

**ПИЛОТИРУЕМЫЕ ПОЛЕТЫ В КОСМОС**  
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 1(30)/2019

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ**

**Власов П.Н.,**  
Герой Российской Федерации,  
заслуженный летчик-испытатель Российской Федерации

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

**Климук П.И.,**  
дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт СССР,  
докт. техн. наук, профессор

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

<b>Курицын А.А.,</b>	заместитель главного редактора, докт. техн. наук, доцент
<b>Крючков Б.И.,</b>	научный редактор, докт. техн. наук
<b>Алифанов О.М.,</b>	докт. техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН
<b>Бармин И.В.,</b>	докт. техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН
<b>Батурин Ю.М.,</b>	Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации, докт. юридических наук, профессор, член-корреспондент РАН
<b>Бубеев Ю.А.,</b>	докт. мед. наук, профессор
<b>Бурдаев М.Н.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Жуков В.М.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Зубов Н.Е.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Микрин Е.А.,</b>	докт. техн. наук, профессор, академик РАН
<b>Наумов Б.А.,</b>	докт. техн. наук, доцент
<b>Орлов О.И.,</b>	докт. мед. наук, академик РАН
<b>Соколов В.П.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Соловьев В.А.,</b>	дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт СССР, докт. техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН
<b>Сохин И.Г.,</b>	докт. техн. наук, доцент
<b>Усов В.М.,</b>	докт. мед. наук, профессор
<b>Шукшунов В.Е.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Ярополов В.И.,</b>	докт. техн. наук, профессор

**РЕДАКЦИОННО-ЭКСПЕРТНАЯ ГРУППА:**

<b>Харламов М.М.,</b>	руководитель редакционно-экспертной группы
<b>Бондарева Е.Н.,</b>	технический редактор
<b>Васильева Л.К.,</b>	выпускающий редактор
<b>Волкова Н.В.,</b>	координатор
<b>Гордиенко О.С.,</b>	ответственный за информационное обеспечение
<b>Дмитриев В.Н.,</b>	канд. воен. наук
<b>Долгов П.П.,</b>	канд. техн. наук
<b>Игнатьев С.В.,</b>	канд. техн. наук, доцент
<b>Кальмин А.В.,</b>	ответственный секретарь
<b>Каспранский Р.Р.,</b>	канд. мед. наук
<b>Орешкин Г.Д.,</b>	канд. техн. наук, доцент
<b>Саев В.Н.,</b>	докт. техн. наук, доцент
<b>Титова М.Л.,</b>	ответственный за распространение журнала
<b>Токарева С.Г.,</b>	редактор
<b>Тюрин М.В.,</b>	Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации

**MANNED SPACEFLIGHT**  
**SCIENTIFIC JOURNAL** **No 1(30)/2019**

**CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD**

**Vlasov P.N.,**  
Hero of the Russian Federation,  
Honored Test Pilot of the Russian Federation

**EDITOR IN CHIEF**

**Klimuk P.I.,**  
Twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut of the USSR,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**EDITORIAL BOARD:**

<b>Kuritsyn A.A.,</b>	<b>Deputy Editor-in-Chief,</b> DScTech, Associate Professor
<b>Kryuchkov B.I.,</b>	<b>Science Editor,</b> Doctor of Technical Sciences
<b>Alifanov O.M.,</b>	DScTech, Professor, Corresponding Member of the RAS
<b>Barmin I.V.,</b>	Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of RAS
<b>Baturin Yu.M.,</b>	Hero of the Russian Federation, pilot-cosmonaut of the Russian Federation, Doctor in Law, Professor, Corresponding Member of the RAS
<b>Bubeev Yu.A.,</b>	M.D., Professor
<b>Burdaev M.N.,</b>	DScTech, Professor
<b>Zhukov V.M.,</b>	DScTech, Professor
<b>Zubov N.E.,</b>	DScTech, Professor
<b>Mikrin E.A.,</b>	DScTech, Professor, Academician of the RAS
<b>Naumov B.A.,</b>	DScTech, Associate Professor
<b>Orlov O.I.,</b>	M.D., Academician of the RAS
<b>Sokolov V.P.,</b>	DScTech, Professor
<b>Solovyov V.A.,</b>	twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut of the USSR, DScTech, Professor, Corresponding Member of the RAS
<b>Sokhin I.G.,</b>	DScTech, Associate Professor
<b>Usov V.M.,</b>	M.D., Professor
<b>Shukshunov V.E.,</b>	DScTech, Professor
<b>Yaropolov V.I.,</b>	DScTech, Professor

**EDITORIAL-EXPERT GROUP:**

<b>Kharlamov M.M.,</b>	<b>Head of the Editorial-Expert Group</b>
<b>Bondareva E.N.,</b>	Technical editor
<b>Vasilieva L.K.,</b>	Executive editor
<b>Volkova N.V.,</b>	Coordinator
<b>Gordienko O.S.,</b>	Information support officer
<b>Dmitriev V.N.,</b>	Candidate of Military Sciences
<b>Dolgov P.P.,</b>	Candidate of Technical Sciences
<b>Ignatiev S.V.,</b>	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
<b>Kalmin A.V.,</b>	Executive secretary
<b>Kaspranskiy R.R.,</b>	PhD of Medical Science
<b>Oreshkin G.D.,</b>	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
<b>Saev V.N.,</b>	DScTech, Associate Professor
<b>Titova M.L.,</b>	Distributor
<b>Tokareva S.G.,</b>	Editor
<b>Tyurin M.V.,</b>	Hero of the Russian Federation, pilot-cosmonaut of the Russian Federation

## СОДЕРЖАНИЕ

ИТОГИ ПОЛЕТОВ ЭКИПАЖЕЙ МКС .....	5
Основные задачи подготовки и результаты деятельности экипажа МКС-55/56 при выполнении программы космического полета. <i>О.Г. Артемьев</i> .....	5
Медицинские аспекты обеспечения безопасности полета экипажа МКС-55/56 (экспресс-анализ). <i>В.В. Богомолов, В.И. Почуев,     И.В. Алферова, Е.Г. Хорошева, В.В. Криволапов</i> .....	18
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС .....	32
Основные результаты конкурсного отбора кандидатов в космонавты в 2017–2018 гг. <i>П.Н. Власов, Ю.И. Маленченко, Б.И. Крючков,     А.А. Курицын, М.М. Харламов, В.И. Почуев, В.Г. Корзун,     В.П. Матвеев, Р.Р. Каспранский, Л.В. Войтулевич, А.В. Васин,     В.М. Усов, В.Ю. Самарцев, А.С. Кондратьев, А.И. Крылов,     В.Г. Назин, Е.В. Андреев, А.Д. Беляева</i> .....	32
Динамическая имитационная модель визуально-инструментального наблюдения космонавтом-оператором точечной цели на пролете. <i>В.М. Жуков</i> .....	45
Проблемы адекватности модельной гипогравитации Луны и Марса. <i>В.А. Акулов, В.Л. Балакин</i> .....	62
Современные подходы к оценке влияния искусственной световой среды на функциональное состояние человека-оператора в условиях гермокамерных испытаний. <i>А.Е. Смолевский,     О.М. Манько, Ю.А. Бубеев</i> .....	80
Снижение последствий влияния мутагенных факторов на организм человека в условиях длительного космического полета. <i>Е.В. Попова, И.В. Кутник, А.И. Кобатов, Н.Б. Вербицкая,     О.В. Добролеж</i> .....	96
Перспективы применения и особенности эксплуатации надувных трансформируемых модулей в составе пилотируемых космических комплексов. <i>Б.И. Крючков, Ю.Б. Сосюрка, Б.В. Бурдин</i> .....	114

## CONTENTS

RESULTS OF THE ISS CREW MISSIONS.....	5
Main Tasks of Training and Results of Activity of the ISS Crew for Expedition 55/56 When Carrying out the Mission Plan. <i>O.G. Artemiev</i> .....	5
Medical Aspects of Ensuring Safety of the Flight of the ISS Crew for Expedition 55/56 (Express Analysis). <i>V.V. Bogomolov,</i> <i>V.I. Pochuev, I.V. Alferova, E.G. Khorosheva, V.V. Krivolapov</i> .....	18
THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS .....	32
Main Results of the Competitive Selection of Cosmonaut Candidates in 2017–2018. <i>P.N. Vlasov, Yu.I. Malenchenko, B.I. Kryuchkov,</i> <i>A.A. Kuritsyn, M.M. Kharlamov, V.I. Pochuev, B.G. Korzun,</i> <i>V.P. Matveev, R.R. Kaspransky, L.V. Voytulevich, A.V. Vasin,</i> <i>V.M. Usov, V.Yu. Samartsev, A.S. Kondratiev, A.I. Krylov,</i> <i>V.G. Nazin, Ye.V. Andreev, A.D. Belyaeva</i> .....	32
Dynamic Simulation Model of Visual and Instrumental Observation of a Point Target by a Cosmonaut-Operator While Flying-By. <i>V.M. Zhukov</i> .....	45
Problems of Adequacy of the Model Hypo Gravity of the Moon and Mars. <i>V.A. Akulov, V.L. Balakin</i> .....	62
Modern Approaches to the Assessment of the Effect of Artificial Light Environment on the Functional Status of a Human Operator in Tests Inside a Pressurized Chamber. <i>A.E. Smoleevskiy,</i> <i>O.M. Manko, Yu.A. Bubeev</i> .....	80
Decrease of Negative Effects of Mutagenic Factors on a Human Body Under Conditions of a Long-Term Space Flight. <i>E.V. Popova,</i> <i>I.V. Kutnik, A.I. Kobatov, N.B. Verbitskaya, O.V. Dobrolezh</i> .....	96
Prospects and Features of the Use of Inflatable Transformable Modules of Manned Space Complexes. <i>B.I. Kryuchkov, Yu.B. Sosyurka,</i> <i>B.V. Burdin</i> .....	114

# ИТОГИ ПОЛЕТОВ ЭКИПАЖЕЙ МКС

## RESULTS OF THE ISS CREW MISSIONS

УДК 629.78.007

### ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДГОТОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА МКС-55/56 ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРОГРАММЫ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

О.Г. Артемьев

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ О.Г. Артемьев  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье представлены состав экипажа МКС-55/56, основные задачи подготовки, деятельность экипажа на борту транспортного пилотируемого корабля (ТПК) «Союз МС-08» и Международной космической станции (МКС). Отдельно выделены работы по внекорабельной деятельности (ВКД) по программам российского (РС) и американского сегментов (АС) МКС, а также выполнению научно-прикладных исследований и экспериментов (НПИ).

**Ключевые слова:** подготовка экипажа, космический полет, транспортный пилотируемый корабль, Международная космическая станция, внекорабельная деятельность, научная программа.

#### **Main Tasks of Training and Results of Activity of the ISS Crew for Expedition 55/56 When Carrying out the Mission Plan.**

**O.G. Artemiev**

The paper presents the members of the ISS-55/56 crew, main training tasks, crew's activity aboard the Soyuz MS-08 spacecraft and the ISS. It also highlights the performance of EVA under the programs of the Russian and American Segments as well as the performance of scientific-applied research and experiments.

**Keywords:** crew training, spaceflight, manned transport vehicle, International Space Station, extravehicular activity, scientific program.

#### **Состав экипажа**

Основной экипаж длительной экспедиции МКС-55/56 (рис. 1) в составе:

Артемьев Олег Германович	командир ТПК «Союз МС-08», бортинженер МКС-55/56 (Роскосмос, Россия)
Фойстел Эндрю Джей	бортинженер-1 ТПК «Союз МС-08», бортинженер МКС-55, командир МКС-56 (НАСА, США)
Арнольд Ричард	бортинженер-2 ТПК «Союз МС-08», бортинженер МКС-55/56 (НАСА, США)

выполнил космический полет длительностью 196 суток 18 часов с 21 марта 2018 года по 4 октября 2018 года. Позывной экипажа – «Гавайи».



Артемяев  
Олег Германович

Фойстел Эндрю Джей

Арнольд Ричард

Рис. 1. Экипаж ТПК «Союз МС-08»

Артемяев Олег Германович – космонавт Роскосмоса, Герой Российской Федерации. До назначения в экипаж совершил один космический полет с 26 марта по 11 сентября 2014 года в качестве бортиженера ТПК «Союз ТМА-12М» МКС-39/40. В полете выполнил два выхода в открытый космос, общая продолжительность которых составила 12 часов 33 минуты. Общая продолжительность полета – 169 суток 5 часов 05 минут.

Фойстел Эндрю Джей – астронавт НАСА, в мае 2009 года совершил первый космический полет в составе экипажа шаттла «Атлантис» STS-125, в полете выполнил три выхода в открытый космос. Второй полет совершил на «Индеворе» STS-134 с 16 мая по 1 июня 2011 года. Общая продолжительность двух полетов составила 28 суток 15 часов.

Ричард Арнольд – астронавт НАСА (США), в мае 2004 года прошел отбор в НАСА. Совершил полет с 15 по 28 марта 2009 года по программе STS-119 на борту «Дискавери». Во время полета выполнил два выхода в открытый космос общей продолжительностью 12 часов 34 минуты.

### **Программа полета экипажа МКС-55/56**

Программа полета экипажа МКС-55/56 предусматривала:

1. Полет на ТПК «Союз МС-08», который включал в себя:
  - выведение, маневры, сближение и стыковку к малому исследовательскому модулю МИМ2;

– расстыковку от МИМ2 и возвращение на Землю спускаемого аппарата (СА).

2. Ремонтно-восстановительные работы и работы по материально-техническому обслуживанию и дооснащению бортовых систем и оборудования РС МКС.

3. Выполнение НИИ в соответствии с «Программой реализации научно-прикладных исследований, планируемых в период пятьдесят пятой и пятьдесят шестой пилотируемых экспедиций МКС-55 и МКС-56».

4. «Выходы» в открытый космос.

5. Работы с транспортными грузовыми кораблями (ТГК) «Прогресс МС-07, -08 и -09».

6. Стыковку и расстыковку трех американских и стыковку одного японского грузовых кораблей.

7. Проведение ТВ-репортажей, фото- и видеосъемок.

### **Основные задачи подготовки экипажа к космическому полету**

Программа подготовки была разработана с учетом требований к технической подготовке экипажей, полученных из РКК «Энергия», уровня подготовленности и функциональных обязанностей членов экипажа, а также по результатам предыдущих этапов подготовки.

Подготовка экипажа МКС-55/56 проводилась с сентября 2016 года поочередными тренировочными сессиями: в России – по РС МКС, ТПК и ТГК; на базах международных партнеров – по другим модулям МКС.

Большая часть времени была уделена технической подготовке по ТПК «Союз МС-08» и РС МКС.

Основными задачами подготовки являлись:

– формирование у членов экипажа знаний и умений, необходимых для выполнения ими функциональных обязанностей в составе экипажа ТПК «Союз МС-08»;

– отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа при управлении бортовыми системами и оборудованием ТПК на всех этапах полета в штатных и нештатных ситуациях (НШС);

– отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа при выполнении сближения, причаливания, стыковки и перестыковки ТПК «Союз МС-08» на все стыковочные узлы РС МКС;

– отработка навыков выполнения ручного управляемого спуска;

– отработка навыков построения ручной ориентации в аналоговом контуре (РО АК);

– отработка навыков построения ручной ориентации в дискретном контуре (РО ДК);

– отработка навыков построения солнечной ориентации и закрутки ТПК в режимах РО АК и РО ДК;

- отработка действий членов экипажа в аварийных ситуациях: пожар, разгерметизация, токсичность атмосферы;
- отработка действий по выполнению срочного спуска с орбиты в случае покидания МКС;
- отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа при выполнении расстыковки ТПК с неориентированной и нестабилизированной МКС;
- отработка навыков и умений по выполнению причаливания, стыковки и расстыковки ТГК «Прогресс МС» на стыковочные узлы РС МКС в телеоператорном режиме управления (ТОРУ);
- отработка навыков и умений контроля автоматического сближения и стыковки ТГК «Прогресс МС» с МКС;
- совершенствование знаний и отработка навыков к приему, передаче смены и совместной работе в полете с экипажами МКС-54/55, 56/57;
- отработка навыков и умений по выполнению операций по консервации и расконсервации ТПК, операциям по обеспечению готовности ТПК к спуску в случае срочного покидания МКС;
- отработка навыков и умений эксплуатации бортовых систем РС МКС (функционально-грузового блока, служебного модуля (СМ), стыковочного отсека СО1, МИМ1, МИМ2);
- отработка навыков и умений технического обслуживания, ремонта и дооснащения бортовых систем РС МКС;
- совершенствование знаний, формирование навыков и умений выполнения разгрузочно-погрузочных работ на грузовых кораблях, укладке снаряжения и личных вещей, возвращаемых грузов на ТПК;
- совершенствование знаний, отработка навыков и умений выполнения программы НПИ на РС МКС;
- отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа при выполнении задач ВКД в объеме типовых операций и по программе ВКД-45;
- отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа в случае нештатной посадки в различных климатогеографических зонах;
- повышение устойчивости организма к факторам космического полета;
- отработка навыков оказания само- и взаимопомощи и эксплуатации бортовых медицинских средств.

На заключительном этапе технической подготовки с экипажем МКС-55/56 были проведены:

- экзаменационные тренировки на специализированных тренажерах по оценке готовности экипажа к выполнению ручных динамических режимов управления ТПК и ТГК;
- экзаменационные комплексные тренировки (ЭКТ) на тренажерах ТПК и РС МКС по оценке готовности экипажа к выполнению программы полета экспедиции в целом.



Результаты экзаменационных тренировок экипажа МКС-55/56 представлены в таблице 1.

По итогам подготовки 22 февраля 2018 года в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина состоялось заседание Межведомственной комиссии, которая, рассмотрев результаты зачетов и экзаменов и выводы Государственной медицинской комиссии, пришла к заключению, что экипаж МКС-55/56 подготовлен к выполнению космического полета и может приступить к этапу предстартовой подготовки на космодроме «Байконур».

Таблица 1

Экзаменационные тренировки	О. Артемьев	Э. Фойстел	Р. Арнольд
ЭКТ по ТПК «Союз МС»	4,96		
ЭКТ по РС МКС	5,0		
По ручному сближению ТПК «Союз МС»	5,0		–
По ручному причаливанию и перестыковке ТПК «Союз МС»	5,0	–	–
По ТОРУ ТК «Прогресс МС»	5,0	–	–
По РУС ТПК «Союз МС»	5,0	5,0	–

### Полет на борту ТПК «Союз МС-08»

Старт ТПК «Союз МС-08» (рис. 2) был произведен 21 марта 2018 года с космодрома Байконур (Республика Казахстан).

Выведение, отделение корабля от ракеты-носителя прошло штатно.



Рис. 2. Старт ТПК «Союз МС-08»

Сближение ТПК «Союз МС-08» с МКС осуществлялось по двухсуточной схеме.

Двухимпульсный маневр № 1 дальнего сближения с МКС проводился на 3-м витке. Корректирующий одноимпульсный маневр № 2 был выполнен на 18-м витке.

23 марта 2018 года на 30-м витке началось автономное сближение с МКС в автоматическом режиме. Сближение, облет, причаливание и стыковка к модулю МИМ2 выполнены штатно.

После стыковки экипаж выполнил контроль герметичности отсеков корабля и стыка, ускоренное выравнивание давления между отсеками ТПК и МКС. На 35-м витке экипаж открыл переходные люки и на 37-м витке выполнил консервацию ТПК «Союз МС-08».

Завершив программу полета на борту МКС, 4 октября 2018 года началась подготовка экипажа к возвращению на Землю.

На 11-м суточном витке экипаж выполнил расконсервацию ТПК «Союз МС-08». В 07:40:00 ДМВ по указанию Земли экипаж осуществил переход на автономное питание и в 08:05:00 ДМВ на 12-м суточном витке закрыл переходные люки.

Расстыковка выполнена на 13-м витке в 10:57:30 ДМВ. На 14-м суточном витке двумя автоматическими импульсами на отвод ТПК «Союз МС-08» выполнен отлет от МКС на дальность около 200 м. Затем командир корабля О.Г. Артемьев организовал контур ручного управления и, в соответствии с разработанной методикой, совершил облет в ручном режиме, обеспечивая необходимые условия для выполнения задачи по фотографированию МКС бортиженером А. Фойстелом из бытового отсека ТПК. Эта уникальная задача была выполнена в отведенное время и с высоким качеством.

Спуск выполнялся по штатной программе. Приземление (рис. 3) произошло в 14 часов 44 минуты ДМВ в расчетной точке вблизи г. Жезказгана. Двигатели мягкой посадки сработали штатно. СА находился на боку, самочувствие экипажа хорошее.

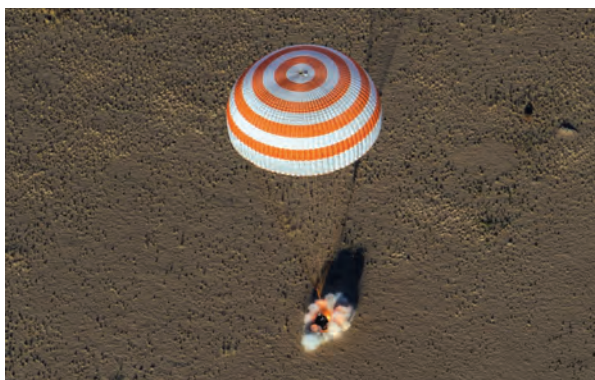


Рис. 3. Приземление спускаемого аппарата

## Полет на борту МКС

Экипаж МКС-55/56 работал на борту МКС 194 суток с 23 марта по 4 октября 2018 года.

Для продолжения дальнейшей эксплуатации МКС на российском сегменте проведены ремонтно-восстановительные работы и работы по материально-техническому обслуживанию и дооснащению бортовых систем и оборудования.

В процессе космического полета выполнены:

- расстыковка от СО1 ТГК «Прогресс МС-07» (28 марта 2018 года);
- сближение американского грузового корабля SpaceX-14 «Dragon» с МКС, захват манипулятором станции SSRMS, перемещение и установка корабля на надирном порту модуля Node2 (4 апреля 2018 года);
- расстыковка американского грузового корабля SpaceX-14 «Dragon» от манипулятора станции SSRMS (5 мая 2018 года);
- сближение американского грузового корабля «Cygnus OA-9» с МКС, захват манипулятором станции SSRMS, перемещение и установка корабля на надирном порту модуля Node1 (24 мая 2018 года);
- расстыковка ТПК «Союз МС-07» от стыковочного узла МИМ1 (3 июня 2018 года);
- стыковка ТПК «Союз МС-09» к стыковочному узлу модуля МИМ1, который осуществлял сближение по двухсуточной схеме в автоматическом режиме (8 июня 2018 года);
- сближение американского грузового корабля Space X-15 «Dragon» с МКС, захват манипулятором станции SSRMS, перемещение и установка корабля на надирный порт модуля Node2 (2 июля 2018 года);
- стыковка ТГК «Прогресс МС-09» к СО1 РС МКС (10 июля 2018 года), сближение которого выполнено впервые по двухвитковой схеме;
- расстыковка американского грузового корабля «Cygnus OA-9» от манипулятора станции SSRMS (15 июля 2018 года);
- расстыковка американского грузового корабля SpaceX-15 «Dragon» манипулятором SSRMS от стыковочного узла Node2 (3 августа 2018 года);
- расстыковка ТГК «Прогресс МС-08» от агрегатного отсека (АО) СМ (23 августа 2018 года);
- сближение японского грузового корабля HTV-7 с МКС, захват манипулятором станции SSRMS, перемещение и установка корабля к надирному порту модуля Node2 (27 сентября 2018 года);
- работы по разгрузке и укладке удаляемого оборудования в грузовые корабли;
- дополнительные работы по программе АС МКС;
- ТВ-приветствия и поздравления в обеспечении деятельности по связям с общественностью;

– видеосъемки жизнедеятельности на станции экспедиций МКС-55 и МКС-56 для сайта Государственной корпорации «Роскосмос» и социальных сетей, а также работы по программе символической деятельности.

Следует отметить, что с 30 по 31 августа 2018 года космонавтами из состава экспедиции МКС-56 проводились работы по устранению НшС, связанной с разгерметизацией МКС (поиск, определение места разгерметизации, ремонтно-восстановительные работы в бытовом отсеке ТПК «Союз МС-09»).

В процессе полета большое внимание уделялось вопросам безопасности. После прибытия экипажей МКС-55/56 и МКС-56/57 были проведены инструктажи по безопасности.

С целью поддержания и восстановления в условиях длительного космического полета профессиональных знаний, навыков и умений, необходимых для успешного выполнения программы полета, с экипажем МКС-55/56 было проведено 15 бортовых тренировок и консультаций. В том числе:

- по действиям в аварийных ситуациях и проверке готовности оборудования к аварийному покиданию МКС;
- перед выполнением ВКД-45;
- по ТОРУ ТГК;
- по выполнению спуска на ТПК «Союз МС-08» и укладке возвращаемого оборудования в СА.

Дополнительно на завершающем этапе полета с экипажем были проведены тренировки и консультации по выполнению облета станции на ТПК «Союз МС-08» с целью проведения фотосъемки МКС.

### **Совместный полет с другими экипажами МКС**

Экипаж МКС-55/56 в периоды:

- с 23 марта по 3 июня 2018 года выполнял совместный полет с экипажем МКС-54/55 (рис. 4) в составе:
  - Шкаплеров Антон Николаевич (бортинженер экспедиции МКС-54, командир экспедиции МКС-55, Роскосмос, Россия);
  - Тингл Скотт Дэвид (бортинженер экипажа МКС-54/55, НАСА, США);
  - Канаи Норишиге (бортинженер экипажа МКС-54/55, ДжАКСА, Япония);
- с 8 июня по 4 октября 2018 года осуществлял совместный полет с экипажем МКС-56/57 (рис. 5) в составе:
  - Прокопьев Сергей Валерьевич (бортинженер экипажа МКС-56/57, Роскосмос, Россия);
  - Герст Александр (бортинженер экспедиции МКС-56, командир экспедиции МКС-57, ЕКА, Германия);
  - Ауньен-Чэнселлор Серина Мария (бортинженер экипажа МКС-56/57, НАСА, США).



Рис. 4. Экипаж 55-й экспедиции МКС



Рис. 5. Экипаж 56-й экспедиции МКС

На фотоснимке (рис. 6) представлены космонавты О.Г. Артемьев и С.В. Прокопьев при проведении совместных работ.



Рис. 6. Проведение совместных работ космонавтов О.Г. Артемьева и С.В. Прокопьева

### **Внекорабельная деятельность**

15 августа 2018 года был выполнен выход в открытый космос ВКД-45 из шлюзового отсека СО1 «Пирс» (рис. 7).

Выход совершили космонавты из состава экспедиции МКС-56 О.Г. Артемьев в скафандре «Орлан МКС» № 5 и С.В. Прокопьев в скафандре «Орлан МКС» № 4. Продолжительность выхода составила 7 часов 46 минут.



Рис. 7. Выполнение ВКД-45

Целевыми задачами выхода являлись:

- запуск двух наноспутников «Танюша-ЮЗГУ» (КЭ «РадиоСкаф»);
- запуск двух наноспутников «SiriusSat» (КЭ «РадиоСкаф»);
- проведение панорамных съемок для телекомпании «Russia Today» камерами GoPro 360;
- монтаж научной аппаратуры «Икарус» на универсальное рабочее место УРМ-Д по II пл. РОБД СМ;
- демонтаж и отталкивание аппаратуры КЭ «Обстановка» (при наличии времени);
- снятие с МИМ2 устройств экспонирования «Тест» № 15 и № 16;
- снятие с СО1 устройств экспонирования «Тест» № 17 и № 18.

*Особенности выхода:*

- целевая задача «Проведение панорамных съемок для телекомпании «Russia Today» камерами GoPro 360» не выполнена в связи с повреждением штанги для установки камер GoPro 360;
- целевая задача «Снятие с МИМ2 устройств экспонирования «Тест» № 15 и № 16» не выполнена в связи с недостатком времени;
- дополнительная задача «Демонтаж и отталкивание аппаратуры КЭ «Обстановка» не выполнена в связи с отсутствием резерва времени.

Расчетное время ВКД было превышено на 1 час 36 минут в связи с:

- нерасчетной НшС, связанной с повреждением штанги для установки камер GoPro 360;
- возникшей расчетной НшС по стыковке низкочастотного разъема на ФП21 СМ;
- затруднением работ в зоне ФП9 и ФП8 СМ;
- отсутствием возможности подготовки по задачам ВКД-45 экипажа в гидролаборатории в условиях моделированной гидроневесомости в скафандрах «Орлан-ГН».

По программе АС МКС за время полета экипажа МКС-55/56 астронавтами Эндрю Фойстелом и Ричардом Арнольдом было выполнено три выхода в открытый космос из шлюзового отсека Airlock в скафандрах ЕМУ.

Первый выход ВКД-49 выполнен 29 марта 2018 года (на восьмые сутки после старта). Продолжительность выхода составила 6 часов 10 минут.

Второй выход ВКД-50 осуществлен 16 мая 2018 года. Продолжительность выхода составила 6 часов 30 минут.

Третий выход ВКД-51 проведен 14 июня 2018 года. Продолжительность выхода составила 6 часов 49 минут.

## **Научная программа**

Космические эксперименты (КЭ) в период полета космонавта О.Г. Артемьева (МКС-55/56) выполнялись в соответствии с «Программой реализации научно-прикладных исследований, планируемых в период пятьдесят пятой и пятьдесят шестой пилотируемых экспедиций МКС-55 и МКС-56».

Перечень экспериментов, распределенных по направлениям Долгосрочной программы НПИ, приведен в табл. 2.

Таблица 2

Направления Долгосрочной программы НПИ	Наименование КЭ	Кол-во КЭ	КЭ с участием экипажа
Физико-химические процессы и материалы в условиях космоса	«Кристаллизатор», «Диффузионное пламя», «Кинетика-1», «Перитектика»	4	4
Исследование Земли и космоса	«БТН-Нейтрон» (А), «Ураган», «Напор-миниРСА», «Дубрава», «Сценарий», «Экон-М»	6	5
Человек в космосе	«Спланх», «Мотокард», «УДОД», «МОРЗЭ», «Профилактика-2», «Биокард», «Космокард», «Альгометрия», «Контент», «Пилот-Т», «Взаимодействие-2», «ДАН», «Матрешка-Р»	13	13
Космическая биология и биотехнология	«Биориск» (А), «Структура», «Кальций», «Биопленка», «Микровир», «Пробиовит», «Фаген», «Константа-2»	8	7
Технологии освоения космического пространства	«Вектор-Т» (А), «Изгиб» (А), «Отклик», «Идентификация», «Контроль», «Наноспутник» (А), «Среда МКС», «Фазопереход», «Сепарация», «Визир», «Биополимер», «Вьносливость» (А), «Альбедо» (А), «Пробой», «ИМПАКТ», «Тест»	16	11
Образование и популяризация космических исследований	«РадиоСкаф», «Великое начало», «О Гагарине из космоса», «Интер-МАИ-75», «Сферы»	5	5
Итого:		52	45

(А) – в автоматическом режиме.

В процессе полета О.Г. Артемьев принял участие в выполнении сорока пяти КЭ, два из которых являются новыми:

– «Фазопереход» (разработка и исследование параметров маломассогабаритных тепловых труб для систем охлаждения и термостабилизации приборов, аппаратуры и конструкции космических аппаратов с использованием ТГК «Прогресс МС-08»);

– «Сепарация» (испытания и отработка в условиях микрогравитации системы регенерации воды из урины СРВ-У-РС в МИМ1).

Общее фактическое рабочее время космонавта О.Г. Артемьева составило 1473 часа 35 минут, из них на выполнение научной программы – 526 часов 10 минут, в том числе – 164 часа 30 минут по Task List.

На фотоснимке (рис. 8) О.Г. Артемьев выполняет КЭ «Кальций».





Рис. 8. О.Г. Артемьев в ходе выполнения КЭ «Кальций»

По завершении космического полета в процессе технического разбора космонавтом О.Г. Артемьевым был высказан ряд замечаний и предложений, направленных на совершенствование космической техники, организации деятельности экипажей в полете и повышения качества подготовки космонавтов.

## **Выводы**

Наземная подготовка экипажа МКС-55/56 по ТПК «Союз МС-08» и РС МКС в соответствии с программой подготовки (ее коррекцией) и подготовка на борту МКС позволили экипажу успешно выполнить программу космического полета, включая устранение НшС.

В процессе космического полета большое внимание уделялось вопросам безопасности.

Тесное сотрудничество экипажа МКС-55/56 с экипажами МКС-54/55 и 56/57, а также с персоналом Центра управления полетами способствовало плодотворной деятельности экипажа на борту МКС.

Для продолжения дальнейшей эксплуатации МКС на российском сегменте выполнены ремонтно-восстановительные работы и работы по материально-техническому обслуживанию и дооснащению бортовых систем и оборудования.

По результатам послеполетного технического разбора разработан план-график мероприятий по устранению замечаний и реализации предложений космонавта О.Г. Артемьева.

УДК 61:629.78.007

**МЕДИЦИНСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ЭКИПАЖА МКС-55/56  
(ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ)****В.В. Богомолов, В.И. Почуев, И.В. Алферова,  
Е.Г. Хорошева, В.В. Криволапов**

Докт. мед. наук, профессор В.В. Богомолов (ГНЦ РФ–ИМБП РАН)  
Канд. мед. наук В.И. Почуев (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)  
Канд. мед. наук И.В. Алферова; ст.н.с. Е.Г. Хорошева;  
ст.н.с. В.В. Криволапов (ГНЦ РФ–ИМБП РАН)

В статье представлены результаты медицинского обеспечения полета экипажа МКС-55/56. Дается краткая характеристика функционирования системы медицинского обеспечения – приводятся основные итоги выполнения программы контроля состояния здоровья космонавтов и среды обитания РС МКС во время полета, а также использования бортовых средств профилактики для поддержания работоспособности и здоровья космонавтов в полете. **Ключевые слова:** медицинское обеспечение, медицинский контроль, система профилактики, среда обитания, режим труда и отдыха.

**Medical Aspects of Ensuring Safety of the Flight of the ISS Crew  
for Expedition 55/56 (Express Analysis). V.V. Bogomolov,  
V.I. Pochuev, I.V. Alferova, E.G. Khorosheva, V.V. Krivolapov**

The paper shows the results of medical maintenance of the ISS-54/55 expedition and gives a brief description of operation of the medical support system and maintaining the stability of human environment aboard the ISS RS. Besides, the paper sums up results of implementing medical recommendations, program of medical monitoring and the use of onboard means designed to prevent the alteration of cosmonauts' health status in spaceflight.

**Keywords:** medical support, medical monitoring, preventive system, human environment, work-rest schedule.

**Выполнение программы полета**

Полет в составе экспедиций:

– экспедиция МКС-55 – с 23 марта 2018 года по 2 июня 2018 года в составе шести человек (два представителя «Роскосмоса», три представителя NASA и один представитель JAXA);

– экспедиция МКС-56 – со 2 июня 2018 года по 4 июня 2018 года в составе трех человек (один представитель Роскосмоса, два представителя NASA). С 8 июня 2018 года по 4 ноября 2018 года в составе шести человек (два представителя «Роскосмоса», три представителя NASA и один представитель ЕКА).

Длительность полета одного российского (БИ-1 МКС-55/56) и двух американских (БИ-5 МКС-55/КЭ МКС-56 и БИ-6) членов экспедиции 55/56, прибывших на корабле «Союз МС-08», составила 197 суток.

*Этапы полета экспедиции*

21.03.18 г. – выведение ТПК «Союз МС-08» – 20:44 ДМВ.

23.03.18 г. – стыковка ТПК «Союз МС-08» к МИМ2 – 19:40 GMT/22:40 ДМВ.

04.10.18 г. – расстыковка ТПК «Союз МС-08» от МИМ2 – 07:57 GMT/  
10:57 ДМВ.

Время посадки – 14:45 ДМВ.

*Основные динамические операции*

28.03.18 г. – расстыковка ТГК № 437 от СО-1 – 13:50 GMT/16:45 ДМВ.

02.04.18 г. – выведение корабля SpX-14 «Dragon» – 20:30 GMT/23:30 ДМВ.

04.04.18 г. – стыковка SpX-14 «Dragon» на надирный порт NODE2 МКС.

04.05.18 г. – отстыковка SpX-14 «Dragon» манипулятором SSRMS от Node2.

21.05.18 г. – выведение корабля ОА-9 «Cygnus» – 08:44:06 GMT.

24.05.18 г. – стыковка корабля ОА-9 «Cygnus» – 09:26 GMT/12:26 ДМВ.

03.06.18 г. – расстыковка ТПК № 737 от МИМ1 – 09:14 GMT/12:14 ДМВ.

06.06.18 г. – выведение ТПК «Союз МС-09» № 739 – 14:12:39 ДМВ.

08.06.18 г. – стыковка ТПК «Союз МС-09» № 739 к МИМ1 – 13:01 GMT/  
16:01 ДМВ.

29.06.18 г. – старт корабля SpX-15 «Dragon» – 09:42 GMT/12:42 ДМВ.

02.07.18 г. – стыковка SpX-15 «Dragon». Установка на надирный порт Node2 с помощью манипулятора SSRMS.

10.07.18 г. – старт ТГК «Прогресс МС-09» № 439 – 00:51:32 ДМВ/  
21:51:32 GMT (09.07.18 г.). Стыковка ТГК «Прогресс МС-09» № 439 к СО1 –  
01:31 GMT/04:31 ДМВ.

15.07.18 г. – отстыковка АО-9 «Cygnus» от Node1 с использованием ма-  
нипулятора SSRMS.

03.08.18 г. – расстыковка корабля SpX-15 от Node2 МКС манипулято-  
ром SSRMS.

23.08.18 г. – расстыковка ТГК № 438 от АО СМ – 02:16 GMT/05:16 ДМВ.

22.09.18 г. – выведение корабля НТВ-7 – 14.52 GMT.

27.09.18 г. – стыковка корабля НТВ-7 к МКС.

