движения. Проведение КЭ по образованию сети МКА и внутрисетевой трансляции данных от ВС позволяет оперативно учитывать лётные характеристики судов.

Размещение модуля АЗН-В как полезной нагрузки в составе МКА открывает новые возможности проведения экспериментов в части организации связи в интересах как обучающихся (получение навыков работы с данными систем типа FlyRadar24), так работников оперативных служб мониторинга воздушной обстановки.

Другой КЭ с применением группировки МКА ориентирован на измерение и передачу шумов радиоэфира, что позволяет оценить трафик частотных каналов и создать карту зашумлённости для низких орбит. В дальнейшем полученная информация позволит управлять частотными характеристиками каналов и проводить новые эксперименты по обеспечению космической связи.

Литература

- Абламейко С. В., Саечников В. А., Спиридонов А. А. *Малые космические аппараты: пособие для студентов ф-тов радиофизики и компьютер. технологий, механико-мат. и геогр.* Минск: БГУ, 2012. 159 с.
- Зарубина А. А. История наноспутников рубежа XX–XXI вв. *Космическая эра в истории России // Международ. молодёж. науч. конф. «16-е Королевские чтения».* 2021. С. 402–403.
- Самбуров С. Н., Артемьев О. Г., Шиленков Е. А. и др. *Результаты проведения 5 этапа космического эксперимента «Радиоскаф» // Науч. значение тр. К. Э. Циолковского: история и современность: материалы 55-х Науч. чт. памяти К. Э. Циолковского.* Калуга, 15–17 сент. 2020 г. Ч. 2. Калуга: ИП Стрельцов И. А. 2020. С. 192–196.

Шиленков Е. А., Фролов С. Н., Титенко Е. А. и др. Отработка системы приёма передачи сообщений АЗН-в через малую космическую станцию // К. Э. Циолковский и прогресс науки и техники в XXI веке: материалы 56-х Науч. Чтений, посвященных разработке науч. наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Калуга, 21–23 сент. 2021. Ч. 2. Калуга: ИП Стрельцов И. А. Изд-во «Эйдос». 2021. С. 183–187.

APPLICATION OF NANOSATELLITES TO SUPPORT RADIOSCAF SPACE EXPERIMENTS FROM BOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION

E. A. Titenko¹, S. N. Samburov², E. A. Shilenkov¹, S. N. Frolov¹, A. N. Shchitov¹, I. E. Brodsky²

¹ Southwestern State University, Kursk, Russia

² S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: radio communications, network, stabilization, data transmission, radio station

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЁТА НА СЕНСОМОТОРНУЮ СИСТЕМУ

Е. С. Томиловская, Т. А. Шигуева, И. В. Рукавишников, А. А. Савеко,
Н. В. Шишкин, М. П. Бекренева, Н. Ю. Лысова, И. А. Наумов, В. В. Китов
Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: космический полёт, невесомость, сенсомоторная система, функциональная работоспособность

Космический полет — это уникальная возможность изучения роли гравитации в работе физиологических систем организма человека, в том числе и сенсомоторной системы. Ряд исследований возможно проводить непосредственно в ходе космического полёта, другие, имеющие различные методические и аппаратные ограничения, проводятся только после возвращения космонавтов на Землю. За годы работы Международной космической станции (МКС) было проведено более десятка научных экспериментов, направленных на изучение влияния факторов космического полёта на деятельность сенсомоторной системы.

Космический эксперимент «Мотокард» был направлен на исследование природы нарушений локомоций в длительных космических полётах и выявление путей их коррекции и предупреждения. Объектом исследований при этом были электромиографические, кинематические и подометрические характеристики локомоций, выполняемых на бегущей дорожке БД-2 в активном и пассивном режимах работы её полотна на Земле и в условиях длительных космических полётов на борту Международной космической станции. Согласно протоколу, в ходе каждого сеанса эксперимента последовательно выполняли локомоций в режиме медленного, среднего и быстрого бега, разминочной и «заминочной» ходьбы в двух режимах работы дорожки: вначале в активном режиме и после небольшого перерыва длительностью 5–8 мин — в пассивном. В исследовании приняло участие 22 космонавта, выполнявших длительные космические миссии на МКС продолжительностью от 115 до 340 сут, пять из которых осуществляли эксперимент повторно в следующей экспедиции. В предполётный период эксперимент выполнялся дважды до старта, в полёте — пять раз с перерывами между сеансами в 30 дней. После завершения полёта эксперимент вновь выполнялся дважды — на 7–8-е и 10–12-е сутки. Ходьба и бег космонавтов в невесомости были схожи с земными стереотипами данных движений,

Томиловская Елена Сергеевна — ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, заведующий отделом, кандидат биологических наук, finegold@gmail.com

Шигуева Татьяна Александровна — старший научный сотрудник, t.shigueva@gmail.com

Рукавишников Илья Вячеславович — старший научный сотрудник, хирург, кандидат медицинских наук, Sapsan.box@gmail.com

Савеко Алина Александровна — научный сотрудник, asaveko@gmail.com

Шишкин Никита Валерьевич — научный сотрудник, chachaturan@yandex.ru

Бекренева Мария Павловна — младший научный сотрудник, mbekreneva@gmail.com

Лысова Наталия Юрьевна — старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, gmob@mcc.rsa.ru

Наумов Иван Андреевич — старший научный сотрудник, naumovivan@gmail.com

Китов Владимир Валерьевич — научный сотрудник, arctg@yandex.ru

что демонстрирует удивительную способность человеческого организма сохранять работоспособность в сложных экстремальных условиях. Результаты эксперимента подтверждают, что эта способность обусловлена многосторонней перестройкой работы нервной системы и опорно-двигательного аппарата. Космическую ходьбу можно сравнить с «лёгкой походкой»: она была быстрее земной, отталкивание происходило с меньшим усилием, а продолжительность момента, когда только одна нога касается опорной поверхности, увеличивалось. Так, интересной находкой оказалось и то, что космонавты в первые месяцы полёта непроизвольно ходили на носочках. Несмотря на это, ходьба в невесомости для космонавта была сложнее привычной земной ходьбы и сопровождалась значительными энергетическими затратами. Результаты электромиографии также подтверждают, что выполнение аналогичных движений в космическом полёте требовало большего напряжения мышц. Важным отличием бега от ходьбы является «фаза полёта», когда обе ноги не касаются опорной поверхности. Логично было предположить, что при беге в космосе фаза полёта будет длиннее, особенно учитывая, что тренировочный костюм обеспечивал притяжение к дорожке на 30–50 % слабее, чем земное. Однако результаты эксперимента показали, что ожидаемое увеличение фазы полёта наблюдалось только на ступени быстрого бега при скорости более 10 км/ч. На более низких скоростях космонавтам не хватало мышечной силы для эффективного «взлёта» при беге. Интересно, что яркие признаки «космической походки» наблюдались только в первые 2–3 мес космического полёта, затем картина наблюдаемых движений приближалась к той, которая наблюдалась до начала космического полёта на Земле. С каждым следующим месяцем космонавтам было легче и проще справляться с выполнением теста, но после приземления выполнение тренировки вновь требовало значительных усилий. По результатам эксперимента даже на 12-й день после завершения полёта шаги космонавтов характеризовались высокой частотой и небольшой длиной. Такие шаги стали результатом слаженной работы всех звеньев нервной системы и позволяли космонавтам успешно справляться с поставленной задачей, компенсируя их неустойчивость после длительного нахождения в невесомости.

Космический эксперимент ЕТД (совместный с Европейским космическим агентством — ЕКА) был направлен на изучение влияния длительных космических полётов на характеристики реакции установки взора (РУВ). Исследовали характеристики РУВ до и после длительных космических полётов. Космонавты (семь человек) выполняли задачу быстрой установки взора на зрительные мишени, внезапно предъявляемые в периферическом поле зрения на расстоянии 20° влево, вправо, вверх и вниз от центра. До полёта все обследуемые выполняли РУВ стандартно. В невесомости характеристики реакции существенно изменялись. Анализ данных выявил две стратегии адаптации системы управления РУВ после длительных КП: 1-я выражалась в гиперметрии взора и увеличении скорости движения глаз, 2-я — в снижении амплитуды и скорости саккадических движений. Общее время установки взора возрастало в обоих случаях на 50 % и более. Результаты исследований свидетельствуют о существенном снижении возможностей и точности системы зрительного слежения за быстро перемещающимися объектами в невесомости.

Цель эксперимента «Равновесие» составляло исследование влияния длительного космического полёта на постуральный контроль и определить изменения сенсорной организации, вызванные микрогравитацией. В исследовании приняло участие 33 космонавта, члены экспедиций на МКС продолжительностью от 166 до 196 сут. Компьютеризированная динамическая постурография, включающая оценку зрительных, проприоцептивных и вестибулярных функций при постуральном тестировании, проводилась дважды перед полё-

том, а также на 3-и, 7-е и 10-е сутки после приземления. Для выяснения причин постуральных изменений был проведён видеонализ колебаний голеностопного и тазобедренного суставов при вертикальной стойке. Длительный космический полёт сопровождался значительными изменениями постуральной стабильности (-27% от значения показателя равновесия в самом сложном тесте). Повышенное вовлечение тазобедренного сустава в процесс постурального контроля наблюдалось в тестах, предполагающих дополнительную нагрузку на вестибулярную систему (закрытые глаза, нестабильная опорная поверхность, качание головой). Данная стратегия поддержания постуральной устойчивости становится более простой с точки зрения энергетической эффективности и центрального контроля, что свидетельствует о снижении способности поддержания равновесия после длительных космических экспедиций.

Эксперимент «Моторный контроль» был направлен на исследование влияний длительного пребывания в невесомости на механизмы спинального и кортикального управления движением. Состояние спинальных механизмов определяли по характеристикам кривой вовлечения сухожильного рефлекса латеральной икроножной и камбаловидной мышцы голени. Для построения кривой вовлечения неврологическим молоточком, снабжённым тензометрическим датчиком, по ахиллову сухожилию наносили удары различной силы — от минимальной, при которой возникает рефлекторный ответ, до максимальной, при которой не наблюдалось увеличения рефлекторного ответа, в случайном порядке. В ходе обработки данных определяли величину порога и максимальную амплитуду рефлекторного ответа. Исследование кортикальных механизмов управления движением выполняли с использованием теста на различие мышечных усилий, при котором двигательная задача составляет выполнение последовательно нарастающих усилий от минимального до максимального с минимальным различием в интенсивности соседних движений. Показателями теста представляются средняя величина средней амплитуды прироста усилия, являющаяся аналогом дифференциального сенсорного порога, число выполняемых градаций усилий, количество ошибочных движений, а также максимальное произвольное усилие. Эксперименты, выполненные с участием 60 космонавтов, проводили до и на 3-и, 7-е и 10-е сутки после полёта.

Анализ результатов послеполётных серий эксперимента показал, что пребывание в условиях невесомости:

- не подавляло способности выполнения двигательных задач, однако количественный анализ выявил снижение точностных характеристик движений;
- в движениях программного типа снижение точности выполнения двигательной задачи проявлялось в уменьшении числа различаемых градаций усилий, возрастании количества ошибок и дифференциального порога, а также снижении значений максимальных усилий;
- длительное пребывание в невесомости вызывало значительные изменения в состоянии спинальных рефлекторных механизмов, проявляющиеся выраженной гиперсензитивностью. В то же время эти изменения по амплитудным параметрам носили не однозначный характер. У ряда космонавтов регистрировалось резкое снижение амплитуды рефлекторных ответов.

Совместное исследование Института медико-биологических проблем РАН и Космического центра имени Линдона Джонсона (англ. *англ. The Lyndon B. Johnson Space Center — JSC, NASA*), получившее название «**Полевой тест**», было направлено на изучение влияния факторов длительного космического полёта на выполнение вестибулярных и сенсомоторных функциональных задач непосредственно после приземления. Одной из уникальных особенностей

этого исследования было использование функциональных тестов, связанных с повседневной жизнью. Эти задачи включают в себя переходы из положения сидя в положение стоя, из положения лёжа в положение стоя, поддержание вертикальной стойки, преодоление препятствий и т.п. Картина изменений, наблюдаемая в день приземления, имеет особое значение для планирования программы исследовательских миссий, когда члены экипажа останутся без посторонней помощи после приземления на поверхность планеты. Результаты исследования выявили существенное снижение функциональной работоспособности членов экипажей в день приземления. В абсолютном большинстве случаев космонавты сообщили о наличии симптомов болезни движения на месте посадки. Важно подчеркнуть, что три космонавта не смогли выполнить запланированные двигательные тесты вследствие выраженных симптомов космической болезни движения. Ещё четыре участника прекратили выполнение эксперимента на различных этапах теста, и только 10 космонавтов из 19 полностью выполнили программу на месте посадки.

О функциональном дефиците в день приземления свидетельствовало: увеличение времени вертикализации из положений сидя и лёжа, времени преодоления препятствий; невозможность выполнения усложнённых локомоторных тестов (ходьба тандемом с закрытыми глазами); снижение значений артериального давления на фоне увеличения частоты сердечных сокращений при активной ортостатической пробе; учащение случаев спонтанного нистагма в крайних отведениях глаз. Кроме того, в рамках данного эксперимента также было зафиксировано увеличение эластичности мягких тканей (способность восстанавливать свою первоначальную форму после сокращения или снятия внешней силы деформации), наиболее выраженное в мышце, выпрямляющей позвоночник, на уровне 8–9-го грудных позвонков (около 25 %). Примечательно, что большинство исследуемых параметров восстанавливались уже на 3–4-е сутки после приземления, свидетельствуя о широких возможностях реадaptации сенсомоторной системы к гравитации в вопросе обеспечения повседневных (самых необходимых) двигательных задач.

Задача эксперимента «Локомоции» состоит в расширении знаний о гравизависимых перестройках в моторном контроле, обусловленных длительным пребыванием в условиях космического полёта, с использованием теста с обходом препятствия и переступанием через него. В эксперименте приняло участие более 20 космонавтов – участников длительных космических экспедиций на МКС средней продолжительностью 171 ± 19 сут. Биомеханические характеристики локомоций регистрировали до полёта и на 3-и и 7-е сутки после его завершения с использованием двух цифровых видеокамер с частотой регистрации 90 Гц. Обнаружено, что после длительного пребывания в условиях невесомости при выполнении переступания через препятствие движения в суставах имеют меньшую амплитуду, чем до космического полёта. Время одноопорного периода и расстояние между ногой и препятствием, первой выполняющей переступание, увеличивались значимо только на высоте 30 см. При этом показано увеличение вариативности времени переступания через препятствие после длительного пребывания в условиях космического полёта на всех изучаемых высотах (5, 10 и 30 см). В работе также показано, что на 3-и сутки после приземления амплитуда углов в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах при переступании на всех исследованных нами высотах были существенно снижены по сравнению с предполётными показателями. Такие результаты могут свидетельствовать о снижении стандартности выполнения моторной задачи после воздействия факторов космического полёта. Подобные изменения были получены при изучении других сложно-координационных движений, таких как реакция установки взора и коррекционные позные ответы. Кроме того, такие результаты могут быть обусловле-

ны индивидуальными особенностями скорости реадaptации системы моторного контроля к условиям Земли.

В эксперименте «Трактография – BRAIN-DTI» (совместно с Европейским космическим агентством) впервые получены данные, свидетельствующие о природе изменений объёмов серого и белого вещества в структурах головного мозга космонавтов после длительных космических полётов (13 человек). Методом диффузионной МРТ выявлено увеличение объёмов белого вещества в мозжечке после космического полёта, что стало первым ясным макроуровневым свидетельством сенсомоторной нейропластичности у человека. Также наблюдалось обратимое (нивелирующееся через 7 мес) широкое перераспределение спинно-мозговой жидкости с сопутствующими изменениями плотности близлежащего серого вещества. Впервые показано, что эти изменения объёма серого вещества являются результатом обратимых морфологических изменений, а не потери ткани (нейродегенеративных процессов).

Впервые был проведён сравнительный анализ наблюдаемых изменений в трёх группах участников космических полётов: астронавтов НАСА (24 человека), астронавтов ЕКА (4 человека) и российских космонавтов (13 человек). Анализ данных выявил увеличение объёмов периваскулярных пространств головного мозга у участников длительных космических полётов. В группе земного контроля и коротких полётов изменения объёма периваскулярных пространств были незначимыми. При этом у астронавтов НАСА изменения были достоверно более выражены, чем у космонавтов «Роскосмоса». У астронавтов НАСА большее увеличение объёма периваскулярных пространств также коррелировало с развитием нейроокулярного синдрома. Выявленные различия предположительно могут быть связаны с особенностями применяемых объёмов и интенсивности тренировок космонавтов и астронавтов, однако данное предположение требует проверки.

Исследование вестибулярной функции при воздействии факторов космического полёта представляет особый интерес. Данная задача включала в себя ряд экспериментов: **«Сенсорная адаптация»** (около 60 обследованных космонавтов), **«ГейзСПИН»** (совместно с Антверпенским университетом (*нидерл.* Universiteit Antwerpen, Бельгия) с центрифугой короткого радиуса (28 обследованных космонавтов), клинико-физиологическое обследование **«Оценка вестибулярной функции»** (около 70 обследованных космонавтов), а также **космический эксперимент «Виртуал»** (9 обследованных космонавтов; 1-й этап). Исследования вестибулярной функции включают комплексное обследование движений и рефлексов глаз и головы, а также их согласованности, методами электроокулографии, видеоокулографии, акселерометрии и т. п. Сеансы экспериментов проводили дважды до полёта, в ходе космического полёта на 2–3-и, 5–7-е, 15-е, 30-е сутки и далее один раз в месяц (8–9 сеансов за полёт для каждого космонавта; эксперимент «Виртуал»), на 1–2-е, 4–5-е, 8–9-е и 10–14-е сутки после полёта. Результаты исследований у космонавтов обнаруживают резкие изменения в состоянии вестибулярной функции после длительных космических полётов, сохраняющиеся до 8–14 сут после посадки. Данные изменения сопровождаются усилением спонтанных движений глаз, снижением тонической (статической) вестибулярной возбудимости (подавление отолито-окулярного рефлекса), повышением реактивности полукружных каналов (снижение порога чувствительности и увеличение интенсивности вестибулярно-индуцированного нистагма), атипичными вестибулярными реакциями (инверсия или отсутствие отолитового противовращения глаз и вестибуло-окулярного рефлекса (компенсаторных движений глаз при повороте головы), изменением взаимодействия между отолитами и полукружными каналами (отрицательная корреляция между показателями). Интересно, что повторный космический полёт (опыт

предварительного пребывания в условиях невесомости) приводит к резкому, статистически значимому сокращению продолжительности послеполетной реадaptации при существенно менее выраженных вестибулярных нарушениях. При этом независимо от того, первый это был космический полёт или повторный, изменения вестибулярной системы наблюдались у всех космонавтов в начале космического полёта, а затем периодически возникали на протяжении всего полёта. То есть фазы компенсации сменялись фазами декомпенсации, и наоборот. Невесомость оказывает влияние на зрительное слежение опосредовано через изменения уровня и характера вестибулярной и опорной информации, т. е. через центральные механизмы вестибулярной системы и её взаимодействие с глазодвигательными центрами. Также было отмечено, что в первые дни реадaptации к условиям Земли вырабатывается новая стратегия зрительного слежения: функция плавного слежения подавляется и заменяется серией последовательных саккад («саккадическое приближение»). Замена плавного преследования саккадами может быть обусловлена большей устойчивостью механизмов иннервации саккадической системы. Саккады генерируются более древними структурами мозга и имеют рефлекторную природу, тогда как плавное преследование требует включения более молодых в эволюционном отношении корковых отделов мозга).

Космические эксперименты поддержаны «Роскосмосом», пред- и послеполётные исследования поддержаны Российской академией наук (63.1).

EFFECTS OF SPACE FLIGHT FACTORS ON SENSORY-MOTOR SYSTEM

E. S. Tomilovskaya, T. A. Shigueva, I. V. Rukavishnikov, A. A. Saveko, N. V. Shishkin, M. P. Bekreneva, N. Yu. Lysova, I. A. Naumov, V. V. Kitov
Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: space flight, weightlessness, sensory-motor system, functional capacity

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ВОКРУГ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ «СОЮЗ» ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

В. Ю. Тугаенко¹, А. С. Грибков¹, А. В. Кацаба^{2,3}

¹ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва Королёв, Московская обл., Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: космический эксперимент, возвращаемый космический аппарат, плазменный поток, сжатый слой, подветренная область, налёт на иллюминаторе, химический состав

Введение

При взаимодействии спускаемого аппарата (СА) с атмосферой формируется плазменный слой, экранирующий прохождение радиоволн. В результате радиосвязь с космическими аппаратами, возвращающимися на Землю, на высотах от ~80 до 30 км практически невозможна (Savino et al., 2015). В рамках Программы отработки перспективных космических технологий, необходимых для освоения космического пространства, реализуемой Госкорпорацией «Роскосмос» на Международной космической станции (МКС), проводятся исследования связи с СА на «плазменном» участке лазерным излучением используя имеющийся на СА иллюминатор, направленный во время спуска на Землю.

Возможность реализации подобной технологии зависит от оптических свойств плазмы и уровня поглощения в слое налёта на иллюминаторе, образующегося при спуске СА. Надёжные данные по указанному вопросу могут быть получены только по результатам измерений в натурных условиях, которые планируется выполнить в рамках космического эксперимента «Плазма-СА». Экспериментальные исследования характеристик плазмы, окружающей СА, представляют большой интерес для фундаментальной науки так как представляют уникальную возможность исследовать физико-химические процессы, происходящие при воздействии высокоскоростного потока газа на поверхность сравнительно крупных космических тел – болидов, ежегодно регистрируемых в атмосфере Земли (Colonna et al., 2019).

Возможности космического аппарата для проведения исследования плазмы

На рис. 1 приведён транспортный пилотируемый корабль (ТПК) «Союз». Масса отсека 2,8 т, длина 2,16 м, диаметр 2,2 м.

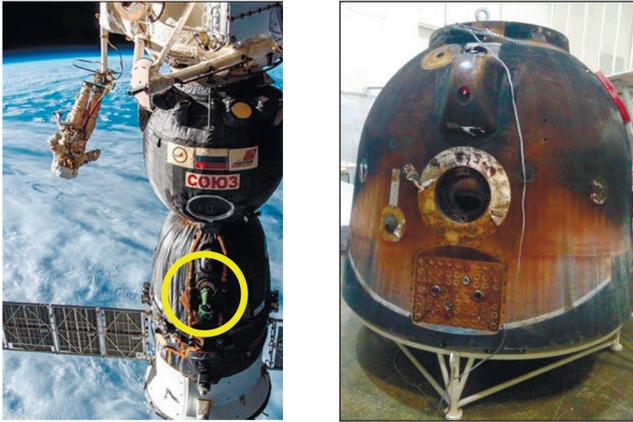
СА входит в плотные слои атмосферы со скоростью ~7,8 км/с под углом атаки ~26°. Продольная дальность движения в атмосфере составляет ~2500 км. Время, затрачиваемое на спуск, составляет около 12 мин. Форма и положение центра масс СА обеспечивают его устойчивый полет до завершения интенсивного нагрева во время спуска. До входа в атмосферу оптический прибор (визир, используемый экипажем для ориентации космического корабля в простран-

Тугаенко Вячеслав Юрьевич — главный специалист, Vjatcheslav.Tugaenko@rsce.ru

Грибков Александр Сергеевич — ведущий инженер

Кацаба Алексей Викторович — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук

стве), установленный на иллюминаторе (см. рис. 1а, в жёлтом кружке) отстреливается, а корабль до высоты ~30 км движется с ориентацией этого иллюминатора в надир. Основная часть набегающего воздушного потока приходится на лобовой теплозащитный экран, подвергающийся интенсивным конвективным и радиационным нагрузкам от высокотемпературного ударного слоя. В работе (Тугаенко и др., 2023) впервые сделаны оценки химического состава сжатого слоя и плазменного потока в подветренной области с учётом термохимического разрушения теплозащитного материала.



а б

Рис. 1. Спускаемый аппарат в составе ТПК «Союз»: *а* — в составе МКС, жёлтым кружком обозначено место расположения иллюминатора; *б* — после спуска

Благодаря ориентации СА при спуске в атмосфере «стекающий» с лобового теплозащитного экрана сжатый слой, как и набегающий атмосферный поток, проходит над боковой поверхностью СА в подветренной области, не приводя к существенным деструктивным изменениям теплозащитного покрытия на достаточно большой площади, включающей, как правило, и расположенный там иллюминатор (см. рис. 1б). Излучение плазмы, образованной при взаимодействии лобового теплозащитного экрана с набегающим гиперзвуковым потоком атмосферного воздуха, может быть исследовано приборами, расположенными внутри СА.

Космический эксперимент «Плазма-СА» по исследованию характеристик плазменного слоя окружающего СА при спуске и экспериментальной проверке возможности установления лазерной связи с СА на плазменном участке траектории предложен Институтом проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН и РКК «Энергия». В настоящее время наземная отработка реализуется в трёх целевых работах: «Плазма-СА», «Плазма-СА-фон» и «Плазма-СА-связь».

Научные задачи и научная новизна работы

Научные задачи космического эксперимента:

- прямое измерение спектра излучения плазменного слоя, окружающего спускаемый аппарат транспортного пилотируемого корабля «Союз», при прохождении атмосферы с гиперзвуковой скоростью;
- экспериментальное исследование динамики процессов загрязнения иллюминатора на этапе прохождения спускаемым аппаратом атмосферы путём регистрации лазерного излучения (генерируемого научной аппаратурой на борту СА), отражённого от наружной поверхности иллюминатора;

- экспериментальное определение влияния плазмы как помехи в канале связи в ИК-диапазоне, посредством регистрации спектральной мощности излучения плазмы, поступающей через иллюминатор в диапазоне 1,5–1,6 мкм;
- экспериментальное подтверждение достоверности расчётно-теоретических моделей плазмообразования и поведения продуктов термохимического разрушения теплозащитных материалов в сжатом слое у СА на теплонапряженных участках траектории входа;
- экспериментальное подтверждение возможности связи с СА путём регистрации в инфракрасном (ИК) диапазоне тестового сигнала, передаваемого лазером с поверхности Земли.

Электромагнитное излучение в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне от возвращаемых космических аппаратов исследовалось экспериментально как с борта самого аппарата (Erdman et al., 1993, 1994) так и с МКС (Пластинин и др., 2006). УФ-излучение ударного слоя с борта космического аппарата при скоростях входа в атмосферу Земли 3,5 и 5 км/с исследовалось в диапазоне 200–400 нм на высотах от 37 до 75 км при обтекании воздушным потоком полусферического купола радиусом 0,1 м с смонтированными в него оптоволоконными фотометрами, быстродействующим спектрометром, а также ионизационной камерой и измерителем плотности электронов. Интенсивность излучения в измеряемом диапазоне длин волн увеличивалась примерно в 100 000 раз с уменьшением высоты с 67 до 38 км. Теоретический анализ излучения для этих условий эксперимента был выполнен в работах (Gorelov et al., 1997; Levin et al., 1992; Plastinin et al., 1998; Vlasov et al., 1997).

Интенсивность УФ-излучения плазменного образования вблизи СА «Союз» была измерена с борта МКС радиометрической ультрафиолетовой камерой в области спектра 230–370 нм. Измерения проводились с расстояния примерно 400 км практически без поглощения атмосферы. Измеренная интегральная интенсивность УФ-излучения в указанном диапазоне длин волн составила 10^2 Вт/ср для высот движения СА в диапазоне от 100 до 30 км.

Следует отметить, в ходе наземной отработки научной аппаратуры для реализации космического эксперимента «Плазма-СА» были получены новые научные данные, представляющие интерес для фундаментальной науки. На поверхности спускаемого космического аппарата транспортного пилотируемого корабля «Союз» были обнаружены различные по форме и размерам кристаллические частицы, образовавшиеся во время прохождения СА атмосферы Земли (Tugaenko et al., 2021). Рентгеноструктурные исследования показали, что в составе проб с поверхности СА находятся различные минералы изначально отсутствующие в составе теплозащитного покрытия космического аппарата.

Бортовая научная аппаратура

Научная аппаратура, разрабатываемая РКК «Энергия» и Физическим институтом имени П. Н. Лебедева РАН изображена на рис. 2а и состоит из выносного блока, устанавливаемого непосредственно на бортовую часть визира, расположенного на внутренней части иллюминатора (рис. 2б) и основного блока, располагаемого в контейнере полезного груза в СА «Союз» (рис. 2в). Для регистрации излучения плазмы разработана аппаратура на основе спектрометра, регистрирующая электромагнитное излучение в диапазоне от 300 до 1060 нм с разрешением 0,7 нм. Для определения степени загрязнения иллюминатора во время спуска измеряется интенсивность излучения лазерного диода подсветки, отражённого от наружной поверхности иллюминатора.

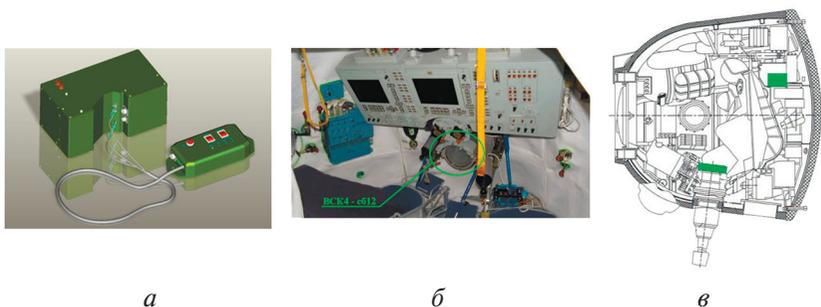


Рис. 2. Научная аппаратура для проведения исследований: *а* — общий вид НА, на переднем плане — выносной блок; *б* — место размещения выносного блока научной аппаратуры, регистрирующей излучение плазмы; *в* — размещение НА в СА, блоки НА обозначены зелёными прямоугольниками

Заключение

Вокруг возвращаемых космических аппаратов, равно как и крупных метеороидов при прохождении атмосферы Земли с орбитальной или с более высокой скоростью образуется плазменный слой, химический состав которого определяется в основном продуктами термодеструкции лобовой части тела в результате взаимодействия с набегающим воздушным потоком. В спускаемом аппарате транспортного пилотируемого космического корабля «Союз», возвращающего экипажи с Международной космической станции, температура на поверхности лобового щита теплозащитного покрытия аппарата достигает 2000 К, а температура в сжатом слое, по толщине составляющем 10–15 см, может достигать 10 000 К. Содержимое сжатого слоя в основном сносится вниз по потоку, что представляет особый интерес с точки зрения проведения инструментальных наблюдений за спектром излучения плазменного слоя в подветренной области спускаемого аппарата через имеющийся в конструкции аппарата иллюминатор. Созданная для проведения космического эксперимента научная аппаратура позволяет измерять спектры излучения плазмы в диапазоне 300–1060 нм с разрешением 0,7 нм по трассе полёта параллельно исследуя динамику загрязнения иллюминатора.

Реализация целей космического эксперимента «Плазма-СА» впервые продемонстрирует возможность осуществления лазерной связи со спускаемым аппаратом при прохождении атмосферы с орбитальной скоростью, а с точки зрения фундаментальной науки ожидаемые научные результаты исследований являются мультидисциплинарными и представляют интерес для широкого круга исследователей в областях аэрофизики, пылевой плазмы, кристаллографии, физики поверхности и пр. Проведение космического эксперимента «Плазма-СА» даёт обоснованную надежду на получение приоритетных для России научных данных мирового значения. Выполнение целей и задач этого космического эксперимента предоставляет именно пилотируемая космонавтика России, использующая спускаемые аппараты с исключительными конструктивными особенностями, которые дают возможность проведения уникальных космических исследований плазмы, образующейся вокруг космических тел при прохождении атмосферы Земли.

Литература

- Тугаенко В. Ю., Грибков А. С., Суржиков С. Т. Физико-химические характеристики плазменного потока, окружающего возвращаемые космические аппараты при входе в атмосферу Земли с орбитальной скоростью // Теплофизика высоких температур. 2023. № 3.
- Пластилин Ю. А., Карабаджак Г. Ф., Власов В. И. и др. Измерение и анализ интенсивности УФ-излучения плазменного образования по траектории

- спуска с орбиты СА «Союз-ТМА» по данным наблюдений с борта МКС // Физико-хим. кинетика в газовой динамике. 2006. Т. 4. 19 с.
- Colonna G., Capitelli M., Laricchiuta A.* Hypersonic Meteoroid Entry Physics / IOP Series in Plasma Physics. Bristol, UK: IOP Publishing, 2019.
- Erdman P. W., Zipf E. C., Espy P. et al.* Measurements of low-velocity bow shock ultraviolet radiation // *J. Thermophysics and Heat Transfer*. 1993. V. 7. No. 1. P. 37–41.
- Erdman P. W., Zipf E. C., Espy P. et al.* Measurements of ultraviolet radiation from a 5-km/s bow shock // *J. Thermophysics and Heat Transfer*. 1994. V. 8. No. 3. P. 441–446.
- Gorelov V. A., Gladyshev M. K., Kireev A. Y. et al.* Experimental and numerical study of nonequilibrium ultraviolet NO and N₂⁺ emission in shock layer // *J. Thermophysics and Heat Transfer*. 1997. V. 12. No. 1. P. 1–8.
- Levin D. A., Candler G. V., Collins R. J. et al.* Examination of ultraviolet radiation theory for bowshock rocket experiment // *AIAA Thermophysics Conf.* 1992. AIAA Paper. No. 92-2871.
- Plastinin Yu. A., Vlasov V. I., Gorshkov A. V. et al.* Analysis of nonequilibrium radiation for low density hypersonic flow at low to moderate velocities // *AIAA Paper*. 1998. Article 98-2466.
- Savino R., D'Elia M. E., Carandente V.* Plasma Effect on Radiofrequency Communications for Lifting Reentry Vehicles // *J. Spacecraft and Rockets*. 2015. V. 52(2). P. 417–425.
- Tugaenko V. Y., Ovchinnikov D. S., Isaenkova M. G. et al.* The chemical and mineral composition of particles precipitated from a plasma–dust layer on the porthole of the descend space vehicles during the passage of the Earth's atmosphere // *Geochemistry Intern.* 2021. V. 59. No. 1. P. 107–112.
- Vlasov V. I., Gorshkov A. V., Kovalev R. V., Plastinin Yu. A.* Theoretical studies of air ionization and NO vibrational excitation in low density hypersonic flow around re-entry bodies // *AIAA Paper*. 1997. Article 97-2582.

STUDY OF THE PLASMA LAYER AROUND THE DESCENT VEHICLE OF THE SOYUZ SPACESHIP DURING PASSAGE OF THE EARTH'S ATMOSPHERE

Tugaenko V. Y.¹, Gribkov A. S.¹, Katsaba A. V.^{2,3}

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

² P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

Keywords: space experiment, re-entry vehicle, plasma flow, compressed layer, downwind area, deposit on the porthole, phase composition of the deposit

ОТ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ К НЕВЕСОМОСТИ И ОБРАТНО — СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПРОФИЛАКТИКИ ГИПОГРАВИТАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ

Е. В. Фомина¹, Н. А. Сенаторова¹, Д. С. Иванов², М. А. Кокуева¹,
А. А. Буракова¹, В. Д. Бахтерева¹

¹ Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

² Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: профилактика негативных влияний невесомости, адаптация, космический полёт

Длительные орбитальные полёты позволили расширить знания о синдромах, сопровождающих пребывание в невесомости, и приблизили человечество к пилотируемому освоению дальнего космоса. Срочная адаптация человека к невесомости сопровождается запуском новых, несовершенных физиологических механизмов адаптации, такие срочные изменения протекают на фоне перераспределения крови в краниальном направлении, что изменяет работу сердечно-сосудистой и выделительной систем, запускаются перестройки функциональных систем с формированием новых взаимодействий, обеспечивающих механизмы жизнедеятельности и поддержания гомеостаза в условиях невесомости. В начальном периоде космического полёта (КП) происходят изменения сенсорного притока, возникает новая конфигурация взаимодействия сенсорных систем. Информация от вестибулярной системы вносит значительные возмущения в сенсорный приток, и по мере адаптации к условиям невесомости центральная нервная система отключает анализ сигналов с этого сенсорного входа. Поток информации от проприорецепторов мышц сигнализирует об отсутствии растяжения под действием силы тяжести, а рецепторные зоны стоп — об отсутствии опоры. Как следствие, происходит перераспределение мышечного тонуса — снижается тонус мышц-разгибателей, обеспечивающих поддержание позы в условиях Земли, и усиливается тонус мышц-сгибателей.

Длительное пребывание в условиях невесомости приводит к следующему этапу адаптивных изменений. Снижение скорости синтеза мышечного белка ведёт к атонии, атрофии, снижению силы и выносливости мышц. В системе крови наблюдается синдром функциональной эритроцитопении, что усугубляет снижение кислородно-транспортных функций крови и ортостатической устойчивости. Наряду с перестройками в нервно-мышечной системе, длительное пребывание в невесомости ведёт к нарушению минерального обмена костной ткани.

Изучение механизмов снижения физической работоспособности в условиях невесомости чрезвычайно важно при подготовке к межпланетным полётам. Очевиден вклад всех описанных выше изменений, таких, как уменьшение объёма плазмы, снижение числа эритроцитов, потеря мышечной массы, способной утилизировать кислород, детренированность сердца, изменения в системе управления

Фомина Елена Валентиновна — профессор, доктор биологических наук, заведующая лабораторией, Fomin-fomin@yandex.ru

Сенаторова Наталья Андреевна — младший научный сотрудник

Иванов Данил Сергеевич — научный сотрудник

Кокуева Мария Андреевна — младший научный сотрудник

Буракова Анна Алексеевна — младший научный сотрудник

Бахтерева Вера Дмитриевна — младший научный сотрудник

движениями. Адаптация человека к невесомости не предполагалась в ходе эволюции, и интересно проследить закономерности адаптации физиологических систем человека к экспозиции невесомости, что и стало целью настоящей работы.

Исследование выполнено на основе анализа данных космического эксперимента «Профилактика-2», в котором приняло участие 12 космонавтов, выполнявших длительные космические миссии на Международной космической станции (МКС) продолжительностью от 140 до 355 сут. Возраст космонавтов составлял 44 ± 7 года.

Физические тренировки на борту МКС планировались для участников эксперимента в соответствии с российской программой два раза в день, общей продолжительностью 150 мин в сутки. Ежедневно планировались тренировки на БД-2 и через день с чередованием тренировки на велотренажёре (ВБ-3М) и силовом тренажёре (ARED).

Экспериментальные сессии состояли из двух нагрузочных тестов: Тест индивидуальной стратегии (ИС) включает определение кинетики функционирования кардиореспираторной системы и индивидуальных стратегий локомоций. Это ступенчатый локомоторный тест на бегущей дорожке БД-2 с регистрацией данных газоанализа, пЭМГ мышц голени и бедра, ЭКГ и скорости локомоций, определением концентрации лактата в капиллярной крови (ЛК) перед нагрузкой в покое и после теста на 1-й и 5-й минуте восстановительного периода. Тест состоит из двух частей. Первая часть включает чередование ходьбы со скоростью 3 и 6 км/ч в форме псевдорандомизированной двоичной последовательности. Вторая часть представляет собой ступенчато-возрастающую нагрузку от 3 до 15 км/ч или до отказа, с приращением скорости на 1 км/ч каждые 30 с. Первая часть теста была предназначена для определения различия кросскорреляционной функции между интенсивностью нагрузки ответом сердечно-сосудистой системы на нагрузку, для этого проводилось сравнение двух идентичных интервалов экспертнозаданной псевдорандомизированной нагрузки. Высокий показатель кросскорреляционной функции означает быструю реакцию конкретного параметра на изменение скорости локомоций.

Ступенчатый локомоторный тест по протоколу МО-3 проводится в пассивном режиме бегущей дорожки БД-2 с регистрацией данных газоанализа, пЭМГ мышц голени и бедра, ЭКГ и скорости локомоций, определением концентрации ЛК перед нагрузкой в покое и после теста на 1-й и 5-й минуте восстановительного периода.

Абсолютные значения ЧСС представляют информативными в узком диапазоне физических нагрузок с аэробным механизмом энергообеспечения мышечной деятельности. Оценка состояния аэробных и анаэробных механизмов энергообеспечения в спортивной медицине выполняется на основе дополнительных пульсовых показателей. Так, пульсовая стоимость работы определяется как разность общего числа сердечных сокращений за время упражнения и их количества за соответствующий период в покое. В нашем исследовании рассчитывались такие показатели, как пульсовая сумма работы (площадь под кривой ЧСС за все время теста ИС) и пульсовая сумма восстановления (площадь под кривой ЧСС за время восстановления в течение 5 мин после теста). Показатель «пульсовой долг» рассчитывался как разность количества сердечных сокращений в периоде восстановления и количества сердечных сокращений в состоянии относительного покоя.

Образцы пЭМГ во всех точках исследования были получены с правой камбаловидной мышцы (*лат. m. soleus*) с помощью самоклеящихся покрытых гелем Ag/AgCl зашёлкивающих адгезивных электродов. Для анализа пЭМГ были взяты 10 шагов на каждой ступени ходьбы или бега. Статистическая обработка данных выполнялась в программах Statistica 12 и SPSS. Статистически значимыми

результаты считались при $p < 0,05$ по критерию Фишера (метод группирования выборок с наименее значимой разницей).