*Внекорабельная деятельность (ВКД)**в СК «Орлан-МКС»:*

15.08.18 г. ВКД № 45 РС из СО-1 – БИ-1, БИ-4 МКС-56. ОВЛ – 16:17 GMT/  
19:17 ДМВ. ЗВЛ – 00:03 GMT/03:03 ДМВ (16.08.18 г.).

Общее время пребывания в открытом космосе – 7 ч 46 мин (на 1 час  
36 минут больше запланированного).

*в EMU:*

29.03.18 г. ВКД-49 АС – БИ-2, БИ-3. Продолжительность – 6 часов  
10 минут. Программа ВКД выполнена полностью.

16.05.18 г. ВКД-50 АС – БИ-2, БИ-3. Длительность – 6 часов 30 минут.  
Выполнены основные и дополнительные задачи.

14.06.18 г. ВКД-51 АС – КЭ (БИ-2), БИ-3 АС МКС.

Продолжительность – 6 часов 45 минут. Программа ВКД выполнена полностью.

### Выполнение программы полета и организация режима труда и отдыха (РТО) экипажа

Старт экипажа ТПК «Союз МС-08» состоялся 21.03.18 г. в 20:44 ДМВ.

Сближение проходило по 2-суточной схеме, стыковка ТПК «Союз МС-08» с МКС проведена 23.03.18 г. в автоматическом режиме в 19:40 GMT.

В сутки стыковки режим труда и отдыха (РТО) экипажа МКС был напряженным (рис. 1). Время работы БИ-1 составило 12 часов 35 минут. После окончания работ на МКС космонавтам было предоставлено время для сна и отдыха продолжительностью 24,5 часа.

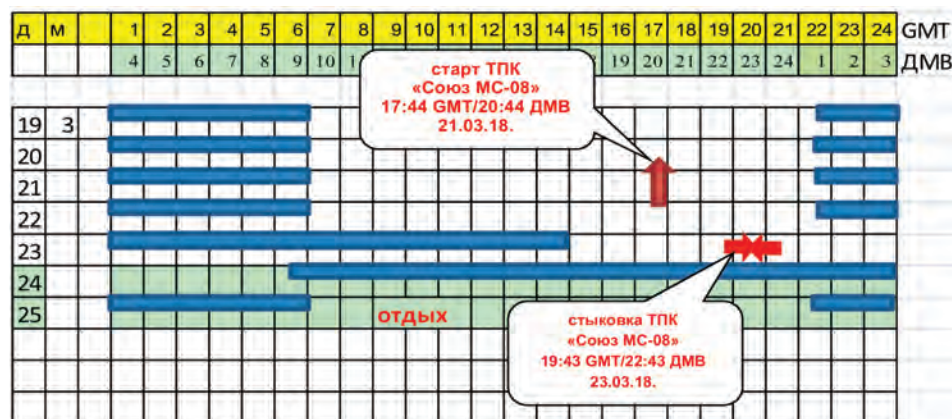


Рис. 1. РТО экипажа МКС на период выведения и стыковки ТПК «Союз МС-08»

Согласно требованиям «Основных правил и ограничений» в первые две недели полета, начиная с 26.03.18 г., рабочая зона у БИ-1 была сокращена до 5,5 часа в день с целью предоставления ему времени (1 час) на адаптацию и ознакомление со станцией.

БИ-1 активно включился в выполнение программы полета – текущие работы на станции, научные эксперименты и большое количество работ в дополнение к плану. Эти работы в рабочие дни были в основном по указанию Земли, иногда по собственной инициативе. В дни отдыха космонавт также выполнял работы и эксперименты по программе Task List (Task List – это перечень работ, подготовленный группой планирования. Он содержит задачи, которые могут быть выполнены на усмотрение экипажа во время рабочего дня или в личное время вне рабочих часов экипажа, позволяет экипажу более свободно регулировать свой рабочий день, повысить эффективность и использовать свободное время для выполнения дополнительной работы по

своему усмотрению). Как правило, ежедневно дополнительно к плану он затрачивал на выполнение различного вида работ от 2,5 до 4 часов.

На 11-й неделе (30.05–05.06.18 г.) РТО оценивался как напряженный и характеризовался выполнением расстыковки ТПК «Союз МС-07» с МКС в ночное время, а также выполнением большого объема работ по завершению укладки возвращаемого оборудования. 01/02.06.18 г. был подписан акт о передаче смены по РС от КЭ к БИ-1 и проведена церемония передачи командования МКС. БИ-5 стал КЭ МКС-56. Перед расстыковкой ТПК «Союз МС-07» планировался сон продолжительностью 13 ч 30 мин. После выполнения заключительных работ по укладке возвращаемых срочных грузов экипажу был предложен дневной сон (отдых) с 16:00 до 22:00 GMT продолжительностью 6 часов. Расстыковка ТПК «Союз МС-07» от МКС состоялась в 09:14 GMT/12:14 ДМВ (03.06.18 г.). Посадка СА в заданном районе состоялась в 15:39 ДМВ.

После ухода экипажа ТПК «Союз МС-07», оставшимся на станции космонавтам было предоставлено время для сна и отдыха с 13:00 GMT 03.06.18 г. до 06:00 GMT 04.06.18 г. продолжительностью 17 часов.

На 12-й неделе 06.06.18 г. в 14:12 ДМВ состоялся старт экипажа ТПК «Союз МС-09». Планировалась 2-суточная схема сближения. Стыковка ТПК «Союз МС-09» к МИМ1 состоялась 08.06.18 г. в 13:01 GMT. После ОПЛ в 15:18 GMT экипаж перешел на станцию и приступил к выполнению работ.

Последующие недели космонавты работали в штатном режиме, БИ-1 выполнял большое количество работ в дополнение к плану (по указанию ЦУПа и по собственной инициативе). В рабочие дни и дни отдыха БИ-1 выполнял работы и эксперименты по программе Task List. Как правило, все дни отдыха фактически можно оценить как рабочие дни, т.к. на выполнение работ затрачивалось не менее 4–5 ч 30 мин.

На 16-й неделе (04–10.07.18 г.) РТО экипажа оценивался как частично напряженный в связи с проведением работ в сутки стыковки ТПК «Прогресс МС-09» в ночное время. Стыковка ТПК «Прогресс МС-09» с МКС состоялась в ночь 9/10.07.18 г. Перед стыковкой экипажу был предоставлен дневной сон (отдых) продолжительностью 7 часов. После стыковки ТПК и выполнения всех запланированных работ на станции, космонавтам предоставляется время для сна (отдыха) продолжительностью 21 ч 30 мин.

На 22-й неделе (15.08–21.08.18 г.) РТО оценивался как напряженный в связи с выполнением ВКД-45 в условиях измененного РТО (в ночное время 15/16.08.18 г.) и выполнением большого объема работ, связанных с консервацией и расконсервацией РС до и после ВКД. Накануне ВКД 14.08.18 г. у БИ-1 и БИ-4 планировалось полдня отдыха. Время плановых работ составило примерно по 4 ч 00 мин, однако дополнительно к плану были выполнены работы и эксперименты по программе Task List.

15.08.18 г. БИ-1 и БИ-4 провели ВКД-45. Время ВКД – 6 ч 10 мин по плану, фактически оно составило 7 ч 46 мин. Космонавты работали спокойно и уверенно. Основная задача ВКД была выполнена.

После завершения ВКД, зона сна планировалась с 03:30 GMT и до 14:00 GMT 16.08.18 г. продолжительностью 10 ч 30 *мин*.

Последующие недели БИ-1 выполнял большой объем работ как в рабочие, так и в дни отдыха. Иногда фактическое время выполнения работ увеличивалось до 9–10 часов.

На 24-й неделе полета 30.08.18 г. экипаж работал в режиме возникшей на борту нештатной ситуации, связанной со снижением общего давления на МКС. Все плановые работы были отменены в связи с проведением необходимых мероприятий по поиску и ликвидации негерметичного объема на МКС/ТПК. Фактическое время работ составило 10 ч 20 *мин*.

Последующие недели работы БИ-1 характеризуются выполнением большого объема работ с временными переработками и нарушением структуры штатного РТО (сокращение времени обеда, зоны *presleep*, пропуск ФТ) и без полноценного отдыха в выходные дни.

С 20.09.18 г. согласно требованиям «Основных правил и ограничений» рабочая зона у БИ-1 была сокращена на 1 час. Это время (1 час) ежедневно планировалось ему на подготовку к возвращению на Землю. Оставшиеся до посадки ТПК «Союз МС-08» две недели БИ-1 выполнял плановые работы по подготовке к спуску, занимался подготовкой и укладкой возвращаемых и удаляемых грузов, а также затрачивал от 1 до 2 часов на выполнение экспериментов по программе Task List. В дни отдыха время выполнения экспериментов по программе Task List увеличивалось до 4 часов.

На 29-й неделе (03–09.10.18 г.) БИ-1 выполнял заключительные операции по подготовке к расстыковке ТПК «Союз МС-08» с МКС. Накануне расстыковки (03.10.18 г.) состоялось подписание акта о передаче смены по РС от БИ-1 к БИ-4 и проведена церемония передачи командования, в результате функции КЭ МКС-57 были возложены на БИ-5.

В сутки расстыковки (03/04.10.18 г.) планировалось изменение РТО – подъем 03.10.18 г. состоялся в 09:30 GMT, продолжительность сна составила 12 часов. После выполнения необходимых работ по окончательной укладке возвращаемого оборудования, экипажу было предоставлено время для сна (отдыха) с 15:00 до 21:30 GMT с продолжительностью сна 6 ч 30 *мин*, затем космонавты продолжили выполнение работ по подготовке к посадке. Расстыковка ТПК «Союз МС-08» от МКС состоялась в 10:57 ДМВ (04.10.18 г.). Посадка СА в заданном районе состоялась в 14:45 ДМВ – 04.10.18 г.

РТО у космонавтов в сутки расстыковки и посадки оценивается как напряженный – подготовка к расстыковке проходила в ночное время суток, расстыковка и посадка проходили в утреннее время. Период бодрствования составил 16 часов (с момента подъема и до момента посадки ТПК).

Общая продолжительность экспедиции МКС-55/56 составила 197 суток, из которых планировались 134 рабочих дня и 63 дня отдыха.

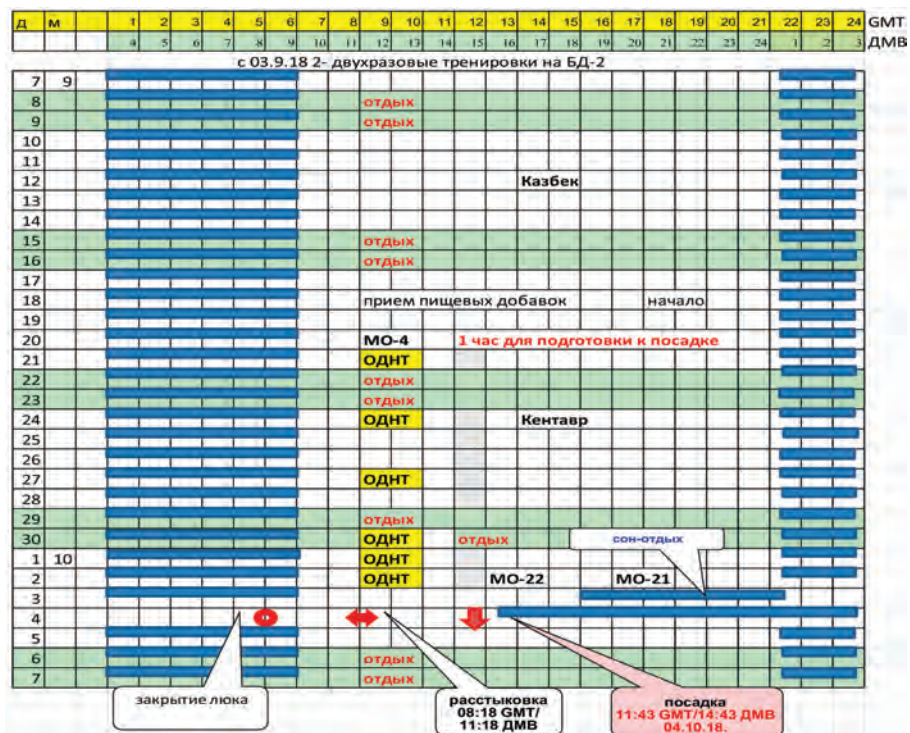


Рис. 2. РТО экипажа МКС на период расстыковки ТПК «Союз MS-08» и посадки

Фактически, по сообщениям с борта и данным специалистов ГОГУ, из 63 дней отдыха у БИ-1 был 1 полноценный день отдыха, когда время работы не превышало 2 часов, и 10 неполных дней отдыха, когда фактическая продолжительность работ составляла от 2 до 4 часов. При этом 52 дня, предназначенных для отдыха, были практически рабочими днями, когда ежедневное время работы составляло 4,5 часа и более.

За весь полет суммарная плановая продолжительность работ в дни отдыха у БИ-1 составила 51 ч 50 мин. Фактически в дни отдыха БИ-1 на выполнение плановых и дополнительных работ израсходовал 115 ч 35 мин; на работы и эксперименты по программе Task List в дни отдыха космонавт затратил 191 ч 20 мин.; на выполнение заданий по Task List в рабочие дни было затрачено 169 часов.

За весь полет на проведение всех дополнительных работ (по Task List, по инициативе экипажа, по указанию Земли и на работы с превышением плановых сроков) БИ-1 затратил 520 часов, что практически равноценно 80 рабочим дням при плановой рабочей нагрузке 6,5 часа в день.

Особенностью режима труда и отдыха БИ-1 МКС-55/56 являлось отсутствие дней отдыха и высокая загруженность космонавта выполнением дополнительных работ, большая часть из которых выполнялась по желанию БИ-1.

Успешному завершению полета и высокой работоспособности БИ-1 способствовали коллегиально дружеские взаимоотношения участников полета, высокая ответственность и профессиональная подготовленность БИ-1 для выполнения возложенных на него задач по реализации программы полета.

### **Медицинский контроль**

Медицинское обеспечение осуществлялось в соответствии с требованиями по медицинским операциям на Международной космической станции (International Space Station Medical Operations Requirements Documents – ISS MORD).

БИ-1 выполнил весь объем запланированных штатных операций периодического медицинского контроля состояния здоровья и среды обитания.

Оперативный медицинский контроль проводился:

- во время выведения, автономного полета и стыковки с МКС ТПК «Союз МС-08»: 21–23.03.18 г.;
- перед и во время проведения ВКД-45: 15/16.08.18 г.;
- при проведении ОДНТ-тренировок: 21, 24, 27, 30.09.18 г.; 01, 02.10.18 г.;
- во время расстыковки и спуска на Землю ТПК «Союз МС-08» 04.10.18 г.;
- при проведении научных экспериментов:
  - МБИ-33 «Биокард»: 17.04.18 г.; 13.06.18 г.; 23.08.18 г.;
  - МБИ-39 «ДАН»: 06.04.18 г.; 10.05.18 г.; 15.06.18 г.; 25.07.18 г.; 20.08.18 г.; 17.09.18 г.

С 30.04.18 г. по 04.05.18 г. проведены работы по замене штатной аппаратуры медицинского контроля «Гамма-1М» на доставленную новую аппаратуру «КМА-01». С 15.05.18 г. она введена в штатную эксплуатацию на МКС для использования при проведении медицинского контроля.

Результаты динамического медицинского контроля свидетельствовали об адекватных физиологических реакциях, достаточных функциональных резервах организма и отсутствии каких-либо существенных отклонений в функциональном состоянии организма БИ-1, что обеспечило сохранение высокого уровня работоспособности на всех этапах экспедиции.

Психологический климат в экипаже и взаимодействие с наземными службами сохранялись на всем протяжении полета на достаточно высоком уровне и носили благоприятный характер.

### **Физиолого-гигиеническая характеристика среды обитания**

Параметры микроклимата колебались в нормальных пределах за исключением температуры воздуха (эпизодически, в некоторых местах на станции, на нескольких витках температура воздуха превышала нормальные величины) и пониженной относительной влажности (табл. 1).

Повышение температуры воздуха в основном отмечалось в периоды «солнечной» орбиты станции. Для снижения температуры воздуха в СМ СОТР переводилась в максимальный режим работы: включались в параллельную работу КОХ1 и КОХ2; РРЖ перенастраивались с 14 °С на 10 °С.



Таблица 1

## Параметры микроклимата на РС МКС

Параметры	Минимально	Максимально	Норма
Д РО мм рт. ст.	730	765	660–860
Д ПХО мм рт. ст.	726	755	660–860
РО <sub>2</sub> мм рт. ст.	140	178	140–200
РСО <sub>2</sub> мм рт. ст.	1,6	3,3–6,7**	< 4,0–4,5*
РН <sub>2</sub> O мм рт. ст.	6,0	12,0	5–20
ОВ %	20	49	40–75
Т ПХО, °С	16,9	21,8	18–28
Т РОБД, °С	20,1	26,3	18–28
Т РОБД, °С	20,1	27,2	18–28
Т над столом °С	20,4	28,2	18–28
Т каюта правая, °С	19,6	26,6	18–28
Т ФГБ, °С	20,2	26,4	18–28
Т СО1, °С	16,5	23,0	18–28

\*\* В период раздельной межмодульной вентиляции между РС и АС

Замечания экипажа по температуре воздуха в СМ:

21.06.18 г. БИ-1 обратился с просьбой: «У нас температура в СМ 27°, можно понизить?». Для создания комфортного микроклимата, в параллельную работу включены два контура охлаждения: КОХ1 и КОХ2 (РРЖ 10°).

Жалоб на сухость воздуха от экипажа не поступало. Для оптимизации влажностного режима периодически отключалась СКВ в РС.

Функционировали постоянно действующие системы российского сегмента: БМП, СРВ-К2М, СКВ1/СКВ2, СОА «Воздух», СКО «Электрон-ВМ»; УОВ «Поток 150 МК» в СМ и ФГБ включались ежедневно на 6 часов.

Периодически проводились наддувы станции кислородом, азотом и воздухом из ТПК, включались поглотительные патроны СО<sub>2</sub>.

Параметры микроклимата ТПК «Союз МС-08» на различных этапах полета показаны в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Параметры микроклимата ТПК «Союз МС-08»  
на участке выведения, орбитального полета и стыковки с МКС (21–23.03.18 г.)

Параметры	Минимальный	Максимальный	Допустимый диапазон
ДСА мм рт. ст.	771	810	450–970
ДБО мм рт. ст.	803	814	450–970
РО <sub>2</sub> мм рт. ст.	163	186	140–310
РСО <sub>2</sub> мм рт. ст.	1,5	4,5	< 10
РН <sub>2</sub> O мм рт. ст.	11,2	19,3	< 20
ОВ %	51	74	40–75
ТСА, °С	21,3	27,2	18–25
ТБО, °С	18,5	23,8	18–25

ДСА – давление в спускаемом аппарате; ДБО – давление в бытовом отсеке; РО<sub>2</sub> – парциальное давление кислорода; РСО<sub>2</sub> – парциальное давление углекислоты; РН<sub>2</sub>O – парциальное давление паров воды; ОВ % – относительная влажность воздуха; ТСА – температура в спускаемом аппарате в градусах Цельсия; ТБО – температура в бытовом отсеке в градусах Цельсия.

Таблица 3

Параметры микроклимата ТПК «Союз МС-08»  
на этапе расстыковки и спуска (04.10.18 г.)

Параметры	Минимальный	Максимальный	Допустимый диапазон
ДСА мм рт. ст.	730	787	450–970
ДБО мм рт. ст.	706	756	450–970
РО <sub>2</sub> мм рт. ст.	158	193	140–310
РСО <sub>2</sub> мм рт. ст.	3,1	6,0	< 10
РН <sub>2</sub> O мм рт. ст.	9,3	11,4	< 15
ОВ %	41	49	30–75
ТСА, °С	21,3	27,8	18–25
ТБО, °С	20,6	23,2	18–25

Замечаний на температурно-влажностный дискомфорт от экипажа ТПК не поступало.

**Замечания по работе СОЖ, СОГС и СТР**

Периодически фиксировались срабатывания датчиков дыма, в ФГБ (06.07.18 г., 15.07.18 г., 08.08.18 г.) загорался транспарант «SMOKE», срабатывание прекращалось автоматически.

По докладам экипажа, запаха гари, дыма и других признаков возгорания обнаружено не было, проводился анализ воздуха газоанализатором CSA-CP, показания были в норме – «нули». Срабатывание сигнализации расценивалось как ложное.

Отмечалась нештатная работа СКВ1 и СКВ2: периодически происходило нештатное самопроизвольное отключение (СКВ1 – «температура хладагона ниже нормы», СКВ2 – в связи со срабатыванием токовой защиты компрессорной установки). Проводились перезапуски и РВР системы.

16.08.18 г. для оценки возможностей системы удаления углекислого газа (CDRA) АС осуществлено разделение межмодульной вентиляции между РС и АС. В последующие дни на РС МКС отмечено нарастание уровня СО<sub>2</sub>. Для снижения уровня СО<sub>2</sub> система «Воздух» переводилась из 3-го в 5-й режим работы. При повышении РСО<sub>2</sub> в РС МКС выше 6,0 мм рт. ст. включался поглотительный патрон. 20.08.18 г. включенный (в 17:53 GMT) поглотительный патрон оказался не эффективным и отмечалось дальнейшее повышение уровня СО<sub>2</sub> (до 6,7 мм рт. ст. в 21:15 GMT). По инициативе ЦУПа-Х, на АС (до утра 21.08.18 г.) была включена CDRA в NODE3 и открыт клапан для смешивания атмосфер АС и РС. 23.08.18 г. зафиксированы показания РСО<sub>2</sub> на уровне 6,5 мм рт. ст. (после выполнения экипажем вечерних физических упражнений). ЦУПом-Х проведено включение CDRA в NODE3 и частичное объединение вентиляции (открытие клапанов IMV). 24.08.18 г. в 20:42 GMT восстановлена штатная межмодульная вентиляция.

В связи с недостаточной эффективностью СОА «Воздух», выявленной в период раздельной межмодульной вентиляции РС и АС, 22–24.08.18 г. и в последующий период (29.08.18 г., 03, 06–07.09.18 г.) проводились работы

по поиску возможной причины (проверка вакуумной магистрали, проверка температур вакуумной магистрали и поглотительных патронов, исследование БВК-1, БВК-2, БВК-3, уточнение производительности по поглощению CO<sub>2</sub>), тестирование системы и РВР. Во время проведения работ система отключалась на несколько часов, включался поглотительный патрон CO<sub>2</sub>.

С 11.09.18 г. во время бодрствования экипажа СОА «Воздух» работала в 4-м режиме, на время сна экипажа переводилась в 3-й режим.

### ***Радиационная обстановка на МКС***

За время полета радиационная обстановка внутри станции оставалась спокойной. Накопленная поглощенная доза за полет у БИ-1 составила 7,1 сГр (7100 мрад), что не превышает допустимые значения доз, определенных согласно Flight Rules В 14.2.2-12 и Гост 25645.215-85.

Ежемесячно проводился дозиметрический контроль радиационной обстановки в РС МКС с использованием аппаратуры «Дозиметр «Пилле-МКС»». 16.07.18 г. установлен новый пульт Пилле-МКС с комплектом датчиков и в настоящее время используется в работе.

Во время выполнения ВКД № 45 РС и ВКД № 49–51 АС проводился контроль радиационной безопасности экипажа с использованием датчиков дозиметра «Пилле-МКС». Значения измеренной дополнительной поглощенной дозы находятся в пределах, установленных полетными правилами (Flight Rules В 14.2.2-12).

### ***Санитарно-гигиеническое состояние МКС***

На протяжении всего полета БИ-1 санитарно-гигиеническую обстановку на станции в основном оценивал как комфортную.

Еженедельно экипаж проводил плановую уборку станции.

При плановом контроле качества атмосферы РС МКС пробоотборниками ИПД-СО (ежемесячно) и ИПД-ННЗ (каждые 3 месяца) монооксида углерода и аммиака в СМ не обнаружено.

16.08.18 г. БИ-1 отметил сильный шум от насоса СПН за панелью 247, насос 3 СПН-1. Экипажу рекомендовано заизолировать насос подручными средствами, чтобы звук уменьшился. 18.08.18 г. БИ-1 сообщил, что интенсивность шума от насоса снаружи каюты стала меньше, в каюте не изменилась, ощущается шум и вибрация. Выполнено переключение на другую СПН, после чего жалоб экипажа на шум в дальнейшем не поступало.

БИ-1 использовал наушники с активным шумоподавлением во время сна и в течение дня при работе с шумящим оборудованием.

Исследование акустической обстановки проводилось в модулях МИМ1 и СМ РС МКС с использованием акустического монитора (АМ hardware), в режиме измерений уровней шума (SLM).

20.06.18 г. результаты анализа полученных данных показали, что на рабочих местах в СМ РС МКС уровни звука превышали допустимые значения на 1,0–5,3 дБА, с максимальным значением в районе СОА «Воздух». По срав-

нению с предыдущими замерами от 13.12.2017 г. уровни звука на рабочих местах СМ понизились на 1,0–5,9 дБА, максимально в районе СКВ. В каютах СМ РС МКС уровни звука превышали допустимые значения только в левой каюте на 3,0 дБА. По сравнению с предыдущими замерами от 13.12.17 г. уровни звука в каютах понизились на 4,6 дБА в левой каюте, а в правой каюте практически не изменились. На рабочих местах в МИМ1 уровни звука превышали допустимые значения на 1,4–8,4 дБА, с максимальным значением в центре 4-го отсека. По сравнению с предыдущими замерами от 13.12.17 г. уровни звука в МИМ1 понизились на 1,1–3,0 дБА в районе 1-го, 2-го и 3-го отсеков и повысились на 1,7 дБА в районе 4-го отсека со стороны ТПК.

Определение индивидуальной акустической нагрузки для БИ-1 проводилось за дневной и ночной периоды времени с использованием акустического монитора (AM hardware) в режиме акустической дозиметрии.

23–25.05.18 г. шумовая нагрузка у БИ-1 за дневной период превысила предельно допустимый уровень (ПДУ) на 15,8 дБА, за ночной период превысила ПДУ на 3,6 дБА. Сравнение с предыдущими замерами от 09–11.04.2018 г. отмечено снижение индивидуальной шумовой нагрузки за дневной период на 4,7 дБА.

06–07.06.18 г. у БИ-1 шумовая нагрузка за дневной период превысила ПДУ на 15,2 дБА, а за ночной период на 13,6 дБА. Сравнение с предыдущими замерами от 23–25.05.18 г. показало повышение индивидуальной шумовой нагрузки за ночной период на 10,0 дБА.

07–08.08.18 г. у БИ-1 шумовая нагрузка за дневной период превысила ПДУ на 12,4 дБА, за ночной период на 4,9 дБА. Сравнение с предыдущими замерами от 06–07.06.18 г. показало снижение индивидуальной шумовой нагрузки у БИ-1 как за дневной, так и за ночной период на 2,8 дБА и 8,7 дБА, соответственно.

Проведенные в этот день статические измерения эквивалентных уровней звука показали превышение в СМ в районе п. 248 допустимые значения для дневного и ночного периодов на 4,5 и 4,3 дБА, соответственно.

Исследования микробиологического состояния атмосферы МКС от 02.10.18 г. (195 сутки полета) показали, что обсемененность газовой среды бактериями и плесневыми грибами в пределах нормативных показателей и соответствует требованиям SSP 50260 MORD.

Проведенный «Контроль санитарно-эпидемиологического состояния РС МКС» от 02.10.18 г. (195-е сутки полета) показал, что содержание фрагментов плесневых грибов на поверхностях интерьера и оборудования не превышало нормативный показатель, регламентируемый SSP 50260 MORD. Содержание бактерий на поверхностях интерьера и оборудования превышало нормативный показатель, регламентируемый SSP 50260 MORD в 2 зонах: СМ, правая каюта члена экипажа с поверхности обшивки стены ( $2,9 \times 10^4$  КОЕ/см<sup>2</sup>) и ФГБ, ПГО-3, ( $1,2 \times 10^4$  КОЕ/см<sup>2</sup>). На 21 поверхности интерьера и оборудования содержание бактерий не превышало норматив-

ный показатель, регламентируемый SSP 50260 MORD. В связи с вышеизложенным следующим экипажем была проведена обработка двух зон с помощью комплекта «Фунгистат».

### ***Питание и водопотребление***

На всем протяжении полета у БИ-1 замечаний по питанию и водопотреблению не было.

### ***Использование средств профилактики***

Для поддержания физической работоспособности человека в условиях космического полета используется многофункциональная система профилактики неблагоприятного воздействия невесомости. В первые дни пребывания в условиях космического полета в ТПК «Союз МС» БИ-1 начал использовать профилактическое изделие «Браслет» с момента снятия скафандра и до момента перехода на станцию. На станции изделие «Браслет-М» использовал еще сутки.

На следующий день после стыковки БИ-1 планировались инструктаж по тренажеру ARED (25.03.18 г.), ознакомительные занятия на тренажерах ВБ-3М (1 час 26.03.18 г.) и БД-2 (1 час 27.03.18 г.). В последующие периоды полета у БИ-1 структура выполнения физических тренировок на штатных тренажерах БД-2, ВБ-3М и ARED была видоизменена в связи с выполнением научного эксперимента «Профилактика-2».

К штатным тренировкам два раза в день общей продолжительностью 2,5 часа на БД-2 и ВБ-3М/ARED (с чередованием) приступил с 05.04.18 г. При подготовке к проведению ВКД-45 БИ-1 с конца июля начал дополнительно выполнять ручную велоэргометрию.

03.05.18 г. экипаж сообщил о возникновении проблем с установкой усилия притяга беговой дорожки, после попытки штатной перезагрузки БД-2 появилось сообщение «запущена процедура парковки» и произошло зависание монитора (перестал реагировать на команды оператора, все клавиши были неактивны), экипаж выполнил перезагрузку (принудительное отключение/ включение БД-2 от бортовой сети). После перезагрузки БД-2 автоматически установился притяг – 70 кгс (без возможности программной коррекции притяга в сторону уменьшения), БИ-1 ослабил притяг до 60 кгс вручную (с помощью ремешков-поводков) и продолжил выполнять программу исследования.

04.05.18 г. проведена регулировка положения каретки притяга БД-2, после чего БИ-1 доложил: «Дорожку настроили, вроде пока все работает».

27.08.18 г. экипаж сообщил о периодическом прокручивании правой педали ВБ-3М при выполнении высоких нагрузок (200 Вт и более). 09.09.18 г. проведены РВР тренажера ВБ-3М.

С 03.09.18 г. в соответствии с требованиями на заключительном этапе полета и рекомендациями специалистов ИМБП планировались двухразовые

тренировки на бегущей дорожке БД-2 с заменой через день одного занятия тренировкой на ARED общей продолжительностью 2,5 часа и ОДНТ-тренировки.

С 21.09.18 г. для БИ-1 планировались четыре предварительные и две заключительные ОДНТ-тренировки. Режимы тренировок разрабатывались, учитывая результаты функциональной пробы для оценки ортостатической устойчивости при воздействии ОДНТ.

Периодически на протяжении полета проводились беседы со специалистами по физическим тренировкам ИМБП и ЦПК.

Примерка и подгонка изделия «Кентавр» у БИ-1, КЭ и БИ-3 проведены 25.09.18 г. без замечаний.

По ежедневным докладам ФТ выполнял в полном объеме в соответствии с планом.

На всех этапах полета уровень физической тренированности БИ-1 оценивался как хороший.

## **Выводы**

Обеспечение безопасности на борту МКС тесно связано с организацией медицинского обеспечения космического полета, проведением санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий. Изучение и оценка потенциальных рисков, мониторинг среды обитания космонавтов позволили нивелировать неблагоприятные факторы космического полета и снизить их влияние на организм космонавтов.

Результаты медицинского контроля свидетельствовали об адекватных физиологических реакциях и достаточных функциональных резервах организма как в ходе полета, так и на завершающем его этапе.

ГМО ГОГУ контролировала планирование и реализацию медицинских операций.

Программа медицинского контроля, медицинских операций и научных медико-биологических исследований выполнена в запланированном объеме.

Психологический климат в экипаже на протяжении всего полета был позитивным.

В целом полет выполнен без медицинских проблем, влияющих на безопасность космического полета. Замечания и предложения экипажа приняты к реализации.

Уровень предполетной подготовки экипажа был достаточным и адекватным задачам полета.

Успешному завершению полета способствовали коллегиально-дружеские взаимоотношения участников полета, продуктивный деловой контакт со специалистами и операторами наземных служб и высокая ответственность космонавта (БИ-1) и его партнеров за выполнение профессиональных задач.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

МКС – Международная космическая станция	PO <sub>2</sub> – парциальное давление кислорода
NASA – космическое агенство США	PCO <sub>2</sub> – парциальное давление углекислоты
JAXA – Японское космическое агенство	PH <sub>2</sub> O – парциальное давление паров воды
БИ – бортовой инженер	ОВ % – относительная влажность воздуха
КЭ – командир экипажа	TCA – температура в спускаемом аппарате в градусах Цельсия
ТПК – транспортный пилотируемый корабль	ТБО – температура в бытовом отсеке в градусах Цельсия
ТГК – транспортный грузовой корабль	CSA-CP – американский анализатор состава атмосферы
ДМВ – декретное московское время	ЕДВ – емкость для воды
GMT – время Гринвичского меридиана	БРП – блок раздачи и подогрева
МИМ1 – малый исследовательский модуль 1	БРП-М – блок раздачи и подогрева воды модернизированный
МИМ2 – малый исследовательский модуль 2	РО – радиационная обстановка
АО СМ – агрегатный отсек служебного модуля	АСУ – ассенизационно-санитарное устройство
РС МКС – российский сегмент МКС	ИПД – индикаторный пробоотборник Дрейгера
СК – скафандр	СПН – сменная панель насосов
ВКД – внекорабельная деятельность	КОБ – контур обогрева
ЕМУ – американский скафандр для ВКД	СОЖ – система обеспечения жизнедеятельности
ОВЛ – открытие выходного люка	ПДУ – предельно допустимый уровень
ЗВЛ – закрытие выходного люка	МО – медицинская операция
РТО – режим труда и отдыха	БД-2 – бегущая дорожка РС МКС
Task List – перечень работ, подготовленный группой планирования. Он содержит задачи, которые могут быть выполнены на усмотрение экипажа во время рабочего дня или в личное время вне рабочих часов экипажа	ARED – силовой тренажер АС МКС
ФТ – физические тренировки	ФТ – физическая тренировка
СА – спускаемый аппарат	ВБ-3М – велоэргометр бортовой
БО – бытовой отсек	ИМБП – Институт медико-биологических проблем
ГОГУ – Главная оперативная группа управления	ЦПК – Центр подготовки космонавтов
ISS MORD – документ требований к медицинским операциям МКС	ТНК-У-1М – российский тренировочно-нагрузочный костюм для бегущей дорожки
ОДНТ – отрицательное давление на низ тела	Harness – американский тренировочно-нагрузочный костюм для бегущей дорожки
МБИ – медико-биологические исследования	
ГМО – группа медицинского обеспечения	
СМ – служебный модуль	
ФГБ – функционально-грузовой блок	
СО1 – стыковочный отсек	
СОТР – система обеспечения терморегулирования	
КОХ – контур охлаждения	
РРЖ – регулятор расхода жидкости	
СКВ – система кондиционирования воздуха	
БМП – блок удаления микропримесей	
СРВ-К2М – система регенерации воды из конденсата	
СОА «Воздух» – система очистки атмосферы	
СКО «Электрон-ВМ» – система обеспечения кислородом	
УОВ «Поток 150 МК» – устройство очистки воздуха	
РВР – ремонтно-восстановительные работы	
ТМ – телеметрия	
ДРО – общее давление в рабочем отсеке служебного модуля	
ДПХО – общее давление в переходном отсеке служебного модуля	
РОБД – рабочий отсек большого диаметра	
ДСА – давление в спускаемом аппарате	
ДБО – давление в бытовом отсеке	

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

## THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.78.007

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОНКУРСНОГО ОТБОРА КАНДИДАТОВ В КОСМОНАВТЫ В 2017–2018 гг.

П.Н. Власов, Ю.И. Маленченко, Б.И. Крючков, А.А. Курицын,  
М.М. Харламов, В.И. Почуев, В.Г. Корзун, В.П. Матвеев,  
Р.Р. Каспранский, Л.В. Войтулевич, А.В. Васин, В.М. Усов,  
В.Ю. Самарцев, А.С. Кондратьев, А.И. Крылов, В.Г. Назин,  
Е.В. Андреев, А.Д. Беляева

П.Н. Власов; Ю.И. Маленченко; докт. техн. наук Б.И. Крючков;  
докт. техн. наук А.А. Курицын; канд. экон. наук М.М. Харламов;  
канд. мед. наук В.И. Почуев; В.Г. Корзун; В.П. Матвеев;  
канд. мед. наук Р.Р. Каспранский; Л.В. Войтулевич; А.В. Васин;  
докт. мед. наук В.М. Усов; В.Ю. Самарцев; А.С. Кондратьев;  
канд. техн. наук А.И. Крылов; канд. техн. наук В.Г. Назин;  
Е.В. Андреев; А.Д. Беляева (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Статья посвящена анализу результатов открытого конкурсного отбора кандидатов в космонавты, проведенному в «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» в 2017–2018 гг.

**Ключевые слова:** кандидат в космонавты, конкурсная комиссия, открытый конкурс, отбор космонавтов, претендент на отбор, этапы отбора.

**Main Results of the Competitive Selection of Cosmonaut Candidates in 2017–2018. P.N. Vlasov, Yu.I. Malenchenko, B.I. Kryuchkov, A.A. Kuritsyn, M.M. Kharlamov, V.I. Pochuev, B.G. Korzun, V.P. Matveev, R.R. Kaspransky, L.V. Voytulevich, A.V. Vasin, V.M. Usov, V.Yu. Samartsev, A.S. Kondratiev, A.I. Krylov, V.G. Nazin, Ye.V. Andreev, A.D. Belyaeva**

The paper represents the analysis of the results of the competitive selection of cosmonaut candidates held at the Yu.A. Gagarin R&T CTC in 2017-2018.