В среднем за 11 мин теста МО-3 участники эксперимента преодолевали дистанцию в 1059 ± 170 м. Средняя скорость локомоций в обследуемой группе космонавтов на ступени быстрого бега на 10–14-е сутки полёта (острый период адаптации) составила $8,1 \pm 2,6$ км/ч, что по сравнению с предполётными данными ($8,8 \pm 2,5$ км/ч) было значимо ниже. Однако уже во второй полётной сессии наблюдается значимое возрастание этого показателя до $9,1 \pm 2,7$ км/ч. Это может свидетельствовать о завершении раннего адаптационного периода и отражается на динамике физической работоспособности. В проведённых ранее работах скорости локомоций на ступени быстрого бега в тесте МО-3 в первом месяце полёта составляли $7,8$ км/ч, и на 2-м, 3-и и 4-м месяце полёта составляли около $8,3$ км/ч (Kozlovskaya, et al., 2006).

Нами был рассчитан традиционный для гравитационной физиологии показатель — физиологическая стоимость нагрузки. До полёта она составила $10,9 \pm 4,3$ ед. Во всех полётных сессиях физиологическая стоимость нагрузки оказалась выше, чем до полёта, в частности, в первой полётной сессии она составляла $17,9 \pm 6,0$ ед., а во второй полётной сессии — $16,6 \pm 4,6$ ед. На первом этапе полёта физическая работоспособность космонавтов существенно снижается с последующим восстановлением до предполётного или близкого к нему уровня. При формировании вывода о результатах анализа показателя физиологической стоимости нагрузки необходимо учитывать, что в ходе полёта нагрузка рассчитывается как величина, обратно пропорциональная скорости локомоций и уровню вертикальной осевой нагрузки. При этом в полёте осевая нагрузка находится в диапазоне от 60 до 70 % от веса тела на Земле.

Согласно подходам российской системы профилактики негативных влияний невесомости все тестовые процедуры первоначально отрабатываются в наземных модельных экспериментах. Тест ИС был использован в 120-суточной изоляции и в условиях 21-суточной «сухой» иммерсии. Так, в 120-суточном изоляционном эксперименте для анализа уровня физической работоспособности были исследованы такие параметры, как ЧСС, лактат капиллярной крови в течение последних 30 с на скорости 3, 6 и 9 км/ч, максимальное поглощение кислорода. Целью этого эксперимента стало сравнение равномерных и интервальных локомоторных тренировок. В результате в обеих группах было обнаружено снижение лабильности ответа сердечно-сосудистой системы на нагрузку в течение эксперимента, однако этот эффект исчез после окончания изоляции. Значения ЧСС, по видимому, изменились из-за снижения внешних стимулов в период тестирования. Также не было обнаружено различий между группами в отношении концентрации лактата. У испытуемых, по мнению исследователей, в период изоляции была более обширная и структурированная программа тренировок по сравнению с их повседневной жизнью, что способствовало профилактике негативных последствий гиподинамии.

В настоящее время определение физической работоспособности космонавтов осуществляется посредством теста МО-3, который имеет ряд недостатков. Во-первых, с точки зрения нестандартности нагрузки (тест выполняется в пассивном режиме движения полотна бегущей дорожки, т.е. усилием ног), скорость и дистанция в тесте не являются постоянными, а во-вторых, часто обусловлена уровнем мотивации испытуемого. В ранее полученных результатах этого теста реакция ЧСС на ступенчато-возрастающую физическую нагрузку в тесте МО-3 была более ярко выражена в течение первых 45 дней полёта, что характеризует протекание адаптивных перестроек физиологических систем к условиям невесомости. В последующие периоды ДКП физическая работоспособность космонавтов была выше

в группе, выполнявшей интервальные тренировки по сравнению с группой, выполнявшей равномерные тренировки, что согласуется с проведёнными исследованиями у иностранных коллег.

Послеполётный тест МО-3 в этом эксперименте выполнили только два космонавта, высокие требования к функциональному состоянию систем, обеспечивающих выполнение физической нагрузки, не позволили другим космонавтам участвовать в обследовании. Данные послеполётного теста МО-3 подтверждают ранее полученные сведения о снижении физической работоспособности после КП. Тест МО-3 не пригоден для выполнения его после полёта, так как в раннем послеполётном периоде имеются ограничивающие факторы режима реабилитации космонавтов, при этом изменения ФР именно после полёта являются важным индикатором здоровья космонавта, которое требует прицельного внимания в перспективе будущих межпланетных полётов. Так, в работе (Moore Jr. et al., 2010) послеполётные тесты на физическую работоспособность проведены на 1-е и 10-е сутки после посадки, а в нашем исследовании на 10-е сутки.

Средний уровень вертикальной осевой нагрузки у космонавтов в период ДКП в тесте МО-3 составлял 55 ± 11 кг, что соответствует в среднем 65,7 % от веса тела космонавтов на земле в фоновом исследовании. Согласно ранее проведённым работам в области сравнительного анализа параметров физических тренировок, величина вертикальной осевой нагрузки более 64 % способствует более эффективному сохранению физической работоспособности в ходе КП (Лысова, 2016).

Во всех проведённых сессиях эксперимента космонавты выполнили весь протокол теста индивидуальные стратегии. Ранее были описаны случаи, когда космонавты после полёта не могли достигнуть максимальной скорости 15 км/ч, предписанной протоколом теста по медицинским показаниям, и тест был завершён раньше. В результате анализа полученных пред- и послеполётных данных теста ИС, 85 % от максимальной возрастной ЧСС было достигнуто практически во всех случаях. В ходе полёта 85 % от максимальной ЧСС было зарегистрировано в трети случаев. На основе этих данных можно считать тест ИС субмаксимальным для исследуемой группы космонавтов, но только в условиях 1G. Зарегистрированное снижение уровня пиковой ЧСС во всех полётных сессиях обусловлено сниженной вертикальной осевой нагрузкой. В ходе КП прирост ЧСС не продемонстрировал значимой динамики. С целью более полной оценки транспортной функции системы кровообращения оценивался кислородный пульс. Этот показатель на двух последних ступенях нагрузки (14 и 15 км/ч) оказался ниже по сравнению с предполётными значениями. Частота дыхания на последней ступени нагрузки (15 км/ч) была значимо выше, чем до полёта. Абсолютные значения потребления кислорода (мл/мин), а также уровень потребления кислорода в расчёте на массу тела ($\text{мл} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$) в тесте ИС после космического полёта значимо не отличались от фоновых значений. Прирост уровня потребления O_2 на каждой ступени теста по сравнению с состоянием покоя рассчитывался в процентах. Показано, что прирост уровня потребления кислорода по сравнению с предполётным значением оказался ниже после полёта на ступенях локомоций со скоростью 14 и 15 км/ч. По нашему мнению, это связано с гравитационно-зависимыми изменениями в транспортной системе O_2 , обусловленными длительным нахождением в условиях невесомости. Показатель пульсовой суммы до полёта составил 15698 ± 2269 уд., в полете значимо не изменялся и увеличился только в тесте после полёта, где значимо увеличился до 18206 ± 2920 уд. ($p < 0,05$). Пульсовая сумма восстановления до полёта составила 2438 ± 408 уд., и значимо увеличилась до 2793 ± 536 уд. только после полёта ($p < 0,05$).

Полученные нами данные после космического полёта показали, что в группе с низким объёмом быстрого бега в полёте повышен

уровень лактата капиллярной крови на 1-й минуте восстановления после выполнения стандартной локомоторной нагрузки. Увеличение уровня лактата крови указывает на то, что испытуемый находится в неустойчивом метаболическом состоянии, сопровождающемся смещением кислотно-щелочного баланса внутренней среды организма, что обычно сопровождается нарушением работы нервных центров, снижением активности ферментных систем, и, как следствие, угнетением работы мышц. Полученные нами данные о том, что уровень лактата после космического полёта в группе, выполнявшей бег с высокой скоростью, оказался на предполётном уровне, согласуются с данными спортивной медицины и означает, что в этой группе способности к утилизации лактата выше. Тренировки с большей долей бега с высокой скоростью обеспечили увеличение ёмкости системы аэробного обеспечения мышечной деятельности, и переход к анаэробным механизмам осуществлялся на более поздних этапах теста и соответственно отсутствовало значительное накопления лактата, являющегося продуктом гликолитической системы обеспечения мышечной деятельности.

Результаты, свидетельствующие о повышении лёгочной вентиляции на ступенях нагрузки с 8 до 15 км/ч на 10 ± 2 -е сутки после космического полёта по сравнению с предполётным тестом, согласуются с данными о повышенном уровне лактата капиллярной крови и указывают на перенапряжение кислородтранспортной системы в группе с низким объёмом быстрого бега в полёте. Повышение лёгочной вентиляции на 10-е сутки после длительного космического полёта было описано и у астронавтов на основе результатов теста на велоэргометре.

С учётом результатов, представленных в данной работе, можно полагать, что наибольшей прогностической ценностью в тесте ИС обладают пульсовая сумма работы и пульсовая сумма восстановления, повышение которых в ходе космического полёта сопровождалось более низким уровнем физической работоспособности после полёта. Расчёт этих параметров при стандартной тестовой нагрузке имеет практическую значимость для формирования заключения о физической работоспособности космонавтов в ходе космического полёта, а также это позволяет корректировать программу тренировок на бегущей дорожке. Важно, что ИС может выполняться в раннем периоде реадaptации к условиям Земли и не имеет ограничений, затрудняющих использование штатного теста МО-3.

По результатам анализа электромиограммы при локомоторной нагрузке амплитуда пЭМГ зависела как от продолжительности полёта ($p < 0,05$), так и от скорости локомоций ($p < 0,05$), значение амплитуды пЭМГ *m.soleus* значительно увеличилось на 120-е сутки КП. Средняя частота пЭМГ при увеличении скорости локомоций оставалась достаточно стабильна, хотя наблюдалось значительное снижение частоты пЭМГ *m.soleus* на 80-е сутки пребывания на борту МКС. Скорость локомоций во время теста МО-3 ожидаемо зависела от длительности активаций *m.soleus*, но не зависела от продолжительности КП ($p > 0,1$). Средняя амплитуда пЭМГ монотонно увеличивалась с увеличением скорости шага, и она была значительно увеличена на 80–119-е сутки КП. Это могло быть связано с привлечением дополнительных двигательных единиц (ДЕ), чтобы компенсировать снижение выработки мышечной силы, наблюдаемое после КП. Однако следует учитывать, что космонавты использовали различную осевую вертикальную нагрузку, что делает среднюю амплитуду пЭМГ ненадёжной для оценки мышечной модификации. С другой стороны, исследование (Ivanenko, и др., 2004) показало, что модели мышечной активности остаются стабильными даже в диапазоне 35–95 % от веса тела (5–65 % от G). Действительно, поддержка веса тела изменяла скорее кинетические, чем кинематические характеристики шага.

Напротив, другой стандартный параметр пЭМГ, а именно средняя частота, оказался неизменным во всём изученном диапазоне ско-

рости шага, но он значительно увеличился пропорционально продолжительности КП. На сегодняшний день универсальных индексов для определения типа мышц по частотным индексам пЭМГ не существует. Однако авторы работы (Chan, и др., 2016) предположили, что средняя частота уменьшается с увеличением скорости бега, что отражало бы активацию двигательных единиц более быстрых типов. Таким образом, постепенное уменьшение средней частоты в нашем исследовании по продолжительности КП, возможно, указывало на растущее содержание ДЕ быстрого типа, что представляется весьма актуальным и подтверждается гистохимическими данными космических экспериментов. С другой стороны, снижение средней частоты, возможно, было связано с изменением структуры активности ДЕ.

Нелинейные параметры пЭМГ *m. soleus* в разной степени реагировали на факторы продолжительности полёта и скорости локомоций. Значения энтропии, экспоненты Ляпунова и корреляционной размерности демонстрировали изменения в зависимости от скорости локомоций. Фактор продолжительности КП находился в обратной взаимосвязи со значениями эксцесса ($r = 0,2$, $p < 0,05$) и энтропии ($r = -0,3$, $p < 0,01$). На 80-е сутки КП коэффициент эксцесса был увеличен. Энтропия была увеличена на 80 и 120-е сутки КП, в то время как экспонента Ляпунова была снижена на 120 и 170-е сутки КП. Значения корреляционной размерности не коррелировали с фактором продолжительности полёта ($p = 0,099$). Не было обнаружено существенных изменений всех показателей при их сравнении во время выполнения начальной и заключительной ходьбы (в начале и конце теста МО-3).

В рамках КЭ «Профилактика-2» получены уникальные данные, открывающие перспективы дальнейших исследований в интересах пилотируемых космических полётов. Закономерности адаптации человека к условиям невесомости аналогичны механизмам адаптации к экстремальным факторам среды в условиях Земли. Наблюдается появление «структурного следа» и «вегетативной памяти» при переходе от срочной к долговременной адаптации на фоне реализации мероприятий, направленных на профилактику негативных влияний микрогравитации. Динамика функциональных изменений со стороны сердечно-сосудистой, дыхательной и двигательной систем после экспозиции невесомости различной продолжительности позволяет сделать заключение о достаточной эффективности системы профилактики негативных факторов длительных и свехдлительных орбитальных полётов.

Работа поддержана бюджетным финансированием по базовой теме РАН 63.1. и Госкорпорацией «Роскосмос»

Литература

- Лысова Н. Ю. Эффективность физических тренировок различной направленности и весовой нагруженности в профилактике негативных эффектов невесомости в двигательной системе: дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 16 с.
- Kozlovskaya I. B., Grigoriev A. I., Bogomolov V. V. Efficacy of physical exercises in long-term space flights on ISS // 57th Intern. Astronautical Congress. 2006. Article A1. 3.02.
- Moore Jr. A. D. et al. Peak exercise oxygen uptake during and following long-duration spaceflight // J. Applied Physiology. 2014. V. 117. No. 3. P. 231–238.

FROM GRAVITY TO WEIGHTLESSNESS AND BACK — A MODERN APPROACH TO THE PREVENTION OF HYPOGRAVITATIONAL DISORDERS

E. V. Fomina¹, N. A. Senatorova¹, D. S. Ivanov², M. A. Kokueva¹, A. A. Burakova¹, V. D. Bakhtereva¹

¹ Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

² Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

Keywords: prevention of negative effects of weightlessness, adaptation, space flight

ЗАДАЧИ ОТБОРА И ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ПИЛОТИРУЕМОЙ КОСМОНАВТИКИ

М. М. Харламов

Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю. А. Гагарина, Звёздный Городок, Россия

Ключевые слова: космонавт, космический полёт, лунная программа, международная космическая станция, отбор космонавтов, пилотируемый корабль, подготовка, реабилитация, Российская орбитальная станция

В 2022 г. ГК «Роскосмос» была уточнена «Стратегия российской пилотируемой космонавтики до 2035 г.». С учётом данного документа НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина видит следующие цели и задачи по своим основным направлениям деятельности:

- обеспечение отбора, подготовки и реабилитации космонавтов по программе МКС;
- обеспечение подготовки астронавтов в рамках перекрёстных полётов по программе МКС;
- отбор, подготовка и обеспечение полётов участников космических полётов (УКП);
- формирование и обеспечение деятельности отряда космонавтов «Роскосмоса»;
- разработка системы отбора, подготовки и реабилитации космонавтов по Российской орбитальной станции (РОС);
- развитие инфраструктуры Центра с учётом задач по РОС;
- развитие комплекса предполётной подготовки космонавтов (КППК) на космодроме «Восточный»;
- создание научно-технических заделов по лунной и марсианской пилотируемым программам.

С 2012 г. в Центре создана новая система открытых конкурсных отборов космонавтов, отвечающая требованиям российского законодательства (Закону «О космической деятельности», Федеральному закону «О Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос»). Она обеспечивает единую политику отбора космонавтов, действующую в отношении всех ведомств, организаций и граждан РФ. Открытые конкурсные отборы в соответствии с требованиями, утверждёнными ГК «Роскосмос», проводились в 2012 г., 2017–1919 гг. и в 2019–1920 гг. всего было отобрано 20 чел. (8+8+4) — лиц в возрасте до 35 лет, имеющих высшее образование. В их числе военнослужащие и гражданские специалисты. Конкурс на одно место в этих наборах составлял от 38 до 53 чел. Активное участие в конкурсах принимали представители авиационной и космической отрасли. Их относительное число по трём наборам распределялось соответственно следующим образом: 16,5; 31,2; 38,9 %. Большинство претендентов на отбор были выпускниками таких вузов как Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Московский физико-технический институт, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова и др., а также ряда военных академий и военно-учебных центров.

Структурно система открытых конкурсных отборов включает заочный и очный этапы. На заочном этапе происходит рассмотре-

ние документов претендентов, на очном этапе допущенные к нему претенденты проходят тестирования по четырём видам отбора — на соответствие требованиям по физической подготовленности, образованию и профессиональной квалификации, психологическим и медицинским требованиям.

В настоящее время объявлен и начат четвёртый конкурсный отбор.

От одного отбора к другому организационные и методические его компоненты постоянно совершенствуются. Так в рамках четвёртого отбора организована беспрецедентная работа на предприятиях космической отрасли с участием опытных космонавтов и специалистов Центра по привлечению к полётам наиболее квалифицированных и мотивированных специалистов с достаточным практическим опытом.

В ближайших планах — модернизация системы отбора под задачи РОС, а затем под лунную программу. Изучаются новые методы отбора, основанные на нейроинформационных технологиях, генных методах исследований и др.

Система подготовки космонавтов к полётам на МКС базируется на методологии, отработанной на орбитальной станции «Мир» и предшествующих длительно функционирующих станциях. Ключевыми её элементами являются научная и учебно-методическая база, комплекс технических средств подготовки, включающий тренажёры и имитаторы условий космического полёта, инфраструктура на территории Центра и космодрома «Байконур», персонал.

Почти четверть века Система подготовки космонавтов стабильно обеспечивает полёты экипажей на МКС в рамках международного сотрудничества. Подготовка на базе Центра проходят все космонавты и астронавты, готовящиеся к полётам на станции. Всего к настоящему времени подготовлено более 140 основных и дублирующих экипажей. Кроме того, подготовку к полётам на МКС проходят участники космических полётов (УКП) и экипажи SpaceX (*англ.* Space Exploration Technologies Corporation) в рамках перекрёстных полётов.

Система подготовки хорошо адаптируется к новым задачам, возникающим в ходе эксплуатации МКС. В том числе — новым целевым работам, ремонтным работам и др. Впервые на станции выполнены при ведущей роли космонавтов две целевые работы (ЦР): «Композит» — научный руководитель и исполнитель на борту МКС А. Н. Шаплеров и «Лазма» — инициатор и исполнитель на борту МКС А. А. Мисуркин. ЦР проводились совместно с университетами Белгорода и Орла.

Предложена и реализована методика многосегментных тренировок с зарубежными партнёрами по МКС, когда при их проведении задействуют технические средства всех участников, что обеспечивает надёжную работу интегрированных экипажей станции в штатных режимах полёта и нештатных ситуациях.

Постоянно совершенствуется техническая база подготовки. В состав технических средств подготовки вводятся современные технологии виртуального и цифрового моделирования, медико-биологической подготовки и др.

В связи с ковидными ограничениями разработаны новые способы дистанционного обучения экипажей, включающие как методические положения, так и современные цифровые технологии.

После капитального ремонта гидролаборатории (ГЛ) она успешно введена в строй. В ней ведётся подготовка космонавтов к внекорабельной деятельности (ВКД), испытывается новая космическая техника. В ГЛ заложены возможности отработки действий экипажей в рамках лунных программ и уже в этом году начнутся исследования в данном направлении.

Ещё один крупный моделирующий комплекс НИИ ЦПК — центрифуга ЦФ-18. Она достаточно интенсивно используется для

задач отбора и подготовки космонавтов, а также исследований с участием человека. В 2023 г. на ней доведено до практического воплощения ещё одно инновационное решение. Вместе с МГУ имени М. В. Ломоносова для центрифуги разработаны необходимые математические решения и алгоритмы и реализован режим «сквозного» моделирования космического полёта, включающий этапы взлёта космонавта на пилотируемом космическом аппарате (ПКА), орбитального полёта и спуска на Землю. Адекватность режима реальному космическому полёту подтверждена опытными космонавтами, что позволяет использовать его в подготовке экипажей ПКА. Особенно полезной будет подобная технология для космонавтов, впервые готовящихся к космическому полёту.

Введены новые элементы в лётную подготовку. Её совершенствование связано с использованием вертолётов для формирования важных профессиональных качеств космонавтов. На базе НИИ ЦПК создан Авиационный учебный центр, получен сертификат установленного образца для обучения полётам на вертолётах. Впервые экспериментально отработана и введена в действие программа лётной подготовки космонавтов на вертолётах. Кроме того, с участием лётчиков-космонавтов, лётчиков-испытателей и пилотов вертолётот отработана технология полётов по моделируемым лунным глассадам в интересах пилотируемой лунной программы. Космонавт А. А. Мисуркин по этой технологии выполнил эксперименты на вертолёте по спуску и посадке на Луну до и после 12-суточного полёта на МКС в декабре 2021 г.

С учётом опыта МКС и современных технологий моделирования задач и условий космических полётов Центром в рамках программы РОС разработан и успешно защищён эскизный проект Системы подготовки космонавтов для новой российской станции.

Поскольку в ближайшей перспективе планируется использование космодрома «Восточный», НИИ ЦПК создаёт на нём комплекс предполётной подготовки космонавтов с целью осуществления заключительных операций с космонавтами перед стартом космического корабля.

В рамках подготовки по РОС будут созданы:

- новые лекционные курсы, включающие материалы по особенностям полёта РОС на высокоширотных орбитах, проблемам технического обслуживания и ремонта беспилотных КА, сборки больших конструкций, обслуживания свободнолетающих КА, взаимодействия с робототехническими комплексами, основам искусственного интеллекта, методам действий в новых климато-географических зонах после штатной и нештатной посадки (при старте с космодрома «Восточный») и др.
- методики, технологии и технические средства, обеспечивающие подготовку космонавтов по всем элементам программы РОС.

Все космонавты, вернувшиеся из космоса после полёта на МКС, проходят реабилитацию — комплекс лечебно-восстановительных мероприятий медицинского, физического и психологического характера. Их цель — поддержание функций организма или их восстановление в случае нарушений в результате воздействия неблагоприятных факторов космического полёта для предупреждения или снижения возможной утраты работоспособности космонавта.

Реабилитация осуществляется в два этапа. Первый этап восстановительных мероприятий проводится в течение 20–21 дня на базе Центра. На втором этапе в санаторно-курортных условиях в течение 30–40 дней проводятся физические, климатические, бальнео- и физиотерапевтические процедуры восстановления. Как правило, к концу этого периода большинство показателей здоровья возвращаются

к предполётному уровню, хотя некоторые показатели, характеризующие состояние двигательной сферы, восстанавливаются лишь к 4–6-му месяцу после длительного космического полёта.

В интересах развития системы реабилитации космонавтов для обеспечения проекта РОС планируется использовать новые высокотехнологичные средства: для медицинской реабилитации — новые диагностические комплексы; для физической — силовые пневматические тренажёры, обеспечивающие строго дозированную нагрузку, СПА-капсулы с применением хромотерапии (лечение светом), сухого тепла, гидромассажа, воздушного массажа, термотерапии и др.; для психологической реабилитации — кабинеты психологической разгрузки (сенсорные комнаты), позволяющие проводить направленное воздействие на физиологические функции человека с целью оптимизации и коррекции психического состояния.

Отряд космонавтов — ядро системы подготовки космонавтов. В настоящее время в его составе 26 чел. В их числе 16 чел. с опытом космических полётов. Более половины космонавтов отряда назначены в экипажи и проходят соответствующую подготовку. На послеполётной реабилитации находятся 3 чел. В этом году 4 чел. завершили этап общекосмической подготовки и перешли на следующий уровень обучения — в группу специализации и совершенствования. В первой половине 2024 г. планируется пополнение отряда космонавтов молодыми кандидатами.

В 2022 г. ГК «Роскосмос» принят ряд организационных решений, направленных на повышение эффективности подготовки космонавтов и их роли в разработке новой космической техники. Одним из результативных способов их деятельности в данном направлении представляется участие в эргономической экспертизе нового пилотируемого транспортного корабля (ПТК), научной аппаратуры для МКС и оценивании проектных материалов по РОС.

На решение задач совершенствовался действующих пилотируемых космических кораблей (ПКК), а также создание научно-технических заделов по перспективным пилотируемым программам (полёты человека на Луну и Марс) направлена и послеполётная деятельность космонавтов.

Послеполётные мероприятия органично сочетают восстановительные процедуры и рабочие встречи со специалистами — постановщиками космических экспериментов (КЭ) и ЦР и разработчиками космической техники. В результате оперативно разрабатываются рекомендации по устранению замечаний и недостатков, а также по развитию технологий пилотируемых полётов.

Важное место в программе послеполётных мероприятий занимают исследования с участием космонавтов на экспериментально-стендовой базе Центра по изучению возможностей человека выполнять сложную операторскую деятельность в будущих лунных и марсианских миссиях. К настоящему времени проведены исследования по ключевым операциям ВКД на поверхности планет, операциям ручной посадки ПКА, сближению и стыковки КА, управлению планетными транспортными средствами, в том числе с использованием антропоморфных роботов. Результаты исследований опубликованы в научных журналах и неоднократно докладывались на крупных международных форумах, таких как Glex-21 (*англ.* Global Space Exploration Conference 2021), конгресс МАФ (Международный конгресс астронавтики (*англ.* International Astronautical Congress)), конференция «Человек в космосе».

Полагаем, что в перспективных пилотируемых программах наряду с космонавтами, имеющими квалификацию «космонавт-испытатель», будут востребованы и «космонавты-исследователи». Действующее «Положение о космонавтах РФ», утверждённое Постановлением Правительства РФ от 10.05.2017 г., предусматривает и то и другое. В настоящее время разработан и действует професси-

ональный стандарт только в отношении должности «космонавт-испытатель». С целью обеспечения перспективных программ Центром разработаны и направлены в ГК «Роскосмос» предложения по профстандарту «космонавт-исследователь» (структура, уровни квалификации, обобщённые трудовые функции, макет стандарта). Надеемся на дальнейшее решение данного вопроса с участием заинтересованных министерств и ведомств.

Третья Международная конференция «Наука на МКС» проходит почти одновременно с Международной научно-практической конференцией НИИ ЦПК «Пилотируемые полёты в космос». Наша конференция была организована в 1993 г. и проводится уже в 15-й раз. Обычно она собирает около 200 российских и зарубежных участников.

Надеемся, что оба наших научных форума будут дополнять друг друга и способствовать развитию отечественной пилотируемой космонавтики и укреплению международного сотрудничества.

TASKS OF COSMONAUT SELECTION AND TRAINING IN THE IMPLEMENTATION OF THE MANNED SPACEFLIGHT STRATEGY

M. M. Kharlamov

Yuri Gagarin Cosmonaut Training Center, Star City, Moscow region, Russia

Keywords: cosmonaut, spaceflight, lunar program, International Space Station, cosmonaut selection, manned transport vehicle, training, rehabilitation, Russian Orbital Station

МАЛЫЙ БУКСИР ДЛЯ РОС. ПРОЕКТНЫЙ ОБЛИК

А. В. Шаповалов, Г. А. Щеглов, А. Ф. Георгиев, Я. В. Дарьин,
И. А. Казаку, Д. А. Макаренко, Д. С. Никулин, С. С. Верзилин
Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Москва, Россия

Ключевые слова: МАТРОС, малый разгонный блок, Российская орбитальная станция, инспектор орбитальной станции, буксир для орбитальной станции

Концепция малых буксиров

Тенденция увеличения количества космических аппаратов (КА) оказалась в целом едина с тенденцией к уменьшению размера единичного КА. От аппаратов массой 250–100 кг в настоящее время переходят к аппаратам массой 25–10 кг с тенденцией уменьшения до 1 кг и менее. Современный космический рынок испытывает потребность в малых разгонных блоках (МРБ) для доставки малых космических аппаратов (МКА) на рабочую орбиту и для решения других задач межорбитальных операций, что классифицируется как периферийная пусковая услуга. Причина возникновения данной услуги — несоответствие размерности средств выведения размерности полезной нагрузки (ПН), которое базируется на противоречии между преимуществами, которые даёт использование группировок из большого числа малых КА и преимуществами, которые даёт выведение большой по массе ПН одним пуском ракеты-носителя (РН).

В настоящее время в мире эксплуатируется четыре МРБ для выполнения данной задачи: ION Satellite Carrier (*англ.* In-Orbit Now), Vigoride, Sherpa-LTC, Lunar Photon и Launcher Orbiter. Технические характеристики данных МРБ позволяют в среднем изменить характеристическую скорость орбитального движения 150 кг ПН на 150 м/с.

Малый разгонный блок БОТ

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н. Э. Баумана) ведёт разработку МРБ для периферийной пусковой услуги на РН «Союз-2.1б» с разгонным блоком «Фрегат». Поскольку транспортная услуга имеет тенденцию к уменьшению стоимости, то на стоимость серийного МРБ накладывается ограничение не более 1 млн дол. и на стоимость применения не более 1,5 млн дол. В связи с этим в конструкции требуется использовать двигательную установку на нетоксичных самовытесняемых компонентах топлива без требований к системе электроснабжения.

В проекте МРБ «БОТ» применяется двигательная установка на газообразных компонентах топлива «Кислород-Метан» собственной разработки. Масса ПН может составлять до 250 кг. Запас характеристической скорости до 500 м/с (для массы ПН в 100 кг).

Шаповалов Анатолий Витальевич — инженер, аспирант,
shapovalovav@bmstu.ru

Щеглов Георгий Александрович — профессор, доктор технических наук
профессор, shcheglov_ga@bmstu.ru

Георгиев Александр Федорович — старший преподаватель, кандидат
технических наук, a.georgiev@bmstu.ru

Дарьин Ярослав Виленович — инженер, yarosvet6@gmail.com

Казаку Илья Александрович — инженер, kazaku@bmstu.ru

Макаренко Данил Алексеевич — инженер, makarenkov@bmstu.ru

Никулин Даниил Сергеевич — инженер, dedperded239@yandex.ru

Верзилин Станислав Сергеевич — инженер, verzilin@bmstu.ru

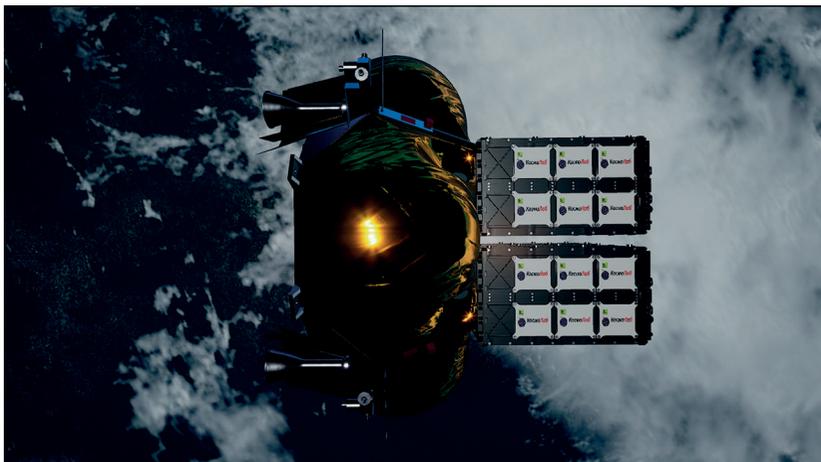


Рис. 1. МРБ «БОТ»

Малый разгонный блок МАТРОС

Проект МРБ «БОТ» занял первое место на Корпоративном акселераторе ПАО «РКК «Энергия».

Были определены следующие задачи для МРБ в составе комплекса орбитальной станции

1. Запуск малых космических аппаратов.
2. Проведение эксперимента с неотделяемой полезной нагрузкой в свободном полете.
3. Инспекция орбитальной станции.

Для соответствия требованиям безопасности пилотируемого комплекса и экипажа и специфике задач МРБ в составе комплекса были внесены следующие основные изменения в проект МРБ МАТРОС (малый орбитальный тягач Российской орбитальной станции (РОС)):

- Замена газообразных компонентов топлива «Кислород-Метан» на сжатый воздух.
- Внедрение в конструкцию сменных баллонов с воздушной смесью.
- Ограничение габаритов МРБ в соответствии с ограничениями транспортировки на транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс».
- Использование Wi-Fi для обеспечения связи с РОС.
- Установка уловителя на внешней поверхности станции для захвата МРБ.

- Декартовое управление положением центра масс МРБ.
- Использование автомобильных радаров от системы адаптивного круиз-контроля для определения параметров движения МРБ относительно РОС.

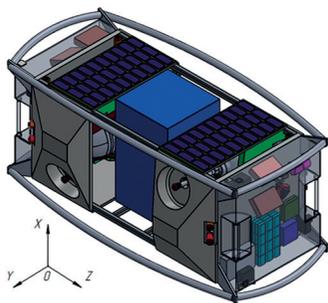


Рис. 2. Внешний вид МРБ МАТРОС

Блок МАТРОС (рис. 2) выполнен в форме параллелепипеда. В центре блока расположена зона под ПН (синий параллелепипед). В качестве ПН может быть установлен: контейнер для запуска МКА Cubesat-16U, целевая камера для инспекции РОС, неотделяемая ПН массой до 50 кг.

Баллистические возможности блока МАТРОС

Задачам применения блока соответствуют два типа миссий: с отделением ПН и без отделения ПН:

- 1) миссия «Инспектор»: перелёт от станции РОС до рабочей орбиты осуществляется с ПН, перелёт к станции РОС осуществляется с ПН;
- 2) миссия «Буксир»: перелёт от станции РОС до целевой орбиты осуществляется с ПН, перелёт к станции РОС осуществляется без ПН.

Масса МРБ после каждого перелёта описывается следующими выражениями:

$$M_1 = M_{\text{ПН}} + M_T + M_C, \quad M_{12} = M_{\text{ПН}} + M_{T_2} + M_C, \quad M_2 = M_{\text{ПН}} + M_C,$$

где: M_0 — начальная масса МРБ; M_1 — масса разгонного блока после перелёта на рабочую орбиту; M_{12} — масса разгонного блока перед началом перелёта к станции РОС; M_2 — масса МРБ после завершения перелёта и возвращения на опорную орбиту.

Сухая масса блока составляет $M_C = 110$ кг. В значения сухой массы включается запас топлива, расходуемый при подлёте и отлёте от станции. Это значение составляет 4 кг. При выполнении миссии «Буксир» перед перелётом обратно к ОС сбрасывается ПН. Масса ПН, которую МРБ может вывести в зависимости от изменения высоты и наклона по следующей формуле.

$$M_{\text{ПН}} = M_T \cdot \exp\left(-\frac{\Delta V(h,i)}{J_{\text{уд}}}\right) \times \left(\frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{2\Delta V(h,i)}{J_{\text{уд}}}\right)} - \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{\Delta V(h,i)}{J_{\text{уд}}}\right)} \right) - M_C,$$

где $J_{\text{уд}}$ — удельный импульс МРБ.

На рис. 3 представлена диаграмма возможных орбит перелёта для миссии с доставкой полезной нагрузки без возвращения на станцию. По вертикали отмечено изменение наклона орбиты, по горизонтали — изменение высоты круговой орбиты. Числами и цветом обозначена масса полезной нагрузки, которая может быть доставлена на эту орбиту.

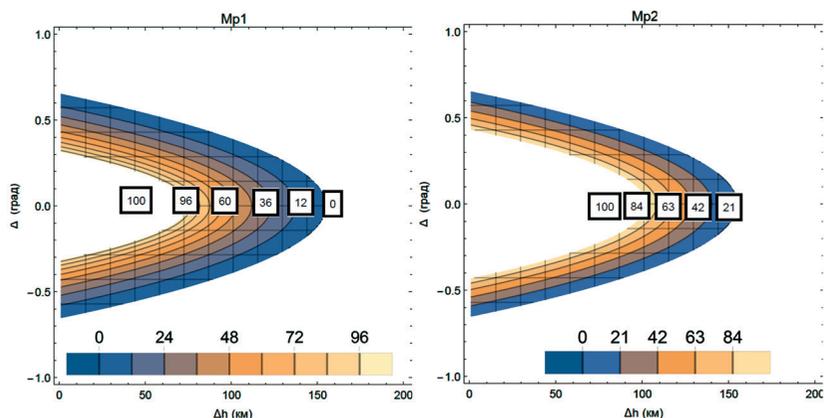


Рис. 3. Область возможных перелётов для миссии «Инспектор» (справа) и для миссии «Буксир» (слева)

Характеристики целевой камеры для миссии «Инспекция»

Чтобы обеспечить безопасность станции инспекция должна проводиться с расстояния больше чем характерный размер станции — 50 м. Объекты, которые необходимо рассмотреть при помощи целевой камеры — мелкие повреждения на поверхности станции. Их характерный размер составляет несколько миллиметров. Будем считать, что для их наблюдения необходимо обеспечить получение изображения, где на $L_{ц} = 1$ мм объекта приходится минимум $c_{ц} = 2$ пикселя матрицы. Угол обзора примем $\alpha = 6^\circ$.

Угловой размер характерного объекта наблюдения на расстоянии $L_{ц} = 50$ м

$$\operatorname{tg}(\theta_{ц}) = \frac{l_{ц}}{L_{ц}} = 0,00002.$$

Для квадратной матрицы со стороной a полное разрешение по двум сторонам составило бы

$$N_{ц} = a^2 = 110 \text{ Мп.}$$

Такое разрешение может быть обеспечено большими среднеформатными матрицами.

Ограничивающей характеристикой объектива становится дифракционный предел, который показывает минимальный размер объекта, который может быть разрешён объективом.

$$\Delta l = 1,22 \frac{L_{ц} \lambda}{D} = 0,0003 \text{ м,}$$

где λ — средняя длина волны света, различимая человеком, $\lambda = 550$ нм; D — диаметр апертуры, $D = f/5,6 = 70$ мм; f — фокусное расстояние, $f = 400$ мм.

Используя преобразованную версию этой формулы, можно найти разрешение объектива в линиях на миллиметр

$$l_{рmm_0} = 1,22 \frac{\lambda}{5,6} = 134 \text{ линий/мм.}$$



Рис. 4. Предлагаемая камера (слева) и объектив (справа)

Требуемыми характеристиками будет обладать сборка из камеры iXM-MV150F и объектива Canon EF 400mm f/5.6L USM (рис. 4).

SMALL TUG FOR RUSSIAN ORBITAL STATION. TECHNICAL SPECIFICATIONS

A. V. Shapovalov, G. A. Shcheglov, A. F. Georgiev, Y. V. Darin, I. A. Kazaku,
D. A. Makarenkov, D. S. Nikulin, S. S. Verzilin
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: small upper stage, Russian orbital station, orbital station inspector, tug for the orbital station

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Е. В. Шубралова¹, В. С. Беляев², Л. М. Василяк³, Е. А. Дешевая⁴,
В. Я. Печеркин³, О. С. Цыганков⁵

¹ Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

³ Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

⁴ Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

⁵ Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: МКС, космическая пыль, микроорганизмы, биологические и химические анализы, поражающие факторы околоземного космического пространства

Космическая пыль всегда была объектом неизменного научного и практического интереса. Инструмент, базирующийся за пределами атмосферы Земли, может позволить получить интереснейшие данные, которые откроют новые представления об околоземном пространстве, в том числе его угрозе для человечества. Результаты космического эксперимента (КЭ) «Тест», проводимого на внешней поверхности модулей Международной космической станции (МКС) в течение 12 лет доказали, что внешняя поверхность МКС (площадь 8500 м²) представляет идеальную экспериментальную базой-сборщиком вещества для непрерывного исследования космического пространства (Гребенникова и др., 2016а). Основное преимущество КЭ «Тест» заключается в возможности проведения биологического и химического анализа на одном доставленном материале (публикации авторов по КЭ «Тест» приведены в списке литературы).

Ранее считалось, что выше 15–20 км над поверхностью Земли из-за воздействия ультрафиолетового излучения живые организмы существовать не могут. Опровержения этой умозрительной схемы получены при аэростатном, самолётном и ракетном зондировании после 1965 г., когда были обнаружены жизнеспособные микроорганизмы на высотах в диапазоне 20–77 км. В космическом эксперименте «Тест», начиная с 2010 г., осуществляется регулярный отбор проб мелкодисперсионного осадка с внешней поверхности российского сегмента (РС) МКС на орбите высотой 400 км. За период 2010–2019 гг. космонавты во время внекорабельной деятельности (ВКД) отобрали 39 проб с поверхности МКС. Микробиологический анализ выявил в 50 % проб наличие жизнеспособных единиц спорных бактерий и грибов (Гребенникова и др., 2016б). Применение высокочувствительных молекулярных методов позволило в 70 % случаев не только выявить фрагменты ДНК геномов различных микроорга-

Шубралова Елена Владимировна — главный специалист, sev@tsniimash.ru

Беляев Владимир Сергеевич — заместитель начальника отдела, кандидат физико-математических наук, belyaev@vniiftri.ru

Василяк Леонид Михайлович — главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: vasilyak@yandex.ru

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

Печеркин Владимир Яковлевич — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, e-mail: vpcherkin@yandex.ru

Цыганков Олег Семенович — главный научный сотрудник, доктор технических наук, Oleg.Tsygankov@rsce.u

низмов, но и типировать их методом секвенирования, в том числе и труднокультивируемых микроорганизмов (Deshevaia et al., 2020).