**Keywords:** cosmonaut candidate, open competition, cosmonaut selection, applicant for selection, selection stages.

Космическая деятельность Российской Федерации, связанная с осуществлением пилотируемых полетов, относится к приоритетам государственной политики в области космонавтики. К 2022 году планируется завершение строи-



тельства Международной космической станции (МКС). В ее состав будут включены еще три новых модуля – многоцелевой лабораторный, узловой и научно-энергетический. После завершения совместных работ с партнерами по МКС на основе российского сегмента возможно создание российской орбитальной станции.

Для обеспечения перспективных пилотируемых программ, в том числе лунной программы, в РФ разрабатывается пилотируемый транспортный корабль нового поколения «Федерация». Предусматривается создание космической инфраструктуры для выполнения полетов в окололунное пространство и на Луну.

Испытания и эксплуатация новой космической техники, реализация крупных космических проектов невозможны без участия космонавтов. Их отбор является первым этапом подготовки человека к сложной профессиональной деятельности, выполняемой в условиях воздействия на него огромного числа негативных факторов космического полета, тем более в условиях автономной деятельности на большом удалении от Земли.

Для пополнения отряда космонавтов в 2018 году планировался отбор 6–8 кандидатов в космонавты-испытатели.

### **Общие вопросы организации отбора кандидатов в космонавты в 2017–2018 гг.**

Отбор кандидатов в космонавты-испытатели в отряд космонавтов Госкорпорации «Роскосмос» проводился на конкурсной основе в соответствии с требованиями Закона РФ от 20.08.1993 г. № 5663-1 «О космической деятельности», Федерального закона от 13.07.2015 г. № 215-ФЗ «О Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос»» и иных федеральных законов. Основанием для проведения очередного отбора кандидатов в космонавты стало решение Межведомственной комиссии по отбору космонавтов и их назначению в состав экипажей пилотируемых кораблей и станций (МВК) от 05.09.2016 г.

Отбор кандидатов в космонавты 2017–2018 гг. был вторым в истории отечественной космонавтики, проводившимся по схеме открытого конкурсного отбора. Первый состоялся в 2012 году. [1]. Положение о проведении открытого конкурса по отбору кандидатов в космонавты РФ в 2017 году было утверждено приказом ГК «Роскосмос» от 21.11.2016 г. Данный документ определил порядок выполнения работ по отбору кандидатов в космонавты РФ в рамках открытого конкурса, функции организаций, участвующих в его проведении, основные требования, предъявляемые к кандидатам в космонавты, а также основные организационно-методические положения по проведению отбора.

При организации отбора космонавтов в 2017 году использовался многолетний предыдущий опыт их проведения в СССР и РФ. Учитывался опыт отбора астронавтов в зарубежных космических агентствах. Был выполнен системный анализ результатов первого открытого конкурсного отбора кос-

монавтов в РФ 2012 года. По результатам проведенных исследований были разработаны предложения по организационно-методическому и материально-техническому обеспечению отбора 2017 года.

Выполнение работ по конкурсному отбору кандидатов в космонавты осуществлялось ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» (далее НИИ ЦПК) при участии ПАО «РКК «Энергия» и ФГБУН «ГНЦ РФ–ИМБП РАН».

Объявление о проведении конкурса было обращено к заинтересованным лицам путем публикации на сайтах Госкорпорации «Роскосмос» и НИИ ЦПК, а также в средствах массовой информации 14 марта 2017 году. В целях организации и проведения процедур отбора претендентов приказом Госкорпорации «Роскосмос» от 28.04.2017 г. была создана конкурсная комиссия. В ее состав вошли ведущие специалисты НИИ ЦПК, РКК «Энергия», ГНЦ РФ–ИМБП РАН (рис. 1).



Рис. 1. Конкурсная комиссия по проведению отбора

С учетом требований, предъявляемых к претендентам, и принятых видов отбора, в составе конкурсной комиссии было сформировано пять подкомиссий. Их структура представлена на рис. 2. Официальный состав подкомиссий, в том числе по согласованию с ГНЦ РФ–ИМБП РАН и РКК «Энергия» в части их представительства, определялся приказом начальника НИИ ЦПК.



Рис. 2. Виды подкомиссий по отбору

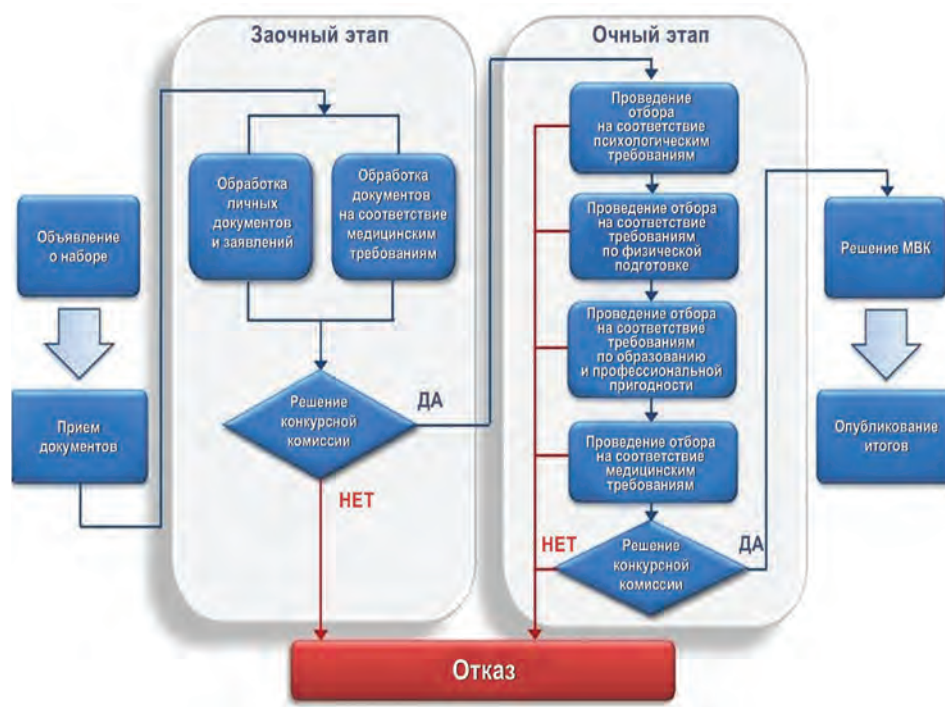


Рис. 3. Блок-схема проведения отбора

Порядок проведения конкурса по отбору кандидатов в космонавты в 2017–2018 гг. осуществлялся по схеме, показанной на рис. 3.

Отбор включал заочный и очный этапы. На заочном этапе специальная подкомиссия НИИ ЦПК «По обработке заявлений и документов претендентов» рассматривала их личные и медицинские документы согласно требованиям Роскосмоса. Результаты этого анализа докладывались на заседаниях конкурсной комиссии, которая принимала решение о допуске каждого конкретного претендента к очному этапу отбора.

На очном этапе претендентам предстояло пройти четыре вида отбора. Успешно прошедшие отбор кандидаты решением конкурсной комиссии представлялись на МВК для решения о зачислении в отряд космонавтов Роскосмоса.

### Краткая характеристика претендентов, поступивших на отбор

Одно из общих требований, предъявляемых к претендентам – возраст не более 35 лет. Как следует из рис. 4, всего 88,8 % претендентов соответствовали требованиям по возрасту, остальные 11,2 % – нет.

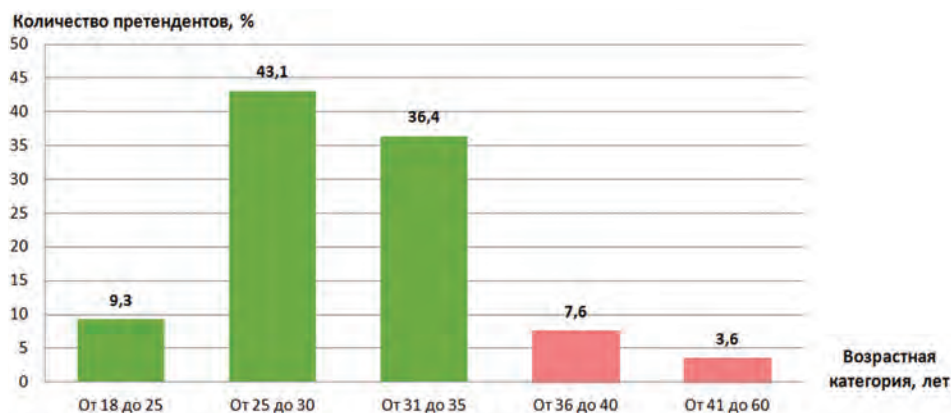


Рис. 4. Распределение претендентов по возрастным категориям

Далее рассмотрим образовательный статус претендентов. Около 95 % претендентов (398 чел.) представили дипломы государственного образца. При этом высшие учебные заведения (университеты, академии, институты или высшие училища, приравненные к ним), выдавшие документы, имели государственную аккредитацию и располагались на территории РФ.

Более 2 % претендентов (9 чел.) представили только дипломы иностранного образца. Университеты, выдавшие их, располагались в Гонконге, Кыргызстане, США, Украине и других странах. Какие-либо документы о нострификации соответствующих дипломов – государственном признании Российской Федерацией иностранных дипломов, отсутствовали. Поэтому подкомиссия по обработке заявлений рассматривала эти дипломы на соответствие международным соглашениям [2] и требованиям Правительства РФ [3].

Более 3 % претендентов (13 чел.) не представили документы о высшем образовании, при этом 5 из них являлись студентами.

Согласно Федеральному закону «Об образовании в Российской Федерации», в нашей стране установлены следующие уровни высшего профессионального образования:

- бакалавр;
- специалист;
- магистр.

Лица, имеющие только квалификацию (степень) «бакалавр», к отбору не допускались. Таких среди общего числа претендентов было 12 человек.

Более 5 % претендентов (21 человек) имели два или более высших образований.

На рис. 5 показано распределение претендентов, имеющих квалификацию магистр/специалист, по специальностям. Их общее число, соответствующее инженерным или летным специальностям, составляло 310 человек (73,81 % от общего числа претендентов).

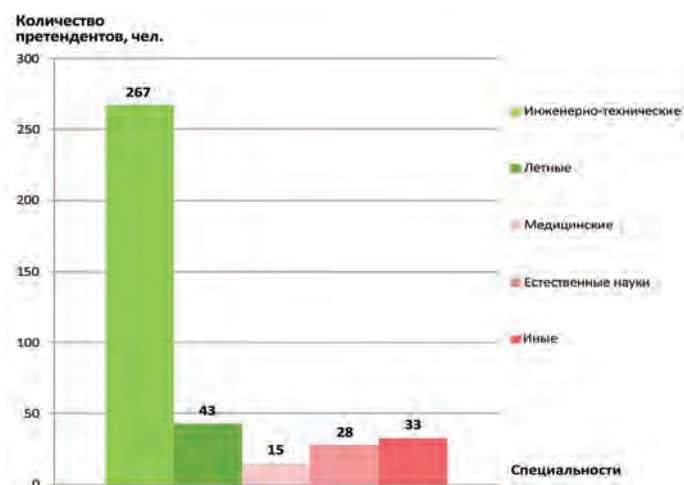
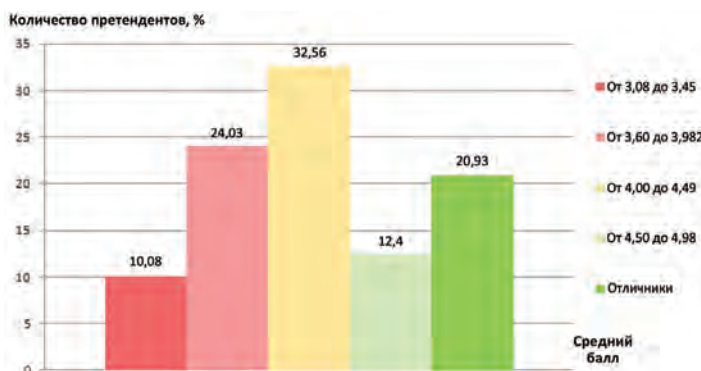


Рис. 5. Распределение претендентов по специальностям



Инженеры



Летчики

Рис. 6. Средний балл претендентов по окончании вузов

В группе инженерно-технических специальностей были такие, как инженер-пилот, инженер-механик, инженер-экономист, морской инженер, инженер-физик, радиоинженер и др. В числе медицинских работников – врач-биофизик, врач-биохимик, врач-кардиолог, ветеринарный врач. К профессиям естественно-научного цикла отнесены такие, как физик, математик, химик, генетик и др. К иным – культуролог, географ, лингвист, экономист, психолог, юрист, менеджер, журналист и др.

Результаты успеваемости в вузах претендентов приведены на рис. 6. Среди летчиков абсолютных отличников больше, чем среди инженеров, на 5,9 %. Число «хорошистов» среди инженеров больше на 3,5 %, чем среди летчиков.

Общая средняя вузовская оценка 258 инженеров – 4,24 балла; 41 летчика – 4,32 балла.

Помимо вышесказанного, в части образования следует отметить, что 14 человек имели ученые степени. В их числе 7 кандидатов технических наук, 4 кандидата физико-математических наук, по одному кандидату медицинских, биологических, геолого-минералогических наук. Три претендента проходили обучение в аспирантуре.

Рассмотрим далее информацию по опыту работы претендентов по специальности. В соответствии с установленными требованиями претенденты должны иметь опыт работы по специальности не менее 3 лет.

Из 267 инженеров, имеющих квалификацию магистр/специалист, у 80 (29,96 %) опыт работы не соответствовал необходимым требованиям. Из 43 летчиков – у 10 претендентов (23,24 %). Основными причинами несоответствия требованиям по данной позиции являлись: полное отсутствие опыта работы на инженерной должности (25 чел.) и недостаточный (менее 3 лет) стаж работы по специальности (50 чел.). Можно отметить, что соответствие опыта работы установленным требованиям у летчиков несколько выше (на 6,7 %), чем у инженеров (рис. 7).

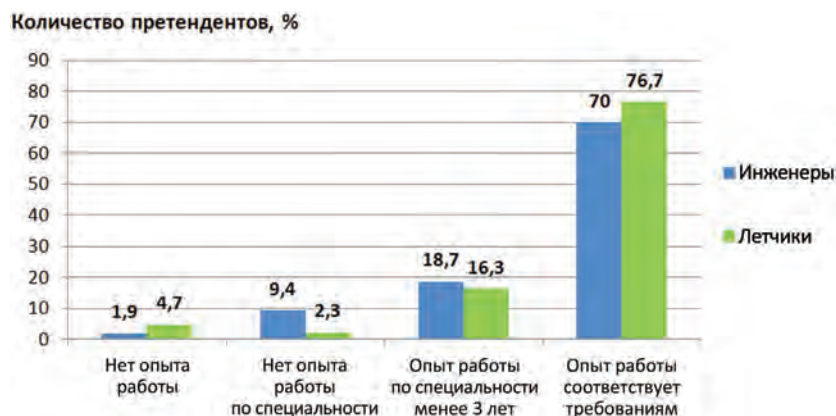


Рис. 7. Опыт работы претендентов инженерных и летных специальностей

Около 19 % всех претендентов, подавших заявления на участие в отборе, являлись представителями космической отрасли. Из них 15 % на момент подачи документов работали в НИИ ЦПК, 42,5 % являлись сотрудниками ПАО «РКК «Энергия», 7,5 % – ФГУП «ЦНИИмаш», остальные 35 % представляли: ФГБУН «ГНЦ РФ–ИМБП РАН», АО «НПО Энергомаш» имени академика В.П. Глушко, АО «НПО имени С.А. Лавочкина» и др. В целом на представителей авиационно-космической отрасли (АКО) приходилось 31,2 % претендентов, что в 1,9 раза превышает результаты 2012 года. (рис. 8).

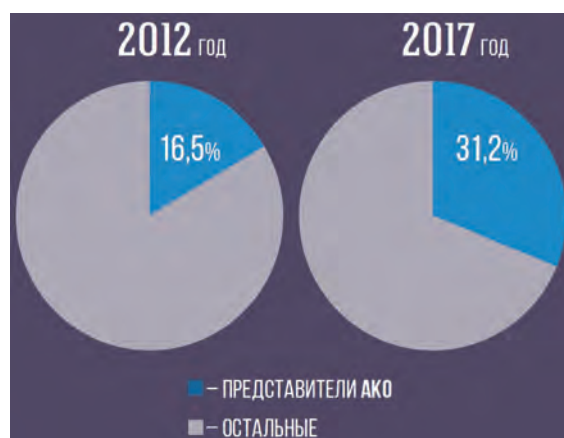


Рис. 8. Участие в отборе претендентов из АКО

Претенденты из числа летного состава имели классность от 1-го до 3-го класса.

В числе претендентов на отбор 2017–2018 гг. были гражданские и военные специалисты. Их относительное количество составляло соответственно 87,4 и 12,6 %. Число мужчин на отборе было 79,3 %, женщин – 20,7 %.

### Результаты заочного этапа отбора

График поступления заявлений на конкурс от претендентов приведен на рис. 9. Для сравнения показана динамика подачи документов конкурсантами двух наборов: 2012 года и 2017–2018 гг. В отборе 2012 года на момент начала конкурса в НИИ ЦПК уже были поданы документы 43 претендентами. Видно, что в течение первого месяца общее количество поступивших документов в 2017 году было незначительным (19 заявлений), что, видимо, связано с необходимостью сбора полного пакета личных и медицинских документов. К середине третьего месяца наблюдалось заметное возрастание числа поданных заявлений, а к концу в 2017 года оно достигло 314 (в 2012 году их было 304). Всего до окончания приема документов 15.12.2017 г. в конкурсе изъявило желание участвовать 420 человек.

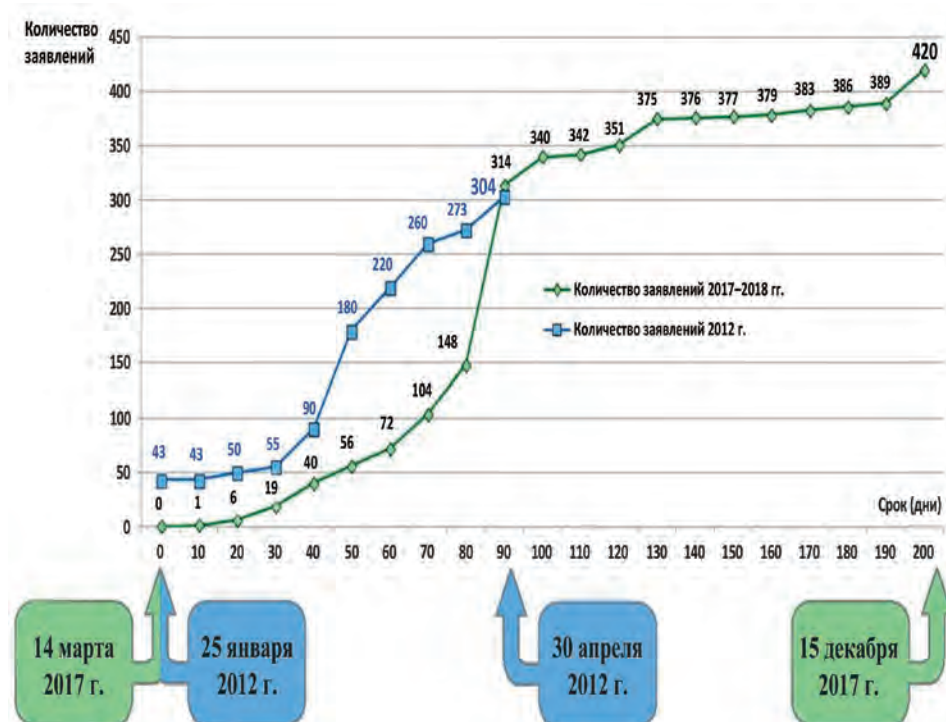


Рис. 9. График поступления заявлений в 2012 году и 2017–2018 гг.

Заседания конкурсной комиссии проходили периодически в течение всего конкурса, их количество и последовательность показаны на рис. 10 (цифры над колонками указывают число претендентов, рассмотренных на данном заседании). Заседание 9 августа было заключительным. На нем из 13 претендентов, прошедших все виды отбора, было отобрано 8 для представления на МВК.

Из 420 подавших на отбор заявлений претендентов 317 чел. (~75,5 %) были отклонены конкурсной комиссией.

Наибольшее количество претендентов было отклонено по медицинским показаниям – 160 человек (~50,5 % от общего количества отклоненных кандидатур). Далее идут такие категории как «образование и опыт работы» – 41 человек (~12,9 %), «неполный пакет поданных документов» – 33 человека (~10,4 %), «опыт работы по специальности менее 3 лет» и «возраст, превышающий 35 лет» – 24 и 20 (~7,6 % и ~6,3 %) человек соответственно.

В итоге по результатам заседания конкурсной комиссии отбора 2017–2018 гг. до очного этапа было допущено 103 человека, 2 из которых далее отказались участвовать в конкурсе.





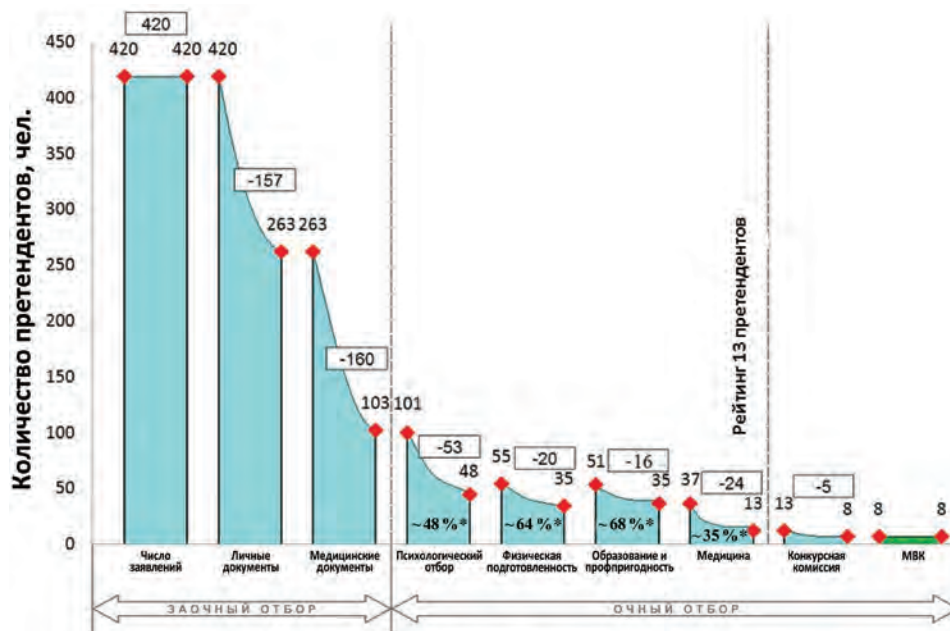
Рис. 10. Диаграмма рассмотрения конкурсной комиссией кандидатур претендентов на предмет допуска к очному этапу отбора

### Результаты отбора кандидатов в космонавты на очном этапе

На очный этап отбора поступил 101 претендент, что составило около 24 % от общего числа конкурсантов. Им предстояло пройти четыре вида отбора в следующей последовательности: психологический отбор, отбор на соответствие требованиям к уровню физической подготовленности, отбор на соответствие требованиям по образованию и профессиональной пригодности, медицинский отбор. В рамках отбора на соответствие требованиям по образованию и профессиональной пригодности оценивались способности претендентов к операторской деятельности. Оценивание проводилось с помощью специальных тестов на стендовой базе НИИ ЦПК. Общая картина прохождения претендентами этапов и видов отбора представлена на рис. 11.

Лица, прошедшие медицинский отбор, рассматривались Государственной медицинской комиссией (ГМК) на предмет получения заключения о годности к специальным тренировкам. Положительное заключение ГМК получили 13 претендентов. По ним был составлен рейтинг с учетом всех видов отбора, на основании которого конкурсная комиссия отобрала 8 человек для представления на МВК.

Все они были утверждены Межведомственной комиссией и зачислены в отряд космонавтов Роскосмоса. Краткая характеристика отобранных претендентов приведена в [6]. Фрагменты тестирования претендентов на очном этапе отбора показаны на рис. 12.



Обозначения: \* Доля претендентов, прошедших данный вид отбора (от числа поступивших на него)  
 [-20] — число претендентов, отчисленных на данном виде (этапе) отбора

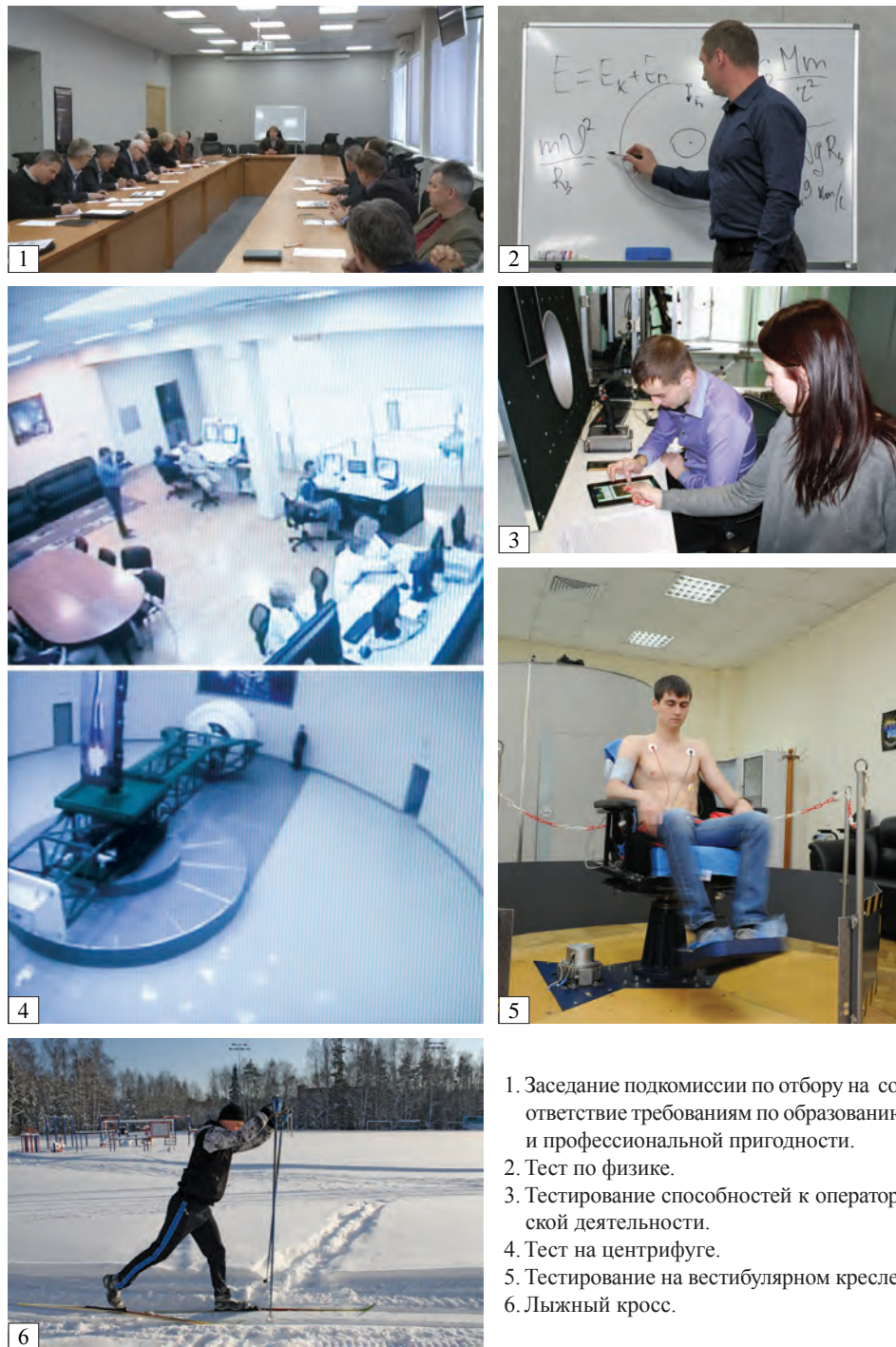
Рис. 11. Динамика прохождения претендентами этапов и видов отбора (итоговая схема)

### Выводы

Анализ организации и результатов открытого конкурса показал, что система отбора космонавтов, включающая технологии и процедуры тестирования, их программно-аппаратное и методическое обеспечение, базовые организационно-методические документы по требованиям и критериям отбора, персонал НИИ ЦПК, позволила решить основную задачу по отбору кандидатов в космонавты для пополнения отряда космонавтов в 2018 году.

По итогам открытого конкурса из числа граждан РФ было отобрано 8 кандидатов в космонавты-испытатели, в наибольшей степени соответствующих предъявляемым профессиональным требованиям, имеющих летные и инженерные специальности и достаточный опыт работы.

В целом опыт второго конкурсного отбора космонавтов 2017–2018 гг. был положительным. Его итоги будут учтены в интересах совершенствования системы отбора космонавтов.



1. Заседание подкомиссии по отбору на соответствие требованиям по образованию и профессиональной пригодности.
2. Тест по физике.
3. Тестирование способностей к операторской деятельности.
4. Тест на центрифуге.
5. Тестирование на вестибулярном кресле.
6. Лыжный кросс.

Рис. 12. Фрагменты тестирования претендентов на очном этапе отбора

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Крикалёв С.К., Крючков Б.И., Харламов М.М., Котов О.В., Волков С.А., Борисенко А.И., Почуев В.И., Матвеев В.П., Войтулевич Л.В., Рень В.А., Сохин И.Г., Корешев И.В., Рюмин О.О., Самарцев В.Ю., Назин В.Г., Троицкий С.С. Открытый конкурс по отбору кандидатов в космонавты в РФ// Пилотируемые полеты в космос. – № 1(10). – 2014. – С. 29–40.
- [2] «Международные соглашения по признанию документов об образовании», Министерство образования и науки РФ, г. Москва. – 2009 г., 103 с.
- [3] Распоряжение, утвержденное правительством РФ 30 декабря 2015 г. № 2777-р «Перечень иностранных образовательных организаций, которые выдают документы об образовании и (или) о квалификации, признаваемых в РФ», 22 с.
- [4] Профессиональный отбор космонавтов. / Под ред. Крючкова Б.И., Харламова М.М., НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина. – 2009. – 209 с.
- [5] Власов П.Н., Курицын А.А., Крючков Б.И., Харламов М.М. Отбор в отряд космонавтов Роскосмоса 2017–2018 гг. Гагаринский сборник: материалы XLV общественно-научных чтений, посвященных памяти Ю.А. Гагарина. – Гагарин: БФ Мемориального музея Ю.А. Гагарина, – 2018 (в печати).
- [6] Маленченко Ю.И., Курицын А.А., Андреев Е.В. Итоги открытого конкурсного отбора космонавтов 2017–2018 гг. // Пилотируемые полеты в космос. – № 4(39). – 2018. – С. 119–123.

## REFERENCES

- [1] Krikalyov S.K., Kryuchkov B.I., Kharlamov M.M., Kotov O.V., Volkov S.A., Borisenko A.I., Pochuev V.I., Matveev V.P., Voitulevich L.V., Ren' V.A., Sokhin I.G., Koreshev I.V., Ryumin O.O., Samartsev V.Yu., Nazin V.G., Troitskiy S.S. Open Cosmonaut Candidate Selection Campaign in the Russian Federation in 2012 // Manned Space Flights. – No 1(10). – 2014. – pp. 29–40.
- [2] “International Agreements on Recognition of Academic Degree”, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Moscow. – 2009, p. 103.
- [3] Order, Approved by the Government of the Russian Federation on December 30, 2015. No 2777-p «List of Foreign Educational Organizations that Provide Academic Certificates Recognized in the Russian Federation», p. 22.
- [4] Professional Cosmonaut Selection. / Edited by Kryuchkov B.I., Kharlamov M.M. Yu.A. Gagarin Research & Test CTC. – 2009. – p. 209.
- [5] Vlasov P.N., Kuritsin A.A., Kryuchkov B.I., Kharlamov M.M. Selection to the Roscosmos Cosmonaut Corps in 2017–2018. /Proceedings of the XLV Social and Scientific Readings Dedicated to the Memory of Yu.A. Gagarin. – Gagarin City: Library Stock of Gagarin Memorial Museum, – 2018 (in press).
- [6] Malenchenko Yu.I., Kuritsin A.A., Andreev E.V. Results of the Open Cosmonaut Candidate Selection Campaign in 2017–2018. // Manned Space Flights.– No 4(39). – 2018, pp. 119–123.



## **ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ «РОСКОСМОС»**

### **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ имени Ю.А. ГАГАРИНА»**

Федеральное государственное бюджетное учреждение «**Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина**» при поддержке Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» 13–15 ноября 2019 года в Звездном городке проводит XIII Международную научно-практическую конференцию «**Пилотируемые полеты в космос**».

Рабочие языки конференции – русский и английский.

**Цель конференции:** оценка современного уровня исследований и практических результатов в области создания и применения пилотируемых космических аппаратов, отбора, подготовки, профессиональной деятельности космонавтов на борту пилотируемых космических аппаратов и послеполетной реабилитации.

**Программой конференции предусмотрена работа по следующим научным направлениям:**

- Секция 1 Проблемы и перспективы развития и применения пилотируемых космических систем
- Секция 2 Профессиональная деятельность космонавтов (отбор, подготовка, космический полет)
- Секция 3 Научно-прикладные исследования и эксперименты в космосе
- Секция 4 Технические средства подготовки космонавтов
- Секция 5 Проблемы эксплуатации центрифуг и их применение для подготовки космонавтов
- Секция 6 Внекорабельная деятельность
- Секция 7 Медицинские и психологические аспекты отбора, подготовки, деятельности экипажей в космических полетах и послеполетной реабилитации
- Секция 8 Новые информационные технологии в обеспечении подготовки космонавтов
- Секция 9 Молодежь для настоящего и будущего пилотируемой космонавтики

**Научная программа конференции предусматривает:**

- пленарное заседание;
- секционные заседания;
- стендовые доклады;
- научные дискуссии в форме «круглого стола» на тему «Настоящее и будущее пилотируемой космонавтики»;
- выставку.

К участию в конференции приглашаются российские и зарубежные космонавты, ученые, инженеры, конструкторы и специалисты смежных областей.

К началу работы конференции будет издан сборник материалов конференции.

Заявки на участие в работе конференции граждан Российской Федерации, работающих на отечественных предприятиях, в организациях, вузах и т.д., следует направлять на соответствующие электронные адреса председателей и секретарей секций не позднее **1 ноября 2019 года**.

Заявки на участие в работе конференции граждан Российской Федерации, представляющим интересы иностранных и международных организаций, а также некоммерческих организаций, выполняющих функции иностранных агентов, следует направлять на соответствующие электронные адреса председателей и секретарей секций не позднее **6 сентября 2019 года**.

Тезисы, представляемые на конференцию, должны быть оформлены в соответствии с требованиями, приведенными на сайте ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» [www.gctc.ru](http://www.gctc.ru) в разделе «XIII Международная научно-практическая конференция». Электронные версии тезисов направляются в адреса руководителей и секретарей соответствующих секций только один раз в окончательной редакции. Полученные тезисы Оргкомитетом не редактируются, ответственность за их содержание и оформление возлагается на авторов.

**Срок предоставления тезисов докладов – до 16 сентября 2019 года.**

Ознакомиться с подробной информацией об условиях проведения конференции и связанных с ней мероприятиях можно на сайте ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» [www.gctc.ru](http://www.gctc.ru) в разделе «XIII Международная научно-практическая конференция».

**Контактная информация оргкомитета:**

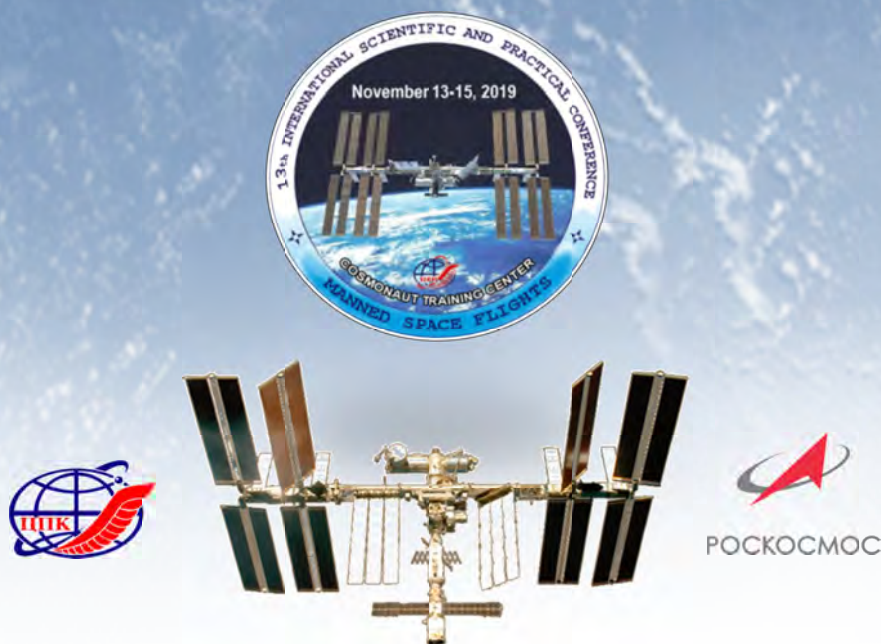
Гордиенко Олег Сергеевич – Тел.: +7 (495) 526-21-00

Кальмин Андрей Валентинович – Тел.: +7 (495) 526-37-31

Пенкин Александр Григорьевич – Тел.: +7 (495) 526-24-97

Факс: +7 (495) 526-26-12;

E-mail: [A.Kalmin@gctc.ru](mailto:A.Kalmin@gctc.ru); [A.Penkin@gctc.ru](mailto:A.Penkin@gctc.ru)



**ROSCOSMOS State Corporation for Space Activities „  
“Yu.A. Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center”  
Federal State Budgetary Organization**

The “Yu.A. Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center” Federal State Budgetary Organization with the assistance of the ROSCOSMOS State Corporation for Space Activities will hold the 13th International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights” November 13–15, 2019 in Star City.