Эксперименты с последующим открытым экспонированием микроорганизмов в космосе, выявленных на внешней поверхности МКС, подтвердили не только сохранение активного метаболизма экспонатов, но и возможность репарировать мутации, нанесённые космическими лучами, ультрафиолетовым (УФ) и рентгеновским излучением, по крайней мере, в течение двух лет (Дешева и др., 2021). Это указывает на возможность их длительного транспортирования в космическом пространстве.

Микроорганизмы на внешней поверхности МКС могут быть как земного, так и внеземного происхождения (Grebennikova et al., 2018). Источники поступления земных микроорганизмов: слой биосферы, пополняемый с помощью ионосферного лифта земными аэрозолями; пристыковывающиеся транспортные средства (внутренняя воздушная среда, контаминация внутренней и внешней поверхности); микрофлора экипажей и их экипировки; внутриобъектовая среда при сбросе воздуха и при работе систем жизнеобеспечения (Гребенникова и др., 2016 б; Гребенникова и др., 2021). Источником поступления микроорганизмов из межпланетного пространства могут быть частицы тридцати шести метеороидных потоков, под воздействием которых поверхность МКС находится практически 75 % времени действия каждого (рис. 1). Это могут быть не только частицы кометных хвостов, но и адсорбированные ими молекулы межзвёздной среды. Следует принять во внимание, что частицы тридцати шести метеороидных потоков могут не только принести на поверхность МКС микроорганизмы из межпланетного пространства, но и наоборот вынести на себе земные из слоя биосферы выше 100 км над её поверхностью. Хвост кометы можно рассматривать как трал (сборщик) и транспортировщик межзвёздных молекул «к нам в руки» (Гребенникова и др., 2020). На рис. 1 показаны результаты микробиологического анализа проб отобранных с поверхности МКС в ходе ВКД (Deshevaia et al., 2020).

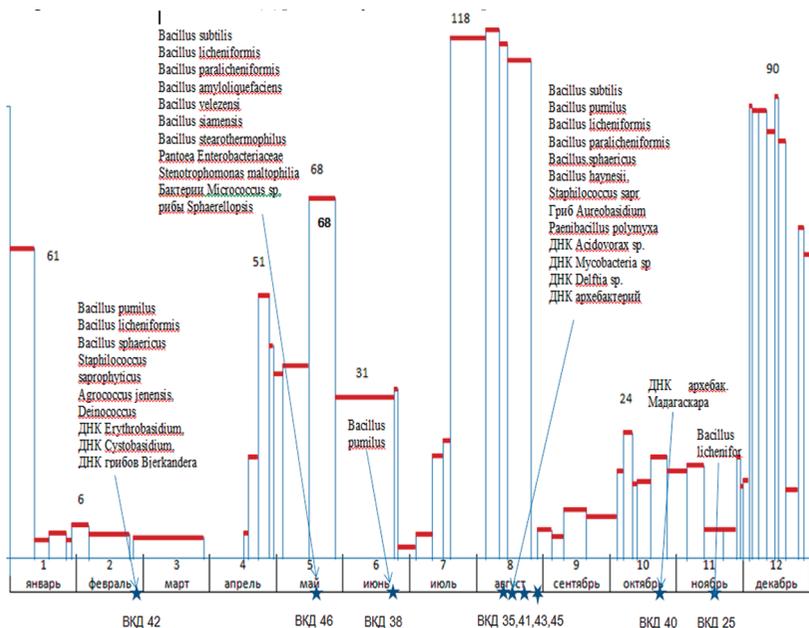


Рис. 1. Результаты отбора проб при ВКД на графике суммарного количества частиц кометных хвостов в час в период движения МКС через зону их метеороидных потоков

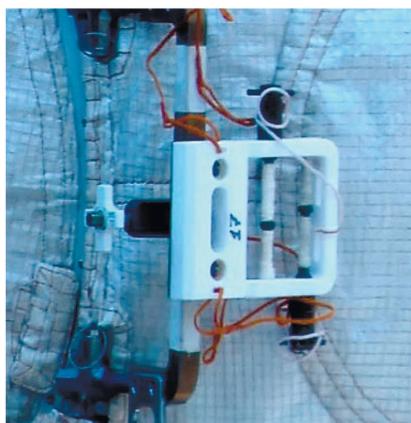
Сохранение жизнеспособности выявленных на поверхности МКС микроорганизмов определило важность проведения исследований:

- возможности занесения микрофлоры на поверхностях скафандров в модули после внекорабельной деятельности для предотвращения контаминации микрофлорой внутренних объёмов;
- выявление изменений биологических свойств микроорганизмов, обнаруженных в ходе эксперимента на внешней поверхности МКС.

Необходимо отметить, что эксперименты с экспонированием различных микроорганизмов в космосе на спутниках, начиная с проекта Gemini и до современных проектов, например, эксперименты на внешней поверхности РС МКС Exposure, «Биориск», Tanpopo, Microbe, эксперименты на наноспутниках O/OREOS (англ. Organism/Organic Exposure to Orbital Stresses) показали необычайную устойчивость живого вещества к поражающим факторам околоземного космического пространства. Однако указанные эксперименты проведены в условиях космического пространства в изолирующих контейнерах, что не соответствовало воздействию полного комплекса факторов открытого космоса. Двухлетний эксперимент «Тест» по экспонированию микроорганизмов в открытом космосе (рис. 2) показал, что в орбитальных условиях вакуума вблизи МКС происходит обезвоживание микроорганизмов, как при низкой температуре при замерзании воды, так и при нагреве, в зависимости от периодического нахождения МКС на орбите в затенённой или в солнечной области. Эти процессы аналогичны применяемым в технологии подготовки микроорганизмов к длительному хранению в коллекциях на Земле, так называемой лиофилизации. Эти процессы, возможно, являются основными факторами длительного выживания микроорганизмов в вакууме около МКС. Причем, лиофилизированные микроорганизмы, как показал КЭ «Тест», не убивает УФ-излучение и радиация. Постулат о стерилизации космических кораблей космическими лучами в условиях космического вакуума не подтверждается.



а



б

Рис. 2. Процесс установки устройства экспонирования «Тест» с микроорганизмами на внешней стороне модуля МИМ2 (а); фотография установленного устройства экспонирования «Тест» на внешней поверхности (б)

Результаты исследования мелкодисперсного осадка, собранного с поверхности РС МКС, включают данные по составу химических элементов (рис. 3), содержащихся в осадке, а также видам микроор-

ганизмов, споры и фрагменты ДНК, которых контаминировали данную зону в момент отбора осадка (см. рис. 1). Химический анализ проб мелкодисперсионного осадка с поверхности МКС показал, что элементный профиль отобранной космической пыли, имеет: значительный вклад тропосферного аэрозоля; следы вулканических газов и радиоактивных изотопов, поднимающихся по восходящей ветви глобальной электрической цепи; в микрочастицах осадка наличие элементов, являющиеся постоянной составной частью метеоритов в характерных соотношениях; частицы 36 кометных хвостов, достигающих поверхность Земли в натуральном виде (Zinicovscaia et al., 2021). В ходе эксперимента выявлено 65 химических элементов.

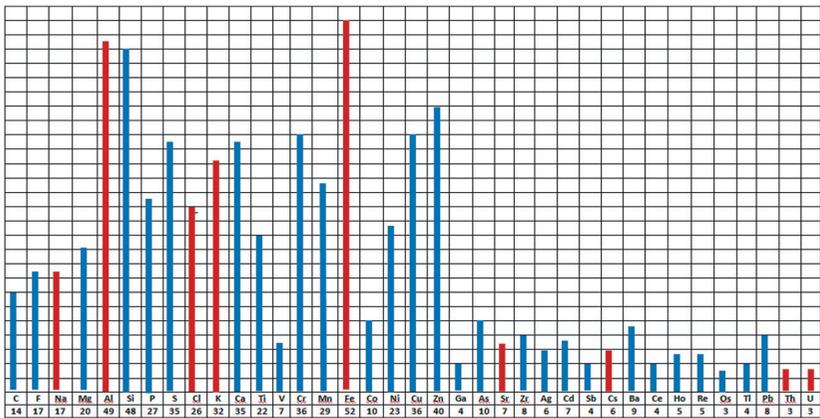


Рис. 3. Количество следов химических элементов, выявленных в пробах осадка на поверхности модулей (красным выделены элементы, имеющие радиоактивные изотопы)

КЭ «Тест» показал, что пробы с поверхности МКС являются объектом исследований физико-химического и минералогического состава осадка на поверхности, определения источника его поступления и происхождения, последствий воздействия окружающей среды МКС и осадка космозоля на конструкционные материалы.

Благодаря рений — очень редкому металлу, не являющемуся продуктом диспергирования материалов МКС, обнаруженному в трёх пробах, исследованных в разных лабораториях, отобранных в разных местах МКС, на разных материалах, в разное время и не обнаруживавшемся ранее в космических телах установлена новая высота распространения вулканических газов. Рений в большом количестве имеется в газовых выбросах fumarольных полей вулкана Кудрявый. С версией вулканического происхождения рения согласуется почти постоянное обнаружение в составе проб осадка на поверхности МКС составляющих вулканических газов: серы, фтора, хлора, в том числе, радиоактивных изотопов калия, цезия, урана.

Если рений попал на МКС из вулкана, то частицы другого выявленного в пробах металла, возможно, долетели до станции из недр галактики. При анализе свертка ткани, экспонировавшегося на внешней поверхности более 8 лет, в значимых концентрациях обнаружен редкоземельный элемент гольмий, обладающий парамагнитными свойствами. Этот лантаноид находится на Земле в рассеянном состоянии. Его неожиданно высокое содержание может быть связано с попаданием на поверхность МКС пыли из межпланетного пространства. Среди космических объектов с аномально высоким содержанием гольмия отличается звезда Пшибльского из созвездия Центавра. Существует мнение, что на этой звезде «собрался» весь

гольмий нашей Галактики возможно потому, что ее магнитное поле в 2000 раз сильнее земного.

Это доказывает, что околоземное пространство является биохимически активной средой и это необходимо учитывать в интересах контроля развития микродеструкции гермокорпуса, ухудшения прозрачности иллюминаторов, деградации эксплуатационных характеристик солнечных батарей и радиаторов под влиянием факторов внекорабельной фоновой среды, включая исследование возможного влияния остаточной радиации.

Результаты КЭ «Тест» позволили выявить новые аспекты экзосферы Земли:

1. Наличие космического мусора в околоземном пространстве опасно не только в плане динамического воздействия при столкновении с ним, но и в результате долговременного хранения собирающегося на его поверхности мелкодисперсного осадка из химических элементов, опасных для человечества, с конечной доставкой его на Землю. Космические национальные агентства обязаны рассматривать эти аспекты, планируя многотысячные орбитальные группировки (например, Starlinks, США), обитаемые орбитальные станции с развитой структурой обеспечения, с доставкой на Землю грузов и возвратом экипажа, развития космического туризма, что неизменно связанные с воздействием на биосферу (экзосферу) Земли. Космический мусор и орбитальные группировки могут являться сборщиками и носителями на своей поверхности биообъектов неизвестного происхождения, агрессивных химических элементов, включая радиоактивные, поступающих с Земли и не рассеиваемых в космическое пространство, как это ранее предполагалось. Это определяет необходимость межгосударственного нормирования квот на размер орбитальных группировок при наличии в составе КА средств сведения с орбиты КА по завершению активного функционирования. Кроме того, необходима разработка строгих мер обеспечения бактериологической и эпидемиологической безопасности после проведения долговременных космических экспедиций. Это должно контролироваться при возвращении на Землю после длительного экспонирования и пребывания в открытом космосе многоразовых транспортных средств, биологических грузов и экспериментального оборудования, комфортно доставляемых на возвращаемых аппаратах на Землю («Союз» (до 50 кг), Dragon 1 (до 3000 кг), Dragon 2 (до 2000 кг).

2. Данные, получаемые в ходе реализации КЭ «Тест», являются демонстрацией возможностей МКС как орбитальной исследовательской лаборатории для получения данных и **альтернативой весьма дорогостоящим путям** их получения при организации специализированных миссий к кометам (Миссия «Розетта» к комете Чуримова-Герасименко — 12 лет, миссия StarDust к комете Wild — 7 лет). Малозатратное и регулярное получение данных в естественном состоянии для химического анализа состава не только частиц кометных хвостов, но и адсорбированных ими молекул и частиц межзвёздного вещества, значительно расширит круг исследовательских работ специалистов по астробиологии, планетологии и астроминералогии. МКС при этом выступает в новой роли — уникального инструмента контроля глобальных общепланетарных процессов.

3. Прикладная направленность КЭ «Тест» ставит задачу оценки стойкости конструкционных материалов космических аппаратов в условиях осаждения на них активной среды, эффективности оптики, фотопреобразователей солнечных батарей, рефлекторов, отражателей, радиаторов, а также переосмысления проблемы планетного карантина. Проведение эксперимента даёт фактический материал для решения перспективных задач по защите космических аппаратов при межпланетных полетах и при проектировании напланетных станций с использованием системного подхода, связыва-

юшего конструктивные решения и факторы окружающей среды при эксплуатации объекта. Проведение эксперимента, также, позволит сформировать программу биологических исследований в рамках лунных экспедиций, в том числе окололунного пространства и нелунных миссий. Аппаратура для взятия проб может быть введена в состав окололунного орбитального модуля.

Литература

- Гребенникова Т. В., Дешева Е. А., Морозова М. А. и др. (2016а) Ловушка космической пыли — поверхность МКС // Материалы 2-й Всерос. конф. по астробиологии «Жизнь во Вселенной: физические, химические и биологические аспекты». Пушино, 2016. С. 47.
- Гребенникова Т. В., Дешева Е. А., Новикова Н. Д. и др. (2016б) Эксперимент «Тест»: космозоль и живая материя на поверхности международной космической станции» // Материалы Международ. конф. “Human space exploration”. Королёв, 2016. С. 58.
- Гребенникова Т. В., Дешева Е. А., Соловьев В. А. и др. Граница биосферы планеты Земля: Интерпретация результатов эксперимента «Тест» // Авианпанорама. 2020. № 3.
- Гребенникова Т. В., Дешева Е. А., Соловьев В. А. и др. Живая материя на границе биосферы Земли // Полет. 2021. № 1. С. 3–11.
- Дешева Е. А., Ошуркова В. И., Сузина Н. Е. и др. Метаногенные археи в условиях космоса // Авиакосм. и эколог. медицина. 2021. Т. 55. № 1. С. 63–69.
- Deshevaya E. A., Shubralova E. V., Fialkina S. V. et al. Microbiological Investigation of the Space Dust Collected from the External Surfaces of the International Space Station // Intern. J. Biomedical Science and Engineering BioNanoScience. 2020. V. 10.
- Grebennikova T. V., Syroeshkin A. V., Shubralova E. V. et al. The DNA of Bacteria of the World Ocean and the Earth in Cosmic Dust at the International Space Station // Scientific World J. 2018. V. 2018. Article 7360147. 7 p. <https://doi.org/10.1155/2018/7360147>.
- Zinibovscaia I., Grozdov D., Yushin N. et al. Analysis of the rolled cotton cloth fixed on the outer surface of the International Space Station using neutron activation analysis and complementary techniques // Acta Astronautica. 2021. V. 189. P. 278–282.

A NEW LOOK AT NEAR-EARTH SPACE

E. V. Shubralova¹, V. S. Belyaev², L. M. Vasilyak³, E. A. Deshevaya⁴, V. Ya. Pecherkin³, O. S. Tsygankov⁵

¹ Central Research Institute for Machine Building

² Russian Metrological Institute of Technical physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow Region, Russia

³ Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

⁴ Institute of Biomedical Problems RAS, Moscow, Russia

⁵ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: ISS, space dust, microorganisms, biological and chemical analyses, near-Earth space damaging factors

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК В ОТСЕКАХ МКС И В ТЕЛЕ КОСМОНАВТА

**В. А. Шуршаков, О. А. Иванова, К. О. Иноземцев, Д. А. Карташов,
И. С. Карцев, С. Г. Дробышев, Р. В. Толочек**

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: космическая радиация, Международная космическая станция, критические органы, фантомы, дозовые нормативы

С самого начала полёта Международной космической станции (МКС) в её отсеках проводится измерение дозовых нагрузок, создаваемых ионизирующим космическим излучением. Эти измерения проводятся как штатной аппаратурой радиационного контроля, так и в рамках космических экспериментов. Штатная аппаратура, используемая российскими (Лягушин и др., 2002) и американскими (Badhwar, 2002) партнёрами для решения оперативных задач по обеспечению радиационной безопасности экипажей МКС, работает непрерывно. Партнёры регулярно обмениваются получаемыми данными, что позволяет в целом успешно обеспечивать выполнение требований по радиационной безопасности космонавтов.

Анализ данных, полученных российской системой радиационного контроля (СРК) в отсеках служебного модуля (СМ) МКС с использованием дозиметра Р-16 на основе ионизационных камер и полупроводниковых датчиков ДБ-8 с самого начала эксплуатации МКС до настоящего времени, представлен в работе (Benghin et al., 2022). При невозмущённой радиационной обстановке по данным ДБ-8 суточные дозы в см МКС находятся в интервале от 0,15 до 0,45 мГр/сут; при этом перепад суточных доз в различных отсеках СМ составляет, как правило, от 1,5 до двух раз. Мощность дозы зависит от условий защищённости конкретного отсека, фазы цикла солнечной активности, высоты орбиты МКС, а также от ориентации модуля по отношению к силовым линиям геомагнитного поля (Дробышев, Бенгин, 2011). Отметим, что, несмотря на оперативный характер функционирования штатных средств радиационного контроля в РС МКС, российской СРК измеряется только поглощённая доза (без учёта коэффициентов качества), отсутствует возможность определять эквивалентную дозу, а также дозу на критические органы космонавтов, не учитывается вклад в дозу вторичных нейтронов.

В новых нормативах (Методические..., 2021), регламентирующих дозовые нагрузки на космонавтов при орбитальных космических полётах, указана предельная величина эффективной дозы ионизирующего излучения за весь период профессиональной деятельности космонавта в размере 1000 мЗв. Кроме того, устанавливаются более жёсткие ограничения (в терминах эквивалентной дозы) для дозовых

Шуршаков Вячеслав Александрович — заведующий отделом, кандидат физико-математических наук, shurshakov@imbp.ru

Иванова Ольга Алексеевна — главный специалист, olgaivanova@imbp.ru

Иноземцев Константин Олегович — научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, koinozemtsev@imbp.ru

Карташов Дмитрий Александрович — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, dkartashov@inbox.ru

Карцев Иван Сергеевич — старший научный сотрудник, кандидат технических наук, kartsev@centro.ru

Дробышев Сергей Геннадиевич — младший научный сотрудник, drobyishev@imbp.ru

Толочек Раиса Владимировна — младший научный сотрудник, tolochek@imbp.ru

нагрузок на критические органы членов экипажа, такие как кожа (КЖ), хрусталик глаза (ХГ) и кровеносная система (КТС) за различные периоды полёта (острое в течение ~1-х суток кратковременное воздействие, месяц и год). Новые дозовые пределы предназначены для принятия оперативных решений о возможности продолжения по критерию радиационной безопасности космического полёта при ухудшении радиационной обстановки, регистрируемой на борту пилотируемого космического аппарата.

Недостаток дозиметрических данных удавалось компенсировать в рамках выполнения космического эксперимента (КЭ) «Матрёшка-Р» на МКС с помощью научной аппаратуры, разработанной с участием широкой международной кооперации. Отличительной особенностью отдельных приборов КЭ «Матрёшка-Р» выступает возможность получения биологически значимых характеристик ионизирующих космических излучений, получение которых не предусмотрено имеющейся на борту РС МКС штатной аппаратурой радиационного контроля. К таким характеристикам относятся, прежде всего, спектр линейной передачи энергии (ЛПЭ), позволяющий определять коэффициент качества в смешанном поле излучений (Inozemtsev et al., 2015) и переходить от поглощённой к эквивалентной дозе, что становится необходимым для определения радиобиологических последствий воздействия космической радиации на человека.

В период 2004–2022 гг. на МКС проведены экспериментальные исследования распределения дозы в отсеках станции и в теле космонавта с использованием тканеэквивалентных антропоморфного (Reitz et al., 2009) и шарового (Карцев и др., 2005) фантомов, оснащённых активными и пассивными детекторами, размещаемыми как на поверхности, так и внутри фантома.