The Conference languages are Russian and English.

**The purpose of the Conference** is to evaluate the current level of research and bottom lines in the sphere of building and usage of manned spacecraft as well as the selection, training and professional activity of cosmonauts aboard manned space vehicles and their post-flight rehabilitation.

**The Conference program provides for the following scientific topics:**

- Section 1 The challenges and prospects of the development and use of manned space systems
- Section 2 Professional activity of cosmonauts (selection, training, space flight)
- Section 3 Scientific-applied research and experiments in space
- Section 4 Technical facilities for cosmonaut training
- Section 5 Problems of the centrifuges operation and their use for cosmonaut training
- Section 6 Extra Vehicular Activity
- Section 7 Medical and psychological aspects of the selection, training, and in-flight activity of crews and their post-flight rehabilitation
- Section 8 Innovative information technologies for ensuring cosmonaut training

Section 9 Youth for the present and future of human space exploration

**The Conference scientific program provides for:**

- Plenary session;
- Workshops;
- Poster papers;
- Roundtable discussions on “The Present and Future of Human Space Exploration”;
- Exhibition.

The Russian and foreign cosmonauts and astronauts, scientists, engineers, designers, and experts in allied fields are invited to take part in the Conference.

A sourcebook will be published before the Conference begins.

Applications for participation in the conference from citizens of the Russian Federation working at domestic enterprises, organizations, universities, etc. should be sent to the appropriate e-mail addresses of chairpersons and secretaries of proper workshops no later than **November 1, 2019**.

Applications for participation in the conference from citizens of the Russian Federation representing the interests of foreign and international organizations as well as non-profit organizations acting as foreign agents should be sent to the appropriate e-mail addresses of chairpersons and secretaries of proper workshops no later than **September 6, 2019**.

The submitted abstracts should meet the requirements available on the site of the FSBO “Gagarin R&T CTC” [www.gctc.ru](http://www.gctc.ru) in the section “13th International Scientific and Practical Conference”. Electronic versions of abstracts should be forwarded to chairpersons and secretaries of proper workshops only once in the final formulation. The abstracts received are not edited, the responsibility for the content and design of abstracts lies on authors.

**The deadline for abstract submission is September 16, 2019.**

Detailed information on the Conference conditions and related events is available on the site of the FSBO “Gagarin R&T CTC” [www.gctc.ru](http://www.gctc.ru) in the section “13th International Scientific and Practical Conference”.

**Contacts:**

Gordienko Oleg Sergeevich – tel.: +7 (495) 526-21-00

Kalmin Andrey Valentinovich – tel.: +7 (495) 526-37-31

Penkin Aleksandr Grigorievich – tel.: +7 (495) 526-24-97

Fax: +7 (495) 526-26-12;

E-mail: [A.Kalmin@gctc.ru](mailto:A.Kalmin@gctc.ru); [A.Penkin@gctc.ru](mailto:A.Penkin@gctc.ru)



УДК 629.78.072.8

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ КОСМОНАВТОМ-ОПЕРАТОРОМ ТОЧЕЧНОЙ ЦЕЛИ НА ПРОЛЕТЕ**

В.М. Жуков

Докт. техн. наук, профессор В.М. Жуков  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Разработана компьютерная динамическая имитационная модель (ДИМ) визуально-инструментального наблюдения (ВИН) космонавтом точечной цели с помощью панкратического оптического прибора. ДИМ является центральной моделью комплекса имитационных моделей (КИМ), который рассчитывает для нее входные параметры (текущие баллистические данные сближения и параметры внешней среды). В основу ДИМ положена гипотеза о соответствии закона распределения точек фиксации взгляда нормальному двумерному закону положения точечной цели в эллипсе вероятностей прогнозируемого положения космического объекта на орбите.

**Ключевые слова:** вероятность обнаружения, космонавт-оператор, визуальный поиск, точечная цель, динамическая имитационная модель, зрительный анализатор, точка фиксации взгляда, предвидение, графическая визуализация, оптимизация.

### **Dynamic Simulation Model of Visual and Instrumental Observation of a Point Target by a Cosmonaut-Operator While Flying-By. V.M. Zhukov**

The computer-based dynamic simulation model (DSM) of visual and instrumental observation (VIO) of a point target by a cosmonaut using a pancratic observation device was developed. The DSM is the core model of the simulation models complex (SMC), which calculates the input parameters for it (current ballistic data of rendezvous and environmental parameters). The DSM is based on the hypothesis of the correspondence between the law of the distribution of points of staring and the normal two-dimensional law of the position of a point target in the ellipse of the probabilities of the predicted position of a space object in orbit.

**Keywords:** probability of detecting, cosmonaut-operator, visual searching, point target, dynamic simulation model, visual analyzer, point of staring, prediction, graphic visualization, optimization.

Космические объекты (КО) с учетом специфики операций ВИН на пролете с борта пилотируемых космических аппаратов (ПКА) можно разделить на следующие категории: действующие космические аппараты (КА), «спящие» КА, мини-КА, «космический мусор», объекты астероидно-кометной опасности. Актуальность проблемы обнаружения КО на околоземных орбитах

обусловлена необходимостью мониторинга астероидно-кометной опасности и возрастающего объема «космического мусора». В ряде стран ведутся активные НИОКР по созданию и развертыванию оптико-электронных средств контроля космического пространства (ККП) космического базирования в интересах обеспечения безопасности функционирования космических систем. Выполнение космических экспериментов (КЭ) на автоматических КА связано с рядом ограничений, к которым относятся сроки функционирования КА, сложность реализации управляемых КЭ и др. КЭ на орбитальных станциях не имеют строгих ограничений по времени проведения исследований.

Сложность операции ВИН КО с борта ПКА на пролете обусловлена движением объектов с первой космической скоростью, периодической сменной теневой и освещенной частями орбиты и рядом факторов внешней обстановки, имеющих стохастический характер и изменяющихся в функции времени сближения ПКА и КО. Операция ВИН КО недостаточно изучена. Продолжительность операции ВИН с дальности наблюдения 1000 км составляет порядка 90 с, что требует ее исследования с детальностью на уровне времени реакции космонавта.

Исследования зрительного анализатора (ЗА) человека как системы «глаз–мозг» далеки от завершения. Они выполняются теоретическими, экспериментальными методами и с помощью математических моделей. Известное преимущество имитационного моделирования заключается в возможности учета воздействия практически неограниченного числа факторов и воспроизведения динамики исследуемых процессов в функции времени. Однако реализация этого преимущества связана с большой трудоемкостью разработки имитационных моделей и необходимостью подтверждения их адекватности.

### **Обзор методов исследования зрительного анализатора**

В течение последних десятилетий исследования ЗА человека-оператора выполнялись различными методами. Глубина исследований изменялась в широком диапазоне: от исследования ЗА как «черного ящика» до исследования системы «глаз–мозг» с помощью моделей на уровне сетчатки глаза и нейронов мозга [14, 20].

На МКС выполняется КЭ «Виртуал» [16] по программе сотрудничества ГНЦ РФ – ИМБП РАН и немецкого космического агентства DLR. Исследуются взаимосвязи между показателями следящей функции глаз, зрительно-мануального слежения и состоянием вестибулярной функции космонавта в условиях коротких и длительных космических полетов. Используется специально разработанное устройство ЕТД для регистрации движения глаз в тестовых задачах наблюдения (на фиксированном расстоянии до экрана). Предварительные результаты показывают, что серьезных изменений в работе глаз в невесомости не обнаружено, однако время распознавания объектов может возрастать в три раза.

В работе [13] рассмотрены вопросы применения малых оптических инструментов в задачах наблюдения звездного неба и ИСЗ. Во время перехода от дневного зрения к ночному чувствительность глаз резко возрастает (вследствие смены механизма дневного зрения на ночной). При этом проявляются эффект Галисо (повышение чувствительности к красным лучам относительно синих) и эффект Пуркиньи (возрастание чувствительности к синим лучам после завершения перехода к ночному зрению). Показано, что при наблюдении ярких точечных целей разрешающая способность глаза вследствие иррадиации на сетчатке может снижаться в два раза, т.е. до 2 угловых минут.

Действие механизма ночного зрения исследовалось также в работах Луизова А.В. [8, 9]. Показано, что чувствительность глаза достигает максимального значения через 50–60 минут пребывания в темноте, экспериментально установлена зависимость чувствительности от времени темновой адаптации ЗА (зрачок при темновой адаптации может изменяться в диаметре от 2 до 8 мм, при этом световой поток увеличивается в 16 раз).

В работе [5] исследовались спонтанные движения глаз, фиксационные саккады, слежение глаз за точечной мишенью при перемещении объекта на безориентирном поле и на поле с помехами. Исследования проведены на орбитальных станциях с участием 31 космонавта. Показано, что в космическом полете структура саккадического компонента реакции слежения сохраняется, однако в период адаптации к невесомости (6–8 суток) у 40 % космонавтов наблюдается распад структуры реакции плавного слежения, т.е. глаз перемещается за стимулом микро- или макросаккадами. В условиях длительных космических полетов у 46 % космонавтов периодически регистрируются нарушения в структуре плавного слежения – оно сменяется саккадическим.

По данным специалистов США [18], пребывание в космосе негативно влияет на сетчатку и зрительные нервы глаз. У значительной части астронавтов отмечалось помутнение зрения, возникновение дальновзоркости, появление пелены. Исследуются вопросы медикаментозного купирования отрицательных эффектов.

КЭ на станции «Мир» по ВИН КО на пролете с помощью оптического визира ОД-5 [3] показал недостаточную эффективность операции и ограниченные возможности натурального эксперимента в ее исследовании. В частности, важный вопрос о выборе оптимальной кратности увеличения оптического прибора на фазе обнаружения (в диапазоне кратностей увеличения 1,5–90) остался открытым.

Книга Дж. Ллойда [7] содержит обзор экспериментальных и теоретических методов и моделей ЗА. Отмечено, что результаты их применения иногда противоречивы. Установлен ряд закономерностей поиска целей на экране монитора и с помощью оптических средств.

По мнению некоторых авторов, стратегия обзора незнакомого сюжета формируется подсознательно, однако выдвинута и подтверждена гипотеза о том, что в случае неподвижного изображения для каждого распределения вероятности появления объекта существует оптимальное распределение поисковых фиксаций взгляда, обеспечивающее минимальное среднее время поиска. К экспериментально полученным результатам можно отнести следующие эмпирические положения количественного порядка, которые использованы в разработанной модели:

- средняя величина саккадического скачка глаза изменяется в зависимости от сюжета и уменьшается при сокращении поля зрения;
- изменение времени фиксаций в пределах 0,578–0,307 с соответствует изменению поля зрения в диапазоне 3–52° и среднего углового расстояния между точками фиксации в пределах 0,87–6,30°;
- при наблюдении в поле зрения (ПЗ) порядка 30° средняя продолжительность фиксаций составляет 0,28 с, а среднее расстояние между точками фиксации – 8,6°;
- горизонтальное движение цели приводит к меньшему ухудшению видения, чем вертикальное;
- априорная информация о наличии и движении цели в ПЗ существенно увеличивает возможность решения зрительной задачи;
- минимальное время обнаружения характерно для объектов, отстоящих от центра круглого ПЗ примерно на половину его радиуса;
- увеличение ПЗ сверх 9° оправдано, когда большая величина ПЗ используется для ориентации и навигации;
- применение больших кратностей прибора наблюдения ограничено увеличением наблюдаемой угловой скорости цели и «смазом» ее изображения, а также узким ПЗ прибора, которое существенно затрудняет сопровождение движущейся цели.

Рассмотренные в [7] модели считаются удовлетворительными при выполнении ряда ограничений, к которым относят: время поиска не более 30 с, контраст и размер объекта не изменяется за время поиска, наблюдатель применяет метод случайного поиска.

Вопросы количественной оценки зрительного восприятия рассмотрены в работах [2, 6, 7, 8, 9, 10, 15]. Единичный акт восприятия включает время фиксации и длительность одного скачка взгляда, которые в среднем составляют соответственно 0,3 с и 0,04 с. В точках фиксации глаз совершает мелкие движения (микросаккады, тремор, дрейф), которые достаточно трудно учесть в моделях ЗА.

Полезным в разработке теории поиска представляется введение понятия «оперативное поле зрения» (ОПЗ) [1]. ОПЗ определяет часть ПЗ, в пределах которой осуществляется элементарный зрительный акт за одну фиксацию взгляда (обнаружение, различение). Установлено [4], что априорное знание человеком-оператором параметров сигнала (наблюдение с предвидением)

существенно повышает вероятность обнаружения цели. В статье [12] разработана модель ЗА человека, представляющая собой математическую модель сетчатки и морфо-функциональную модель нейрона.

Возможности исследования операций ВИН реальных КО в натурном эксперименте ограничены [3]. Движение КА-наблюдателя и КО с первой космической скоростью обуславливает кратковременность наблюдения на пролете. Возможности регистрации параметров ЗА космонавта-наблюдателя, параметров относительного движения и фоноцелевой обстановки в космическом полете практически не реализуемы, а возможности набора даже малой выборки сеансов наблюдения КО требуют длительного времени.

Создание достаточно строгой теории визуального обнаружения связано с трудностями количественного учета (в аналитических моделях и в экспериментах) множества психофизиологических параметров человека-оператора, факторов внешней среды, а также характеристик средства наблюдения. Большинство разработанных и исследованных моделей ЗА относятся к наблюдению целей на фиксированной дальности в ПЗ порядка  $30^\circ$  при располагаемом времени на обнаружение порядка 30 с.

В рамках теории свободного поиска различными авторами разработаны экспоненциальные модели поиска. Отмечено, что модели этого класса рассматриваются как удовлетворительные при выполнении ряда ограничений: контраст и размер объекта не изменяются за время поиска, наблюдатель применяет случайный метод поиска и др. [7, 11, 15].

### Постановка задачи

Общие требования модели заключались в обеспечении компьютерной реализации алгоритма поиска и обнаружения КЦ в динамике сближения КО.

Анализ моделей ЗА и реальных условий ВИН космических целей (КЦ) позволил нам выдвинуть гипотезу о соответствии закона распределения точек фиксации взгляда космонавта-наблюдателя в ПЗ оптического прибора двумерному нормальному закону распределения положения КЦ в эллипсе вероятностей ее прогнозируемого положения на орбите. Цель исследований заключалась в разработке ДИМ для прогнозирования вероятности обнаружения точечной цели в условиях динамики сближения КА (на основе принятой гипотезы) с учетом характеристик оптического средства наблюдения, характеристик КЦ и уровней факторов внешней среды.

Компьютерная ДИМ предназначена для исследования процесса поиска и обнаружения КЦ космонавтом в ПЗ оптического прибора и установления алгоритмической зависимости вероятности обнаружения КЦ на пролете (для основных способов наведения: с упреждением и «в точку») от параметров: ЗА космонавта-оператора, оптического прибора, КЦ, баллистики относительного движения КА-наблюдателя и КЦ, фона и источников засветки объектива прибора наблюдения. Искомую зависимость можно представить в формализованном виде:

$$P_{об} = f \{ \langle E_{о пор}, m_{гл}, \bar{\sigma}_{гл}, d_{гл}, t_{зад ад} \rangle, \langle D_{вх}, D_{вых}, k_{об}, k_{бл}, \Gamma_{об}, 2\beta_{об}, 2\beta_{опз} \rangle, \langle S_{ц}, k_{отр}, m, d_k \rangle, \langle \rho_{ин}, \rho_i, \omega_{лв i}; S_1, S_2 \rangle, \langle L_{ф}, \varphi_C, \varphi_L, \varphi_3 \rangle \};$$

где:

– параметры ЗА:  $m_{гл}$ ,  $\bar{\sigma}_{гл}$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение саккадического скачка глаза при двумерно нормальном распределении  $N(m_{гл}, \bar{\sigma}_{гл})$ ;  $d_{гл}$  – диаметр зрачка глаза,  $t_{зад ад}$  – заданное время темновой адаптации ЗА,  $E_{о пор}$  – пороговая чувствительность ЗА;

– параметры оптического прибора:  $D_{вх}$ ,  $D_{вых}$  – диаметры апертуры и выходного зрачка прибора,  $\Gamma_{об}$  – кратность увеличения прибора,  $k_{об}$  – коэффициент светопропускания,  $k_{бл}$  – коэффициент бленды,  $2\beta_{об}$  – угол поля зрения,  $2\beta_{опз}$  – угол оперативного ПЗ;

– параметры КЦ:  $S_{ц}$  – площадь мишени КЦ,  $m^2$ ;  $m$  – блеск цели в звездных величинах,  $E_{ц}$  – блеск цели,  $k_{отр}$  – коэффициент отражения;

– баллистические параметры:  $\rho_{ин}$ ,  $\rho_i$  – дальность начала наблюдения и текущая дальность;  $\omega_{лв i}$  – текущая угловая скорость линии визирования цели;

– способы наведения ПЗ с упреждением и «в точку» –  $S_1$ ,  $S_2$ ;

– параметры фона и засветки объектива Солнцем, Луной и Землей:  $L_{ф}$ ,  $\varphi_C$ ,  $\varphi_L$ ,  $\varphi_3$ .

### Описание модели

ДИМ поиска и обнаружения КЦ точечной цели является центральной моделью комплекса имитационных моделей (КИМ) «Барбет» [3], который включает генератор случайных чисел для реализации метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) и баллистико-навигационный блок, который рассчитывает и выдает на вход ДИМ значения дальности до КЦ, угловой скорости линии визирования и угловой скорости движения цели в ПЗ прибора наблюдения (в функции времени сближения ПКА и КО с дискретностью 0,34 с):  $\rho_i = f(t)$ ,  $\omega_{лв i} = f(t)$ . Блоки управления и графической поддержки обеспечивают реализацию заданного числа прогонов модели, расчет и индикацию на экране монитора текущих значений и результатов моделирования операции.

Разработанный алгоритм отражает причинно-следственные и временные связи процесса поиска и обнаружения КЦ на пролете. Алгоритм соответствует логике взаимодействия модулей ДИМ, взаимодействия с КИМ, обращения к генератору случайных чисел и модулю графической поддержки, останавливает моделирование по заданным критериям срыва операции. Сложность алгоритма обусловлена значительным количеством условий выбора альтернативных решений.

#### *Модуль темновой адаптации зрительного анализатора*

Модуль предназначен для вычисления величины порогового блеска ЗА к концу заданного периода темновой адаптации. Опыт космических полетов

и КЭ по наблюдению КЦ показывает, что перед темновой адаптацией экипаж работает в кабине, где яркость элементов интерьера и иллюминаторов изменяется в диапазоне:

$$(10^{-3} \leq L_o \leq 10^3) \text{ кд/м}^2.$$

Величина порогового блеска вычисляется по формуле [8]:

$$E_{o\text{пор}} = 1,6 \times 10^{-7} \times L_o^{\lambda_o},$$

где  $L_o = 30 \text{ кд/м}^2$ ; для других яркостей  $E_{o\text{пор}}$  вычисляется с помощью выражений:

$$\begin{aligned} \lambda_o &= 0,6 + 0,1 L_o \text{ при } L_o < 30 \text{ кд/м}^2, \\ \lambda_o &= 0,75 \text{ при } L_o \geq 30 \text{ кд/м}^2. \end{aligned}$$

Зависимость порогового блеска от длительности темновой адаптации получена экспериментально и может быть аппроксимирована выражением [9]:

$$\lg E = c_1 \times \exp\{-\lambda_1 \cdot t_r\} + c_2 \cdot \exp\{-\lambda_2 t_{\text{зад}}\},$$

где  $t_{\text{зад}}$  – заданное время темновой адаптации ЗА,  $c_1 = -1,8857$ ,  $c_2 = 3,7253$ ,  $\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_2 = 0,1259$ ,  $E$  – в мклк. Решив уравнение (5) относительно  $t_r$ , получим:

$$t_r = [\ln c_2 - \ln (\lg E_o - c_1)] / \lambda_2.$$

При заданном космонавту в программе полета времени темновой адаптации ( $t_{\text{зад}}$ ) можно определить пороговый блеск в конце адаптации ( $E_k$ ) с помощью эмпирической формулы [9]:

$$E_k = 10^{z_k} [\text{мклк}],$$

где  $z_k = c_1 + c_2 \cdot \exp\{-\lambda_2 \cdot t_{\text{зад}}\}$ .

#### **Модуль движения цели в поле зрения**

Величина ПЗ прибора наблюдения определяется условием накрытия эллипса вероятностей положения цели на орбите. Имитация движения цели в ПЗ осуществляется в системе координат ОХУ, начало которой совпадает с центром ПЗ прибора в плоскости цели. Положение точечной цели определяется путем вычисления ее координат на каждом интервале дискретизации времени наблюдения ( $\Delta t = 0,34 \text{ с}$ ) в плоскости, перпендикулярной ЛВ, на дальностях  $\rho_i$  по формуле:

$$X_{\text{ц}i+1} = X_{\text{ц}i} + \rho_i \cdot \text{tg}(0,34 \cdot \omega_{\text{лв}i}), i = 1, \dots, n,$$

где  $\rho_i$  и  $\omega_{\text{лв}i}$  – текущие дальность и угловая скорость линии визирования (рассчитываются в баллистическом блоке КИМ).

Эта зависимость в совокупности с операциями розыгрыша положения цели в вертикальной плоскости, вычисления текущего значения линейного радиуса ПЗ и момента входа КЦ в ПЗ представляет математический аналог динамики движения КЦ в пространстве предметов.

### **Модуль поиска цели в поле зрения**

Поиск КЦ осуществляется в ПЗ прибора наблюдения, которое накрывает эллипс вероятностей положения КЦ на орбите. Размеры эллипса вероятностей зависят от глубины прогнозирования положения КЦ на орбите системой контроля космического пространства (от 2 до 20 витков КО). При этом на дальности начала наблюдения порядка 1000 км большая ось эллипса может достигать величины порядка 250 км.

В космическом полете имеется возможность ориентировать ПКА и прибор наблюдения (по предварительному целеуказанию (ЦУ) от ЦУПа) таким образом, что КО в ПЗ оптического прибора будет двигаться вдоль выбранной оси координат. Модуль рассчитывает движение цели в ПЗ для способов наведения с упреждением и «в точку». Используется система координат ОХУ, начало которой совпадает с центром ПЗ прибора наблюдения в плоскости цели, перпендикулярной линии визирования, а ось ОХ направлена по вектору скорости цели. В ЦУ космонавту сообщаются исходные параметры операции: баллистические параметры ПКА и КЦ, углы разворота оптического прибора, размеры эллипса вероятностей, ориентировочные размеры КЦ, навигационные звезды-ориентиры, способ наведения и ожидаемое начальное положение КЦ (на входе или в центре ПЗ), расчетное время появления цели в ПЗ и направление ее движения.

При наведении с упреждением в модели разыгрывается исходное положение цели на входе в ПЗ, т.е. значение координаты  $\pm Y$  на прямой, касательной к окружности ПЗ, в соответствии с одномерным нормальным законом. Продвижение цели в ПЗ моделируется до ее обнаружения или до выхода из ПЗ. Стратегия поиска может включать две фазы. Первая фаза – поиск на входе в ПЗ (концентрация внимания космонавта в левой половине ПЗ). Вторая фаза – распространение поиска на все ПЗ, если цель не обнаружена на площади левой его половины. Розыгрыш положения точек фиксации взгляда в ПЗ окуляра осуществляется также методом статистических испытаний в соответствии с гипотезой о двумерном нормальном законе распределения точек фиксации взгляда, обусловленных величиной математического ожидания (МО) скачков взгляда, равного половине радиуса ПЗ, и среднеквадратическим отклонением (СКО), равным  $1/6$  радиуса ПЗ,  $-N(m_{\text{гл}} = r_{\text{пз}}/2, \sigma_{\text{гл}} = r_{\text{пз}}/6)$ . В плоскости КЦ координаты точек фиксации взгляда рассчитываются по формулам, аппроксимированным для машинной реализации [17]:

$$\begin{aligned} X_{\text{гл } i} &= \sigma_x \sqrt{2} \cdot (\sum_{i=1}^6 R_i - 3) + \rho_i \cdot \text{tg}(m_{\text{гл } x} \cdot \Gamma_{\text{об}}); \\ Y_{\text{гл } i} &= \sigma_y \sqrt{2} \cdot (\sum_{i=1}^6 R_i - 3) + \rho_i \cdot \text{tg}(m_{\text{гл } y} \cdot \Gamma_{\text{об}}), \end{aligned}$$



где  $\Gamma_{об}$  – кратность увеличения оптического прибора,  $m_{гн}$  и  $\sigma_{гн}$  – математическое ожидание и СКО величины скачка глаза (в плоскости КЦ в км),  $r_{пз}$  – радиус ПЗ,  $R_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) – случайное равномерно распределенное на интервале  $0 \dots 1$  число.

Способ наведения «в точку» моделируется путем розыгрыша начального положения цели в центре ПЗ, а поиск осуществляется по всему ПЗ. Графическая реализация способов поиска показана на рис. 1.

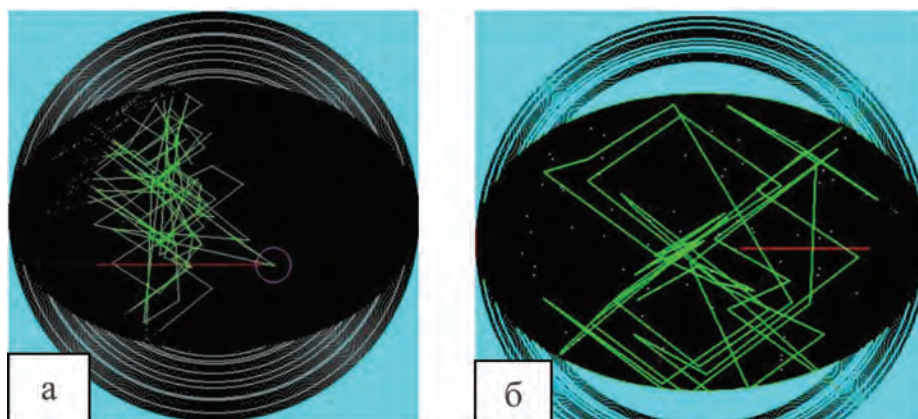


Рис. 1. Скриншот визуализации процесса поиска и обнаружения точечной цели:

- а) процесс при наведении оптического прибора с упреждением (красная линия – трасса движения цели, зеленые линии – саккадические скачки глаза, окружность в точке обнаружения – ОПЗ в плоскости цели, concentric окружности отображают сокращение линейного ПЗ в процессе сближения, черный фон индицирует эллипс вероятностей положения цели на орбите);  
 б) процесс поиска при наведении оптического прибора «в точку»

Восприятие видеoinформации происходит в ОПЗ, которое у различных наблюдателей изменяется от  $2^\circ$  до  $20^\circ$  в зависимости от многих факторов. В качестве среднего значения принята величина  $4,5^\circ$  [7].

Измеряя на каждом шаге дискретизации расстояние между положением цели и точкой фиксации взгляда ( $D$ ) и сравнивая его с радиусом ОПЗ в плоскости цели, определяем факт попадания цели в ОПЗ ( $D < r_{опз}$ ). Цикл поиска в модели повторяется до тех пор, пока цель не окажется в ОПЗ, а ее блеск будет выше порогового (рассчитывается в отдельном модуле). Если блеск ниже порога обнаружения, поиск продолжается, а цель может быть обнаружена за счет возрастания блеска в результате сближения КО. Выход необнаруженной цели из ПЗ считается срывом обнаружения.

#### **Модуль фона**

Модуль предназначен для вычисления суммарной яркости фона звездного неба на зрачке человека-оператора, которая складывается из яркости фона, на котором наблюдается цель, и яркости боковой засветки объектива

Солнцем, Луной и отраженным от Земли солнечным излучением. Засветки весьма опасны – они могут привести к срыву операции наблюдения. Яркость боковой засветки вычисляется по формуле [9]:

$$L_{\text{засв}} = E (\cos \varphi / p k_{\text{от}}) \cdot b,$$

где  $E$  – освещенность площадки, расположенной перпендикулярно потоку излучения от источника засветки,  $\varphi$  – угол боковой засветки,  $k_{\text{от}}$  – коэффициент ослабления бленды,  $b$  – суммарный коэффициент яркости оптических деталей иллюминатора (например, для одностекольного иллюминатора он равен 0,005).

Яркость фона на зрачке вычисляется по формуле [9]:

$$L_{\text{ф зр}} = (L_{\text{ф}} + L_{\text{засв}}) \cdot k_{\text{об}},$$

где  $k_{\text{об}}$  – коэффициент светопропускания прибора наблюдения.

Приведенная формула представляет собой математический аналог фона в пространстве изображений.

#### **Модуль блеска цели**

Модуль предназначен для вычисления текущего значения блеска цели в зависимости от дальности, текущего времени сближения, размеров цели, коэффициента отражения ее поверхности, фазовых углов источников подсвета и угловой скорости движения ЛВ.

Математическим аналогом блеска КЦ на входе объектива СН в общем случае служит функция, которая рассчитывается алгоритмически:

$$E_{\text{ц}} = E_{\text{ц}} (\rho; E_{\text{с}}, E_{\text{з}}, E_{\text{л}}, E_{\text{н}}, S_{\text{ц}}, k_{\text{отр}}, \varphi_{\text{с, л, з}}, \omega_{\text{лв}}, t_{\text{н}}),$$

где  $\rho$  – дальность до цели;  $E_{\text{с}}, E_{\text{з}}, E_{\text{л}}$  – освещенность КО Солнцем, Землей и Луной;  $S_{\text{ц}}$  – площадь миделя КЦ;  $k_{\text{отр}}$  – коэффициент отражения КЦ;  $\varphi_{\text{с, л, з}}$  – фазовые углы Солнца, Луны и Земли;  $\omega_{\text{лв}}$  – угловая скорость поворота ЛВ;  $t_{\text{н}}$  – текущее время наблюдения.

Широко используется метод представления воздушных и космических целей эквивалентным по объему шаром. По сообщенному в ЦУ значению  $S_{\text{ц}}$  определяем радиус эквивалентного шара:

$$r_{\text{ш}} = S_{\text{ц}} / \pi.$$

Блеск цели-шара, освещенного Солнцем, на входе объектива прибора вычисляем по формуле [19]:

$$E_{\text{ц max}} = 2/3 \cdot k_{\text{отр}} \cdot (r_{\text{ш}} / \rho)^2 \cdot (E_{\text{с}} / \pi) \cdot [\sin \varphi_{\text{с}} + (\pi - \varphi_{\text{с}}) \cdot \cos \varphi_{\text{с}}].$$

Если высота орбиты ПКА в рабочей зоне меньше или равна высоте орбиты КЦ, то необходимо учитывать составляющую блеска цели, обуслов-

ленную подсветкой Земли. Освещенность КЦ Землей достигает 40 % от ее освещенности Солнцем, т.е.

$$E_3 = 0,4 \cdot E_{ц \max}$$

Суммарная освещенность КЦ Солнцем и солнечным светом, отраженным от Земли и Луны, равна:

$$E_{\Sigma} = E_c + E_3 + E_{л}$$

Блеск цели на входе объектива определяем по формуле [19]:

$$E_{ц \text{ вх}} = 2/3 \cdot k_{отр} \cdot (r_{ш} / \rho_i)^2 \cdot E_{\Sigma}$$

Блеск цели на зрачке глаза вычисляется с учетом выбранной кратности увеличения панкратического прибора, его параметров и положения цели относительно центра ПЗ по формуле [19]:

$$E_{гл} = \Gamma_{об}^2 \cdot \left( \frac{d_{вых}}{d_{вх}} \right) \cdot k_{об} \cdot E_{ц} \cdot \cos(\gamma_{ц} \cdot \Gamma_{об}),$$

где  $\Gamma_{об}$  – кратность увеличения оптического прибора при обнаружении,  $d_{вх}$  и  $d_{вых}$  – диаметры объектива и выходного зрачка прибора,  $k_{об}$  – коэффициент светопропускания прибора,  $\gamma_{ц}$  – угол отклонения цели от оптической оси прибора.

#### **Модуль обнаружения цели в оперативном поле зрения**

Модуль предназначен для вычисления порога обнаружения точечной цели космонавтом-оператором в зависимости от яркости фона и угловой скорости движения изображения цели в ОПЗ. В модуле вычисляются значения времени инерции зрения ( $t_{гл}$ ) и диаметр зрачка глаза ( $d_{гл}$ ) для заданной яркости фона на зрачке ( $L_{зр}$ ) по аппроксимирующим формулам [9]:

$$t_{гл} = 0,13 - [0,08 \cdot \text{th}(L_{зр} + 1)],$$

$$d_{гл} = 5 - [3 \cdot \text{th}(0,4 \cdot L_{зр})],$$

где  $\text{th}$  – гиперболический тангенс.

Величина диаметра зрачка глаза используется для его сравнения с выходным зрачком окуляра ( $d_{вых}$ ) с целью выбора сменного равнозрачкового окуляра, соответствующего заданному времени темновой адаптации.

Время пребывания движущейся с угловой скоростью  $\omega_{лв}$  цели в ОПЗ ( $2\beta_{опз}$ ) вычисляем по формуле:

$$t_{ц} = 2\beta_{опз} / \Gamma_{об} \cdot \omega_{лв}$$

Значение эффективного порогового блеска определяется по формуле:

$$E_{пор \text{ эф}} = (1 + t_{гл} / t_{ц}) \cdot E_{о \text{ пор}}$$

где  $E_{\text{о пор}}$  – пороговый блеск для ночного, сумеречного или дневного зрения (в зависимости от  $L_{\text{ф зр}}$ ) в соответствующих диапазонах яркости [8]:

$$\{10^{-7} \leq L_{\text{ф зр}} \leq 10^{-3}; 10^{-3} \leq L_{\text{ф зр}} \leq 30; 30 \leq L_{\text{ф зр}} \leq 4 \cdot 10^3\} \text{ кд/м}^2.$$

Критерий обнаружения цели в ОПЗ – превышение величины блеска цели (на зрачке) уровня эффективного порогового блеска:

$$E_k > k \cdot E_{\text{пор эф}},$$

где  $k$  – заданное отношение сигнал/шум.

В практической астрономии блеск измеряется в звездных величинах. Пересчет блеска цели из световых единиц в звездные величины выполняем по известной формуле для визуального наблюдения:

$$m_{\text{гл}} = -2,5 \cdot \log E_{\text{гл}} - a,$$

где  $a$  – ноль-пункт шкалы звездных величин (равен блеску звезды Вега + 0,03<sup>m</sup>).

#### **Критерии срыва обнаружения**

В модель введены следующие критерии срыва обнаружения:

- выход необнаруженной цели из ПЗ, радиус положения цели больше радиуса ПЗ ( $RPC > RPZR$ );
- выделенное время на темновую адаптацию ЗА космонавта меньше требуемого времени ( $T_{\text{ад}} < T_{\text{ад тр}}$ );
- располагаемое время на поиск и обнаружение меньше 1 с ( $T_{\text{об расп}} < 1 \text{ с}$ );
- блеск цели на зрачке глаза ниже порога восприятия ( $E_{\text{гл}} < E_{\text{пор эф}}$ ).

На рис. 2 показан пример табличной визуализации параметров поиска цели на момент срыва обнаружения по критерию « $RPC > RPZR$ ».

Анализ данных таблицы и геометрии поиска позволяет установить вероятную причину срыва обнаружения.

СРЫВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ $RPC > RPZR$	
Время	28.900
XC	18.674
YC	-95.539
XGL	-79.386
YGL	23.608
RPZR	94.145
D	153.370
ROPZ	12.678_

Рис. 2. Скриншот визуализации параметров срыва обнаружения точечной цели по критерию « $RPC > RPZR$ » ( $RPC$  – радиус положения цели в ПЗ,  $RPZR$  – радиус ПЗ в плоскости цели;  $XC$ ,  $YC$  – координаты положения цели в системе координат с началом в центре ПЗ;  $XGL$ ,  $YGL$  – координаты положения точки фиксации глаза;  $D$  – расстояние между целью и точкой фиксации взгляда,  $ROPZ$  – текущее значение радиуса ОПЗ глаза в плоскости цели, км)

### Модуль оценки эффективности операции обнаружения

Основным показателем эффективности является вероятность обнаружения КЦ. В качестве частных показателей эффективности выбраны время обнаружения цели и пороговая звездная величина, которые зависят от кратности увеличения оптического прибора, параметров ЗА космонавта и параметров фона и относительного движения КО. Для анализа этих зависимостей результаты вычислительных процедур выводятся на экран монитора в форме таблицы, которая визуализирует текущие значения параметров в функции времени сближения КО на пролете с дискретностью 0,34 с (рис. 3). Текущие значения индицируются для каждого прогона модели. Оценка вероятности вычисляется на основе реализации заданного числа прогонов модели как отношение числа реализаций с положительным исходом (M) к общему числу реализаций (N).