В период с февраля 2004 г. по август 2005 г. антропоморфный фантом в специальном контейнере, имитирующем защиту скафандром, находился на внешней поверхности СМ. Перепад поглощённой дозы по телу антропоморфный фантома превышал 4 раза, а для эквивалентной дозы составил 3 раза (Puchalska et al., 2014). Отмечался также широкий диапазон изменения коэффициента качества излучения от 1,7 до 2,9.

На рис. 1 показано размещение шарового фантома (с мая 2012 г. по сентябрь 2012 г.) в модуле «Кибо» (*англ.* Kibo) в том же месте, где ранее (с мая 2010 г. по март 2011 г.) размещался антропоморфный фантом.

По телу антропоморфного фантома при средней высоте полёта 380 км доза изменялась от 160 до 300 мкГр/сут и перепад доз составил 1,7 раза, в то время как для шарового фантома при средней высоте полёта 420 км доза изменялась от 260 до 380 мкГр/сут и перепад доз составил 1,5 раза. При размещении шарового фантома в каюте СМ полученные результаты показали более чем 2-кратное различие дозы на поверхности фантома, при этом наибольшая доза наблюдалась вблизи внешней стенки отсека, наименьшая — на диаметрально противоположной стороне фантома. Максимальная мощность дозы, измеренная в фантоме, связана с воздействием галактических космических лучей (ГКЛ) и радиационного пояса Земли (РПЗ); минимальные величины доз вызваны в основном сильно проникающими частицами ГКЛ и наблюдаются за защитой более 5 г/см² тканеэквивалентного вещества. Таким образом, полученные с использованием шарового фантома результаты по дозам в критических органах хорошо согласуются с данными измерений с использованием антропоморфного фантома.

Благодаря сферической форме и оптимальным размерам шарового фантома (масса 32 кг, диаметр 35 см, внутренняя сферическая полость 10 см), распределение длины хорд для мест расположения детекторов может быть соотнесено с условиями самозащищённости

критических органов в теле человека (Акатов и др., 2007). По сравнению с антропоморфными фантомами, используемыми специалистами Европейского космического агентства (ЕКА) и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (НАСА), сферический фантом имеет меньшую массу, меньший размер и требует меньше времени экипажа для установки и извлечения детекторов, кроме того по химическому составу материал фантома максимально приближен к биологической ткани. Измерения, выполненные различными активными дозиметрами в шаровом фантоме, позволили оценить уровни радиационного воздействия на критические органы космонавтов (Hallil et al., 2010; Jadrnickova et al., 2010; Semkova et al., 2014).



Рис. 1. Шаровой (слева) и антропоморфный (справа) фантомы в модуле «Кибо» МКС

Уникальные данные были получены на МКС прибором «Люлин-5» КЭ «Матрёшка-Р» 7–8 марта 2012 г. (Semkova et al., 2014). Впервые в практике пилотируемых полётов проведены измерения динамики нарастания мощности дозы и потока ионизирующего космического излучения на разных глубинах в тканеэквивалентном фантоме во время солнечного протонного события (СПС), произошедшего в этот период. Зафиксировано возрастание мощности дозы и потока одновременно на трёх глубинах в детекторах, расположенных на расстоянии 40, 60 и 165 мм от поверхности фантома. По данным прибора «Люлин-5» максимальный поток частиц составил $7,2 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а мощность дозы достигла 108 мкГр/ч. Во время СПС дополнительная поглощённая доза на глубине 40 мм в фантоме (1-й детектор) составила 180 мкГр, а на глубине 160 мм в (3-й детектор) — 130 мкГр. Таким образом, перепад доз от данного СПС между упомянутыми глубинами равен 1,4.

Применение уникальной научной аппаратуры «БАББЛ-Дозиметр» КЭ «Матрёшка-Р» позволило измерить спектрометрические и дозиметрические характеристики нейтронов снаружи и внутри шарового фантома (Хулапко и др., 2016; Smith et al., 2016). Было установлено, что доза нейтронной компоненты внутри фантома состав-

ляет примерно 70 % от дозы нейтронной компоненты на его поверхности, при этом энергетический спектр нейтронов внутри фантома содержит большую долю нейтронов высоких энергий ($E_n > 10$ МэВ), чем спектр на поверхности фантома. В целом в КЭ «Матрёшка-Р» было показано, что вклад нейтронной компоненты в суммарную эквивалентную дозу может варьироваться от 20 до 30 %.

Альтернативные измерения вклада вторичного космического излучения в рамках КЭ «Матрёшка-Р» проводилось с помощью твердотельных трековых детекторов, по составу также близких к биологической ткани. Полученные результаты (Inozemtsev et al., 2018) подтверждают значительный вклад в суммарную эквивалентную дозу (от 15 до 35 %) продуктов ядерной фрагментации, генерируемых в мягких тканях под воздействием как нейтронов, так и протонов высоких энергий.

В случае проникновения на орбиту солнечных космических лучей (СКЛ) перепад доз по телу космонавта может достигать нескольких раз и более в зависимости от жёсткости спектра СКЛ, что особенно актуально для высокоширотных орбит. Для недопущения ситуаций необоснованного прекращения полёта из-за превышения заданных дозовых пределов необходимо с достаточной точностью измерять дозы в критических органах и оперативно определять накопленную эффективную дозу (в том числе с учётом вклада нейтронов) в периоды возмущённой радиационной обстановки.

В рамках КЭ «Матрёшка-Р» было продемонстрировано на практике, что с помощью шарового фантома могут быть определены дозы в критических органах и эффективные дозы членов экипажа. К настоящему времени российский тканеэквивалентный шаровой «фантом-свидетель», оснащённый пассивными и активными детекторами, прошёл апробацию в условиях МКС в период 2004–2022 гг. и рекомендуется в качестве штатного средства радиационного контроля в отсеках новой высокоширотной станции РОС.

Литература

- Акатов Ю. А., Архангельский В. В., Бенгин В. В. и др. Исследование закономерностей формирования радиационных полей в теле человека и в отсеках орбитальной станции в ходе космического полета // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 4(49). С. 71–84.
- Дробышев С. Г., Бенгин В. В. Оценка влияния ориентации Международной космической станции на мощность дозы в служебном модуле станции при прохождении области Южно-Атлантической аномалии // Косм. исслед. 2011. Т. 49. № 5. С. 411–418.
- Карцев И. С., Акатов Ю. А., Еременко В. Г. и др. Шаровой фантом для исследования радиационной обстановки в космическом пространстве. Конструктивные особенности // Ядерные измерительно-информац. технологии. 2005. Т. 4. № 16. С. 36–45.
- Лягушин В. И., Волков А. Н., Александрин А. П. Предварительные результаты измерения поглощенных доз по данным системы радиационного контроля российского сегмента Международной космической станции // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиац. воздействия на радиоэлектрон. аппаратуру. 2002. Вып. 4. С. 22–25.
- Методические рекомендации МР ФМБА 17.01-2021. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах. (ООКОКП-2021) / Гос. корпорация «Роскосмос»; Федеральное медико-биолог. агентство. М.: Науч. кн., 2021. Система стандартизации в здравоохранении: Группа 17. Требования к системам жизнеобеспечения в экстремальных ситуациях и специальным системам.
- Хулапко С. В., Лягушин В. И., Архангельский В. В. и др. Сравнение эквивалентной дозы от заряженных частиц и нейтронов внутри шарового тканеэквивалентного фантома на борту РС МКС // Авиакосм. и эколог. медицина. 2016. Т. 50. № 2. С. 47–52.

- Badhwar G. D.* Shuttle radiation dose measurements in the International Space Station orbits // *Radiation Research*. 2002. V. 157. № 1. P. 69–75. DOI: 10.1667/0033-7587(2002)157[0069:SRDMIT]2.0.CO;2
- Benghin V., Shurshakov V., Osedlo V. et al.* Results of long-term radiation environment monitoring by the Russian RMS system on board Zvezda module of the ISS // *Life Sciences in Space Research*. 2022. (In Press). DOI:10.1016/j.lssr.2022.11.002.
- Hallil A., Brown M., Akatov Yu. et al.* MOSFET dosimetry mission inside the ISS as part of the Matroshka-R experiment // *Radiation Protection Dosimetry*. 2010. V. 138. No. 4. P. 295–309. DOI: 10.1093/rpd/ncp265.
- Inozemtsev K. O., Kushin V. V., Maklyaev E. F., Shurshakov V. A.* Measurements of linear energy transfer spectra of high-LET space radiation inside the International Space Station Modules (2013–2014) // *Physics Procedia*. 2015. V. 74. P. 324–327. DOI:10.1016/j.phpro.2015.09.250.
- Inozemtsev K. O., Kushin V. V., Strádi A. et al.* Measurement of different components of secondary radiation onboard International Space Station by means of passive detectors // *Radiation Protection Dosimetry*. 2018. V. 181. No. 4. P. 412–417. DOI: 10.1093/rpd/ncy043.
- Jadrnickova I., Brabcova K., Mrazova Z. et al.* Dose characteristics and LET spectra on and inside the spherical phantom onboard of ISS // *Radiation Measurements*. 2010. V. 45. No. 10. P. 1536–1540. DOI: 10.1016/j.radmeas.2010.07.002.
- Puchalska M., Bilski P., Berger T. et al.* NUNDO: a numerical model of a human torso phantom and its application to effective dose equivalent calculations for astronauts at the ISS // *Radiation and environmental biophysics*. 2014. V. 53. No. 4. P. 719–727. DOI: 10.1007/s00411-014-0560-7.
- Reitz G., Berger T., Bilski P. et al.* Astronaut's organ doses as inferred from measurements in a human phantom outside the ISS // *Radiation Research*. 2009. V. 171. No. 2. P. 225–235. DOI: 10.1667/RR1559.1.
- Semkova J., Dachev T., Koleva R. et al.* Observation of Radiation Environment in the International Space Station in 2012–March 2013 by Liulin-5 Particle Telescope // *J. Space Weather and Space Climate*. 2014. V. 4. Article A32. DOI: 10.1051/swsc/2014029.
- Smith M., Khulapko S., Andrews H. et al.* Bubble-detector measurements of neutron radiation in the International Space Station: ISS-34 to ISS-37 // *Radiation Protection Dosimetry*. 2016. V. 168. No. 2. P. 154–166. DOI:10.1093/rpd/ncv181.

STUDY OF DOSE DISTRIBUTION IN ISS COMPARTMENTS AND IN A COSMONAUT BODY

V. A. Shurshakov, O. A. Ivanova, K. O. Inozemtsev, D. A. Kartashov, I. S. Kartsev, S. G. Drobyshev, R. V. Tolocheck
 Institute of biomedical problems of the RAS, Moscow, Russia

Keywords: space radiation, International, space station, critical organs, dose limits

ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ И ЯВЛЕНИЙ В КЭ «УРАГАН» НА РС МКС

О. А. Юрина

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., Россия

Ключевые слова: космический эксперимент «Ураган», международная космическая станция (МКС), дистанционное зондирование

Одной из эффективных технологий, предоставляющих наиболее полную информацию о состоянии природных и техногенных объектов, а также развитии потенциально опасных и катастрофических явлений на земной поверхности, представляется дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) с борта пилотируемой космической станции. Для России, имеющей обширные просторы и огромные территории, это направление особенно актуально. Создание автоматических космических систем, осуществляющих непрерывный мониторинг нашей страны и обработку поступающих данных, предполагает предварительную отработку используемых технических методов и средств ДЗЗ. Такую отработку удобнее всего проводить на российском сегменте (РС) Международной космической станции (МКС) в рамках космического эксперимента (КЭ) «Ураган», постановщиком которого выступает ПАО «РКК «Энергия», научный руководитель КЭ «Ураган» доктор технических наук, профессор М. Ю. Беляев. Главная цель КЭ «Ураган» — отработка научной аппаратуры (НА) и методов наблюдения Земли с борта РС МКС.

Особое внимание в эксперименте уделяется мониторингу потенциально опасных и катастрофических явлений на земной поверхности и в атмосфере.

КЭ «Ураган» проводится на борту РС МКС поэтапно, начиная с 2001 г., и перечень его задач и состав аппаратуры постоянно расширяется.

На первом этапе в основном решались задачи проведения визуально-инструментальных наблюдений подстилающей поверхности Земли с использованием оптических приборов и ручных фото- и видеокамер из комплекса средств поддержки экипажа, а также задачи создания компьютерных баз данных по зарегистрированным катастрофическим явлениям.

В настоящее время для фотосъёмки земной поверхности с борта РС МКС космонавты используют переносные цифровые фотокамеры Nikon (Nikon D800E, Nikon D850, Nikon D5), регистрирующие объекты в оптическом диапазоне спектра электромагнитных волн, в натуральных цветах, и позволяющие получать цветные изображения с детальностью до 2–3 м, что соответствует мировому уровню получения цветных снимков с автоматических космических аппаратов. Однако в отличие от автоматических аппаратов на борту РС МКС при выполнении фотосъёмок используются интеллектуальные возможности космонавтов и специально разработанное математическое обеспечение для поддержки КЭ.

На втором этапе, начиная с 2007 г., на смену оптическим приборам наблюдения начали приходиться переносные спектрометры (фото-спектральная система (ФСС) и видеоспектральная система (ВСС)) (рис. 1), в связи с чем к задачам первого этапа КЭ добавились задачи отработки методов визуальных наблюдений с помощью новой НА, изучения различных объектов и явлений на поверхности Земли

и в атмосфере в различных областях спектра электромагнитного излучения, а также задачи усовершенствования методов распознавания и классификации объектов с использованием спектров.

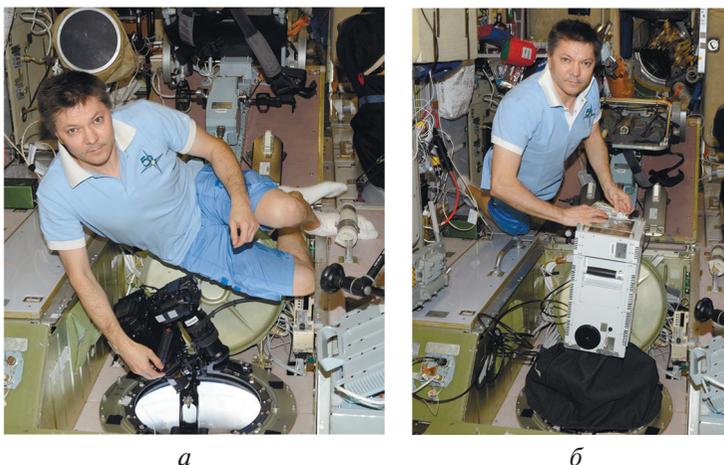


Рис. 1. Космонавт О. Д. Кононенко проводит съёмку: *а* — фотоспектральной системой; *б* — видеоспектральной системой

Несомненным преимуществом ручных спектрометрических приборов, используемых на борту РС МКС, представляется возможность отслеживания объекта исследования. За счёт этого появляется возможность изучать изменение спектральных характеристик подстилающей поверхности в зависимости от угла визирования.

Российские космонавты для мониторинга Земли из космоса используют НА ФСС и ВСС, изготовленную по техническому заданию «РКК «Энергия» Научно-исследовательским институтом прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, работающую в спектральном диапазоне 0,35–1,1 мкм, что позволяет решать задачи с пространственным разрешением 50 м.

С помощью спектрометров ФСС, ВСС получено большое количество интересных данных, и их использование продолжается не только в КЭ (целевой работе (ЦР)) «Ураган», но и в других экспериментах на МКС: «Дубрава», «Сценарий» и др.

На третьем этапе, начиная с 2015 г., на борт РС МКС дополнительно доставляется ряд НА, предназначенной для автоматического наведения и съёмки земной поверхности с помощью фото- и спектральной аппаратуры (система ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА)) (рис. 2), наблюдения за перемещением животных и птиц («Икарус») (рис. 3), получения гиперспектральных изображений («Гиперспектрометр») и проведения измерений излучений наблюдаемых объектов в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах спектра (радиометр инфракрасный высокого разрешения (РИВР)). Использование различной НА КЭ «Ураган» для мониторинга земной поверхности позволяет ещё больше расширить и без того широкий круг задач.

В качестве примера комплексного применения различной НА в КЭ «Ураган» можно привести использование данных от НА «Икарус», разработанной по соглашению между Госкорпорацией «Роскосмос» и Национальным центром аэрокосмических, энергетических и транспортных исследований Германии (*нем.* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DLR). С помощью НА «Икарус» изучаются миграции животных и птиц на земной поверхности и их состояние.



Рис. 2. Космонавт О. И. Скрипочка проводит фотосъёмку с помощью НА СОВА

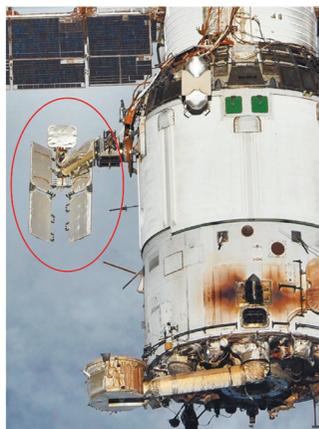


Рис. 3 НА «Икарус» на борту РС МКС



Рис. 4 Космонавт А. Н. Шкаплеров с длиннофокусным цифровым фотоаппаратом Nikon

С 2021 г. помимо установки тегов на животных и птиц, осуществляется контроль подвижек некоторых оползней. В дальнейшем планируется также начать осуществлять контроль подвижек ледников.

На этапе целевого использования аппарата «Икарус» работает в режиме «Включено» круглосуточно, в автоматическом режиме, кроме коротких (несколько часов) перерывов на проведение динамических операций на МКС.

Информация с тегов принимается антенным блоком «Икарус» обрабатывается компьютером ОВС-1 и оперативно транслируется в Центр управления полётами в Москве (ЦУП-М) по каналу радиосистемы передачи извещений (РСПИ) с последующей передачей на автоматизированное рабочее место (АРМ) «Икарус», расположенное в РКК «Энергия», и в научные организации, где оцениваются миграции животных и их состояние.

В 2022 г. специалисты РКК «Энергия» на АРМ «Икарус» ежедневно проводили декодирование целевой информации (информации с тегов) и формировали две группы целевой информации (информация с российских и с немецких тегов). Далее эта декодированная информация передавалась российским учёным.

Использование возможностей космонавтов при изучении земной поверхности даёт определённые преимущества в процессе про-

ведения исследований. К сожалению, постоянно работать с НА КЭ «Ураган» космонавты не могут, так как им необходимо работать с НА других КЭ и отдыхать. В связи с этим, в рамках КЭ «Ураган» разрабатываются и создаются специальные системы для автоматической ориентации аппаратуры на объекты исследований. Первый экземпляр системы ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА-1-426) был доставлен на борт РС МКС в 2019 г. и успешно используется при выполнении КЭ. СОВА-1-426 устанавливается на иллюминатор 426 мм служебного модуля РС МКС и позволяет проводить как автоматическое наведение различной фото-, видео- и спектральной аппаратуры под управлением бортового ноутбука, так и съёмку по заданной оператором программе. При этом обеспечивается построение оптимальных программ наблюдения исследуемых объектов.

В ходе выполнения КЭ «Ураган» отрабатываются методы контроля и изучаются наводнения, пожары, вулканы, оползни, ледники и другие объекты и явления, накоплен большой банк данных по результатам исследований с РС МКС. Полученные космические снимки, спектральная информация и данные о перемещении животных и птиц широко используются различными организациями, такими как Институт географии РАН, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Института космических исследований РАН и др. При этом получены следующие результаты.

- Материалы космической съёмки были использованы для изучения причин катастрофического схода ледника Колка в 2002 г. Результаты исследований отмечены в серии публикаций и отчётной документации. На сегодняшний день изучаются особенности восстановления ледника, набравшего по данным исследований за 20-летний период около 19 % объёмов тела.
- С 2008 г. ведётся мониторинг Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги для оценки динамики засыхания, рисков возникновения пожаров, изменения конфигурации русла Волги и Ахтубы, Мониторинг протоков канала Бахтемир для оценки возможности судоходства, мониторинг загрязнения Волги и Каспия продуктами нефтепереработки.
- Долгосрочно осуществляется мониторинг Каспийского моря на предмет оценки загрязнения вод продуктами нефтепереработки и потенциально-опасных явлений, приводящих к гибели биоты (массовые заморы рыбы, явления массовой гибели каспийской нерпы).
- На протяжении всего срока проведения КЭ проводится мониторинг пульсации ледника Медвежий на Памире. Пульсации ледников Центрального Памира. Выявлены и проанализированы подвижки 48 ледников в шести речных бассейнах. Акцентировано внимание на тех пульсациях, которые достигнут кульминации в ближайшие годы.
- С 2019 г. ведётся наблюдение за оползневым процессом на реке Дюльтычай в Рутульском р-не Республики Дагестан и сформировавшемся запрудным озером, как потенциально опасным природным объектом.
- Опубликованы результаты многолетнего мониторинга горных ледников Северного и Южного поля Патагонии. Показана многолетняя динамика и установлено феноменальное наступание ледников на протяжении последних 75 лет на фоне глобального сокращения оледенения самого большого глетчера Южной Америки — ледника Брюген.

Таким образом, с помощью научных приборов КЭ «Ураган» к настоящему времени уже получено большое количество ценной информации, на основе которой проводились изучения ледников

(Колка, Медвежий, Бивачный и др.), наводнений, вулканов, возникающих пожаров и т. д. Разработаны специальные методы, позволяющие эффективно планировать и проводить наблюдения с МКС, а также оценивать развитие некоторых потенциально опасных и катастрофических явлений и процессов. Предложенные способы защищены патентами на изобретения.

Доставка на борт РС МКС новых создаваемых приборов («Гиперспектрометр», «Инфракрасный радиометр высокого разрешения» (РИВР)) позволит расширить исследования в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения. Отработанные в КЭ (ЦР) «Ураган» технические средства и методы будут использованы при создании автоматизированных спутниковых систем мониторинга и контроля земной поверхности.

Литература

- Беляев М. Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В. Мониторинг Земли с Международной космической станции // Земля и Вселенная. 2002. С. 16–25.
- Беляев М. Ю., Волков О. Н., Караваев Д. Ю. и др. Изучение катастрофических явлений и природной среды с борта МКС по программе «Ураган» // 6-я Международ. научно-практ. конф. «Пилотируемые полеты в космос». 10–11 нояб. 2005, Звёздный городок, Московская обл. 2005. С. 141.
- Беляев М. Ю., Богатырев В. А., Десинов Л. В., Юрина О. А. (2013а) Использование информации о перемещении животных и птиц в программе «Ураган» на российском сегменте Международной космической станции // Материалы 48-х Науч. Чтений К. Э. Циолковского. Калуга, 2013.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю., Ледостаев В. П. (2013б) Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса // Изв. Рос. акад. наук. Энергетика. 2013. № 4. С. 75–90.
- Беляев М. Ю., Артемьев О. Г., Десинов Л. В. и др. Наблюдение океанских кольцевых волн вблизи острова Дарвин с Международной космической станции // Докл. 49-х Науч. Чтений К. Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Калуга. 2014.
- Беляев М. Ю., Вikelьски М., Лампен М. и др. (2015а) Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на российском сегменте МКС // Косм. техника и технологии. 2015. № 3. С. 38–51.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю. и др. (2015б) Особенности проведения и использования результатов съемки земной поверхности, выполняемой экипажами российского сегмента МКС // Косм. техника и технологии. 2015. № 1(8). С. 17–30.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю. и др. (2015в) Изучение с борта российского сегмента Международной космической станции в рамках программы «Ураган» катастрофических явлений, вызывающих экологические проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1(80). С. 71–79.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю., Юрина О. А. (2015г) Изучение катастрофических явлений и экологических проблем с российского сегмента МКС // Тр. 50-х Чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. 2015. С. 79–87.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Юрина О. А. (2015д) Изучение катастрофических явлений и экологических проблем с российского сегмента Международной космической станции // К. Э. Циолковский и этапы развития космонавтики: Материалы 50-х Науч. Чтений памяти К. Э. Циолковского. 2015. С. 111–112.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Юрина О. А. (2015е) Способ определения скорости движения фронтальной части ледника с космического аппарата. Патент на изобретение № 2568152 от 10.11.2015.

- Беляев М. Ю., Юрина О. А., Караваев Д. Ю., Десинов Л. В.* (2015ж) Изучение динамики развития катастрофических явлений по изменению площади наблюдаемых объектов в эксперименте «Ураган» на РС МКС // Международный научно-практ. конф. «Научные исследования и эксперименты на МКС». 9—11 апр. 2015, Москва, ИКИ РАН. 2015. С. 194.
- Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Юрина О. А.* (2016а) Способ определения момента времени схода наблюдаемого с космического аппарата ледника. Патент на изобретение RU № 2605528 С2. 20.12.2016.
- Беляев М. Ю., Караваев Д. Ю., Юрина О. А.* (2016б) Способ определения координат фотографируемых с космического аппарата земных объектов. Патент на изобретение RU № 2587539 С2, 20.06.2016.
- Беляев М. Ю., Рулев Д. Н., Юрина О. А.* Вариант подхода к планированию наблюдений потенциально опасных ледников на земной поверхности с борта орбитальной станции // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 3(96). С. 107—115.
- Десинов Л. В.* (2003а) Аральская катастрофа — прямая угроза южному Уралу // Биржа интеллектуальной собственности. 2003. Т. 2. № 9. С. 23—27.
- Десинов Л. В.* (2003б) Проблемы окружающей среды бассейна реки Волги. Биржа интеллектуальной собственности. 2003. Т. 2. № 8. С. 23—29.
- Десинов Л. В.* Цунами с орбитальной высоты // Биржа интеллектуальной собственности. 2005. Т. 4. № 2. С. 32—37.
- Десинов Л. В., Десинов С. Л.* Катастрофа в Геналдонской долине. 2003. С. 66—71.
- Десинов Л. В., Коновалов В. Г.* Дистанционный мониторинг многолетнего режима оледенения Памира // Материалы гляциолог. исслед. 2007. № 103. С. 129—133.
- Котляков В. М., Десинов Л. В.* Подвижка ледника Медвежьего в 2011 году // Лёд и снег. 2012. Т. 52. № 1. С. 128—131.
- Юрина О. А.* Использование информации о перемещении животных для изучения катастрофических явлений и экологических проблем с РС МКС // Тр. 48-х Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Серия «Проблемы ракетной и космической техники». Калуга, 17—19 сент. 2013. Казань: Изд-во Казан. ун-та. 2014. С. 193—215.
- Юрина О. А.* Контроль подвижек ледников и оползней в эксперименте «Ураган» на МКС // Материалы 56-х Науч. Чтений, посвящённых разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Калуга, 2021. С. 194—197.
- Юрина О. А., Беляев М. Ю., Десинов Л. В.* Наблюдение и оценка подвижек ледников с Международной космической станции // Тр. 48-х Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Серия «Проблемы ракетной и космической техники». Калуга, 17—19 сент. 2013. Казань: Изд-во Казан. ун-та. 2014. С. 187—192.
- Юрина О. А., Караваев Д. Ю., Беляев М. Ю., Десинов Л. В.* Изучение динамики развития катастрофических явлений по изменению площади наблюдаемых объектов в эксперименте «Ураган» на РС МКС. 2015. С. 17—31.
- Юрина О. А., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н.* (2018а) Способ определения параметров движения наблюдаемого с космического аппарата ледника. Патент № 2643224 (Россия) от 31.01.2018.
- Юрина О. А., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н.* (2018б) Способ контроля движения наблюдаемого с космического аппарата ледника. Патент RU № 650779 от 17.04.2018.
- Юрина О. А., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н.* Способ наблюдения наземных объектов с движущегося по околокруговой орбите космического аппарата. Патент RU № 2629694 от 31.08.2018.
- Юрина О. А., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н.* (2018в) Способ определения положения фронтальной части ледника с находящегося на околокруговой орбите космического аппарата. Патент RU № 2642544 от 25.01.2018.
- Belyaev M. Yu., Dessinov L. V.* Study of the Environment from the ISS in the URAGAN Program // 23rd Intern. Symp. Space Technology and Science. May 26—June 2, 2002, Matsuc, Japan: Abstracts. 2002. P. 74. 2002—n-25.

Belyaev M. Yu., Dessinov L. V. Investigation of the Earth Catastrophes from the International Space Station // 24th Intern. Symp. Space Technology and science. May 30–June 6, 2004, Miyazaki, Japan. 2004. Article ISTS 2004-n-19.

Iurina O., Belyaev M. Yu., Karavaev D. Yu., Desinov L. V. Study of catastrophic phenomena and environmental problems from the Russian segment of the ISS // Proc. 66th Intern. Astronautical Congress. IAC. V. 66. 2015, IAC. 2015. P. 3987–3997.

STUDY OF POTENTIALLY DANGEROUS OBJECTS AND EVENTS IN THE SPACE EXPERIMENT URAGAN ONBOARD THE ISS RS

O. A. Yurina

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev, Russia

Keywords: space experiment Uragan, international space station (ISS), remote sensing

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩЕНИЯ ЭКИПАЖА В КОНТУРЕ БОРТ – ЗЕМЛЯ. КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «КОНТЕНТ»

А. К. Юсупова, Н. С. Суполкина, Д. М. Швед, В. И. Гушин

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: контент-анализ, переговоры экипажа и ЦУП, психоэмоциональное состояние космонавта, копинг-стратегии, коммуникативный стиль общения, интенсивность рабочей нагрузки, мониторинг психоэмоционального состояния

Введение

В настоящее время основной источник психологической информации о человеке на борту станции — переговоры экипажа и Центра управления полётами (ЦУП). В любой форме общения проявляются специфические человеческие эмоции и психические состояния (Ломов, 1981). Традиционно дистанционный контроль и оценка психоэмоционального состояния экипажа базируются на анализе содержания его коммуникаций (контента) с внешними абонентами (Мясников и др., 1986). Стандартный метод оценки выраженности неблагоприятных феноменов у космонавтов в полёте (метод балльных оценок) имеет существенный недостаток: субъективность (опора при вынесении экспертного решения на личный экспертный опыт) (Дистанционное..., 1982; Мясников, Степанова, 2000).

В 2015–2018 гг. коллектив исследователей ИМБП РАН провёл космический эксперимент «Контент», цель которого — применение метода количественного контент-анализа коммуникации человека-оператора с Центром управления для оперативной оценки психологического состояния, а также внутригруппового и межгруппового взаимодействия.

Ранее, в 2002–2011 гг., сотрудники Института медико-биологических проблем РАН (ИМБП) проводили контент-анализ переговоров экипажей с ЦУП в модельной изоляции. (Швед и др., 2013).

Методика исследования

Контент-анализ — систематический, воспроизводимый метод сведения массива текста в ограниченное количество категорий с помощью внешних, заранее заданных и обоснованных правил кодирования (Krippendorff, 2004; Neuendorf, 2019). Единицей анализа коммуникации является высказывание — полностью законченная мысль. Использование контент-анализа текста переговоров позволило решить проблему субъективности эксперта при оценке психологического состояния каждого космонавта на орбите, опора в анализе текста на чёткую систему категорий нивелирует искажающее действие личных установок эксперта, сохраняя при этом важное требование к психологической диагностической методике, проводимой на борту космической станции — неинвазивность.

Теоретическая основа для разработки категорий контент-анализа включала в себя положение Б. Ф. Ломова о трёх функциях человеческого общения: информационно-коммуникативная — происходит передача и приём информации; регуляционно-коммуникативная —

Юсупова Анна Камиловна — ведущий научный сотрудник,
anna_yusupova@mail.ru

Суполкина Наталья Сергеевна — младший научный сотрудник,
natalyasupolkina@yandex.ru

Швед Дмитрий Михайлович — старший научный сотрудник,
d.shved84@gmail.com

Гушин Вадим Игоревич — ведущий научный сотрудник, vgushin.57@mail.ru

осуществляется регуляция поведения людей по отношению друг к другу, попытки оказать влияние на принимающего сообщение; аффективно-коммуникативная — проявляется эмоциональная сфера человека. Другая базовая теоретическая составляющая — теория копинг-стратегий Ф. Лазаруса и С. Фолкман, подразумевающая, что в стрессовой ситуации человек автоматически начинает использовать сформированные в ходе его жизни способы преодоления стресса (копинги), имеющие чёткие речевые корреляты (Lazarus, Folkman, 1984). Подсчёт в речи экипажа содержательных признаков использования копинг-стратегий — способов совладания со стрессом — позволяет проводить мониторинг индивидуального психологического статуса (Гушин, 2003; Швед и др., 2010; Юсупова, 2008; Suedfeld et al., 2015). Выделяют две группы копинг-стратегий: проблемно-ориентированные — направленные либо на разрешение проблемы (плановое разрешение проблем), либо на дистанцирование от стрессора (производился подсчёт категорий контент анализа: *Избегание, Избегание ответственности, Конфронтация*) и эмоционально-ориентированные — направленные на то, чтобы сделать проблему психологически более переносимой (*Самоконтроль, Позитивная переоценка, Принятие ответственности, Поиск поддержки, Дистанцирование* — игнорирование серьёзности проблемы). Также был введён ряд дополнительных категорий анализа, применение которых в анализе переговоров позволило максимально отразить специфику работы на орбите (например, *Проблема, Авария/поломка, Время, Требование/просьба*). Надёжность методики обеспечена статистической значимостью сходимости оценок независимо и дистанционно работающих экспертов (Гушин и др., 2016).

В рамках космического эксперимента «Контент» было проведено несколько исследований изменения структуры общения экипажа и ЦУП в зависимости от степени рабочей нагрузки и личностного стиля космонавта. На основании анализа недельных медицинских заключений группы медицинского обеспечения главной лавной оперативной группой управления (ГМО ГОГУ) (2015–2018) все дни полёта были разделены на две группы: дни со стандартной и с высокой рабочей нагрузкой. На основании экспертной оценки экспериментальная группа космонавтов была разделена на три подгруппы, соответствующие коммуникационным стилям по В. Сатир: «блейминг», «плакатынг», «компьютинг». Автор выделила основные стили общения, которые проявляются наиболее ярко в стрессовой ситуации в замкнутом контуре. Представители стиля «блейминг» стремятся сохранить самооценку посредством выражения несогласия, при этом адресатом выражения их негативных эмоций становится не проблемная ситуация, но человек, вовлечённый в контур общения с «блеймером». «Плакатыеры» стараются избежать конфронтации, ориентируясь в своих действиях на значимых других. Предпочитающие стиль «компьютинг» в стрессовой ситуации собирают максимальное количество информации для принятия рационального и логического решения (Satir, 1972).

Источник данных: содержание открытых, неприватных переговоров экипажей российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) с ЦУП в формате стенограмм (2015–2018). Объём проанализированного материала составляет 164 658 высказываний космонавтов.

Выборка обследуемых: 15 космонавтов в полётах МКС-43/44–54/55, принимавшие участие в КЭ «Контент».

Результаты и обсуждение

1. В дни с высокой рабочей нагрузкой достоверно увеличивался объём общения экипажа и ЦУП. Среднее количество высказываний в переговорах космонавтов значительно возрастало и составило 14,84 в дни со стандартной нагрузкой 6,34 ($p < 0,05$).

Повышение рабочей нагрузки изменяло структуру общения экипажа и ЦУП. В дни с высокой рабочей нагрузкой интенсифицировался обмен данными между космонавтами и ЦУП (функция информирования по Б.Ф. Ломову). Например, возрастала частота высказываний, отражающих наличие у экипажа проблем, содержащих категории: *Поломки/неисправности* ($t = 0,29$), *Проблема* ($t = 1,37$), *Поиски* ($t = 0,68$), *Просьбы* ($t = 1,89$). Увеличивалась частота высказываний в таких категориях как *Планирование* ($t = 1,20$), *Информирование* ($t = 3,94$), а также *Когнитивное* ($t = 1,29$), отражающие проявление адаптивных стратегии решения проблем. Также возрастала доля функции социальной регуляции общения, отражающей конфликтную напряжённость. Количество высказываний в категории *Конфронтация* возрастало шесть раз (в дни со стандартной рабочей нагрузкой $t = 0,13$, в дни с повышенной рабочей нагрузкой $t = 0,59$), в четыре раза чаще звучали в адрес специалистов ЦУПа *Претензии* (в дни со стандартной рабочей нагрузкой $t = 0,35$, в дни с повышенной рабочей нагрузкой $t = 1,24$). Также увеличивалось количество *Самооправданий* — в два раза (в дни со стандартной рабочей нагрузкой $t = 0,05$ в дни с повышенной рабочей нагрузкой $t = 0,11$). Доля аффективной составляющей общения также увеличивалась независимо от модальности в категориях *Отрицательные эмоции* (в дни со стандартной рабочей нагрузкой $t = 0,12$, в дни с повышенной рабочей нагрузкой $t = 0,60$ и *Положительные эмоции* (в дни со стандартной рабочей нагрузкой $t = 0,57$, в дни с повышенной рабочей нагрузкой $t = 0,94$).

Таким образом, можно говорить о признаках психоэмоционального напряжения в речи космонавта, появление которых требует особого стиля общения (увеличение объёма информирования и нарастание конфликтной напряжённости), направленного на снижение степени аффективного напряжения (Гушин и др., 2022).

2. Для разработки рекомендаций по эффективному общению в контуре ЦУП — экипаж были выделены основные коммуникативные стили космонавтов при общении с ЦУП. Экспериментальная группа из 15 человек была разделена на три подгруппы: использующие стиль «компьютинг» (7 человек), чаще использующие стиль «блейминг» (4 человека) и преимущественно использующие стиль «плакатинг» (4 человека).

Было установлено следующее распределение высказываний в рамках разных коммуникативных стилей по категориям контент-анализа в дни регулярной и интенсивной нагрузки:

А. Для обследуемых с доминирующим стилем «блейминг» в дни с интенсивной нагрузкой, вместе с ожидаемым увеличением общего объёма общения (с $t = 1,99$ до $t = 2,74$), рост количества утверждений, которые были отнесены к копинг-стратегиям: *Планирования* (от $t = 0,62$ до $t = 1,21$, $p < 0,05$); *Инициативы* (от $t = 0,73$ до $t = 1,7$, $p < 0,05$); *Конфронтации* (от $t = 0,2$ до $t = 0,79$, $p < 0,05$), *Претензия/жалоба* (от $t = 0,67$ до $t = 1,94$, $p < 0,05$), *Отрицательные эмоции* (от $t = 0,21$ до $t = 0,77$, $p < 0,05$); *Юмор* (от $t = 0,31$ до $t = 0,68$, $p < 0,05$). В стрессовой ситуации космонавты-«блеймеры» занимают активную стеничную позицию, демонстрируют готовность брать на себя ответственность за решение проблемы. Вместе с тем, для снижения степени эмоционального напряжения, космонавты, применяющие этот стиль общения, переносят негативные эмоции с предмета проблемы на человека, с которым они общаются в данный момент («феномен трансфера») (Береговой и др., 1993; Kanas et al., 2008).

Б. У космонавтов, демонстрировавших стиль «плакатинг», повышенная рабочая нагрузка вызвала рост использования копинг-стратегий, направленных на получение дополнительной поддержки от ЦУПа. Отмечался рост высказываний в категориях: *Информирование* (от $t = 2,54$ до $t = 6,69$, $0,05 < p < 0,1$), *Поиск поддержки* (от $t = 0,21$ до $t = 0,78$, $0,05 < p < 0,1$), *Избегание ответственности*

(от $t = 0,27$ до $t = 0,77$, $0,05 < p < 0,1$); *Претензии/жалобы* ($s = 0,13$ до $t = 0,5$, $0,05 < p < 0,1$) (рис.4); *Отрицательные эмоции* (от $t = 0,06$ до $t = 0,57$, $0,05 < p < 0,1$); *Планирование* (от $t = 0,63$ до $t = 1,45$, $0,05 < p < 0,1$); *Инициатива* (от $t = 1,02$ до $t = 2,27$, $0,05 < p < 0,1$); *Положительные эмоции* (от $t = 0,59$ до $t = 1,2$, $0,05 < p < 0,1$). Космонавты-«плакаты» (как правило, это новички) при увеличении рабочей нагрузки занимают относительно пассивную позицию, требуют большей поддержки со стороны ЦУПа, продолжают максимально подробно информировать специалистов Земли о ситуации на борту.

В. У космонавтов с преобладанием стиля общения «компьютинг» при существенном увеличении нагрузки мы также наблюдали повышение частоты высказываний в категориях: *Информирование* (от $t = 1,38$ до $t = 3,08$, $p < 0,05$); *Планирование* (от $t = 0,31$ до $t = 0,62$, $p < 0,05$); *Инициатива* (от $t = 0,62$ до $t = 1,26$, $p < 0,05$); *Претензии/жалобы* (от $t = 0,24$ до $t = 0,94$, $p < 0,05$); *Отрицательные эмоции* (от $t = 0,05$ до $t = 0,32$, $p < 0,05$). Космонавты-«компьютеры» доносят до специалистов «Земли» максимально неискаженную эмоциями информацию.

На основании полученных данных были сформулированы основные принципы, повышающие эффективность общения ЦУП с экипажем: 1) неинвазивность; 2) учёт личностных особенностей коммуникативного поведения при построении разговора; 3) внесение предложений по коррекции рабочей нагрузки космонавта в зависимости от результата оперативной диагностики. Учитывая особенности поведения в рамках каждого коммуникативного стиля, были сформулированы рекомендации по эффективному общению с космонавтами во время ДКП, описаны типы социальной поддержки, в зависимости от степени аффективного напряжения у космонавта (Суполкина и др., 2023).