Текущие значения параметров операции			
Время (с)	10.20	Дальность (км)	900.95
Угл. скорость (о/с)	.222		
Геометрические параметры		Параметры освещенности	
XC (км)	3.125	Порог звезд. вел.	(m) 4.947
YC (км)	60.982	Зв. вел. Ц на зрачке	(m) 4.541
XGL (км)	-12.241	Порог знач. блеска Ц	(лк) .269E-07
YGL (км)	60.481	Блеск Ц на зрачке	(лк) .391E-07
D (км)	15.374	Зв. вел. Ц на входе	(m) 5.512
RDPZ (км)	15.723	Блеск Ц на входе	(лк) .173E-07
RPZR (км)	117.264	Яркость фона на вх. (кд/кв.м)	.100E-01
RPC (км)	61.062	Яркость фона на зр. (кд/кв.м)	.230E-02
Обнаруж. по критерию		N1 = 300	N = 300
Срыв обн. по критерию			
Требуем. вр. адаптации (мин) =			
Ср. угол отклонения Ц (град) =	3.376	Ср. время обн. (с) =	9.570
<b>M = 182</b>	<b>L = 117</b>	<b>Оценка вероятн. обн. = .610</b>	

Рис. 3. Скриншот визуализации текущих значений параметров фазы обнаружения космонавтом-оператором точечной космической цели (N1 и N – числа заданных и реализованных прогонов модели, M – количество обнаружений, L – количество срывов обнаружения; «средний угол отклонения Ц» – отклонение цели от центра ПЗ прибора на момент обнаружения; «Оценка вероятности обнаружения» – в данном примере равна 0,610; «Требуемое время темновой адаптации» – вычисляется, если заданное время было не достаточным)

Табличное представление текущих значений параметров операции соответствует процессу в плоскости цели и в реальном пространстве сближения. Единицы измерений: пространственные параметры – в км, время – в секундах, угловая скорость линии визирования – в °/с; блеск цели – в звездных величинах и лк; яркость фона – в кд/м<sup>2</sup>.

Обнаружение с предвидением реализуется в два этапа: за счет ЦУ экипажу с исходными данными для моделирования и за счет результатов моделирования с наглядной визуализацией процесса обнаружения. Способ

наведения с упреждением целесообразно использовать для обнаружения слабо светящихся целей, а способ наведения «в точку» – для наблюдения КЦ, блеск которых, по данным ЦУ, существенно превышает порог обнаружения ЗА. В наиболее сложном случае, когда блеск цели при входе в ПЗ ниже порога обнаружения, табличное представление процесса позволяет определить момент превышения порогового значения блеска за счет сближения и движения цели к центру ПЗ, что дает возможность космонавту априори уточнить стратегию поиска.

### Обсуждение результатов

В соответствии с общей методологией математического моделирования к моделям всех восьми классов предъявляются два противоречивых требования: точность и простота. При разработке ДИМ были приняты следующие основные упрощения:

1. Задание фазовых углов Солнца, Луны, Земли и яркости фона выполняется вне зависимости от параметров орбиты цели, что обеспечивает на этапе исследования модели установление зависимости вероятности обнаружения цели от уровней отдельных факторов в полном диапазоне их изменения. Модель может быть использована на этапе теоретической подготовки космонавтов.

2. При разработке модуля обнаружения точечной цели в ОПЗ исключено моделирование мелких движений глаза (микросаккады, тремор, дрейф) [19], результат действия которых включен в восприятие сигналов в точке фиксации взора продолжительностью 0,3 с.

3. В модуле ОПЗ не учтен фактор мерцания цели. По частоте мерцания можно выделить группы объектов на околоземных орбитах: астероиды, стабилизированные в пространстве КА с низкой частотой мерцания, и фрагменты КМ с относительно высокой частотой мерцания, которая обусловлена их собственным вращением и многолепестковой диаграммой рассеяния [3]. Известна зависимость контрастной чувствительности от частоты мерцаний. Частота мерцаний в диапазоне 6–12 Гц облегчает обнаружение. В этом случае модель вычисляет заниженное значение вероятности обнаружения.

Вычисляемые в ДИМ значения времени и вероятности обнаружения, а также значение угла отклонения цели от центра ПЗ прибора наблюдения обеспечивают оценивание эффективности фазы обнаружения и определяют условия выполнения следующей фазы операции ВИН КЦ – фазы захвата цели на сопровождение.

Сложность алгоритма ДИМ обусловлена наличием большого числа альтернативных ветвлений алгоритма и критериев срыва операции. Введенные режимы ускорения, замедления и останова работы модели позволяют исследовать процесс поиска и обнаружения цели с дискретностью одного акта восприятия.

Программное обеспечение ДИМ разработано на языке «Фортран-IV». Автономная отладка программных модулей и ДИМ в целом выполнена по контрольным тестам для средних и крайних значений диапазонов изменения параметров операции, а также по реальным данным, полученным в КЭ на станции «Мир».

К отличительным особенностям разработанной ДИМ можно отнести следующие положения:

- задание стратегии поиска цели на основе механизма распределения точек фиксации взгляда наблюдателя по двумерному нормальному закону;
- расчет вероятности обнаружения в условиях многофакторного воздействия на процесс поиска и обнаружения в функции времени сближения КО и имитации условий наблюдения в космосе;
- детальность имитации процесса на уровне единичного восприятия ЗА;
- практическая направленность разработки на использование модели в процессе теоретической и тренажерной подготовки космонавтов;
- возможность введения в модель индивидуальных параметров ЗА космонавта в период наземной подготовки и в космическом полете.

Расчет вероятности и времени обнаружения в зависимости от параметров ЗА космонавта, параметров оптического прибора и внешних факторов обуславливает возможность использования ДИМ в операции ВИН конкретно заданной КЦ. Точность расчета вероятности обнаружения точечной цели зависит от числа прогонов модели: при  $N \geq 30$  ошибка оценивается величиной 0,01.

## Выводы

1. Разработанная ДИМ является многофакторной и предназначена для детального исследования процесса визуально-инструментального обнаружения космонавтом точечной цели на пролете. Модель имитирует процесс поиска и обнаружения цели в динамике сближения двух КО и рассчитывает вероятность обнаружения в зависимости от параметров ЗА космонавта, параметров средства наблюдения и факторов внешней среды. Режим предвидения осуществляется за счет ввода в модель априорной информации о пространственно-временных условиях сближения КА, параметров фоноцелевой обстановки, а также за счет графической и табличной визуализации процесса с детальностью до единичного акта восприятия ЗА космонавта. Модель может быть использована на этапах теоретической и тренажерной подготовки космонавтов.

2. Машинные эксперименты с ДИМ позволяют решать задачу выбора оптимальной кратности увеличения при наблюдении КЦ различных классов. Модель может быть полезной при проектировании оптических приборов ВИН для ПКА.

3. Совершенствование модели целесообразно осуществлять за счет ее сопряжения со штатной бортовой баллистико-навигационной системой МКС «Сигма», которая обеспечит использование ДИМ космонавтом в орбитальном полете при вводе в модель прогнозируемых параметров реальной внешней обстановки на витках встречи КА.

4. Адекватность ДИМ подтверждается на уровне совпадения результатов моделирования с результатами КЭ на станции «Мир». Гипотеза о распределении точек фиксации взгляда по нормальному двумерному закону проверена на созданном стенде-тренажере с регистрацией глазодвигательной деятельности. Адекватность гипотезы подтверждена для профессионально подготовленных операторов. Результаты экспериментальных исследований на стенде-тренажере предполагается представить в отдельной публикации.

5. Можно полагать, что предложенный подход к моделированию ЗА человека-оператора будет полезен при проектировании роботизированных оптических систем для ПКА и систем «технического зрения».

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алексеев Ю.В., Кушпиль В.И., Петрова Л.Ф. и др. Стохастическая модель оперативного поля зрения // Труды ГОИ им. С.И. Вавилова. – Т. 3, вып. 20. – Л.: Изд. ГОИ, 1988. – С. 81–90.
- [2] Гиппенрейтер Ю.Б. Движения человеческого глаза. – М.: МГУ, 1987.
- [3] Жуков В.М. Экспериментальное исследование диаграмм рассеяния объектов космического мусора в условиях солнечно-лазерного подсвета // Пилотируемые полеты в космос. – № 3. – 2017. – С. 90–106.
- [4] Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения. – М.: Радио и связь, 1986. – 246 с.
- [5] Корнилова Л.Н., Екимовский Г.А., Хабарова Е.В., Глухих Д.О. и др. Компьютерный метод объективизации головокружения и дифференциальная диагностика вестибулопатий // Журнал неврологии и психиатрии. – № 3. – 2015. – С. 54–60.
- [6] Кравков С.В. Глаз и его работа. – М.-Л.: Наука, 1950. – 531 с.
- [7] Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1981.
- [8] Луизов А.В. Глаз и свет. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 10 с.
- [9] Луизов А.В. Инерция зрения. – М.: Оборонгиз, 1961. – 28 с.
- [10] Оптический приборный комплекс ОПК-51. Светотехнический расчет. – Казань: ГИПО, 1981.
- [11] Роуз А. Зрение человека и электронное зрение. – М.: «Мир», 1978. – 216 с.
- [12] Рожцов В.В. Математическая модель зрительного анализатора человека // Системы управления и информационные технологии. – Т. 21, № 4. – 2005. – С. 20–23.
- [13] Суханов А.Г. Панорамная астрофотография. – М.: «Наука», 1985. – 88 с., ил.
- [14] Травникова Н.П. Эффективность визуального поиска. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
- [15] Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек-техника. – М.: Машиностроение, 1983. – 263 с.



- [16] Космический эксперимент «Виртуал» на МКС. URL: <http://www.mcc.rsa.ru/exp/virtual.htm> (дата обращения: 12.01.2018).
- [17] Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Сов. радио, 1972. – 551 с.
- [18] Электронный ресурс. URL: <https://www.vesti.ru/doc.html?id=2827267> (дата обращения: 12.01.2018).
- [19] Климук П.И., Забелина И.А., Гоголев В.А. Визуальные наблюдения и загрязнение оптики в космосе. – Л.: Машиностроение, 1983. – 224 с.
- [20] Зрительная система оператора и ее основные характеристики //Электронный ресурс – URL: <https://studfiles.net/preview/5065644/page:2/>.

## REFERENCES

- [1] Alekseev Yu.V., Kushpil V.I., Petrova L.F. and others. Stochastic Model of the Operative Viewing Field // Proceedings of Vavilov State Optical Institute. – Vol. 3, Issue 20. – St-Petersburg: SOI Publ., 1988. – pp. 81–90.
- [2] Gippenreiter Yu.B. Human Eye Movements. – Moscow: MSU Publ., 1987.
- [3] Zhukov V.M. Scattering Diagrams of Scaled Models of Space Debris under Conditions of Solar-Laser Illumination // Manned Space Flights. – No 3. – 2017. – pp. 90–106.
- [4] Krasilnikov N.N. Theory of Transmission and Perception of Images. Theory of Image Transmission and its Applications. – Moscow: Radio svyaz Publ., 1986. – p. 246.
- [5] Kornilova L.N., Ekimovskiy G.A., Khabarova E.V., Glukhikh D.O. and others. Computer Method of Dizziness Objectivization and Differential Diagnostics of Vestibulopathy // Journal of Neurology and Psychiatry. – No 3. – 2015. – pp. 54–60.
- [6] Kravkov S.V. Eye and its Functioning. – Moscow – St.-Petersburg: Nauka Publ., 1950. – p. 531
- [7] Lloyd J. Thermal imaging systems. – Moscow: Mir Publ., 1981.
- [8] Luizov A.V. Eye and Light. – St.-Petersburg: Energoatomizdat Publ., 1983. – p. 10.
- [9] Luizov A.V. Visual Inertia. – Moscow: Oborongiz Publ, 1961. – p. 28.
- [10] Optical Instrumental Complex OPK-51. Lightning design. – Kazan: GIPO Publ, 1981.
- [11] Rouz A. Human Vision and Electronic Vision. – Moscow: Mir Publ., 1978. – p. 216.
- [12] Rozhentsov V.V. Mathematical Model of Human Visual Analyzer // Sistemy upravleniya i informatsionniye tekhnologii Publ. – Vol. 21, No 4. – 2005. – pp. 20–23.
- [13] Sukhanov A.G. Panoramic Astrophotography. – Moscow: Nauka Publ., 1985. – p. 88, il.
- [14] Travnikova N.P. Efficiency of Visual Search. – Moscow: Mashinostrieniye Publ., 1985. – p. 128.
- [15] Shibanov G.P. Quantitative Assessment of Human Activity in “Man-Technology” Systems. – Moscow: Mashinostrieniye Publ., 1983. – p. 263.
- [16] “Virtual” Space Experiment on the ISS URL: <http://www.mcc.rsa.ru/exp/virtual.htm> (accessed date: 12.01.2018).
- [17] Venttsel E.S. Operations Research. – Moscow: Sov. radio, 1972. – p. 551.
- [18] Electronic resource. URL: <https://www.vesti.ru/doc.html?id=2827267> (accessed date: 12.01.2018).
- [19] Klimuk P.I., Zabelina I.A. Gogolev V.A. Visual Observations and Contamination of the Optics in Space. – St.-Petersburg: Mashinostrieniye Publ., 1983. – p. 224.
- [20] Operator’s Visual System and its Main Characteristics // Electronic resource – URL: <https://studfiles.net/preview/5065644/page:2/>.

УДК 681.51.012:531.5

## ПРОБЛЕМЫ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЬНОЙ ГИПОГРАВИТАЦИИ ЛУНЫ И МАРСА

В.А. Акулов, В.Л. Балакин

Докт. техн. наук, профессор В.А. Акулов  
(Самарский государственный технический университет)  
Докт. техн. наук, профессор В.Л. Балакин (Национальный  
исследовательский университет имени академика С.П. Королёва)

Предлагается методология косвенной оценки адекватности модельной гипогравитации Луны и Марса. Актуальность проблемы обусловлена задачами, поставленными в национальных программах ряда стран по освоению дальнего космоса (экспедиции на планеты), отсутствием возможности применения прямых методов оценки адекватности и расширением масштабов гравитационной терапии (лечение ишемий). В качестве генераторов гипогравитации выбраны короткорadiusные центрифуги и наклонные плоскости, т. е. устройства, отличающиеся принципом действия, что важно для косвенной оценки сходства и различий моделей и реальных условий. В качестве эталона выбрана земная гравитация. Результаты экспериментов сопоставлены с закономерностями гидромеханики и обобщены методами регрессионного анализа. Установлено, что воздействие гипогравитации и невесомости на периферическую гемодинамику человека в значительной степени идентичны.

**Ключевые слова:** модельная гипогравитация, адекватность, короткорadiusная центрифуга, наклонный стенд, распределенный четырехполосник.

### **Problems of Adequacy of the Model Hypo Gravity of the Moon and Mars. V.A. Akulov, V.L. Balakin**

The methodology of indirect assessing the adequacy of the model hypo gravity of the Moon and Mars is proposed. The urgency of the problem is due to the tasks set in the national programs of deep space exploration (expeditions to planets) of a number of countries, the lack of the possibility of applying direct methods for assessing adequacy and expanding the scale of gravity therapy (treatment of ischemia). The short-radius centrifuges and inclined planes, that is, devices differing in the principle of action, were chosen as generators of hypo gravity what is important for indirect assessing the similarities and differences of models and real conditions. Earth gravity was chosen as the standard. The results of the experiments were compared with the regularities of hydromechanics and generalized by regression analysis methods. It has been established that the effect of hypo gravity and weightlessness on human peripheral hemodynamics is largely identical.

**Keywords:** model hypo gravity, model adequacy, short radius centrifuge, inclined stand, distributed four-pole element.

Как свидетельствует многолетний опыт пилотируемой космонавтики, ее эффективность в значительной степени определяется совершенством наземной подготовки экипажей [1–4]. К числу основных методов такой подготовки относятся тренировки в условиях, максимально приближенных к реальным. В частности, перегрузки, возникающие при старте и возвращении космических аппаратов (КА) на Землю, имитируются на центрифугах, а внекорабельная деятельность – в водном бассейне. По отзывам космонавтов, названные и им подобные тренажеры обеспечивают высокий уровень адекватности реальным условиям, причем как по целеполаганию, так и по уровню внешних воздействий. В свою очередь, адекватность является одним из показателей, свидетельствующих об эффективности методологии подготовки космонавтов и, что особенно важно, о целесообразности дальнейшего применения методов моделирования при решении перспективных задач.

Серия таких задач сформировалась в связи с начавшейся реализацией международных программ (РФ, США, Китай, Япония и др.), получивших наименование «Дальний Космос» [1–5], [9]. Речь идет о продолжительном (до 20–30 суток) пребывании экипажей в условиях Луны и Марса, т.е. при воздействии гипогравитации. Учитывая, что гипогравитация является новой разновидностью внешнего силового воздействия, которое отсутствует не только на Земле, но и на Международной космической станции (МКС), и которое недостаточно изучено, особую значимость приобретает комплекс задач по обеспечению здоровья и длительной работоспособности экипажей межпланетных экспедиций [1, 4, 5, 9]. Отметим, что в их числе междисциплинарные исследования отклика жизненно важных систем организма человека на вариации гравитационной нагрузки и, что немало важно, тренировки экипажей в условиях, максимально приближенных к реальным. Для этого необходимо создать соответствующую проблемно-ориентированную методологию и соответствующую экспериментальную базу.

К числу основных трудностей относится преодоление земного притяжения, которое препятствует созданию локального пространства с многократно пониженной гравитацией, т.е. модельной гипогравитации. Как следствие, сформировалась весьма специфическая ситуация, характеризующаяся следующими обстоятельствами.

Во-первых, номенклатура устройств, обеспечивающих генерацию модельной гипогравитации в наземных условиях, крайне ограничена. Основные из них – это центрифуги и наклонные стенды (плоскости).

Во-вторых, данные устройства являются моделями, что означает неизбежность отличий в свойствах от реальных (объектовых) условий. К числу источников отличий относится зависимость центробежного ускорения от радиуса центрифуги, в то время как ускорения свободного падения на планетах (объекты моделирования) постоянны. Кроме того, ряд отличий обуслов-

лен нелинейностью характеристик центрифуг: перегрузка пропорционально квадрату угловой скорости вращения ротора. Поэтому ввиду указанных и им подобных отличий особую значимость приобретает задача по выработке управляющей информации, обеспечивающей эквивалентность нелинейных (центрифуга) и линейных систем (сила тяжести).

В-третьих, неоспоримый положительный опыт, накопленный на центрифугах при имитации перегрузок, возникающих при стартах и посадках КА, имеет ограниченное применение при моделировании гипогравитации. Прежде всего, отличаются схемы силового воздействия, согласно которым направление «грудь–спина» заменяется на направление «голова–ноги». Кроме того, существенно (в несколько раз) отличаются уровни силового воздействия и, следовательно, реакция организма на него.

В-четвертых, и это особенно важно, задача оценки адекватности модельной гипогравитации содержит в себе противоречия. С одной стороны, отсутствует возможность прямой оценки, так как для этого необходимо пребывание людей на поверхности планет, что является задачей на перспективу. С другой стороны, проблему адекватности необходимо решить на ранних этапах подготовки к экспедициям. Экипаж должен пройти серию тренировок в условиях модельной гипогравитации задолго до прибытия на планеты. В противном случае существенно возрастают полетные риски, становятся проблематичными обоснования целесообразности экспедиций и прогнозы их эффективности.

Таким образом, при реализации программ освоения дальнего космоса особую значимость и актуальность приобретают следующие семь взаимосвязанных задач: 1) разработка и апробация методологии косвенной оценки адекватности модельной гипогравитации реальным условиям; 2) выявление механизма имеющихся отличий; 3) разработка мер по минимизации отличий; 4) всестороннее подтверждение достоверности полученных результатов; 5) выполнение проблемно ориентированных исследований; 6) выявление скрытых закономерностей отклика организма человека на вариации гравитационной нагрузки; 7) выработка рекомендаций специалистам (прежде всего, инструкторам) по эффективному применению модельной гипогравитации при наземной подготовке экипажей к освоению дальнего космоса. В конечном итоге речь идет о создании экспериментальной базы, обеспечивающей генерацию в наземных условиях модельной гипогравитации Луны и Марса для тренировок космонавтов.

Настоящая статья посвящена решению перечисленных задач. Исследования обладают двунаправленностью: пилотируемая космонавтика и гравитационная терапия, предметом которой является профилактика и лечение ишемий конечностей различной этиологии воздействием управляемой искусственной силой тяжести [6–8].

## 1. Методология исследований

Как указывалось, задача по обеспечению адекватности модельной гипогравитации объектовым условиям (Луна, Марс) имеет противоречия. С одной стороны, она востребована, а с другой стороны ее оценка прямыми методами невозможна, что многократно осложняет решение задачи. Учитывая, что речь идет о реализации крупных проектов перспективной космонавтики, не имеющих ближайших аналогов, особую значимость приобретают доказательства достоверности результатов, полученных косвенными методами. Для решения поставленных задач и разрешения противоречий применен мультиагентный подход с привлечением экспериментальных и теоретических методов исследований, разнообразных технических средств и информационных технологий (таблица 1).

В качестве генераторов управляемой гипогравитации (позиция 1, таблица 1) применены два устройства – короткорADIUSная центрифуга (ЦКР) и наклонный стенд (НС) (рис. 1, 2). Выбор устройств, отличающихся принципом действия (центробежная сила и разложение вектора силы тяжести на компоненты), является одной из первоочередных мер, направленных на повышение достоверности результатов исследований, выявление сходства и различия генераторов как моделей гипогравитации.

Таблица 1

Обобщенная характеристика предлагаемой методологии

№ п/п	Перечень устройств и основных процедур	Пояснения
1	Генераторы гипогравитации	КороткорADIUSные центрифуги (ЦКР) и наклонные стенды (НС)
2	Критерий адекватности	Авторский критерий [7, 8]
3	Алгоритмы управления ЦКР	Авторские алгоритмы [7, 8]
4	Расчет углов наклона НС	Законы теоретической механики
5	Эталон, к которому применимы прямые и косвенные методы оценки адекватности	Земная гравитация при ортостазе человека
6	Количество режимов, отличающихся величиной и направлением силового воздействия	Пять на ЦКР, три на НС и три без генераторов (таблица 2)
7	Методы оценки состояний испытуемого	Теория распределенных четырехполосников, кардиология, ультразвуковая доплерография (УЗДГ)
8	Методы обработки информации	Статистический и регрессионный анализ в автоматизированном режиме
9	Форма представления результатов	Таблицы, графики, обобщенный анализ выявленных закономерностей

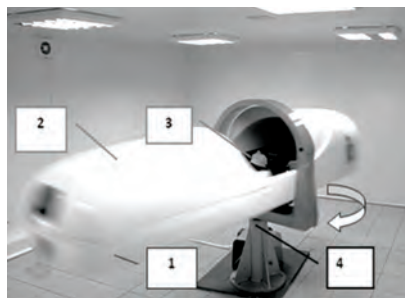


Рис. 1. Внешний вид системы «человек–ЦКР»

1 – ротор – горизонтальный стол;  
2 – кабина пациента; 3 – пациент,  
поза «лежа», ногами к периферии;  
4 – ось ЦКР

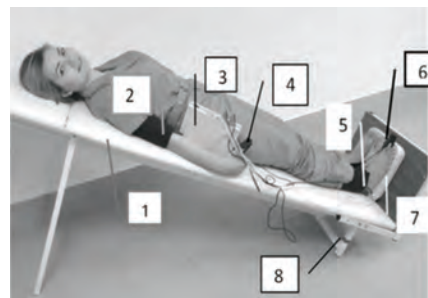


Рис. 2. Внешний вид системы «человек–НС»

1 – наклонная плоскость; 2 – тонометр (рука);  
3 – монитор; 4 – пульсоксиметр (рука);  
5 – тонометр (лодыжка); 6 – пульсоксиметр  
(нога); 7 – весы; 8 – быстросъемная опора

К числу важных положений предлагаемой методологии относится выбор критерия адекватности (позиция 2, таблица 1). Широко известный параметр  $+G_z$  (перегрузка на периферийном радиусе), применяемый для оценки режимов вращения роторов ЦКР, недостаточен для решения поставленных задач. Прежде всего, он не позволяет определить место приложения и величину перегрузки для имитации линейной гипогравитации нелинейными системами [4, 8]. Поэтому потребовалась разработка нового критерия. Его основу составляет энергетический подход, согласно которому периферической системе кровообращения за счет вращения сообщается столько же потенциальной энергии, что и гидростатическим давлением, действующим на поверхности планет (Земля, Луна, Марс). В конечном итоге задача сводится к обоснованному выбору из множества возможных распределений инерционного давления крови, обусловленных вращением, единственного распределения, обладающего минимальными отличиями от линейного распределения гидростатического давления. Было найдено решение данной задачи, достоверность которого подтверждена эмпирически и теоретически [7, 8].

Что касается алгоритмов управления ЦКР, обеспечивающих адекватность модельной гипогравитации (позиция 3, таблица 1), то они после несложных преобразований следуют из авторского критерия адекватности [7]. Вычисление углов наклона НС, исходя из условия моделирования гипогравитации (позиция 4, таблица 1; рис. 2), сводится к применению известных законов теоретической механики. В этой связи важным моментом и одновременно достоинством НС является постоянство его настройки: угол наклона плоскости относительно горизонта, вычисленный из условия моделирования гипогравитации, одинаков для всех испытуемых. В отличие от НС на ЦКР необходимо рассчитывать индивидуальные режимы вращения, зависящие от ряда факторов, прежде всего, роста пациента.

К числу принципиально важных подходов, направленных на повышение достоверности результатов, относится обоснованный выбор и испытания эталонного объекта исследований. Под эталоном понимается объект, к которому применимы как косвенные, так и прямые методы оценки адекватности. Таким эталоном послужила гравитация Земли при вертикальной позе испытуемого (позиция 5, таблица 1). Были разработаны и проведены сеансы вращения на ЦКР, имитирующие действие земной гравитации, показавшие высокую сходимость результатов с эталонными и прогнозируемость различий, обусловленных нелинейностью ЦКР как модели (раздел 2). Такая сходимость и общность методологии выполнения модельных экспериментов послужила основанием для косвенной оценки адекватности модельной гипогравитации Луны и Марса, а также достоверности алгоритмов управления ЦКР. Что касается позиции 6, то в общей сложности предусмотрено 11 режимов испытаний, отличающихся величиной и направлением воздействия на человека со стороны гравитационных сил, включая режим моделирования невесомости (таблица 2).

Как следует из таблицы 2, к числу средств, направленных на достижение высокой достоверности предлагаемой методологии, относятся разнообразие режимов испытаний и дублирование средств силового воздействия на человека (позиции 6–9, таблица 2).

Таблица 2

Циклограмма испытаний и их краткая характеристика

№ п/п	Режим	Пояснения
1	Клиностастика	Горизонтальная поза испытуемых. Оценка исходного состояния
2	Ортостаз	Вертикальная поза испытуемых. Эталонное испытание
3	Вращение на ЦКР с имитацией земной гравитации	Оценка достоверности критерия адекватности и алгоритмов управления прямым методом
4 5	Вращение на ЦКР с нагрузкой $\pm 20\%$ от режима 3	Повышение достоверности результатов за счет более подробного исследования окрестности эталонного испытания
6 7	Имитация гипогравитации Марса	Параллельные исследования на ЦКР и НС. Оценка сходимости результатов с применением двух разновидностей генераторов модельной гипогравитации
8 9	Имитация гипогравитации Луны	
10	Имитация невесомости	Только на НС. Отрицательный угол наклона
11	Повторная клиностастика	Оценка восстановительных процессов в организме после испытаний. Сравнение с данными режима 1

К числу важных задач предлагаемой методологии относится оценка состояния испытуемых в условиях модельной гипогравитации (ЦКР, НС, позиция 7, таблица 1). В отличие от ближайших аналогов, впервые к исследованию периферической гемодинамики человека была применена теория четырехполюсников, причем в ее наиболее сложном варианте с учетом распределенности параметров (акустика процессов). Ее адаптация к поставленным задачам заключалась в измерении давления и скорости кровотока в начальном сечении (вход в распределенную систему) и в конечном сечении артериального русла (выходной сигнал). Для этого потребовалась установка двух автоматических тонометров, первый («привычный») – на руке, второй – на лодыжке. Кровоток измерялся стандартными методами ультразвуковой доплерографии (УЗДГ) в варианте с трехточечной схемой доступа: бедренная артерия, подколенная и задняя большеберцовая (разделы 2, 3).

Таким образом, для оценки состояний испытуемых был применен комплексный подход, сочетающий в себе методы теоретической гидромеханики, кардиологии, УЗДГ; привлечение генераторов, отличающихся принципом действия, и эталона, к которому применимы как косвенные, так и прямые методы оценки адекватности объектам моделирования.

Что касается позиций 8, 9 таблицы 1, то они изложены в последующих разделах.

## **2. Методы обработки информации**

Специфику предлагаемой методологии составляет сочетание эмпирических и теоретических методов исследований. Значительный объем исходных данных и множество решаемых задач (таблицы 1, 2) потребовали разработки проблемно ориентированной информационно-аналитической системы (ИАС). Ее основные функции заключаются в выработке управляющей информации для настройки ЦКР, обработке результатов измерений артериального давления и кровотока, полученных при вариации гравитационной нагрузки в широких пределах, с автоматизированным построением эмпирических и теоретических моделей на основе статистического и регрессионного анализа.

### *2.1. Обработка результатов измерения артериального давления*

Как указывалось, для оценки вариаций давления в артериальном русле, обусловленных различием гравитационного воздействия, был предусмотрен двухточечный доступ (входное/выходное сечение, позиции 2, 5, рис. 2). В результате применения автоматических тонометров определялись стандартные для практической кардиологии систолическое, диастолическое артериальное давление (САД, ДАД) и частота сердечных сокращений (ЧСС). Кроме того, вычислялся лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ) и среднее артериальное давление (АДср).

ЛПИ характеризует перепад давления в артериальном русле, что важно для оценки его свойств как распределенного четырехполюсника. АДср



является средством оценки АД с учетом как постоянной, так и динамической составляющей. Его простота и наглядность удобны для сравнительного анализа данных, полученных при вариации гравитационной нагрузки и сопоставлении результатов экспериментов на ЦКР и НС.

### 2.2. Обработка результатов измерения параметров кровотока

Скорость кровотока в артериальном русле измерялась методами ультразвуковой доплерографии (УЗДГ) с регистрацией как стандартных, принятых в практической медицине параметров (рис. 3), так и дополнительных параметров. Стандартные параметры необходимы для выявления их отличий от нормы, обусловленных пониженной гравитацией или ее отсутствием.

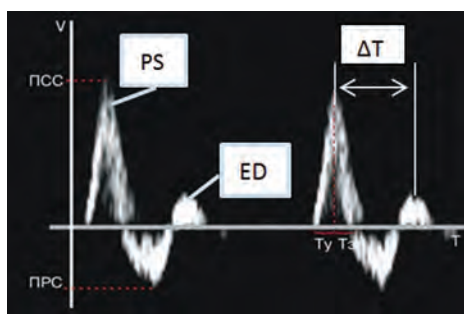


Рис. 3. Типовая доплерограмма периферических сосудов

За норму принята поза «ортостаз» на поверхности Земли. Кроме того, было выполнено более подробное по сравнению с практической медициной исследование пульсовой волны с определением собственных частот кровотока и коэффициентов затухания. Эти данные необходимы для выявления скрытых механизмов кровообращения и косвенной оценки состояния кровеносных сосудов, прежде всего эластичности, в условиях пониженного по отношению к норме системного давления. Для этого измерялся период затухающих колебаний  $\Delta T$  (рис. 3). С целью повышения достоверности результатов УЗДГ осуществлялось на обеих конечностях.

Типовая доплерография кровотока в периферическом русле представлена на рис. 3, где показаны два сокращения сердца. Пульсовая волна исследовалась методами автоматического управления («черного ящика»), что является новизной и спецификой технологии. Колебательный процесс моделировался аппроксимациями вида

где  $V$  – текущая скорость кровотока,  $PS$  – пиковая систолическая скорость (рис. 3),  $\beta$  – коэффициент затухания,  $t$  – текущее время, отсчитываемое от момента возникновения  $PS$ .

Как следует из рис. 3, в артериях, несмотря на малое гидравлическое сопротивление, происходит интенсивное затухание колебаний. В связи с этим вычислялся коэффициент  $\beta$  по формуле, которая следует из (1) после подстановки  $V = ED$  ( $ED$  – конечная диастолическая скорость, рис. 3), в результате которой  $\cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} t\right) = 1$ . После логарифмирования получим:

$$V = (PS) e^{-\beta t} \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} t\right), \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{\Delta T} \ln \frac{PS}{ED} \quad (2)$$

УЗДГ применялось только на НС, т.к. в условиях ЦКР вследствие ее габаритов (одноместный вариант) УЗДГ выполнить невозможно. Представляется целесообразным разработку специализированной технологии, обеспечивающей УЗДГ на центрифуге большого радиуса, как, например, на ЦФ-18 ЦПК имени Ю.А. Гагарина.

В качестве программного средства ИАС был выбран электронный процессор Excel, поскольку он получил широкое распространение в медицинских учреждениях. Кроме того, он оснащен встроенными средствами (таблицы, графики, математические формулы, регрессионный анализ), достаточными для решения поставленных задач. Его важным свойством является открытость, т. е. относительная простота последующей модернизации. В ИАС широко применена трехмерная (постраничная) структура, характерная для Excel. Действия пользователей сводятся к заполнению таблиц исходных данных и получению результатов.

Предусмотрены три группы страниц. Первая из них предназначена для ввода и сохранения исходных данных. На рис. 4 представлен один из примеров применения ИАС к обработке данных, относящихся к режиму «Ортостаз», который принят за норму. Типовой экран представляет собой таблицу, состоящую из пяти областей, отличающихся содержанием и типом вводимой информации. Область 1 предназначена для ввода учетных данных пациентов: фамилия, имя, отчество, рост, вес. Вес для планеты Марс вычисляется автоматически (позиция «вес/2,5»).

В области 2 помещаются результаты измерения АД по схеме «рука–лодыжка» и ЧСС. Кроме того, автоматически вычисляются ЛПИ и АДср, которые обозначены как АДср<sub>р</sub>, АДср<sub>н</sub>, где индексы «р», «н» соответственно означают «рука–нога».

$$\text{ЛПИ} = \text{САД}_n / \text{САД}_p, \quad \text{АДср} = \text{ДАД} + (\text{САД} - \text{ДАД})/3.$$

Области 3–5 предназначены для внесения результатов как стандартного УЗДГ обследования обеих конечностей с доступом в трех точках, так и дополнительных параметров, которыми являются период пульсовой волны и ЧСС. Для измерения  $\Delta t$  в аппаратуре применен режим двух маркеров. Учитывая многообразие исходных данных, для удобства и наглядности каждому из испытуемых отводится отдельная страница.

В целях сокращения изложения, фрагменты таблиц, относящихся к режимам «Марс» и «невесомость», не приводятся, т.к. они аналогичны фрагменту, представленному на рис. 4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	Результаты УЗДГ, поза								
3	"Ортостаз"								
4									
5									
6	Фамилия			Имя			Отчество		
7	Юлдашев			Н			Р		
8	Рост, см		Вес, кг		вес/2,5				
9	164		62		24,8				
10	ОРТОСТАЗ								
11	Сегментарное давление								
12	САД рука	ДАД рука	САД нога	ДАД нога	ЧСС	ЛПИ	АД ср. р.	АД ср. н.	
13	145	99	226	162	85	1,56	114	183	
14									
15	УЗДГ бедренной артерии								
16	Правая	PS	ED	RI	S/D	ΔI	ЧСС		
17	конечность	0,66	0,18	0,73	3,69	324	85		
18	Левая	PS	ED	RI	S/D	ΔI	ЧСС		
19	конечность	0,52	0,15	0,71	3,48	370	85		
20									
21	УЗДГ подколенной артерии								
22	Правая	PS	ED	RI	S/D	ΔI	ЧСС		
23	конечность	0,3	0,12	0,62	2,67	318	85		
24	Левая	PS	ED	RI	S/D	ΔI	ЧСС		
25	конечность	0,46	0,14	0,7	3,31	301	85		
26									
27	УЗДГ задней ББ артерии (ЗББ)								
28	Правая	PS	ED	RI	S/D	ΔI	ЧСС		
29	конечность	0,3	0,11	0,61	2,58	353	85		
30	Левая	PS	ED	RI	S/D	ΔI	ЧСС		
31	конечность	0,58	0,09	0,84	6,32	293	85		
32									

Область 1

Область 2

Область 3

Область 4

Область 5

Рис. 4. Фрагмент таблицы исходных данных

Во второй группе страниц выводятся промежуточные результаты обработки для контроля достоверности вычислений. Третья, основная группа, содержит результаты обработки в виде эмпирических и теоретических моделей, представленных в виде таблиц, графиков и уравнений регрессий. Типовые примеры приведены в разделе 3.

### 3. Результаты исследований

#### 3.1. Зависимость артериального давления от величины гравитационной нагрузки

В целях сокращения изложения из многочисленных результатов исследований рассмотрим только ту часть, которая непосредственно относится к проблеме адекватности ЦКР и НС объектовым условиям, а также к наиболее общим закономерностям кровотока. Как указывалось, в качестве эталона, к которому применимы как косвенные, так и прямые методы оценки, выбрана поза «ортостаз на поверхности Земли». Как следует из рис. 5, ЛПИ в позе «ортостаз» (столбец «Верт. положение») составил  $1,7 \pm 0,1$ , а при модельном эксперименте на ЦКР (столбец «Режим 2 (0 %)») – несколько выше:  $1,8 \pm 0,13$ .

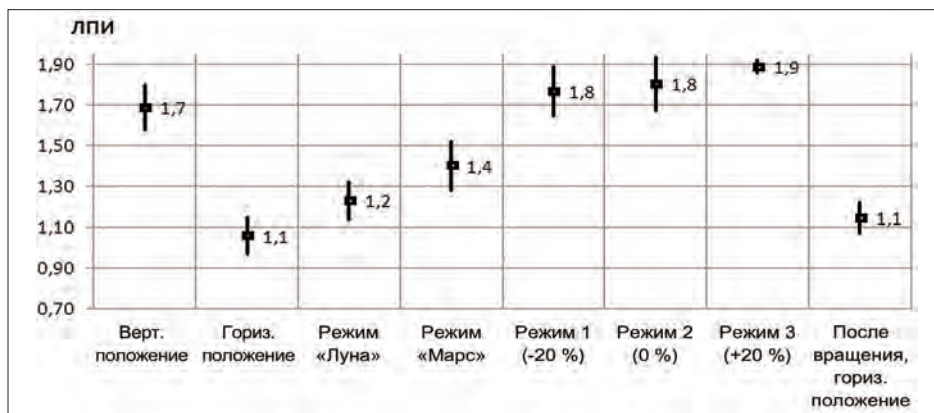


Рис. 5. Результаты измерения перепада давления в артериальном русле (ЛПИ) на ЦКР

Учитывая относительно небольшие отличия параметров модельной и моделируемой гравитации и учитывая применение прямого метода, правомерно утверждение, что авторские алгоритмы управления ЦКР обеспечивают определение режимов вращения, обеспечивающих адекватность модельной и объектовой гравитации. Что касается выявленных отличий, которые неизбежны при моделировании, то они являются следствием нелинейной зависимости инерционного давления от частоты вращения, известной в теоретической гидромеханике и адаптированной к ЦКР в работах [7, 8].

Выполним сравнительную оценку модельной гипогравитации, создаваемой ЦКР и НС. В качестве примера рассмотрим моделирование для условий Марса. Как следует из рис. 5, прогнозируемое значение ЛПИ на Марсе, полученное на ЦКР, составляет  $1,4 \pm 0,12$  (столбец «Режим «Марс»»). ЛПИ, измеренное на НС, составило  $1,35 \pm 0,14$ . Таким образом, результаты, полученные в условиях модельной гравитации, создаваемой устройствами, отличающимися принципом действия, практически совпадают. Такое совпадение объясняется снижением влияния нелинейности давления при пониженной частоте вращения относительно имитации ортостаза («выпрямление» кривой и ее приближение к прямой линии). С практической точки зрения совпадение результатов является доказательством адекватности модельной (ЦКР и НС) и модулируемой гипогравитации.

Отметим, что гипогравитации Марса соответствовало почти 20 % отклонение ЛПИ от нормы, причем в патологическом направлении, каковым является невесомость. Эффект объясняется снижением АДср в выходном сечении (лодыжка) до значения  $120 \text{ мм рт. ст.}$  от нормы, составляющей для обследуемой группы  $165 \text{ мм рт. ст.}$  Столь значительные реакции гемодинамики на вариацию гравитационной нагрузки требуют дополнительных исследований и всесторонней оценки со стороны соответствующих специа-

листов. В целях уточнения данных, полученных в модельных условиях, целесообразно выполнить прямые измерения ЛПИ на МКС, а также на длиннорадиусной центрифуге ЦФ-18.

### 3.2. Зависимость артериального кровотока от величины гравитационной нагрузки

Как указывалось, параметры кровотока измерялись методами УЗДГ. Эти методы основаны на технологической схеме «врач–аппаратура–пациент». Такая схема не применима на ЦКР вследствие ее ограниченных габаритов и достаточно высоких скоростей вращения. Так, например, имитация земной гравитации достигается при частоте вращения  $32\text{--}36 \text{ мин}^{-1}$  (вариации обусловлены ростом испытуемого). Поэтому УЗДГ выполнялось только на НС. В качестве аргумента зависимостей, полученных на НС, применен  $\sin \alpha$  (где  $\alpha$  – угол установки наклонной плоскости относительно горизонта). Выбор аргумента обусловлен следующими двумя основными факторами. Во-первых, разложение силы тяжести на компоненты определяются тригонометрическими соотношениями. Во-вторых, соотношения являются безразмерными, что важно для теоретического обобщения и удобства при анализе графических зависимостей. В частности, горизонтальной позе соответствует значение  $\sin \alpha = 0$ , а вертикальной –  $\sin \alpha = 1$ .

Эксперименты явились очередным, причем количественным доказательством того, что человек является гравитационно зависимым субъектом и что акустические свойства системы кровообращения зависят от гравитационной нагрузки. Так, например, существенно изменяется индекс резистентности (RI), который относится к числу важнейших гемодинамических показателей в практической медицине (рис. 6).

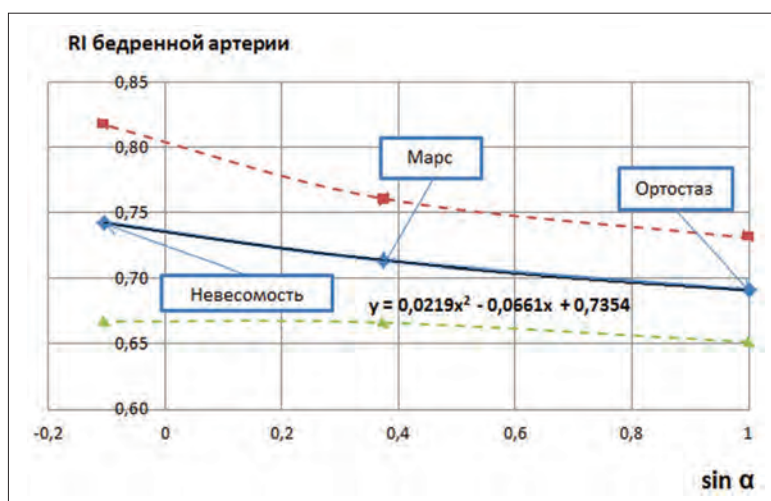


Рис. 6. Зависимость индекса резистентности от величины гравитационной нагрузки

Переход от позы «ортостаз» к позе, имитирующей невесомость, сопровождался возрастанием значения  $RI$  от 0,69 до 0,74. Режиму «Марс» соответствовало значение  $RI = 0,72$ , что, как и в случае ЛПИ, существенно отличается от нормы. Представляет интерес сравнение данных, полученных при имитации невесомости и в позе «лежа», которая применяется при стандартных УЗДГ-обследованиях ( $\sin \alpha = 0$ ). Как следует из рис. 6, данные по  $RI$  практически совпадают. Этот факт является очередным количественным доказательством негативного воздействия на организм человека многосуточного пребывания в горизонтальном положении. Полученные закономерности отклика гемодинамики на вариации гравитационной нагрузки требуют тщательного анализа и обоснованного объяснения со стороны специалистов по УЗДГ, пилотируемой космонавтике и гравитационной терапии.

Впервые исследовано влияние гравитационной нагрузки на период затухающих колебаний (рис. 7). При переходе от позы «ортостаз» (норма) к модельной невесомости  $\Delta T$  возросло от значения 335 мсек до 401 мсек, а частота соответственно снизилась с 3 Гц до 2,5 Гц, т.е. более, чем на 20 %. При этом гравитации Марса соответствовало значение 364 мсек. Значимость результата состоит в том, что установлены количественные соотношения, связывающие акустический параметр  $\Delta T$ , и, следовательно, частоту колебаний с внешней нагрузкой. Что касается механизма явления, то он обусловлен зависимостями упругоинерционных свойств системы кровообращения от уровня системного давления. Как известно, снижение давления сопровождается увеличением податливости стенок артерий. Однако имеющихся знаний недостаточно, и необходимы более детальные исследования механизма колебаний, в том числе с применением предлагаемых подходов.

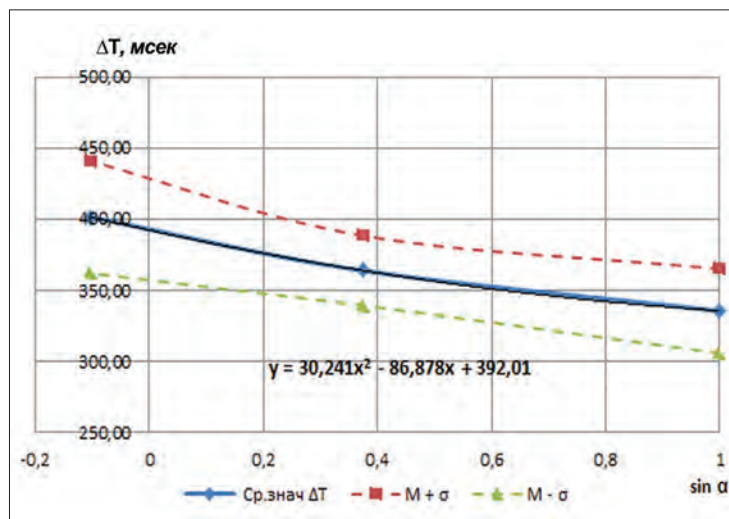


Рис. 7. Зависимость периода пульсовой волны от величины гравитационной нагрузки

Спецификой проведенных исследований является исследование процесса затухания собственных колебаний крови в артериальном русле. Тот факт, что, несмотря на незначительную величину гидравлических потерь в артериях, происходит интенсивное затухание колебаний, широко известен (типовой процесс, рис. 3).

Новизной является определение коэффициента затухания на основе анализа доплерограмм. Расчет выполнялся по формуле (2). Как следует из типового примера, при вариации гравитационной нагрузки в диапазоне «норма–невесомость» коэффициент  $\beta$  изменяется в пределах  $3,5 \pm 0,1$  (рис. 8).

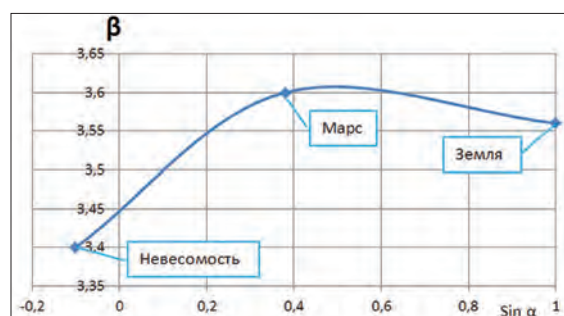


Рис. 8. Зависимость коэффициента затухания колебаний в подколенной артерии от величины гравитационной нагрузки

Полученные данные следует рассматривать как предварительные, подлежащие уточнению. Следует продолжить исследования с установлением механизма процесса. Его знание необходимо не только в данной предметной области, но и в смежных областях, в которых актуально гашение колебаний в гидравлической системе без увеличения сопротивления. Важно отметить, что методика исследований разработана и успешно апробирована.

Кроме эмпирических моделей ИАС осуществляла построение теоретических моделей в форме регрессий. Основное назначение – обобщение полученных данных и оценка соответствия законам гидромеханики. На рис. 6, 7 приведены примеры уравнений регрессий, составленных для средних значений  $R_i$  и  $\Delta T$ . Установлено, что полиномы второй степени адекватно отражают экспериментальные зависимости, поскольку линии регрессии совпали с экспериментальными кривыми, что важно с практической точки зрения. Кроме того, регрессии позволяют сократить объем испытаний и обработки данных, которые достаточно трудоемки. Примером служат вычисления показателей гемодинамики в условиях Луны или в позе «лежа», наиболее распространенной в практической медицине. В частности, расчетное значение ЛПИ в позе «лежа» составляет 1,12, что практически совпадает с ЛПИ при невесомости (1,02). Обобщая изложенное, следует особо отметить, что высокая эффективность предлагаемой технологии в значительной степени обусловлена применением мультиагентных принципов.

#### 4. Сравнительная оценка ЦКР и НС как генераторов гипогравитации

Как следует из предыдущих разделов, и ЦКР, и НС обеспечивают генерацию управляемой искусственной гравитации, причем каждое из устройств обладает своей спецификой. Поэтому целесообразна их сравнительная оценка по ряду показателей, определяющих полноту имитации и технологичность применения (таблица 3).

Таблица 3

Сопоставление ЦКР и НС как генераторов модельной гравитации

Показатели	Адекватность	УЗДГ	Кориолисово ускорение: имитация движения	Индивидуальная коррекция под рост	Имитация невесомости
1	2	3	4	5	6
ЦКР	Да	Нет	Имитируется	Требуется	Нет
НС	Да	Да	Не имитируется	Не требуется	Да

Как следует из таблицы 3, ЦКР и НС являются генераторами искусственной силы тяжести, дополняющими друг друга. При этом на ЦКР отсутствует возможность УЗДГ обследования (позиция 3) и необходимы существенные доработки ротора и системы управления для имитации невесомости (позиция 6). Кроме того, проявляются нелинейные свойства, обусловленные вращением, создающие расхождение модельных и объектовых данных. Что касается НС, то не требуется изменение угла установки плоскости в зависимости от роста испытуемого (позиция 5), имитируется невесомость (позиция 6), выполняется УЗДГ как по стандартным методикам, принятым в медицине, так и по методикам, учитывающим специфику космонавтики (позиция 3). В отличие от ЦКР не имитируется кориолисово ускорение, приложенное к потоку крови, возникающее при движении человека и способствующее интенсификации процессов в коллатералях (позиция 4).

Таким образом, ЦКР и НС являются генераторами модельной гипогравитации, отличающимися принципом действия, но функционально дополняющими друг друга. Их совместное применение при соответствующем информационно-аналитическом обеспечении позволяет решать ряд задач, актуальных для космонавтики. Следовательно, ЦКР и НС представляют собой перспективные технические средства, которые применимы для подготовки космонавтов к освоению дальнего космоса и выполнению научных исследований. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о целесообразности выполнения аналогичных исследований на центрифуге большого радиуса (ЦФ-18 ЦПК имени Ю.А. Гагарина) с оценкой динамики системы кровообращения на основе теории распределенного четырехполюсника, т. е. с измерением перепада давления и кровотока в сосудистом русле.



## Выводы

Разработана и апробирована методология косвенной оценки адекватности модельной гипогравитации Луны и Марса, состоящая из выбора генераторов управляемой искусственной силы тяжести, построения измерительного комплекса и информационно-аналитической системы, осуществляющей выдачу управляющей информации исходя из решаемой задачи, полуавтоматическую обработку данных и теоретическое обобщение результатов методами статистического и регрессионного анализа.

В качестве генераторов модельной гравитации выбраны короткорadiusные центрифуги и наклонные стенды. Эти устройства создают локальную гипогравитацию в условиях действия земной гравитации, превышающей по напряженности модельную в несколько раз. Кроме того, устройства отличаются принципом действия, что важно при косвенной оценке адекватности.

В качестве эталона применена земная гравитация. Под эталоном понимается объект, к которому применены как косвенные, так и прямые методы оценки адекватности модели и имитируемого объекта. Основу прямого метода составляет сравнение данных, характеризующих гемодинамику группы людей и полученных при вертикальной позе (ортостаз) и на короткорadiusной центрифуге в режиме имитации земной гравитации. С целью повышения достоверности результатов применен двухточечный доступ к периферическим артериям с измерением артериального давления, частоты сердечных сокращений и, что особенно важно, перепада давления по схеме «рука–нога» (лодыжечно-плечевой индекс).

В результате прямого эксперимента получено подтверждение достоверности авторских алгоритмов расчета режимов вращения ротора центрифуги, обеспечивающих адекватность модельной и моделируемой гравитации. Установлено также некоторое отличие в параметрах гемодинамики, которое заключается в относительно небольшом систематическом повышении давления относительно нормы. Это повышение обусловлено нелинейной зависимостью инерционного давления от радиуса вращения. С уменьшением частоты вращения ротора влияние нелинейности ослабевает, что нашло подтверждение при моделировании гипогравитации.

Учитывая положительный результат прямой оценки адекватности, компьютерные модели применены для расчета режимов вращения, моделирующих гипогравитацию Марса. Кроме того, исследования продублированы на наклонном стенде. Получено совпадение результатов, полученных на ЦКР и НС, позволяющее заключить, что указанные устройства являются адекватными средствами, решающими задачи подготовки космонавтов к освоению дальнего космоса и выполнению научных исследований.

При выполнении экспериментов на НС был применен адаптированный вариант метода распределенных четырехполюсников. Для этого наряду с измерением перепада давления выполнялось ультразвуковое исследование кровотока в обеих нижних конечностях. С целью сравнения результатов

исследований с данными практической медицины измерялись стандартные параметры. Кроме того, выполнено более детальное исследование акустических свойств периферического русла (пульсовая волна). Для этого впервые определялся период затухающих колебаний с последующим вычислением частоты и коэффициента затухания.

Предлагаемая технология показала высокую эффективность по выявлению скрытых закономерностей периферической гемодинамики. Получено количественное подтверждение того, что человек является гравитационно-зависимым субъектом. Выявлены скрытые закономерности отклика параметров периферической гемодинамики на вариацию гравитационной нагрузки в широком диапазоне ее изменения от земной гравитации до невесомости.

Учитывая высокую информативность и эффективность метода распределенных четырехполюсников, целесообразна его адаптация и апробация на длиннорадиусной центрифуге типа ЦФ-18.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 17-48-630834/18.*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Г.И. Падалка, П.П. Долгов, В.Н. Киршанов. Задачи подготовки космонавтов на центрифугах по перспективным космическим программам // Материалы «Космического форума 2011, посвященного 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина». – ФГБУ НИИ ЦПК, 18–19 октября 2011.
- [2] П.П. Долгов, В.Н. Киршанов, А.П. Чудинов. Основные направления работ на центрифугах и их целевого применения // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», посвященной 55-летию ЦПК имени Ю. А. Гагарина, 10–12 ноября 2015. С. 267–268.
- [3] О.Г. Газенко, А.И. Григорьев, А.Д. Егоров. От 108 минут до 438 суток и далее (к 40-летию полета Ю.А. Гагарина) // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2001. – Т. 35, № 2. – С. 10–11.
- [4] А.Р. Котовская, Виль – И.Ф. Вильямс, В.Ю. Лукьянюк. Проблема создания искусственной силы тяжести с помощью центрифуги короткого радиуса для медицинского обеспечения межпланетных пилотируемых полетов // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2003. – Т. 37, № 5. – С. 36–39.
- [5] Федеральная космическая программа на 2016–2025 гг., утвержденная Постановлением Правительства РФ от 23 марта 2016 г. № 230.
- [6] Р.А. Галкин, И.В. Макаров. Гравитационная терапия в лечении больных облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей. – Самара, 2006. – 198 с.
- [7] В.А. Акулов. Анализ и синтез систем медицинского назначения с управляемой искусственной силой тяжести // Дисс. докт. наук, Самара, 2013. – 252 с.
- [8] В.А. Акулов. Мехатронные системы генерации искусственной силы тяжести наземного и космического применения / Под ред. Г.П. Аншакова. – М: Из-во Машиностроение, 2011. – 161 с.
- [9] V. Zander, R. Anken. Short radius Centrifuge – A New Approach for Life Science Experiments Under Hyper-g Conditions for Application in Space and Beyond /Recent Patents on Space Technology, 2013, 3. pp. 74–81.

## REFERENCES

- [1] G.I. Padalka, P.P. Dolgov, V.N. Kirshanov. Tasks of Training Cosmonauts on Centrifuges for Future Space Programs // Proceedings of the Space Forum-2011 Dedicated to the 50<sup>th</sup> Anniversary of Yu.A. Gagarin's Space Flight. – Gagarin Research&Test CTC, October 18–19, 2011.
- [2] P.P. Dolgov, V.N. Kirshanov, A.P. Chudinov. Main Directions of Operations on Centrifuges. Designated Use of Centrifuges. // Proceedings of the XI International Scientific & Practical Conference “Manned Space Flights” Dedicated to the 55<sup>th</sup> Anniversary of Yu.A. Gagarin Research&Test CTC, November 10–12, 2015. pp. 267–268.
- [3] O.G. Gizenko, A.I. Grigoryev, A.D. Egorov. From 108 Minutes to 438 Days and More... (to the 40<sup>th</sup> Anniversary of the Gagarin's Space Flight) // J. “Aerospace and Environmental Medicine”. – 2001. – V. 35, No 2. – pp. 10–11.
- [4] A.R. Kotovskaya, Vil' – I.F. Williams, V.Yu. Lukyanyuk. Issue of Creating an Artificial Gravity with the Help of a Short-Radius Centrifuge for Medical Support of Interplanetary Manned Missions. / J. “Aerospace and Environmental Medicine”. – 2003. – V. 37, No 5. – pp. 36–39.
- [5] Federal Space Program for 2016–2025, approved by Government Decree dated March 23, 2016. No 230.
- [6] R.A. Galkin, I.V. Makarov. Gravitational Therapy in Treatment of Patients with Obliterating Diseases of Lower Extremity Arteries. – Samara, 2006. – p. 198.
- [7] V.A. Akulov. Analysis and Synthesis of Medical Purpose Systems with Controlled Artificial Gravity // Diss. of Dr. of Scie, Samara, 2013. – p. 252.
- [8] V.A. Akulov. Mechatronic Systems for the Generation of Artificial Gravity of Terrestrial and Space Applications / Eds. G.P. Anshakov. – Moscow: Mashinostroyeniye Publishing House. 2011. – p. 161.
- [9] V. Zander, R. Anken. Short radius Centrifuge – A New Approach for Life Science Experiments Under Hyper-g Conditions for Application in Space and Beyond /Recent Patents on Space Technology, 2013, 3. pp. 74–81.

УДК 613.693 + 617.7-001.15

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ  
ИСКУССТВЕННОЙ СВЕТОВОЙ СРЕДЫ  
НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ  
ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА  
В УСЛОВИЯХ ГЕРМОКАМЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

А.Е. Смолеевский, О.М. Манько, Ю.А. Бубеев

А.Е. Смолеевский; докт. мед. наук О.М. Манько;  
докт. мед. наук, профессор Ю.А. Бубеев (ГНЦ РФ–ИМБП РАН)

В статье рассмотрены современные подходы к оценке влияния искусственной световой среды на функциональное состояние человека-оператора и представлены результаты испытаний систем освещения, выполненных внутри герметичной камеры и моделирующих искусственную световую среду рабочих отсеков пилотируемых космических аппаратов.

**Ключевые слова:** гермокамера, динамическое освещение, светодиодное освещение, человек-оператор, зрительный анализатор, функциональное состояние.

**Modern Approaches to the Assessment of the Effect of Artificial  
Light Environment on the Functional Status of a Human Oper-  
ator in Tests Inside a Pressurized Chamber. A.E. Smoleevskiy,  
O.M. Manko, Yu.A. Bubeev**

The article deals with modern approaches to the assessment of the influence of artificial light environment on the functional status of a human operator and presents the results of tests of lighting systems within a pressurized chamber that simulate the artificial light environment inside working compartments of manned spacecraft.

**Keywords:** pressurized chamber, dynamic lighting, LED lighting, human operator, visual analyzer, functional status.

В практическом плане обитаемость гермообъектов космической техники – это комплекс условий рабочей среды, значимо влияющих на функциональное состояние, здоровье и работоспособность находящихся в них людей, что, в конечном итоге, является одной из базовых составляющих надежности человеческого фактора и безопасности жизнедеятельности.

Одной из характеристик обитаемости, непосредственно влияющих на функционирование человека-оператора в условиях гермообъекта, является система искусственного освещения. Особая роль света в жизнедеятельности данной категории специалистов дополнительно обусловлена двумя важными обстоятельствами.

Во-первых, гермообъекты, как правило, эксплуатируются в условиях агрессивной внешней среды, представляющей опасность для жизни и здо-

ровья человека (космос, морские глубины, условия Крайнего Севера и т.п.). Чувство опасности оказывает стрессирующее действие на психику, а световая среда является важным регулятором психоэмоционального состояния человека, способным как усилить, так и ослабить действие стресс-факторов [21, 23, 27, 30].

Во-вторых, гермообъект является средой обитания, в которой субъекты труда (например, космонавты или подводники) находятся круглосуточно на протяжении продолжительного времени. Следовательно, искусственное освещение должно не только улучшать условия труда в гермообъекте, но также вне рабочих зон и рабочих мест операторов создавать комфортную обстановку для отдыха и восстановления работоспособности членов экипажа.

Разработка оптимальных режимов освещения и научное обоснование возможности их продолжительного применения в замкнутых объектах представляет собой важную практическую задачу для космической отрасли и для других сфер человеческой деятельности [2, 8].

### **Современные подходы к оптимизации искусственной световой среды**

Основываясь на результатах анализа литературных источников, можно выделить три основных подхода к построению систем освещения:

- освещение с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками;
- адаптивное (регулируемое) освещение с параметрами, изменяемыми пользователем;
- динамическое освещение, воспроизводящее естественную суточную цикличность.

Наибольшее распространение получило освещение с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками. Его преимуществом является возможность четкого нормирования светотехнических параметров. Требования к освещению в космических летательных аппаратах определяются ГОСТ Р 50804-95 «Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования» (1995), который из всего множества параметров нормирует только уровни освещенности. В настоящее время данные требования в значительной мере утратили свою актуальность [3, 5, 12, 17]. Минимальные уровни освещенности, приведенные в ГОСТ Р 50804-95, вдвое ниже минимальных требований, установленных СП 2.2.1.1312-03, СНиП 23-05-95\* и их зарубежными аналогами. Это обусловлено тем, что ГОСТ Р 50804-95 был ориентирован на энергопотребление и световую отдачу люминесцентных ламп низкого давления, которыми оснащались советские и российские космические летательные аппараты в конце прошлого века. Светодиодные источники света позволяют при том же энергопотреблении увеличить уровни освещенности вдвое, приблизив их к современным санитарно-гигиеническим требованиям [4].

Освещение с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками обладает низкой адаптивностью к условиям труда. Каждый вид деятельности предъявляет свои требования к световой среде. При работе с разными типами приборов и индикаторов (стрелочными приборами, приборами со световым отсчетом, газоразрядными и жидкокристаллическими индикаторами, электролюминесцентными панелями, оптическими приборами) оптимальными являются различные условия освещения, что обуславливает необходимость регулирования параметров светового цвета среды с учетом вида и фазы профессиональной деятельности [3].

Постоянное освещение также не учитывает индивидуальные потребности и предпочтения пользователя. В литературе имеются данные, указывающие на то, что один и тот же источник света по-разному влияет на людей разного возраста [4, 24] и пола [21]. Воздействие освещения на человека имеет суточную [19, 26, 27] и сезонную специфику [23].

Так, яркий свет более эффективно устраняет чувство сонливости и проявления психического утомления в ночное время, чем днем [27]. Яркий свет (1000 лк) увеличивает продуктивность решения легких абстрактно-логических задач во второй половине дня, но затрудняет решение более сложных задач [19]. Высокая цветность световой среды устраняет чувство сонливости в дневное время [29], но малоэффективно для борьбы с «утренней инерцией сна» или сонливостью после пробуждения [26]. Освещение с высокой КЦТ (6000 К) повышает психическую работоспособность в вечернее и ночное время по сравнению с освещением меньшей цветности (2700 К) и той же освещенностью (500 лк), но в дневное время этот эффект практически отсутствует [27].

Недостатки систем освещения с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками отчасти могут быть компенсированы за счет выделения в гермообъекте функциональных зон (рабочей зоны, мест отдыха, сна, вспомогательных отсеков и т.п.), различающихся параметрами освещенности (ГОСТ Р 50804-95). Однако возможности данного подхода в значительной мере уже исчерпаны [5].

Более перспективным направлением исследований является разработка так называемого интеллектуального (персонализированного) освещения, параметры которого адаптируются к потребностям пользователя и в то же время позволяют экономить электроэнергию [9].

Одна из таких систем была апробирована в эксперименте со 105-суточной изоляцией «Марс 105» [6]. В данном исследовании использовалось освещение, цветность которого регулировалась с учетом пороговых частотных характеристик зрительного анализатора. На выборке из 4 человек было показано, что светодиодное освещение, адаптированное по цветности к текущему функциональному состоянию оператора, способно обеспечить более высокую зрительную работоспособность и менее выраженное зрительное утомление при работе с кольцами Ландольта, чем стандартное освещение

с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками. Однако данная система не предназначена для общего освещения и использовалась только в качестве местного освещения рабочей зоны. Кратность и продолжительность воздействия также были небольшими (четыре раза по одному часу) и не позволяют исключить развитие кумулятивного негативного эффекта светодиодного освещения.

Динамическое освещение, воспроизводящее естественную суточную цикличность, в отличие от адаптивного освещения не предназначено для оптимизации световой обстановки на рабочем месте, а направлено на стабилизацию режима сна-бодрствования и профилактику десинхроноза при изоляции от естественного освещения [13]. Такой подход предполагает применение яркого освещения с высокими значениями КЦТ в дневное время и тусклого освещения желто-оранжевой цветности вечером и утром [9]. Для воспроизведения суточной динамики освещения предлагается также варьировать уровень освещенности [18].

Danilenko и Ivanova провели сравнительный анализ терапевтической эффективности яркого света (4300 лк в течение 30–45 минут вскоре после пробуждения) с эффективностью режима освещения, моделирующего рассвет [15]. Имитация рассвета осуществлялась путем постепенного увеличения освещенности до 100 лк в течение 30 минут перед пробуждением с последующим приближением источника света (250 лк) к открытым глазам на 15 минут. Цветность излучения не менялась. Несмотря на значительно более низкий уровень освещенности, режим, имитирующий рассвет, оказался столь же эффективным при лечении сезонной депрессии, как и постоянное яркое освещение. Авторы данного исследования предполагают, что эффективность динамического освещения может возрасти, если сделать его более естественным. Этого можно добиться путем изменения не только освещенности, но и спектрального состава света.

Hoffmann et al. (2008) показали, что светодиодное освещение с КЦТ 6500 К и переменным уровнем освещенности (от 500 до 1800 лк) в отличие от постоянного с КЦТ 4000 К (освещенность 500 лк) обладает активирующим действием на психоэмоциональное состояние и нормализует суточный профиль мелатонина [18]. Однако не ясно, какой вклад в этот эффект внесли изменения уровня освещенности, а какой различия цветности излучения [9, 16].

Koppel (2012) в течение года проводил мониторинг суточной и сезонной динамики параметров световой среды в условиях умеренного климата и пришел к выводу, что естественный диапазон изменения освещенности слишком велик (до 100 000 лк) и моделировать его не целесообразно [22]. Для воспроизведения естественной суточной динамики достаточно поддерживать освещенность на уровне, установленном нормативными документами (порядка 400–500 лк), но при этом варьировать цветовую температуру от 2200 К до 4300 К. В настоящее время вопрос о соотношении эффектов освещенности и спектрального состава света по-прежнему мало изучен, что

существенно затрудняет выбор параметров световой среды для воспроизведения суточной цикличности освещения.

Моделирование сезонной динамики световой среды представляет еще более сложную задачу. Полное воспроизведение в гермообъекте параметров естественной световой среды, вероятно, не целесообразно. Это обусловлено тем, что в странах, удаленных от экватора, параметры освещения в течение года подвержены чрезмерным колебаниям, приводящим к развитию сезонных депрессивных расстройств в зимне-осенний период [25]. Известно также, что наиболее позитивное психоэмоциональное состояние работников наблюдается в весенне-летний период, что обусловлено высоким уровнем естественной освещенности и большой продолжительностью дня [23].

В связи с этим параметры освещения, соответствующие весеннему дню, представляются наиболее подходящими на роль эталона при разработке системы освещения, воспроизводящей естественную суточную цикличность [22].

Данный принцип реализован, например, в светильниках серии CooLux (45, 60 и т.п.) для офисных и жилых помещений (разработчик CooLux Srl, Italy). В рандомизированном контролируемом исследовании было показано, что потолочные светильники в виде светового проема, воспроизводящие вид безоблачного неба и Солнца, более положительно влияют на настроение человека, снижают психическую напряженность, беспокойство и проявления клаустрофобии, чем освещение с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками [14].

### **Выбор методик для оценки психофизиологических эффектов искусственного освещения в условиях гермообъекта**

Для того чтобы сделать научно-обоснованный вывод о преимуществах той или иной системы освещения для гермообъекта по сравнению с альтернативными техническими решениями, необходимо выбрать наиболее информативные параметры и подобрать адекватные методики для их оценки.

От адекватности параметров освещения зависит психическая работоспособность человека-оператора [9, 27], являющаяся основой надежности, качества и безопасности его профессиональной деятельности [20].

Варьирование спектрально-энергетических характеристик света может влиять на психическую работоспособность через прямые (зрительные) и косвенные (незрительные) механизмы. Прямое действие света на психическую работоспособность оператора реализуется за счет изменения функциональной активности зрительного анализатора и отражается на качестве и продуктивности выполнения сенсомоторных операторских задач [4]. Незрительные эффекты световой среды проявляются в изменениях психоэмоционального состояния человека-оператора, структуры и качества его



сна, уровня дневной активности, свойств внимания и, в конечном счете, определяют точность и продуктивность выполнения абстрактно-логических задач [1, 12, 13, 16, 21, 25, 27].

Таким образом, набор методик для оценки психофизиологических эффектов искусственного освещения в условиях гермообъекта должен позволять оценивать следующий минимальный набор характеристик человека-оператора:

- функциональную активность зрительного анализатора;
- работоспособность;
- психоэмоциональное состояние;
- качество сна.

О работоспособности оператора можно судить по двум группам признаков, поддающихся объективной оценке [7]:

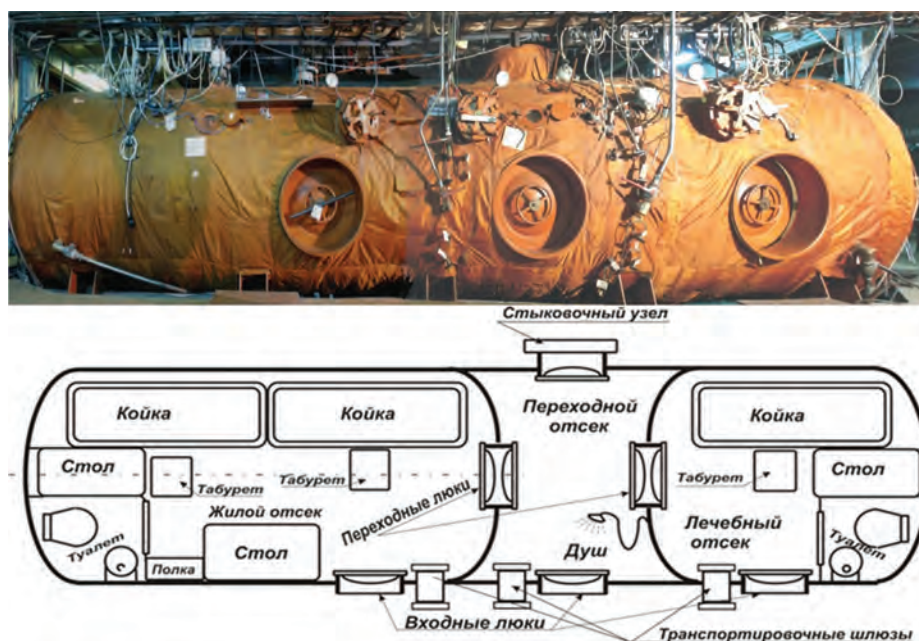
- 1) По показателям результативности деятельности: продуктивность, качество, временные затраты, скорость выполнения отдельных операций и т.п.
- 2) По функциональным показателям оператора: электрическая активность сердца, пульс, электроэнцефалограмма, электрокожное сопротивление, температура тела, число дыхательных движений, величина артериального давления и т.п.

Широкое распространение получил также комбинированный подход к изучению работоспособности, направленный на оценку результативности с учетом психофизиологических затрат («цены» деятельности) [20]. Методология оценки психической работоспособности по показателям качества профессиональной деятельности с учетом функциональных показателей оператора была отработана в космических экспериментах и в исследованиях на авиационных тренажерах [11, 20]. В настоящее время данный подход используется наиболее часто и базируется на понятии «функционального состояния» [10].

Анализ литературных источников показывает, что оценку психической работоспособности целесообразно производить прямыми методами, то есть по продуктивности и качеству тестовой операторской деятельности. Помимо этого, необходимо оценивать степень напряжения основных функциональных систем, участвующих в поддержании психической работоспособности (ЦНС и зрительного анализатора). Изменение функционального состояния этих систем характеризует лабильность психической работоспособности, показывает, чем обусловлено ее изменение, и в определенной степени позволяет прогнозировать возможность срыва работоспособности. Для оценки функциональной активности зрительного анализатора были выбраны современные прямые электрофизиологические методики исследования (электроретинография и зрительные вызванные потенциалы), а для оценки функционального состояния ЦНС – косвенные показатели: психоэмоциональное состояние оператора и субъективные показатели качества его сна.

### Результаты собственных исследований

В период с 2014 г. по 2015 г. на базе ГНЦ РФ–ИМБП РАН была проведена серия гермокамерных испытаний светодиодных светильников для космических летательных аппаратов с оценкой психофизиологических эффектов их использования (договор № 14-04-735 с ЗАО НПЦ «НИИ Микроприборов» от 27.03.2014 г.). Работа выполнялась в глубоководном водолазном комплексе (ГВК-250) с контролируруемыми параметрами среды обитания на связанных выборках, состоящих из здоровых мужчин-добровольцев в возрасте от 25 до 43 лет (рис. 1).



Примечания: 1. Комплекс имеет три отсека: жилой – объемом  $15 \text{ м}^3$ , переходный – объемом  $5,5 \text{ м}^3$ , лечебный – объемом  $8,5 \text{ м}^3$ ; 2. Койки двухъярусные.

Рис. 1. Общий вид и схема экспериментального комплекса

Было проведено 2 эксперимента продолжительностью 12 суток в условиях светодиодного освещения с постоянными спектрально-энергетическими характеристиками (постоянного светодиодного освещения) (коррелированная цветовая температура (КЦТ)  $4000 \text{ K}$ ,  $n = 10$ ) и 2 эксперимента продолжительностью 11,5 суток в условиях светодиодного освещения с варьируемыми во времени спектрально-энергетическими характеристиками (динамического светодиодного освещения), моделирующими естественный суточный цикл (КЦТ от  $2200 \text{ K}$  до  $8000 \text{ K}$ ,  $n = 8$ ). Фоновые значения психофизиологических показателей регистрировались в условиях люминесцентного освещения (КЦТ =  $4000 \text{ K}$ ) при том же уровне освещенности (рис. 2).

Этап исследования	№ эксперимента	Фаза эксперимента	Тип освещения	Продолжительность (сут.)
Этап 1 (постоянное освещение) (n = 10)	Эксперимент 1.1 (n = 5)	Фон	Люминесцентное	3
		Изоляция	Постоянное светодиодное	12
		Последствие	Люминесцентное	2
	Эксперимент 1.2 (n = 5)	Фон	Люминесцентное	3
		Изоляция	Постоянное светодиодное	12
		Последствие	Люминесцентное	2
Этап 2 (динамическое освещение) (n = 8)	Эксперимент 2.1 (n = 4)	Фон	Люминесцентное	3
		Изоляция	Динамическое светодиодное	11,5
		Последствие	Люминесцентное	2,5
	Эксперимент 2.2 (n = 4)	Фон	Люминесцентное	3
		Изоляция	Динамическое светодиодное	11,5
		Последствие	Люминесцентное	2,5

Рис. 2. Дизайн исследования

На рисунке 3 представлены образцы цветности освещения, использовавшиеся в эксперименте.