На основании разработанных в рамках проведения космического эксперимента «Контент» материалов была выпущено методическое пособие, позволяющее осваивать модификацию методики «Контент» широкому кругу специалистов-психологов (Гущин и др., 2023). Рекомендации по эффективному общению включены в разрабатываемое методическое пособие по психологической поддержке экипажей во время космического полёта. В настоящее время проводится подготовка к реализации космического эксперимента «Контент-2», в рамках которого коллектив учёных ИМБП РАН планирует получить более точные данные об особенностях психоэмоционального состояния космонавта во время космического полёта. Данные контент-анализа текста переговоров планируется дополнить данными акустических параметров речи, частоты сердечных сокращений, двигательной активности, качества и продолжительности сна.

Выводы

1. Применение метода контент-анализа переговоров даёт специалистам-психологам возможность получать значимую информацию о психоэмоциональном состоянии космонавта во время полёта.

2. Особенности коммуникации экипажа и ЦУП в условиях длительного космического полёта позволяют оптимизировать методику дистанционного мониторинга психологического состояния экипажа на орбите, а также улучшить качество общения экипажа и ЦУП.

Литература

- Береговой Г. Т., Богдашевский Р. Б., Григоренко В. Н. и др. Космическая академия. М.: Машиностроение, 1993. 219 с.
- Гущин В. И. Проблемы дистанционного общения изолированных малых групп // Физиология человека. 2003. Т. 29. № 5. С. 39–46.

- Гуцин В. И., Юсупова А. К., Швед Д. М. и др. Методологические подходы к контент-анализу общения космического экипажа // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2016. Т. 50. № 3. С. 55–64.
- Гуцин В. И., Суполкина Н. С., Швед Д. М. и др. Применение контент-анализа для исследования общения космонавтов со специалистами ЦУП при различном уровне полетной нагрузки // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2022. Т. 56. № 3.
- Гуцин В. И., Швед Д. М., Юсупова А. К. и др. Методология и методика анализа коммуникации космических экипажей с Землей: учеб. пособие. М.: ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2023. 47 с.
- Дистанционное наблюдение и экспертная оценка: общение и коммуникация в задачах медицинского контроля / ред. П. В. Симонов, В. И. Мясников. М.: Наука, 1982. 109 с.
- Ломов Б. Ф. Проблема общения в психологии. М.: Наука, 1981. 279 с.
- Мясников В. И., Степанова С. И. Проблема психической астенизации в космическом полете. М.: Слово, 2000. 224 с.
- Мясников В. И., Усков Ф. Н., Козеренко О. П., Макаров В. И. Психологическая надежность космонавтов // *Результаты мед. исслед. на орбитальном научно-исследовательском комплексе «Салют-6» – «Союз»*. М.: Наука, 1986. С. 185–202.
- Суполкина Н. С., Швед Д. М., Юсупова А. К. и др. Основные феномены общения космонавтов в коммуникативной системе «экипаж – Центр управления полетами» и необходимость ее модификации // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2023. Т. 57. № 4. С. 20–25.
- Швед Д. М., Гуцин В. И., Эман Б., Балаж Л. Особенности коммуникации между экипажем и Центром управления под влиянием задержки связи и других факторов в 520-суточном модельном эксперименте // *Авиакосм. и эколог. медицина*. 2013. Т. 47. № 3. С. 19–23.
- Швед Д. М., Гуцин В. И., Виноходова А. Г. и др. Новый метод дистанционной оценки психофизиологического состояния контингента // *Технологии живых систем*. 2010. № 2. С. 25–31.
- Юсупова А. К. Индивидуальные стили общения личности в условиях долговременной изоляции: дис. ... канд. психолог. наук. М., 2008. 162 с.
- Kanas N., Gushin V., Yusupova A. Problems and possibilities of astronauts — Ground communication content analysis validity check // *Acta Astronautica*. 2008. V. 63. P. 822–827.
- Krippendorff K. Reliability in content analysis: Some common misconceptions and recommendations // *Human Communication Research*. 2004. V. 30. No. 3. P. 411–433.
- Lazarus R. S., Folkman S. Stress, appraisal and coping. N. Y.: Springer, 1984. 436 p.
- Neuendorf K. A. Content analysis and thematic analysis // *Advanced Research Methods for Applied Psychology* / ed. P. Brough. Routledge, 2019. P. 211–223.
- Satir V. *Peoplemaking*. Palo Alto: Science and behavior books. 1972. 304 p.
- Suedfeld P., Brcic J., Johnson P., Gushin V. Coping strategies during and after spaceflight: Data from retired cosmonauts // *Acta Astronautica*. 2015. V. 110. P. 43–49.

STUDY OF CREW COMMUNICATION IN THE ON-BOARD-EARTH CIRCUIT. SPACE EXPERIMENT “CONTENT”

A. K. Yusupova, N. S. Supolkina, D. M. Shved, V. I. Gushin
Institute of Medical and Biological Problems RAS, Moscow, Russia

Keywords: content analysis, negotiations between the crew and the control center, the psycho-emotional state of the astronaut, coping strategies, communicative style, workload intensity, psycho-emotional state monitoring

ПРОЕКТ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СИСТЕМЕ ОРБИТАЛЬНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

С. В. Янчур¹, И. Ю. Даляев², А. В. Дрондин¹, В. М. Копылов²,
В. В. Кошляков¹, А. В. Лопота², С. Г. Ребров¹

¹ Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, Москва, Россия

² ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: солнечная батарея, робототехническая сборка, космический эксперимент, фотоэлектрический модуль, фитинги, МКС, Российская орбитальная станция, крупногабаритные орбитальные конструкции, шагающий робот

Рассматриваются материалы по научно-техническому обоснованию и постановке космического эксперимента на пилотируемом космическом комплексе по отработке роботизированной сборки на орбите модульной конструкции солнечной батареи. Для сборки используется автономный робот-сборщик, способный перемещаться по собираемой конструкции и выстраивать её в пространстве. Конструкция солнечной батареи модульная, снабжённая такелажными элементами, сборно-разборными силовыми элементами — фитингами и коммутационными элементами. Робот-сборщик способен заряжаться от собираемых модулей солнечной батареи, что позволяет формировать протяжённые конструкции.

Реализация космического эксперимента планируется в два этапа. На первом этапе, который запланирован на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС), проводится отработка технологии сборки орбитальных конструкций, адаптированных для робототехнических средств, в виде фотоэлектрических модулей (ФМ) солнечных батарей; исследование стойкости элементов ФМ к факторам космического пространства (ФКП). На втором этапе, который планируется на будущей Российской орбитальной станции (РОС) с использованием штатного шагающего робота, будет проведена отработка технологии роботизированной сборки крупногабаритных орбитальных конструкций, в частности солнечных батарей, с обеспечением автономного питания за счёт энергии, вырабатываемой самой собираемой конструкцией.

Янчур Сергей Викторович — начальник группы бортовой энергетики, yanchur@kerc.msk.ru

Даляев Игорь Юрьевич — заместитель главного конструктора, кандидат технических наук, igor@rtc.ru

Дрондин Алексей Викторович — ведущий инженер, drondin@kerc.msk.ru

Копылов Владислав Маркович — начальник сектора, v.kopylov@rtc.ru

Кошляков Владимир Владимирович — генеральный директор, доктор технических наук, kerc@elnet.msk.ru

Лопота Александр Витальевич — директор, главный конструктор, доктор технических наук, alopota@rtc.ru

Ребров Сергей Григорьевич — начальник отдела, доктор технических наук, rebrov@kerc.msk.ru

PROJECT OF A SPACE EXPERIMENT USE AN ORBITAL ROBOTIC SOLAR ARRAY ASSEMBLY SYSTEM

**S. V. Yanchur¹, I. U. Dalyaev², A. V. Drondin¹, V. M. Kopylov², V. V. Koshlakov¹,
A. V. Lopota², S. G. Rebrov¹**

¹ Keldysh Research Center, Moscow, Russia

² Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics,
Saint Petersburg, Russia

Keywords: solar array, robotic assembly, space experiment, photovoltaic module, fittings, ISS, russian orbital station, large-sized orbital structures, walking robot

СОДЕРЖАНИЕ

Алифанов О. М., Оделевский В. К., Фирсюк С. О. О научной и практической значимости экспериментов и исследований, проводимых на борту РС МКС по направлению секции № 8 «Космическое образование» КНТС ГК «Роскосмос».....	19
Алифанов О. М. Образовательный и популяризационный потенциал пилотируемой космонавтики	33
Алямовский С. Н. Эксперименты на МКС по запуску спутников сферической формы.....	38
Андреевский С. Е., Кузнецов В. Д. Космический эксперимент «Сейсмопрогноз»: результаты исследования локальных и глобальных вариаций электронной концентрации.....	41
Белаковский М. С., Куссмауль А. Р., Сахарова А. Б. Практическое использование результатов медико-биологических исследований, проведённых на российском сегменте Международной космической станции	45
Беляев М. Ю. Изучение возможностей выполнения научных исследований в технических экспериментах на МКС и перспективы научного применения орбитальных станций.....	49
Беляев М. Ю. Отработка научной аппаратуры и технологий изучения Земли в эксперименте «Ураган» на МКС.....	53
Блошенко А. В. Целевые работы на пилотируемых космических комплексах: состояние и перспективы	62
Бронников С. В., Рожков А. С., Лепорский А. Н., Караваев Д. Ю. Применение систем позиционирования для поддержки деятельности экипажа МКС	64
Бычков В. Б., Беляев В. С., Шорин В. Н. Акустико-эмиссионная диагностика состояния гермокорпуса обитаемых модулей орбитальной станции: возможности и перспективы	70
Бычков В. Б., Кузнецов Г. Н., Смагин Д. А. Результаты исследования шумов в рамках космического эксперимента «Бар» и методы их снижения	75
Васильев М. М., Дьячков Л. Г., Лисин Е. А., Савин С. Ф., Чурило И. В., Петров О. Ф. Дисперсные активные системы: результаты и перспективы космических исследований	80
Васильева Г. Ю. Гомеостатическая регуляция физиологических функций организма: от научной идеи к стратегии сохранения и укрепления здоровья космонавтов	83
Волков О. Н. Образовательный эксперимент «Великое начало» на РС МКС.....	87
Волков О. Н., Монахов М. И., Беляев М. Ю. Изучение смещений элементов конструкции МКС в КЭ «Среда-МКС»	91
Долганов П. В. Жидкие кристаллы. Эксперимент OASIS.....	93
Евдокимов Р. А., Мацак И. С., Тугаенко В. Ю. Отработка технологии дистанционного энергоснабжения лазерным излучением в космосе на борту РС МКС.....	97
Есаков А. М. Планирование и проведение исследований КЭ «Сценарий»	102
Залетова И. А., Ситников Н. Н., Ризаханов Р. Н., Юрченко И. И., Лукьянова О. А. Слоистые самозалечивающиеся материалы с внутренним вязкотекучим наполнителем для космической техники.....	105
Зеленый Л. М., Зарубин Д. С. Использование ПКК для проведения научных исследований	111

Ильин В. К., Поддубко С. В., Харин С. А., Морозова Ю. А. Микробиологические эксперименты на МКС	113
Исиков Н. Е., Ананьевский И. М., Беляев М. Ю., Болотник Н. Н., Волков О. Н., Якуш С. Е. Изучение движения космонавтов в КЭ «Таймер» на МКС	117
Казинский Н. В. Опыт проведения научных экспериментов на российском сегменте Международной космической станции (на примере эксперимента «Магнитная фабрикация»).....	121
Климов С. И., Зеленый Л. М., Петрукович А. А., Ангаров В. Н., Вайсберг О. Л., Веселов М. В., Садовский А. М., Скальский А. А., Грушин В. А., Новиков Д. И., Осадчая Л. А., Эйсмонт Н. А., Летуновский В. В., Костров А. В., Лихтенбергер Я., Надь Я. Опыт и перспективы реализации научно-исследовательских микроспутников в инфраструктуре орбитальных станций.....	127
Климов П. А., Белов А. А., Шаракин С. А., Зотов М. Ю. «УФ атмосфера» (Mini-EUSO) — мониторинг излучения атмосферы с высоким временным разрешением. Результаты работы за четыре года на борту МКС.....	132
Крикалёв С. К. Задачи Российской программы пилотируемых космических полётов....	136
Корянов В. В., Ваюта М. Н., Кухаренко А. С. Баллистический анализ траекторий спуска малого спускаемого аппарата для доставки научных грузов с МКС.....	138
Кузнецов Г. Н., Смагин Д. А. Методы, технические средства и результаты активного гашения широкополосного шума в авиационных кабинах	143
Кузьмин А. В., Батырев Ю. П. Исследования лесов в космическом эксперименте «Дубрава» на российском сегменте Международной космической станции.....	149
Кузьмин А. В., Кузьмичев А. С. Планируемые исследования с научной аппаратурой «Гиперспектрометр» космического эксперимента «Ураган» на российском сегменте Международной космической станции.....	154
Кукоба Т. Б., Киреев К. С., Харламов М. М. Динамика восстановления скорости-силовых качеств мышц космонавтов после космического полёта на разных этапах реабилитации	159
Ларина И. М., Кононихин А. С., Бржозовский А. Г., Каширина Д. Н., Пастушкова Л. Х., Смирнов Ю. И., Николаев Е. Н. Таргетный протеомный анализ образцов крови космонавтов, собранных во время длительных космических полётов.....	164
Литвак М. Л., Митрофанов И. Г., Головин Д. В., Мокроусов М. И., Пеков А. Н. Эксперимент «БТН-Нейтрон»: наблюдение за нейтронной компонентой радиационного фона в окрестности МКС	168
Лупян Е. А., Саворский В. П. Исследования по направлению «Исследования Земли из космоса» на РС МКС.....	174
Махмутов В. С., Филиппов М. В., Квашнин А. А., Максумов О. С., Разумейко М. В., Мизин С. В., Соков С. В., Криволапова О. Ю., Гайфутдинова А. Г. Космический эксперимент «Солнце – Терагерц».....	178
Мокроусов М. И., Митрофанов И. Г., Аникин А. А., Головин Д. В., Карпушкина Н. Е., Козырев А. С., Литвак М. Л., Пеков А. Н., Сарин А. Б., Третьяков В. И. Второй этап космического эксперимента «БТН-Нейтрон» на борту российского сегмента Международной космической станции: аппаратура БТН-М2	183
Монахов М. И., Матвеева Т. В., Аюкаева Д. М., Беляев М. Ю. Результаты выполнения космического эксперимента «Изгиб»	187
Никифоров А. И., Блинов В. В., Д. Н. Придачин, О. П. Пчеляков, Соколов Л. В., Фрицлер К. Б., Владимиров В. М., Кулинич С. Н., Древин К. А., Кулик С. В. Оборудование для выращивания полупроводниковых структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии в открытом космосе	190
Орлов О. И., Котов О. В., Смирнов Ю. И. Медико-биологические эксперименты на борту российского сегмента МКС и перспективной РОС	194

Петров С. В., Кудан Е. В., Левин А. А., Миронов В. А., Хесуани Ю. Д. Развитие технологий биопринтинга в космосе (Космический эксперимент «Магнитный 3D-биопринтер»).....	197
Петров О. Ф., Зобнин А. В., Липаев А. М., Наумкин В. Н., Усачев А. Д., Тома М. Х., Кречмер М. Космический эксперимент на российско-европейской научной аппаратуре «Плазменный кристалл-4» на борту МКС — цели, аппаратурная реализация и основные результаты.....	200
Полуаршинов М. А., Смирнов Ю. В., Беляев А. Н., Николайшвили С. Ш., Омельченко А. Н., Страхов А. В. Наблюдения с МКС аэрозольного слоя на высотах от 80 до 100 км.....	208
Постол Г. А., Заживихин И. М. Экспериментальная отработка высокопотенциальных широкополосных многофункциональных АФАР космического базирования.....	215
Рассказов И. В., Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Караваев Д. Ю. Использование платформ при наведении научной аппаратуры на наблюдаемые объекты с борта МКС.....	219
Рачкин Д. А., Майорова В. И., Тененбаум С. М., Мельникова В. Г. Образовательный космический эксперимент «Парус-МГТУ» предварительные результаты.....	223
Рулев Д. Н. Отработка технологии учёта уходящего от Земли излучения при моделировании прихода электроэнергии от солнечных батарей орбитального космического аппарата в космическом эксперименте «Альбедо».....	230
Рулев Д. Н., Ашманов С. И. Разработка виртуального ассистента космонавта. Космический эксперимент «Ассистент».....	235
Русанов В. Б., Луцицкая Е. С., Черникова А. Г., Фунтова И. И. Исследование механизмов регуляции и функционального состояния сердечно-сосудистой системы в космическом полёте.....	239
Рюмин О. О., Бубеев Ю. А., Поляниченко А. А., Суполкина Н. С. Психофизиологическое сопровождение экипажей длительных пилотируемых экспедиций на МКС.....	243
Садовский А. М. Сферы – Zero Robotics. Опыт проведения и результаты.....	248
Сафронов А. А. Космические эксперименты с моделями капельных холодильников-излучателей.....	252
Селезнев Д. А. Научная аппаратура радиотехнического мониторинга «Напор-РТМ»....	255
Семена Н. П. Космический эксперимент «Монитор всего неба».....	257
Сигалева Е. Э., Котов О. В., Поляков А. В., Мацнев Э. И., Ковачевич И. В., Ниязов А. Р. Особенности диагностики и лечения заболеваний ЛОР-органов у космонавтов МКС в условиях продолжительных космических полётов.....	262
Смирнов Ю. И., Ярманова Е. Н., Седлецкий В. С. Разработка научной аппаратуры для проведения медико-биологических исследований на борту РС МКС.....	265
Смоленцева Л. А., Беляев М. Ю. Задачи научно-технической поддержки экспериментов ПАО РКК «Энергия» с помощью наземного сегмента планирования и экспресс-анализа результатов исследований.....	268
Соловьёв В. А. Стратегия развития пилотируемых космических средств и Российская орбитальная станция.....	273
Сычев В. Н., Алексеев В. Р., Гурьева Т. С., Гусев О. А., Ларина О. Н., Левинских М. А., Поддубко С. В., Подольский И. Г. Биологические исследования на российском сегменте Международной космической станции.....	276

Тимофеев В. И., Самыгина В. Р., Бойко К. М., Куранова И. П., Ковальчук М. В. Исследование структуры белков в условиях микрогравитации	282
Титенко Е. А., Самбуров С. Н., Шиленков Е. А., Добросердов Д. Г., Зарубин Д. М., Оделевский В. К., Артемьев О. Г. Космический эксперимент «О Гагарине из космоса»: исторический опыт и перспективы	285
Титенко Е. А., Самбуров С. Н., Шиленков Е. А., Фролов С. Н., Бродский А. Н., Щитов И. Э. Применение малых космических аппаратов для поддержки космических экспериментов «Радиоскаф» с борта МКС	289
Томиловская Е. С., Шигуева Т. А., Рукавишников И. В., Савеко А. А., Шишкин Н. В., Бекренева М. П., Лысова Н. Ю., Наумов И. А., Китов В. В. Изучение влияния факторов космического полёта на сенсомоторную систему.	293
Тугаенко В. Ю., Грибков А. С., Кацаба А. В. Исследование плазменного слоя вокруг спускаемого аппарата космического корабля «Союз» при прохождении атмосферы Земли	299
Фомина Е. В., Сенаторова Н. А., Иванов Д. С., Кокуева М. А., Буракова А. А., Бахтерева В. Д. От силы тяжести к невесомости и обратно — современная концепция профилактики гипогравитационных нарушений	304
Харламов М. М. Задачи отбора и подготовки космонавтов при реализации стратегии пилотируемой космонавтики	311
Шаповалов А. В., Щеглов Г. А., Георгиев А. Ф., Дарьин Я. В., Казаку И. А., Макаренков Д. А., Никулин Д. С., Верзилин С. С. Малый буксир для РОПроектный облик С.	316
Шубралова Е. В., Беляев В. С., Василяк Л. М., Дешева Е. А., Печеркин В. Я., Цыганков О. С. Новый взгляд на околоземное пространство	320
Шуршаков В. А., Иванова О. А., Иноземцев К. О., Карташов Д. А., Карцев И. С., Дробышев С. Г., Толочек Р. В. Исследование распределения дозовых нагрузок в отсеках МКС и в теле космонавта.	326
Юрина О. А. Изучение потенциально опасных объектов и явлений в КЭ «Ураган» на РС МКС	331
Юсупова А. К., Суполкина Н. С., Швед Д. М., Гуцин В. И. Исследование общения экипажа в контуре борт – земля. Космический эксперимент «Контент»	338
Янчур С. В., Далаев И. Ю., Дрондин А. В., Копылов В. М., Кошлаков В. В., Лопота А. В., Ребров С. Г. Проект космического эксперимента по системе орбитальной роботизированной сборки солнечных батарей	343