Рис. 3. Образцы цветности света с различными значениями КЦТ

Психическая работоспособность операторов оценивалась с помощью методик «Корректирующая проба», «Адаптивная модель операторской деятельности» (АМОД) и «Реакция на движущийся объект» (РДО).

Психоэмоциональное состояние, субъективные показатели качества сна и выраженность дневной сонливости оценивались соответственно с помощью вопросников: Профиль настроения, Leeds Sleep Evaluation Questionnaire (LSEQ) и Karolinska Sleepiness Scale (KSS).

Для оценки функциональной активности зрительного анализатора использовались: компьютерная хроматическая статическая периметрия (на синий и зеленый цвета), методики оценки критической частоты слияния мельканий (КЧСМ) и запаса относительной аккомодации (ЗОА) по методу Аветисова. Также выполнялось электрофизиологическое исследование (ЭФИ) зрительного анализатора, включавшее в себя:

- мультифокальную (мф-) электроретинографию (ЭРГ);
- комплекс ганцфельд-ЭРГ на диффузные стимулы;
- паттерн-ЭРГ (ПЭРГ) на черно-белые шахматные паттерны с размером ячеек  $0,8^\circ$  и  $0,3^\circ$ ;
- зрительные вызванные корковые потенциалы (ЗВКП) на реверсивный паттерн с угловым размером ячеек  $1^\circ$  и  $0,3^\circ$ .

ЭФИ выполнялось непосредственно перед началом экспериментального воздействия и сразу после его завершения в одно и то же время суток (с 10 до 11 часов) для исключения влияния суточных изменений функциональной активности зрительного анализатора на результаты исследования.

Программа экспериментальных исследований по уровню научной обоснованности и обеспечению безопасности была признана соответствующей нормам биомедицинской этики и одобрена Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ–ИМБП РАН (Протокол № 367 от 31.07.2014 г.).

Исследование показало, что оба режима светодиодного освещения в условиях гермообъекта способны обеспечить сохранение высокой работоспособности оператора на протяжении 12-суточной изоляции. В условиях постоянного светодиодного освещения продуктивность тестовой деятельности (корректирующая проба) увеличилась на 14,2–27,8 % (по медиане) по сравнению с фоном ( $p < 0,05$ , критерий Вилкоксона,  $n = 10$ ). Качество счета (АМОД) имело тенденцию к росту и, начиная с 9-х суток, значительно ( $p < 0,05$ ,  $n = 10$ ) превышало фоновые значения (на 26,6–31,5 % по медиане).

Отмечены косвенные признаки позитивного влияния динамического светодиодного освещения на баланс процессов возбуждения и торможения в ЦНС (по данным РДО). В фоне у всех операторов преобладали запаздывающие реакции на движущийся объект, а среднее отклонение РДО было смещено вверх от нулевой линии. В условиях динамического светодиодного освещения количество и выраженность запаздывающих ответов существенно сократились, а среднее отклонение РДО уменьшилось на 22–75,6 % (по медиане) по сравнению с фоном и приблизилось к оптимальной области.

Психоэмоциональное состояние операторов в обеих сериях экспериментов оставалось достаточно стабильным. Показатель «Депрессия–уныние» в условиях как постоянного, так и динамического светодиодного освещения имел практически одинаковые значения (медиана равна 1,5 и 1 усл. ед. соответственно), более низкие, чем в фоне (2 усл. ед.). Данный результат согласуется с многочисленными литературными сведениями о высокой терапевтической эффективности светотерапии в отношении депрессивных

расстройств [30]. Отсутствие статистической значимости улучшения по шкале «Депрессия–уныние» по сравнению с фоном объясняется тем, что данный показатель изначально имел очень низкое значение, близкое к нулю.

Динамика оценок активности и усталости, выявленная в настоящем исследовании, является не вполне типичной для гермокамерных экспериментов. Как правило, объективное ограничение двигательной активности участников изоляционных экспериментов и накапливающееся утомление сопровождаются аналогичным изменением субъективных оценок этих показателей [11, 17]. Однако под действием постоянного светодиодного освещения медиана показателя «Бодрость–активность» не изменилась относительно фона и составила 17,5 усл. ед., а в условиях динамического светодиодного освещения снизилась лишь незначительно (до 16,5 усл. ед.). При этом значения оценок по шкале «Усталость–инертность» в условиях продолжительного гермокамерного эксперимента не только не увеличились, но, напротив, имели тенденцию к снижению. «Усталость–инертность» в фоне составляла 4,5 усл. ед. (медиана). В условиях постоянного светодиодного освещения данный показатель снизился до 3,5 усл. ед. (медиана), а в условиях динамического светодиодного освещения снизился в еще большей степени и составил 1,5 усл. ед. (медиана). Снижение данного показателя не достигло уровня статистической значимости только потому, что фоновое значение «Усталость–инертность» находилось на низком уровне, близком к минимально возможному.

Обнаруженная в эксперименте динамика показателя «Усталость–инертность» отчасти может быть обусловлена высокой мотивацией операторов на участие в исследовании. Известно, что у высокомотивированных лиц субъективные признаки утомления могут быть слабо выраженными вплоть до завершения определенной деятельности [11]. Однако наличие высокой мотивации не объясняет отсутствие негативной динамики показателя «Бодрость–активность» в условиях выраженной гиподинамии и монотонии. Вероятно, данная картина обусловлена активирующим влиянием экспериментального освещения. На это указывает и существенно более низкий уровень усталости операторов в условиях динамического светодиодного освещения по сравнению с постоянным светодиодным освещением.

В целом, освещение с изменяемыми спектрально-энергетическими характеристиками оказало более выраженное активирующее влияние на психоэмоциональное состояние операторов, чем постоянное освещение. Интегральный показатель настроения (профиль настроения) вырос в условиях динамического светодиодного освещения на 78,9 % (по медиане), а в условиях постоянного светодиодного освещения на 14,1 % (по медиане) по сравнению с фоновым значением ( $p = 0,063$ , критерий Вилкоксона,  $n = 8$ ).

Апробированные режимы освещения не оказали значимого влияния ( $p > 0,05$ ) на субъективную оценку сна по показателям «Засыпание», «Качество сна», «Пробуждение», «Состояние после пробуждения» (LSEQ), а также на дневную активность и сонливость (KSS, LSEQ) операторов.

Светодиодное освещение с изменяемыми спектрально-энергетическими характеристиками в целом не оказало негативного влияния на функциональную активность зрительного анализатора в условиях 11,5-суточной изоляции. Однако отмечено снижение отдельных функциональных показателей: ЗОА – на 14,3 % по медиане ( $p < 0,05$ , критерий Вилкоксона,  $n = 8$ ), СГПЗ на синий (– 6,3 % по медиане) и зеленый (– 9,1 % по медиане) цвета ( $p < 0,01$ , критерий Вилкоксона,  $n = 16$ ). В то же время КЧСМ – наиболее чувствительный показатель развития астенопии – практически не изменился по сравнению с фоном. Аналогичные исследования эффектов светодиодного освещения вне гермообъекта не выявили ухудшения функциональной активности зрительного анализатора [8]. Это дает основание полагать, что обнаруженное снижение ЗОА и сужение СГПЗ могут быть обусловлены пребыванием в замкнутом объеме, а не спектральным составом освещения.

Среди результатов ЭФИ наибольшего внимания, вероятно, заслуживает раздвоение пика Р100 ЗВКП в ответ на стимулы с разным угловым размером, обнаруженное у четырех операторов. Однако многообразие причин, способных привести к раздвоению пика Р100 ЗВКП на стимулы  $1^\circ$  и  $0,3^\circ$ , не позволяет однозначно интерпретировать природу данного феномена и требует специального исследования. Нельзя исключить возможность того, что данное изменение морфологии ЗВКП обусловлено экспериментальным воздействием.

Субъективной симптоматики, указывающей на развитие патологии зрительного анализатора, а также морфофункциональных изменений сетчатки (по данным оптической когерентной томографии и электроретинографии) в условиях динамического светодиодного освещения также выявлено не было.

## Выводы

1. Эргономическое сопровождение разработки систем освещения для космических пилотируемых аппаратов и других обитаемых гермообъектов должно включать этап гермокамерных испытаний с участием здоровых добровольцев. Отсутствие линейной зависимости между светотехническими и психофизиологическими показателями не позволяет отказаться от экспериментального метода исследования и заменить его расчетами. Необходимость экспериментов с участием человека обусловлена тем, что опыты на животных и клеточных культурах позволят оценить лишь наиболее явные, физиологические эффекты освещения, но не исключают наличие негативного влияния на психоэмоциональную сферу и работоспособность оператора.

2. Минимальный набор параметров, оцениваемых при проведении гермокамерных испытаний систем освещения, должен включать функциональную активность зрительного анализатора, точность и продуктивность тестовой (профессиональной) деятельности, качество сна и психоэмоциональное состояние человека-оператора. Наибольшей чувствительностью по нашему мнению обладают методики оценки функциональной активности зритель-

ного анализатора. Однако они же являются и наименее специфичными. Точность и продуктивность деятельности позволяют получить прямую количественную оценку работоспособности оператора, но зависят от мотивации и тренированности оператора. Качество сна и психоэмоциональное состояние оператора отражают комфортность среды обитания, кумуляцию негативных эффектов освещения и развитие переутомления.

3. При проведении экспериментальной оценки систем освещения для космических пилотируемых аппаратов необходимо стремиться к увеличению их продолжительности, так как негативные эффекты имеют разный латентный период и могут обладать кумулятивным эффектом. Так, негативное влияние спектрально-энергетических характеристик освещения на работоспособность оператора при краткосрочном (1–3 суток) воздействии может компенсироваться за счет мотивации, но проявляется по мере истощения компенсаторно-приспособительных механизмов.

*Работа выполнена в рамках базовой тематики РАН № 63.2 «Исследование интегративных процессов в центральной нервной системе, закономерностей поведения и деятельности человека в условиях автономности и под влиянием других экстремальных факторов среды».*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Архангельский Д.В. Исследование влияния света на зрительную работоспособность и утомление человека с учетом его циркадных ритмов [Текст] / Д.В. Архангельский, В.Ю. Снетков // Вестник МЭИ. – 2012. – № 6. – С. 219–224.
- [2] Базылева Л.В. Светодиоды в качестве основного освещения: проблемы и пути решения [Текст] / Л.В. Базылева, В.Н. Болехан, В.П. Ганапольский // 3-й Азиатско-Тихоокеанский конгресс по военной медицине. Материалы конгресса. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 7–8.
- [3] Беляев Р.И. Об освещении помещений орбитальных космических станций [Текст] / Р.И. Беляев, А.В. Леонов // Светотехника. – 2007. – № 4. – С. 41–44.
- [4] Бизяк Г. Спектры излучения и фотобиологическое действие светодиодов [Текст] / Г. Бизяк, М. Кланичек-Гунде, М.Б. Кобав, К. Маловр-Ребек // Светотехника. – 2013. – № 2. – С. 20–24.
- [5] Богатова Р.И. Освещенность жилых помещений РС МКС [Текст] / Р.И. Богатова, И.В. Кутина, А.В. Леонов, С.М. Гвоздев, Р.И. Беляев // Космическая биология и медицина. – Т. 1. Медицинское обеспечение экипажей МКС. – М.: Учреждение РАН Государственный научный центр РФ–Институт медико-биологических проблем, 2011. – С. 281–298.
- [6] Богатова Р.И. Исследование пороговых характеристик восприятия визуальной информации оператором при регулировании параметров световой среды в период проведения 105-суточного эксперимента с изоляцией [Текст] / Р.И. Богатова, С.М. Гвоздев, В.П. Сальницкий, И.В. Кутина, А.В. Леонов, Н.Д. Садовникова, А.Е. Артюхова, А.А. Ливенцова, И.В. Тятых // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2011. – № 3. – С. 30–34.
- [7] Бодров В.А. Психологические основы профессиональной деятельности [Текст] – М.: ПЭР СЭ; Логос, 2007. – 855 с.

- [8] Болехан В.Н. Комплексное исследование влияния светодиодных источников света на функциональное состояние организма человека [Текст] / В.Н. Болехан, В.П. Ганапольский, Н.А. Щукина, Л.В. Базылева // Медицина и здравоохранение: материалы V Международной научной конференции. – Казань: Изд-во «Бук», 2017. – С. 85–88.
- [9] Войтысяк А. Биологическое действие освещения – традиционного и светодиодами [Текст] / А. Войтысяк, Ц. Лю // Светотехника. – 2013. – № 2. – С. 17–19.
- [10] Пухов В.А. Оценка функционального состояния организма военных специалистов: научно-практическое руководство [Текст] / В.А. Пухов, И.В. Иванов, С.В. Чепур; под ред. акад. И.Б. Ушакова // Санкт-Петербург: СпецЛит, 2016. – 312 с.
- [11] Рыжов Б.Н. Психическая работоспособность в экстремальных условиях профессиональной деятельности [Текст] // Диссертация на соискание ученой степени доктора психологических наук. – М., 2001. – 443 с.
- [12] Brainard G.C. Solid-state Lighting for the International Space Station: Tests of Visual Performance and Melatonin Regulation [Text] / G.C. Brainard, W. Coyle, M. Ayers, J. Kemp, B. Warfield, J. Maida, C. Bowen, C. Bernecker, S.W. Lockley, J.P. Hanifin // Acta Astronautica. – 2013. – Vol. 92. – Iss. 1. – pp. 21–28.
- [13] Brainard G.C. The Development of Lighting Countermeasures for Sleep Disruption and Circadian Misalignment During Spaceflight (Review) [Text] / G.C. Brainard, L.K. Barger, R.R. Soler, J.P. Hanifin // Current Opinion in Pulmonary Medicine. – 2016. – Vol. 22. – Iss. 6. – pp. 535–544.
- [14] Canazei M. Artificial Skylight Effects in a Windowless Office Environment [Text] / M. Canazei, W. Pohl, H.R. Bliem, M. Martini, E.M. Weiss // Building and Environment. – 2017. – Vol. 124. – pp. 69–77.
- [15] Danilenko K.V. Dawn Simulation Vs. Bright Light in Seasonal Affective Disorder: Treatment Effects and Subjective Preference [Text] / K.V. Danilenko, I.A. Ivanova // Journal of Affective Disorders. – 2015. – Vol. 180. – pp. 87–89.
- [16] Ferlazzo F. Effects of New Light Sources on Task Switching and Mental Rotation Performance [Text] / F. Ferlazzo, L. Piccardi, C. Burattini, M. Barbalace, A.M. Giannini, F. Bisegna // Journal of Environmental Psychology. – 2014. – Vol. 39. – pp. 92–100.
- [17] Guo J.H. Keeping the Right Time in Space: Importance of Circadian Clock and Sleep for Physiology and Performance of Astronauts [Electronic resource] / J.H. Guo, W.M. Qu, S.G. Chen, X.P. Chen, K. Lv, Z.L. Huang, Y.L. Wu // Military Medical Research. – 2014. – 1:23. – p. 7. Access: <http://www.mmjournal.org/content/1/1/23>
- [18] Hoffmann G. Effects of Variable Lighting Intensities and Colour Temperatures on Sulphatoxymelatonin and Subjective Mood in an Experimental Office Workplace [Text] / G. Hoffmann, V. Gufler, A. Griesmacher, C. Bartenbach, M. Canazei, S. Staggl, W. Schobersberger // Applied Ergonomics. – 2008. – Vol. 39. – Iss. 6. – pp. 719–728.
- [19] Huijberts L.M. Shining Light on Memory: Effects of Bright Light on Working Memory Performance [Text] / L.M. Huijberts, K.C.H.J. Smolders, Y.A.W. de Kort // Behavioral Brain Research. – 2015. – Vol. 294. – pp. 234–245.
- [20] Johannes B. De-individualized Psychophysiological Strain Assessment During a Flight Simulation Test – Validation of a Space Methodology [Text] / B. Johannes, V. Salnitski, H. Soll, M. Rauch, H.J. Hoermann // Acta Astronautica. – 2008. – Vol. 63. – Iss. 7. – pp. 791–799.



- [21] Knez I. Effects of Colour of Light on Non-Visual Psychological Processes [Text] / I. Knez // *Journal of Environmental Psychology*. – 2001. – Vol. 21. – Iss. 2. – pp. 201–208.
- [22] Koppel T. Dynamic Lighting System for Workplaces at Northern Latitudes [Text] / T. Koppel // *Safety of Technogenic Environment*. – 2012. – No 3. – pp. 39–44.
- [23] Küller R. The Impact of Light and Colour on Psychological Mood: a Cross-cultural Study of Indoor Work Environments [Text] / R. Küller, S. Ballal, T. Laike, B. Mikellides, G. Tonello // *Ergonomics*. – 2006. – Vol. 49. – Iss. 14. – pp. 1496–1507.
- [24] Malovrh Rebec, K. White LED Compared with Other Light Sources: Age-Dependent Photobiological Effects and Parameters for Evaluation [Text] / K. Malovrh Rebec, M. Klanjsek-Gunde, G. Bizjak, M.B. Kobav // *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. – 2015. – Vol. 21. – Iss. 3. – pp. 391–398.
- [25] Martensson B. Bright White Light Therapy in Depression: A Critical Review of the Evidence [Text] / B. Martensson, A. Pettersson, L. Berglund, L. Ekselius // *Journal of Affective Disorders*. – 2015. – Vol. 182. – pp. 1–7.
- [26] Santhi N. Morning Sleep Inertia in Alertness and Performance: Effect of Cognitive Domain and White Light Conditions [Electronic resource] / N. Santhi, J.A. Groeger, S.N. Archer, M. Gimenez, L.J.M. Schlangen, D.J. Dijk // *PLoS ONE*. – 2013. – Vol. 8. – Iss. 11. – e79688. – p. 13. Access: [www.plosone.org/PLoS ONE 8\(11\): e79688](http://www.plosone.org/PLoS ONE 8(11): e79688). doi:10.1371/journal.pone.0079688.
- [27] Smolders K.C.H.J. Bright Light and Mental Fatigue: Effects on Alertness, Vitality, Performance and Physiological Arousal [Text] / K.C.H.J. Smolders, Y.A.W. de Kort // *Journal of Environmental Psychology*. – 2014. – Vol. 39. – pp. 77–91.
- [28] Smolders K.C.H.J. Investigating Daytime Effects of Correlated Colour Temperature on Experiences, Performance, and Arousal [Text] / K.C.H.J. Smolders, Y.A.W. de Kort // *Journal of Environmental Psychology*. – 2017. – Vol. 50. – pp. 80–93.
- [29] Taillard J. In-Car Nocturnal Blue Light Exposure Improves Motorway Driving: A Randomized Controlled Trial [Electronic resource] / J. Taillard, A. Capelli, P. Sagaspe, A. Anund, T. Akerstedt, P. Philip // *PLoS ONE*. – 2012. – Vol. 7. – Iss. 10. – e46750. – p. 6. Access: [www.plosone.org/PLoS ONE 7\(10\): e46750](http://www.plosone.org/PLoS ONE 7(10): e46750). doi: 10.1371/journal.pone.004675.
- [30] Tseng P.T. Light Therapy in the Treatment of Patients with Bipolar Depression: A Meta-analytic Study [Text] / P.T. Tseng, Y.W. Chen, K.Y. Tu, W. Chung, H.Y. Wang, C.K. Wu, P.Y. Lin // *European Neuropsychopharmacology*. – 2016. – Vol. 26. – Iss. 6. – pp. 1037–1047.

## REFERENCES

- [1] Arkhangelsky D.V. Study of the Effect of Light on Visual Performance and Fatigue of a Human Taking into Account his Circadian Rhythm [Text] / D.V. Arkhangelsky, V.Yu. Snetkov // *Bulletin of MPEI*. – 2012. – No 6. – pp. 219–224.
- [2] Bazyleva L.V. Light-emitting Diodes as the Main Illumination: Problems and Solutions [Text] / L.V. Bazyleva, V.N. Bolekhan, V.P. Ganapolsky // 3<sup>rd</sup> Asian-Pacific Congress on Military Medicine. Proceedings of the Congress. – St. Petersburg, 2016. – pp. 7–8.
- [3] Belyaev R.I. Lighting of the Compartments of the Orbital Stations [Text] / R.I. Belyaev, A.V. Leonov // *Svetotekhnika*. – 2007. – No 4. – pp. 41–44.
- [4] Bizyak G. Emission Spectra and Photobiological Action of LEDs [Text] / G. Bizyak, M. Klanichek-Gunde, M.B. Kobav, K. Malovr-Rebek // *Svetotekhnika*. – 2013. – No 2. – pp. 20–24.

- [5] Bogatova R.I. Illumination of Habitable Modules of the ISS RS [Text] / R.I. Bogatova, I.V. Kutina, A.V. Leonov, S.V. Gvozdev, R.I. Nelyaev // *Space Biology and Medicine*. – Vol. 1. Medical Support of the ISS's Crews. – M.: Russian Federation State Research Center – Institute of Biomedical Problems RAS, 2011. – pp. 281–298.
- [6] Bogatova R.I. The Study of the Threshold Characteristics of the Perception of Visual Information by an Operator While Regulating the Parameters of Light Environment During 105-day Isolation Experiment [Text] / R.I. Bogatova, S.M. Gvozdev, V.P. Saltitsky, I.V. Kutina, A.V. Leonov, N.D. Sadovnikova, A.E. Artyukhova, A.A. Liventsova, I.V. Tyatykh // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2011. – No 3. – pp. 30–34.
- [7] Bodrov V.A. Psychological Fundamentals of Professional Activity [Text] – M.: PER SE; Logos, 2007. – p. 855.
- [8] Bolekhan V.N. Comprehensive Study of the Effect of LED Light Sources on Human Body's Functional Status [Text] / V.N. Bolekhan, V.P. Ganapolsky, N.A. Schukina, L.V. Bazyleva // *Medicine and Healthcare: Proceedings of the 5th International Scientific Conference*. – Kazan: Publishing house "Buk", 2017. – pp. 85–88.
- [9] Voitysyak A. Biological Effect of Illumination – Traditional and LED [Text] / A. Voitysyak, Ts. Lyu // *Svetotekhnika*. – 2013. – No 2. – pp. 17–19.
- [10] Pukhov V.A. Evaluation of the Body's Functional Status of Military Specialists: Scientific and Practical Guidance [Text] / V.A. Pukhov, I.V. Ivanov, S.V. Chepur; edited by Academician I.B. Ushakov // St. Petersburg: SpecLit, 2016. – p. 312.
- [11] Ryzhov B.N. Mental Capacity Under Extreme Conditions of Professional; Activity [Text] // Thesis for the Degree of Doctor of Psychology. – M., 2001. – p. 443.
- [12] Brainard G.C. Solid-state Lighting for the International Space Station: Tests of Visual Performance and Melatonin Regulation [Text] / G.C. Brainard, W. Coyle, M. Ayers, J. Kemp, B. Warfield, J. Maida, C. Bowen, C. Bernecker, S.W. Lockley, J.P. Hanifin // *Acta Astronautica*. – 2013. – Vol. 92. – Iss. 1. – pp. 21–28.
- [13] Brainard G.C. The Development of Lighting Countermeasures for Sleep Disruption and Circadian Misalignment During Spaceflight (Review) [Text] / G.C. Brainard, L.K. Barger, R.R. Soler, J.P. Hanifin // *Current Opinion in Pulmonary Medicine*. – 2016. – Vol. 22. – Iss. 6. – pp. 535–544.
- [14] Canazei M. Artificial Skylight Effects in a Windowless Office Environment [Text] / M. Canazei, W. Pohl, H.R. Bliem, M. Martini, E.M. Weiss // *Building and Environment*. – 2017. – Vol. 124. – pp. 69–77.
- [15] Danilenko K.V. Dawn Simulation Vs. Bright Light in Seasonal Affective Disorder: Treatment Effects and Subjective Preference [Text] / K.V. Danilenko, I.A. Ivanova // *Journal of Affective Disorders*. – 2015. – Vol. 180. – pp. 87–89.
- [16] Ferlazzo F. Effects of New Light Sources on Task Switching and Mental Rotation Performance [Text] / F. Ferlazzo, L. Piccardi, C. Burattini, M. Barbalace, A.M. Giannini, F. Bisegna // *Journal of Environmental Psychology*. – 2014. – Vol. 39. – pp. 92–100.
- [17] Guo J.H. Keeping the Right Time in Space: Importance of Circadian Clock and Sleep for Physiology and Performance of Astronauts [Electronic resource] / J.H. Guo, W.M. Qu, S.G. Chen, X.P. Chen, K. Lv, Z.L. Huang, Y.L. Wu // *Military Medical Research*. – 2014. – 1:23. – p. 7. Access: <http://www.mmjournal.org/content/1/1/23>
- [18] Hoffmann G. Effects of Variable Lighting Intensities and Colour Temperatures on Sulphatoxymelatonin and Subjective Mood in an Experimental Office Workplace [Text] / G. Hoffmann, V. Gufler, A. Griesmacher, C. Bartenbach, M. Canazei, S. Staggl, W. Schobersberger // *Applied Ergonomics*. – 2008. – Vol. 39. – Iss. 6. – pp. 719–728.

- [19] Huiberts L.M. Shining Light on Memory: Effects of Bright Light on Working Memory Performance [Text] / L.M. Huiberts, K.C.H.J. Smolders, Y.A.W. de Kort // Behavioral Brain Research. – 2015. – Vol. 294. – pp. 234–245.
- [20] Johannes B. De-individualized Psychophysiological Strain Assessment During a Flight Simulation Test – Validation of a Space Methodology [Text] / B. Johannes, V. Salnitski, H. Soll, M. Rauch, H.J. Hoermann // Acta Astronautica. – 2008. – Vol. 63. – Iss. 7. – pp. 791–799.
- [21] Knez I. Effects of Colour of Light on Non-Visual Psychological Processes [Text] / I. Knez // Journal of Environmental Psychology. – 2001. – Vol. 21. – Iss. 2. – pp. 201–208.
- [22] Koppel T. Dynamic Lighting System for Workplaces at Northern Latitudes [Text] / T. Koppel // Safety of Technogenic Environment. – 2012. – No 3. – pp. 39–44.
- [23] Küller R. The Impact of Light and Colour on Psychological Mood: a Cross-cultural Study of Indoor Work Environments [Text] / R. Küller, S. Ballal, T. Laike, B. Mikellides, G. Tonello // Ergonomics. – 2006. – Vol. 49. – Iss. 14. – pp. 1496–1507.
- [24] Malovrh Rebec, K. White LED Compared with Other Light Sources: Age-Dependent Photobiological Effects and Parameters for Evaluation [Text] / K. Malovrh Rebec, M. Klanjsek-Gunde, G. Bizjak, M.B. Kobav // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. – 2015. – Vol. 21. – Iss. 3. – pp. 391–398.
- [25] Martensson B. Bright White Light Therapy in Depression: A Critical Review of the Evidence [Text] / B. Martensson, A. Pettersson, L. Berglund, L. Ekselius // Journal of Affective Disorders. – 2015. – Vol. 182. – pp. 1–7.
- [26] Santhi N. Morning Sleep Inertia in Alertness and Performance: Effect of Cognitive Domain and White Light Conditions [Electronic resource] / N. Santhi, J.A. Groeger, S.N. Archer, M. Gimenez, L.J.M. Schlangen, D.J. Dijk // PLoS ONE. – 2013. – Vol. 8. – Iss. 11. – e79688. – p. 13. Access: [www.plosone.org/PLoS ONE 8\(11\): e79688](http://www.plosone.org/PLoS ONE 8(11): e79688). doi:10.1371/journal.pone.0079688.
- [27] Smolders K.C.H.J. Bright Light and Mental Fatigue: Effects on Alertness, Vitality, Performance and Physiological Arousal [Text] / K.C.H.J. Smolders, Y.A.W. de Kort // Journal of Environmental Psychology. – 2014. – Vol. 39. – pp. 77–91.
- [28] Smolders K.C.H.J. Investigating Daytime Effects of Correlated Colour Temperature on Experiences, Performance, and Arousal [Text] / K.C.H.J. Smolders, Y.A.W. de Kort // Journal of Environmental Psychology. – 2017. – Vol. 50. – pp. 80–93.
- [29] Taillard J. In-Car Nocturnal Blue Light Exposure Improves Motorway Driving: A Randomized Controlled Trial [Electronic resource] / J. Taillard, A. Capelli, P. Sagaspe, A. Anund, T. Akerstedt, P. Philip // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7. – Iss. 10. – e46750. – p. 6. Access: [www.plosone.org/PLoS ONE 7\(10\): e46750](http://www.plosone.org/PLoS ONE 7(10): e46750). doi: 10.1371/journal.pone.0046750.
- [30] Tseng P.T. Light Therapy in the Treatment of Patients With Bipolar Depression: A Meta-analytic Study [Text] / P.T. Tseng, Y.W. Chen, K.Y. Tu, W. Chung, H.Y. Wang, C.K. Wu, P.Y. Lin // European Neuropsychopharmacology. – 2016. – Vol. 26. – Iss. 6. – pp. 1037–1047.

УДК 61:629.78

**СНИЖЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ  
ВЛИЯНИЯ МУТАГЕННЫХ ФАКТОРОВ  
НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА  
В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА**

Е.В. Попова, И.В. Кутник, А.И. Кобатов, Н.Б. Вербицкая,  
О.В. Добролеж

Канд. пед. наук Е.В. Попова; И.В. Кутник (ФГБУ «НИИ ЦПК  
имени Ю.А. Гагарина»)

Канд. техн. наук А.И. Кобатов; канд. биол. наук Н.Б. Вербицкая;  
О.В. Добролеж (ФГУП «Гос.НИИ ОЧБ» ФМБА России)

В статье представлены результаты проведенных экспериментов, направленных на разработку упрощенной технологии получения кисломолочного пробиотического продукта на борту пилотируемого космического комплекса (ПКК). Отмечено, что в условиях длительного космического полета организм человека подвергается влиянию целого ряда мутагенных факторов. Можно предположить, что в определенный момент времени компенсаторные возможности иммунной системы окажутся полностью исчерпанными. Показано, что разработанная технология представляет собой одностадийную операцию и не требует для ее осуществления ни дополнительного оборудования, ни специальных знаний по микробиологии со стороны экипажа. Технология прошла успешную апробацию на борту МКС. Полученные силами экипажей МКС-50 и МКС-52 образцы кисломолочного продукта обладают высоким пробиотическим потенциалом, в связи с чем данная технология может быть рекомендована для получения лечебно-профилактического кисломолочного продукта на борту ПКК в ходе выполнения длительной космической экспедиции.

**Ключевые слова:** мутагены, антимутагенная активность, кисломолочный пробиотический продукт, технология термостатного культивирования, пилотируемый космический корабль, ацидофильные лактобактерии.

**Decrease of Negative Effects of Mutagenic Factors on a Human  
Body Under Conditions of a Long-Term Space Flight. E.V. Popova,  
I.V. Kutnik, A.I. Kobatov, N.B. Verbitskaya, O.V. Dobrolezh**

The paper presents the results of experiments conducted in order to develop a simplified technology for producing fermented milk probiotic foods aboard a manned space vehicle (MSV). Since a variety of mutagenic factors attacks the human body during a long-term space flight, one can assume that at some moment the compensatory abilities of the human immune system will be completely exhausted. The developed technology was shown to be a single-stage operation ("Just add water" technology) and requires neither additional equipment nor special knowledge in microbiology for its implementation. The technology was successfully

tested aboard the ISS. The samples of fermented milk foods obtained by the crews of the ISS-50 and 52 have a high probiotic potential, so the said technology can be recommended for producing the treatment-prophylactic product during long-term space missions.

**Keywords:** mutagenes, antimutagenic activity, acidophilus probiotic product, thermostatic cultivation technology, manned spacecraft, *Lactobacillus acidophilus*

Известно, что человек ежедневно подвергается воздействию различных факторов окружающей среды, в том числе химических, физических и биогенных мутагенов. Так, например, из химических соединений, используемых в быту и производственной деятельности человека, 72 % обладают мутагенными, канцерогенными, тератогенными или кластогенными свойствами [1]. Наряду с этим мутагены также могут возникать во время стрессов, связанных с экстремальными условиями, действующими на человека, при вирусной и бактериальной инфекции, а также под влиянием факторов физической природы (УФ-лучей, ионизирующего излучения, термических повреждений и т.д.) [1, 7].

В условиях длительного космического полета организм человека подвергается влиянию целого ряда мутагенных факторов. Можно предположить, что в определенный момент времени компенсаторные возможности иммунной системы окажутся полностью исчерпанными. Продукты, образующиеся в клетках под воздействием ионизирующего излучения, сами являются мутагенами. Вполне обоснованным представляется поиск веществ, проявляющих помимо радиопротекторной и антимутагенную активность. Применение таких средств может способствовать снижению медицинских рисков, сопровождающих человека в процессе выполнения космического полета.

В результате интенсивных поисков был выявлен ряд препаратов, представляющих как комплексы природных веществ (например, препараты элеутерококка, лимонника китайского), так и индивидуальные соединения (витамины, стероидные гормоны, интерлейкины, интерфероны, супероксиддисмутаза и многие другие), рекомендованных в качестве средств профилактики радиационных поражений и при риске возникновения онкологических заболеваний [6]. В литературе в последние годы резко возросло количество публикаций о выраженной антимутагенной активности живых культур некоторых штаммов молочнокислых бактерий. Проверка антимутагенной активности более 70 штаммов молочнокислых бактерий, относящихся к родам *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Lactococcus* и *Bifidobacterium*, показала, что, во-первых, в наибольшей степени такой способностью обладают ацидофильные лактобациллы и, во-вторых, пробиотическая и антимутагенная активность наиболее ярко проявляются у клеток *Lactobacillus acidophilus*, находящихся в активном физиологическом состоянии (в виде кисломолочного продукта) [8, 9, 10].

Принимая во внимание вышеизложенное, можно сказать, что для поддержания здоровья космонавтов, находящихся длительное время в неоптимальных условиях жизнеобитания, необходимо предусмотреть на борту корабля пробиотический продукт, который может взять на себя роль общеукрепляющего средства и позволит снизить последствия негативного воздействия на организм человека агрессивной окружающей среды, в первую очередь, физической и биологической составляющих. И, как вариант, в качестве такого средства может быть предложен пробиотик в виде кисломолочного продукта, содержащего живые клетки лактобацилл и оказывающего комплексное общеукрепляющее действие на организм человека [2].

В связи с этим актуальна необходимость разработки технологии, которая бы позволяла получать пробиотический кисломолочный продукт непосредственно на борту ПКК силами находящегося в нем экипажа в процессе совершения длительной космической экспедиции.

Однако, прежде чем приступить к разработке подобной технологии необходимо рассмотреть два вопроса, от ответа на которые зависит ход дальнейших исследований.

Первый вопрос: можно ли в условиях космического полета вырастить лактобациллы до концентраций, необходимых для проявления ими пробиотического эффекта? Второй вопрос: не повлияют ли факторы космического полета (ФКП) на пробиотические свойства выращенных на борту ПКК лактобацилл?

Для ответа на данные вопросы на протяжении 2007–2014 гг. был поставлен ряд космических экспериментов (КЭ) по выращиванию на борту Международной космической станции (МКС) ацидофильных лактобацилл, обладающих пробиотическими свойствами.

### **Космический эксперимент «Биоэмульсия»**

Цель КЭ: создание автономного биореактора закрытого типа и исследование на его основе малостадийной технологии эмульсионного культивирования микроорганизмов.

Задачи КЭ: исследование и отработка автономного реактора закрытого типа для получения биомассы микроорганизмов и биологически активных веществ (БАВ) без внесения дополнительных ингредиентов и удаления продуктов метаболизма, разработка на его основе новых малостадийных и высокопроизводительных технологий получения лекарственных препаратов.

Срок реализации эксперимента на РС МКС: 2007–2014 гг.

Ожидаемые результаты КЭ: при выполнении КЭ планировалось получить следующее научно-технические результаты:

1) Рецепт эмульсионной питательной среды для получения биомассы микроорганизмов и БАВ в автономных реакторах закрытого типа.

- 2) Макетный образец автономного реактора закрытого типа.
- 3) Характеристики процесса культивирования, массопереноса питательных веществ и метаболитов, основных биологических и физико-химических свойств клеток, выращенных в эмульсионной питательной среде в реакторе закрытого типа в условиях микрогравитации и на Земле.
- 4) Разработка принципиально новой малостадийной технологии получения биомассы микроорганизмов и биологически активных веществ с использованием эмульсионных питательных сред на основе модифицированных углеводов и автономных реакторов закрытого типа.

### **Материалы и методы**

Посевной материал – «Симбиотический комплекс ацидофильных бактерий «Витафлор» на основе *L. acidophilus* Д-75 и *L. acidophilus* Д-76.

Питательная среда: на первых этапах эксперимента стерильная гидролизат-молочная среда, на заключительных – коммерческое питьевое молоко жирностью 1,5 %.

Основой «Витафлора» являются жизнеспособные клетки двух штаммов молочнокислых бактерий *Lactobacillus acidophilus* Д-75 и Д-76, специально подобранные по медико-биологическим свойствам. При определенных условиях (ноу-хау) штаммы образуют симбиоз, который усиливает их полезные свойства: расширяет спектр и уровень антагонистической активности, повышает устойчивость к терапевтическим дозам ряда антибиотиков, увеличивает содержание жизнеспособных клеток и длительность хранения препарата.

«Витафлор» принципиально отличается тем, что в процессе его получения формируется устойчивая симбиотическая система двух штаммов ацидофильных лактобацилл, усиливающая полезные медико-биологические свойства препарата. «Витафлор» характеризуется высокой скоростью роста, широким спектром и высоким уровнем антагонистической активности по отношению к патогенным и условно-патогенным микроорганизмам, ярко выраженной способностью к кислотообразованию, устойчивостью к химиотерапевтическим препаратам, то есть обладает достаточно высоким пробиотическим потенциалом.

### **Методика выполнения космического эксперимента «Биоэмульсия» на борту РС МКС**

Эксперименты на борту МКС в период с 2007 г. по 2010 г. проводили в аппаратуре «Биоэмульсия», состоящей из термостата с блоком управления (БУП) и сменного герметичного биореактора (рис. 1, а).

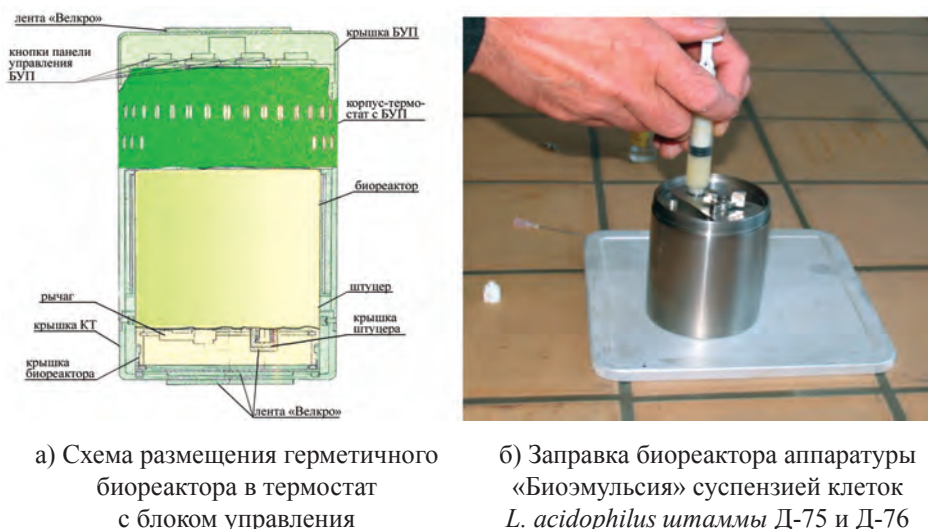


Рис. 1. Аппаратура «Биоэмульсия»

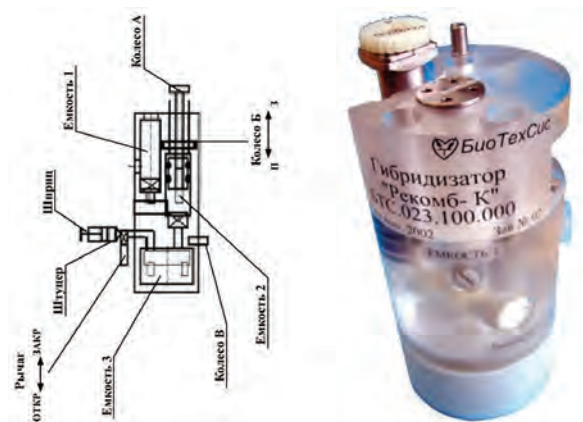
Термостат, обеспечивающий температуру 37 °С, с блоком управления находился на борту МКС. На Землю доставлялся только герметичный биореактор для его заполнения питательной средой и посевным материалом. Заправка биореактора жидкими компонентами – питательной средой и посевным материалом (суспензией клеток ацидофильных лактобацилл) осуществлялась на Земле перед полетом. На рис. 2, б показана операция по загрузке биореактора посевным материалом.

В задачу космонавтов входило помещение доставленного на борт МКС сменного биореактора в корпус-термостат (рис. 1, а) сроком на 22–24 часа, с последующим перемещением биореактора в бортовой холодильник до момента отправки на Землю.

Учитывая, что в процессе совершения длительной космической экспедиции отсутствует возможность постоянной доставки на борт МКС жидких компонентов, в первую очередь речь идет о посевном материале, был рассмотрен вопрос о возможности получения жидкого посевного материала из сухого путем его регидратации (насыщение предварительного обезвоженного вещества водой) непосредственно на борту МКС.

В связи с этим, в период с 2011 г. по 2014 г. продолжение КЭ «Биоэмульсия» осуществлялось в гибридизаторах аппаратуры «Рекомб-К» (рис. 2), исключающих возможность внесения дополнительных ингредиентов в аппаратуру в процессе культивирования лактобацилл, а также выгрузку полученного на борту МКС продукта.





а) Схема устройства гибридизатора аппаратуры «Рекомб-К»



б) Загрузка в гибридизатор сухого порошка посевного материала

Рис. 2. Устройство гибридизатора и загрузка посевного материала

В емкость № 1 гибридизатора загружали регидратирующую жидкость (2 мл питьевой воды), в емкость № 2 – посевной материал (40 мг сухого концентрата *L. acidophilus* штаммы Д-75 и Д-76) активностью  $4,0 \times 10^9$  КОЕ/г жизнеспособных клеток. В емкость 3 – питательную среду (15 мл питьевого молока). На рис. 2, б представлена операция по загрузке емкости № 2 сухим посевным материалом, порошком сублимационно высушенных клеток ацидофильных лактобацилл.

На протяжении ряда лет на борту МКС была проведена серия экспериментов, в результате которых был получен положительный ответ на поставленные вопросы о возможности культивирования в условиях микрогравитации ацидофильных бактерий и сохранения выращенными на борту МКС лактобациллами присущего им пробиотического потенциала.

**Результаты проведения  
космического эксперимента «Биоэмульсия»  
на борту РС МКС**

Таблица 1

Сводная таблица результатов экспериментов по культивированию *L. acidophilus* в герметичном сменном биореакторе, проведенных на РС МКС в период с апреля 2007 года по апрель 2009 года

		МКС-15 (апрель, 2007 г.)	МКС-17 (апрель, 2008 г.)	МКС-18 (октябрь, 2008 г.)	МКС-19 (апрель, 2009 г.)
Условия проведения процесса активации на борту МКС		Среда ГМС с перемешиванием	Среда ГМС без перемешивания	Среда ГМС без перемешивания	Молоко без перемешивания
Результаты эксперимента	Биологическая активность по отношению к контролю (%)	Контроль – 100 Опыт – 12 ( $2,2 \times 10^7$ КОЕ/мл)	Контроль – 100 Опыт – 126 ( $8,6 \times 10^7$ КОЕ/мл)	Контроль – 100 Опыт – 119 ( $1,9 \times 10^7$ КОЕ/мл)	Контроль – 100 Опыт – 100 ( $2 \times 10^8$ КОЕ/мл)
	Спектр и уровень антагонизма	ФКП не влияет на антагонизм	ФКП не влияет на антагонизм	ФКП не влияет на антагонизм	ФКП не влияет на антагонизм
	Хранение жидкой культуры (динамика инактивации)	К – 10 дней Оп – 5 дней	К – 30 дней Оп – 25 дней	К – 15 дней Оп – 20 дней	К – 45 дней Оп – 45 дней
	рН жидкой культуры	К – 4,0 Оп – 3,6	К – 4,4 Оп – 3,8	К – 3,5 Оп – 2,6	К – 2,6 Оп – 2,6
	Органолептическое тестирование	–	–	–	Вкусовые характеристики продукта близки к норме

ГМС – гидролизат-молочная питательная среда; перемешивание – включение принудительного перемешивания посредством вмонтированной в биореактор магнитной мешалки; К – земной образец; Оп – образец, полученный на борту МКС; ФКП – факторы космического полета.

Как следует из таблицы 1, результаты, полученные в последнем из экспериментов данной серии (МКС-19), позволяют говорить о том, что оптимизация процесса культивирования на борту МКС позволила получить из жидких компонентов кисломолочный продукт, обладающий высоким пробиотическим потенциалом. Органолептический анализ полученного кисломолочного продукта показал, что продукт обладает приятным кисломолочным вкусом, без посторонних привкусов и запахов.

В таблице 2 отражены результаты, полученные при культивировании ацидофильных лактобацилл в гибризаторах аппаратуры «Рекомб-К».

Приведенные в таблице данные позволяют говорить о том, что операции по регидратации сухого посевного материала и засев полученной суспензией питательной среды, находящейся в емкости № 3 гибризатора, проведены в условиях микрогравитации успешно.

Полученные данные являются определяющими для решения вопроса о возможности организации в перспективе в условиях длительной космической экспедиции на борту ПКК производства продуктов микробиологического происхождения, в первую очередь, пробиотических продуктов на основе молочнокислых бактерий.

Таблица 2

Результаты проведения серии экспериментов на МКС  
в период с 2011 г. по 2013 г.

Дата проведения эксперимента		МКС-29 2011 г.*	МКС-31 2012 г.	МКС-33 2012 г.*	МКС-35 2013 г.*	МКС-36 2013 г.
Характеристики	Биологическая активность (% к контролю)	К – 100 Оп – 220	К – 100 Оп – 104	К – 100 Оп – 125	К – 100 Оп – 136	К – 100 Оп – 200
	Спектр и уровень антагонизма	ФКП не влияет на антагонизм	ФКП не влияет на антагонизм	ФКП не влияет на антагонизм	ФКП не влияет на антагонизм	ФКП не влияет на антагонизм
	Микро-биологическая чистота	Посторонняя микрофлора не выявлена	Посторонняя микрофлора не выявлена	Посторонняя микрофлора не выявлена	Посторонняя микрофлора не выявлена	Посторонняя микрофлора не выявлена
	рН жидкой культуры	К – 4,2 Оп – 3,7	К – 3,55 Оп – 3,91	К – 3,50 Оп – 3,81	К – 3,48 Оп – 3,72	К – 3,48 Оп – 3,72
	Кислотность (ед. Тернера)	К – 210 Оп – 120	К – 251 Оп – 137	К – 140 Оп – 115	К – 155 Оп – 110	К – 155 Оп – 110

(\*) Ввиду незначительного количества кисломолочного продукта, полученного на борту МКС в емкости № 3 гибридизаторов аппаратуры «Рекомб-К», органолептический анализ конечного кисломолочного продукта в данных экспериментах не проводился.

Во всех экспериментах данной серии в качестве посевного материала использовался порошок сублимационно высушенной и измельченной биомассы, включающей в себя клетки лактобацилл.

Существующие в настоящее время технологии получения биомассы микроорганизмов являются многостадийными и включают стадии культивирования, концентрирования и получения конечной формы биопрепарата. В условиях микрогравитации на борту ПКК выполнение каждой стадии процесса представляет определенные трудности как с точки зрения природы микробиологического объекта и последствий, вызванных влиянием ФКП на его характеристики, так и с точки зрения инженерного обеспечения каждой стадии технологического процесса. При разработке данной технологии получения пробиотического препарата в условиях космического полета необходимо было решить следующие задачи:

– предлагаемая технология должна была исключать необходимость выполнения работ по периодическому вскрытию используемого оборудования для его зарядки требуемыми питательными и посевными компонентами,

что позволит в перспективе избежать возможности несанкционированного выхода входящих в состав продукта микроорганизмов;

– данная технология, в случае ее осуществления на борту МКС, не должна требовать от членов экипажа наличия специальных знаний в области практической микробиологии и наличия на борту МКС сложного технологического оборудования.

Исходя из этих требований в Гос.НИИ ОЧБ (г. С.-Петербург) в результате проведения серии экспериментов была разработана малостадийная технология получения на борту ПКК активного пробиотического кисломолочного продукта, включающего штаммы *Lactobacillus acidophilus*.

### **Космический эксперимент «Пробиовит»**

Цель КЭ: разработка простой и удобной, при осуществлении ее на борту космического корабля, технологии получения активного лечебно-профилактического пробиотического продукта, обладающего иммуномодулирующими свойствами.

Срок реализации на РС МКС: 2017 г. – по настоящее время.

Ожидаемые результаты КЭ:

1) Данные о возможности получения на борту МКС образцов кисломолочного пробиотического продукта по предлагаемой технологии.

2) Исходные данные по отработке в условиях микрогравитации простой и удобной в случае использования ее на борту пилотируемого космического корабля технологии, позволяющей гарантированно получать кисломолочный продукт с высоким пробиотическим потенциалом.

3) Результаты предполагается использовать для последующего рассмотрения данной технологии, а также непосредственно полученный при ее осуществлении кисломолочный продукт в качестве штатных при осуществлении длительных космических полетов (Марс, Луна).

### **Методика выполнения космического эксперимента «Пробиовит» на борту РС МКС**

Заключительные эксперименты по разработке технологии получения пробиотического кисломолочного продукта на борту МКС и апробация ее в условиях космического полета проводятся с 2017 г. и по настоящее время в рамках КЭ «Пробиовит». Эксперимент «Пробиовит» осуществляется в двухслойном полиэтиленовом пакете, предназначенном для обезвоженных пищевых продуктов (рис. 3). Внешний слой – пленка комбинированная марки «ПЕТ/Пластиклен» типа ПТА-Л 05601, вкладыш – пленка полиэтиленовая нестабилизированная марки СК ГОСТ – 10354-82.



Рис. 3. Спецпакет «Продукт», используемый в качестве биореактора для получения кисломолочного пробиотического продукта в условиях космического полета [3]

### Последовательность проведения КЭ «Пробиовит»

1. В земных условиях готовится двухкомпонентная смесь, включающая посевной материал в виде пористой таблетки, полученной методом «сублимационного формования» и содержащей 2 симбиотических штамма лактобацилл (рис. 4, а), и сухую питательную среду в виде сублимационно высушенного и измельченного питьевого молока [4].

Питательная среда и посевной материал в необходимом соотношении загружаются в емкость (полиэтиленовый пакет для сухих пищевых продуктов). Пакет герметизируется (запаивается) (рис. 4, б).

Пакет с сухими компонентами, входящими в состав препарата, транспортируется на борт МКС.



а) Внешний вид двухкомпонентной сухой смеси в качестве основы для получения кисломолочного пробиотического продукта на борту МКС



б) Внешний вид снаряженного сухими компонентами пакета перед отправкой его на борт МКС

Рис. 4. Компонентная смесь получения кисломолочного пробиотического продукта на борту МКС

2. На борту МКС проводят следующие операции:

Пакет с сухим материалом, представляющим собой смесь питательной среды и посевного материала, заполняется требуемым объемом питьевой воды из бортовых источников и помещается в бортовой термостат на 24 часа при температуре 37 °С.

По завершении процесса термостатного культивирования пакет с готовым кисломолочным продуктом извлекают из термостата и помещают в бортовой холодильник, где он и находится до момента отправки на Землю для определения пробиотических свойств полученного кисломолочного продукта.

Как следует из вышеизложенного, при осуществлении предлагаемой технологии получения конечного кисломолочного продукта, обладающего пробиотическими и иммунномодулирующими свойствами, на борту МКС планируется выполнять только одну операцию, а именно – операцию по регидратации сухого полупродукта (технология «Просто добавь воду!»).

### **Результаты проведения космического эксперимента «Пробиовит» на борту РС МКС**

***В период МКС-50*** (КЭ выполняли космонавты А. Борисенко и С. Рыжиков) Образцы кисломолочного продукта после проведения космической части эксперимента поступили на анализ в Гос.НИИ ОЧБ 13 апреля 2017 года (рис. 5, а).

Как показал визуальный осмотр извлеченных из летной аппаратуры «Пробиовит» спецпакетов с маркировкой «Продукт», находящийся в них кисломолочный продукт обладает структурой и консистенцией, полностью отвечающей требованиям, предъявляемым к кисломолочным продуктам, произведенным термостатным способом (ГОСТ 33491-2015). Так, цвет полученного кисломолочного продукта молочно-белый, распределенный по всей внутренней поверхности пакета массе. Консистенция продукта с ярко выраженным сгустком в нижней части пакета, без газообразования.

***В период МКС-52*** (КЭ выполняли космонавты С. Рязанский и Ф. Юрчихин) Образцы кисломолочного продукта после проведения космической фазы эксперимента поступили на анализ в Гос.НИИ ОЧБ 6 сентября 2017 года (рис. 5, б).

Как показал визуальный осмотр извлеченных из летной аппаратуры «Пробиовит» спецпакетов с маркировкой «Продукт», находящийся в них кисломолочный продукт, как и в случае МКС-50, обладает структурой и консистенцией, полностью отвечающей требованиям, предъявляемым к кисломолочным продуктам, произведенным термостатным способом.

Емкости с образцами кисломолочного продукта, полученного в земных условиях и в условиях микрогравитации на борту МКС, вскрывали в асептических условиях микробиологического бокса. Кисломолочные продукты извлекали из спецпакетов в стерильные пробирки Corning, после чего контрольные и летные образцы были подвергнуты тщательной оценке их пробиотических свойств и физико-химических характеристик, а также органолептическому тестированию.



а) экспедиция МКС-50

б) экспедиция МКС-52

Рис. 5. Внешний вид образцов кисломолочного пробиотического продукта, полученного в результате термостатного культивирования сухого препарата «Пробиовит» на борту РС МКС

Итоговые результаты экспериментов, выполненных в рамках КЭ «Пробиовит» в течение 2017 г., представлены в сводной таблице 3.

Таблица 3

Сводная таблица результатов экспериментов по получению кисломолочных пробиотических продуктов на борту РС МКС (КЭ «Пробиовит»)

Условия проведения на борту МКС процесса активации сухого препарата в спецпакетах аппаратуры «ПРОБИОВИТ»		МКС-50 (апрель, 2017 г.). Введение 100 мл воды в спецпакет с сухим препаратом	МКС-52 (август, 2017 г.). Введение 100 мл воды в спецпакет с сухим препаратом
Результаты эксперимента	Биологическая активность (% к контролю)	«Земной» – 100 «Летный» – 56 ( $4,0 \times 10^8$ КОЕ/мл)	«Земной» – 100 «Летный» – 143 ( $4,2 \times 10^8$ КОЕ/мл)
	рН кисломолочного продукта	«Земной» – 3,42 «Летный» – 3,51	«Земной» – 4,09 «Летный» – 3,60
	Спектр и уровень антагонизма к условно-патогенным бактериям	Факторы космического полета не влияют на антагонизм	Факторы космического полета не влияют на антагонизм
	Динамическая вязкость кисломолочного продукта (Па.с)	«Наземный» – 18,30 «Летный» – 3,98	«Наземный» – 16,10 «Летный» – 4,52
	Органолептическое тестирование	Продукт обладает приятным чистым кисломолочным вкусом без посторонних привкусов и запахов	
Вывод	На борту МКС получен кисломолочный продукт, обладающий высоким пробиотическим потенциалом		

### **Анализ подготовки космонавтов к выполнению КЭ «Биоэмульсия» и «Пробиовит» на борту РС МКС**

Подготовка космонавтов – сложный целенаправленный процесс формирования у них профессиональных знаний, навыков, умений и иных профессионально важных качеств и свойств.

Обучение космонавтов к полету на МКС проводится на базе Научно-исследовательского испытательного центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина и включает в себя различные этапы и направления. Одним из таких направлений является подготовка по научно-прикладным исследованиям и экспериментам, которые проводятся на борту РС МКС с 2001 года [14, 17].

КЭ «Биоэмульсия» и «Пробиовит» относятся к направлению «Космическая биология и биотехнология», что предусматривает особый подход к обучению космонавтов, так как идет работа с живыми организмами.

Программы подготовки космонавтов по научным экспериментам «Биоэмульсия» и «Пробиовит» содержат различное сочетание педагогических методик, используемых преподавателями (инструкторами), и сводятся к одной стандартной схеме.

Подготовку делят на теоретическую и практическую:

а) теоретические занятия осуществляют в форме лекций, консультаций, самостоятельной работы;

б) практическая подготовка космонавта включает в себя [12, 14, 15]:

– подготовку в учебном классе;

– тренировки на станции-тренажере, включающие текущие тренировки, тренировки при отработке типовых полетных суток и комплексные экзаменационные тренировки.

Основными функциями космонавтов при выполнении космических экспериментов КЭ «Биоэмульсия» и «Пробиовит» являются:

– организация рабочего места, безопасное расположение исследуемых материалов;

– управление научной аппаратурой и контроль ее функционирования;

– работа с циклограммой эксперимента.

В подготовке космонавтов учитывают ряд особенностей, влияющих на процесс освоения действий при выполнении соответствующих операций:

– большое количество и разнообразие операций, которые необходимо выполнить при проведении эксперимента;

– специфика и разнообразие используемых технических и программных средств;

– большой объем запоминаемой информации.

Следует обратить внимание на общую характеристику учебной деятельности космонавтов по научной программе, отличающуюся от других форм обучения [11, 13, 16]:



- она специально направлена на формирование знаний космонавта по проведению космических научных экспериментов, которые имеют свои особенности и значительно отличаются от обычных наземных экспериментов;
- в ней осваиваются общие способы действий по выполнению экспериментов в условиях космического полета;
- она не предусматривает воспроизведение всех факторов космического полета; исходя из этих позиций, инструктор или преподаватель использует вспомогательные материалы.

Рассмотрим особенности формирования навыков у космонавтов по выполнению КЭ «Пробиовит». При этом условно выделено 5 этапов, отличающихся методическими подходами в подготовке космонавтов.

*1 этап.* На базе НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина в рамках подготовки космонавтов в группах и экипажах проводится подготовка к работе с научной аппаратурой и целевым оборудованием в виде теоретических и практических занятий в специализированно оборудованных учебных классах и на УТМ РС МКС:

- отработка и приобретение навыков при работе с тренажерным комплектом укладки научной аппаратуры «Пробиовит» с использованием целевого оборудования укладки «Главбокс-С» и термостата «ГБУ-В»;
- отработка и приобретение навыков по заправке водой емкости с продуктом (из состава укладки «Пробиовит») из системы «СРВ-К2М» с учетом определенных условий выполнения эксперимента.

*2 этап.* Для промежуточного контроля и закрепления навыков по отработке выполнения эксперимента внедрены зачетные тренировки по научно-прикладным исследованиям и экспериментам (проверка знаний и навыков).

На практической части зачета космонавт в условиях интерьера станции, максимально приближенных к реальному полету, отрабатывает циклограмму эксперимента с использованием бортовой документации и штатных радиogramм под руководством специалиста ЦПК. По результатам тренировки можно делать вывод об уровне подготовки космонавта к проведению эксперимента на борту станции. При выявлении ошибок и замечаний проводятся дополнительные практические занятия.

Теоретическая часть зачета подразумевает контроль знаний по научным основам, целям, задачам, результатам КЭ (полученным в предыдущих экспедициях), составу аппаратуры, используемой при выполнении эксперимента.

*3 этап.* Для закрепления и контроля полученных практических навыков в подготовку включена тренировка в рамках типовых полетных суток (ТПС) и экзаменационных комплексных тренировок (ЭКТ).

*Планируется внедрение новых этапов подготовки:*

*4 этап.* Планируется внедрение в программу подготовки космонавтов занятий на базе постановщика КЭ ФГУП «Гос.НИИ ОЧБ» ФМБА для ознакомления с производственной базой предприятия, для более углубленного ознакомления с результатами эксперимента, полученными в предыдущих

экспедициях, и знакомством с перспективной научной аппаратурой, а также ознакомление с вариантами проведения эксперимента в лабораториях института в связи с изменениями условий выполнения эксперимента.

*5 этап.* Планируется внедрение в программу подготовки космонавтов выполнение эксперимента по отработке заправки водой емкости с продуктом (из состава укладки «Пробиовит») из системы СРВУ.

На рисунке 6 представлены основные процедуры по отработке циклограммы выполнения КЭ «Пробиовит» на учебно-тренировочном макете (УТМ) РС МКС.

Таким образом, в результате подготовки космонавт должен обладать следующими знаниями и навыками:

1. Знать:

- цели и задачи эксперимента;
- физические основы проведения эксперимента;
- состав научной аппаратуры и целевого оборудования;
- циклограмму выполнения эксперимента; меры безопасности при выполнении эксперимента;
- какие действия необходимо предпринять для приведения научной аппаратуры в безопасную конфигурацию в случае возникновения нерасчетной нештатной ситуации (до принятия решения Землей по устранению этой ситуации).

2. Иметь навыки:

- выполнения эксперимента (работа с аппаратурой с использованием бортовой документации и радиограмм, взаимодействие между членами экипажа и ГОГУ и т.д.).



Рис. 6. Отработка космонавтом циклограммы выполнения эксперимента «Пробиовит» на УТМ РС МКС

## Выводы

1. Проведен анализ метода выращивания лактобацилл в условиях микрогравитации на борту РС МКС. Исследован посевной материал «Симбиотический комплекс ацидофильных бактерий «Витафлор» на основе *L. acidophilus* Д-75 и *L. acidophilus* Д-76, используемый в КЭ «Биоэмульсия» и «Пробиовит». Основой «Витафлор» являются жизнеспособные клетки двух штаммов молочнокислых бактерий *Lactobacillus acidophilus* Д-75 и Д-76. «Витафлор»

удобен для проведения космических экспериментов, так как характеризуется высокой скоростью роста, широким спектром и высоким уровнем антагонистической активности и обладает достаточно высоким пробиотическим потенциалом.

2. Рассмотрены методика и результаты проведения КЭ «Биоэмульсия» и КЭ «Пробиовит» на борту РС МКС.

По результатам экспериментов по культивированию *L. acidophilus* в герметичном сменном биореакторе, проведенных на РС МКС в период с апреля 2007 года по апрель 2009 года, отмечается, что оптимизация процесса культивирования на борту МКС позволила получить из жидких компонентов кисломолочный продукт, обладающий высоким пробиотическим потенциалом. Органолептический анализ полученного кисломолочного продукта показал, что продукт обладает приятным кисломолочным вкусом, не имеет посторонних привкусов и запахов.

По результатам проведения серии экспериментов на МКС в период с 2011 года по 2013 год можно заключить, что полученные данные являются определяющими для решения вопроса о возможности организации в перспективе в условиях длительной космической экспедиции на борту ПКС производства продуктов микробиологического происхождения.

3. В результате проведения КЭ «Пробиовит» на борту МКС космонавтами экспедиций МКС-50 и МКС-52 подтверждена принципиальная возможность проведения полного цикла культивирования пробиотических лактобацилл с использованием типовых пищевых спецпакетов и получения на борту пилотируемого космического корабля пробиотического кисломолочного продукта из сухой двухкомпонентной смеси (посевной материал и питательная среда). В то же время, использование типовых пищевых спецпакетов в качестве биореактора для культивирования ацидофильных лактобацилл дает основание предположить, что, в перспективе, полученный кисломолочный продукт может быть использован в качестве лечебно-профилактического в условиях микрогравитации.

4. Специфические особенности учебного процесса по научно-прикладным исследованиям и экспериментам определяются индивидуальным подходом к программе подготовки каждого космонавта в зависимости от его опыта полета, технологических особенностей проведения космических экспериментов и сложности их выполнения в условиях космического полета.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воробьева Л.И., Абилов С.К. Антимутагенные свойства бактерий (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология, 2002. – Т. 38. – № 2. – С. 115–127.
- [2] Кобатов А.И., Вербицкая Н.Б., Добролеж О.В., Петров Л.Н. Пробиотик «Витафлор» как возможное средство защиты космонавтов от негативных последствий воздействия ионизирующего излучения // Медицина экстремальных ситуаций, 2007. – № 2 (20). – С. 72–79.

- [3] Кобатов А.И. Устройство для получения и приема кисломолочного продукта в условиях невесомости. Патент РФ на полезную модель, № 169875. М. кл. А 23С9/12, А23С9/18, 04.04.2017 г.
- [4] Кобатов А.И., Вербицкая Н.Б., Добролеж О.В. Сухой пробиотически активный препарат «Витафлор-П». Патент РФ № 2487547, А23С9/12, А23Р1/02, А61К35/74. 20.07.2013 г.
- [5] Паркер Ю. Как защитить космических путешественников // В мире науки, 2006. – № 6. – С. 15–20.
- [6] Состояние и перспективы развития средств профилактики и лечения радиационных поражений / Под ред. проф. В.Д. Гладких. – М.: «Комментарий», 2017. – 304 с.
- [7] Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных. – М.: Высшая школа, 2004. – 549 с.
- [8] Bodana A.R., Rao D.R. Antimutagenic Activity of Milk Fermented by *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus bulgaricus* // J. Dairy Sci., 1990. – V. 73. – pp. 3379–3384.
- [9] Matar Ch., Nadathur S.S. Antimutagenic Effects of Milk Fermented by *Lactobacillus Helveticus* L 89 and a Protease-Deficient Derivative // J. Dairy Sci., 1997. – V. 80. – pp. 1965–1970.
- [10] Nadathur S.R., Gould S.J., Bakalinsky A.T. Antimutagenicity of Fermented Milk // J. Dairy Sci., 1994. – V. 77. – pp. 3287–3295.
- [11] Попова Е.В., Пушкарева Т.В. Интериоризация профессиональных знаний в процессе подготовки космонавтов в экипажах // Вестник университета Российской академии образования, 2011. – № 5. – С. 92–95.
- [12] Крючков Б.И., Курицын А.А., Усов В.М., Поляков В.М., Попова Е.В. Исследовательская деятельность космонавтов в длительных орбитальных полетах // Авиакосмическая и экологическая медицина. Москва, 2012. – № 4. – С. 22–26.
- [13] Сабуров С.П., Сабуров П.А., Попова Е.В. Пути совершенствования подготовки кадров в области космонавтики // Научное обозрение: гуманитарные науки, № 4, Изд-во: Издательский дом «Наука образования», 2017. – С. 4–10.
- [14] Попова Е.В. Навыки в профессиональной подготовке космонавтов по научно-прикладным исследованиям и экспериментам // Пилотируемые полеты в космос. 2012. – № 1(3). – С. 114–118.
- [15] Курицын А.А., Сиволап В.А., Попова Е.В., Шолохова И.А., Кутник И.В. Использование современных информационных технологий для подготовки космонавтов к выполнению программы научно-прикладных экспериментов на борту РС МКС // XLII академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 261 с. (23–26 января 2018 года).
- [16] Крючков Б.И., Попова Е.В. Опыт подготовки и анализ выполнения космонавтами научно-прикладных исследований и экспериментов на РС МКС // К.Э. Циолковский. Проблемы и будущее российской науки и техники. Материалы 52-х научных чтений памяти К.Э. Циолковского, г. Калуга 2017. – С. 394–395.
- [17] Кутник И.В., Кондратенко Ю.Г. Подготовка космонавтов к выполнению биотехнологических экспериментов на борту МКС // Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники. Материалы 50-х научных чтений памяти К.Э. Циолковского, г. Калуга, 2015.

## REFERENCES

- [1] Vorobyova L.I., Alibaev S.K. Antimutagenic Properties of Bacteria (review) // Journal "Applied Biochemistry and Microbiology", 2002. – Vol. 38. – No 2. – pp. 115–127.
- [2] Kobatov A.I., Verbitskaya N.B., Dobrolezh O.V., Petrov L.N. Probiotic "Vitaflor" as a Possible Remedy for Protecting the Cosmonauts from Negative Effects of Ionizing Radiation // Journal "Medicine of Emergency Situations", 2007. – No 2(20). – pp. 72–79.
- [3] Kobatov A.I. Device for Production and Eating of a Fermented Milk Product in Zero Gravity Conditions. The Patent of the Russian Federation for Utility Model, No 169875. Intern. Cl. A 23C9/12, A23C9/18, 04.04.2017.
- [4] Kobatov A.I., Verbitskaya N.B., Dobrolezh O.V. Dried Prebiotic "Vitaflor-P". The Patent of the Russian Federation No 2487547, A23C9/12, A23P1/02, A61K35/74. 20.07.2013.
- [5] Parker Yu. How to Protect Space Travelers. // Journal "V mire Nauki. Scientific American", 2006. – No 6. – pp. 15–20.
- [6] Current Status and Prospects of Development of Means for Prevention and Treatment of Radiation Injury. / Eds. Professor V.D. Gladkikh. – Moscow: Publ. House "Komentariy", 2017. – p. 304.
- [7] Yarmonenko S.P., Vaison A.A. Radiobiology of Humans and Animals. – Moscow: Publ. House "Vysshaya shkola", 2004. – p. 549.
- [8] Bodana A.R., Rao D.R. Antimutagenic Activity of Milk Fermented by *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus bulgaricus* // J. Dairy Sci., 1990. – V. 73. – pp. 3379–3384.
- [9] Matar Ch., Nadathur S.S. Antimutagenic Effects of Milk Fermented by *Lactobacillus helveticus* L 89 and a Protease-Deficient Derivative // J. Dairy Sci., 1997. – V. 80. – pp. 1965–1970.
- [10] Nadathur S.R., Gould S.J., Bakalinsky A.T. Antimutagenicity of Fermented Milk // J. Dairy Sci., 1994. – V. 77. – pp. 3287–3295.
- [11] Popova E.V., Pushkaryova T.V. Interiorization of Cosmonauts' Professional Knowledge in the Course of Their Crew Training. // Journal of the University of Russian Innovative Education, 2011. – No 5. – pp. 92–95.
- [12] Kryuchkov B.I., Kuritsyn A.A., Usov V.M., Polyakov V.V., Popova E.V. Research Activity of Cosmonauts During Long-Term Space Missions // Journal "Aerospace and Environmental Medicine". Moscow, 2012. – No 4. – pp. 22–26.
- [13] Saburov S.P., Saburov P.A., Popova E.V. Improvement of Personnel Training in the Field of Cosmonautics // Scientific Review: Humanities, No 4, Publishing House: "Nauka Obrazovaniya", 2017. – pp. 4–10.
- [14] Popova E.V. Formation of Skills During Professional Training of Cosmonauts for Applied Scientific Research and Experiments // Journal "Manned Space Flights". 2012. – No 1(3). – pp. 114–118.
- [15] Kuritsyn A.A., Sivolap V.A., Popova E.V., Sholokhova I.A., Kutnik I.V. Use of Modern Information Technologies When Training Cosmonauts to Implement the Program of Scientific and Applied Experiments Onboard the ISS RS // XLII S.P Korolyov Academic Readings. Moscow: Bauman MSTU, 2018. p. 261 (January 3–26, 2018).
- [16] Kryuchkov B.I., Popova E.V. Analysis of Preparation and Implementation of the Scientific-Applied Research and Experiments by the Cosmonauts Aboard the ISS RS. // K.E. Tsiolkovskiy. Issues and Prospects of Russian Science and Technology. Proceedings of the 52<sup>nd</sup> K.E. Tsiolkovskiy Academic Readings. Kaluga, 2017. – pp. 394–395.
- [17] Kutnik I.V., Kondratenko Yu.G. Cosmonaut Training for Performing Biotechnological Experiments Aboard the ISS // K.E. Tsiolkovskiy's Conceptions in the Innovation of Science and Technology. Proceedings of the 50<sup>th</sup> K.E. Tsiolkovskiy Academic Readings. Kaluga, 2015.

УДК 629.78.072.8

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ  
И ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
НАДУВНЫХ ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ МОДУЛЕЙ  
В СОСТАВЕ ПИЛОТИРУЕМЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Б.И. Крючков, Ю.Б. Сосюрка, Б.В. Бурдин

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; канд. техн. наук, доцент Ю.Б. Сосюрка;  
канд. техн. наук Б.В. Бурдин (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье анализируются современные достижения в области создания и использования технологий надувных трансформируемых модулей (ТМ) в пилотируемой космонавтике. Приводятся достигнутые характеристики экспериментальных образцов ТМ в США и России. Показаны преимущества технологии ТМ по сравнению с существующими традиционными технологиями. Оценены проблемы и особенности использования трансформируемых модулей в составе пилотируемых космических комплексов. Рассмотрены основные аспекты деятельности космонавтов при их эксплуатации.

**Ключевые слова:** надувные трансформируемые модули, экспериментальная отработка надувных модулей, опытный образец надувного модуля, жилой модуль, исследовательский модуль, складской модуль.

**Prospects and Features of the Use of Inflatable Transformable  
Modules of Manned Space Complexes. B.I. Kryuchkov,  
Yu.B. Sosyurka, B.V. Burdin**

The paper analyzes achievements in the field of the development and use of technologies of inflatable transformable modules (TMs) for manned space exploration. The characteristics of experimental models of TMs obtained in the USA and Russia are given. The advantages of the TM technology as compared with existing traditional technologies are shown. The problems and features of the use of transformable modules for manned space complexes are evaluated. The main aspects of cosmonauts' activity when operating them are discussed.

**Keywords:** inflatable transformable modules, experimental tests of inflatable modules, inflatable module test pattern, habitation module, research module, storage module.

В настоящее время одним из перспективных направлений развития пилотируемой космической техники является создание и использование технологий надувных трансформируемых модулей (ТМ) в составе орбитальных станций, а также напланетных баз. Об этом свидетельствует анализ имеющегося зарубежного и отечественного опыта разработки ТМ различного целевого назначения [1, 2, 3].

Данная технология является наиболее перспективной по следующим основным причинам:

- возможно существенное увеличение гермообъемов обитаемых отсеков по сравнению с традиционными жесткими модулями с целью повышения комфортности длительного пребывания экипажей и создания необходимых условий для проведения сложных научных и технологических экспериментов;
- обеспечивается выведение ТМ в космос существующими и перспективными ракетами-носителями;
- отсутствует необходимость существенной модернизации производства и испытательной базы на заводах-изготовителях космической техники;
- возможна эффективная защита экипажей от воздействия ионизирующего излучения, метеороидов и частиц космического мусора;
- обеспечивается транспортировка ТМ существующим железнодорожным и авиационным транспортом [1].

Разработка и испытания ТМ продвигаются довольно быстрыми темпами. К настоящему времени уже проведен ряд экспериментов с ТМ в космосе.

Заметим, что впервые в истории пилотируемой космонавтики надувной модуль в виде шлюзовой камеры применялся на советском космическом корабле «Восход-2». Из этого модуля А.А. Леонов совершил 18 марта 1965 года первый выход человека в открытый космос.

## **Состояние разработок и варианты использования трансформируемых модулей**

### ***ТМ компании BEAM***

Из зарубежных проектов одним из первых и наиболее результативным можно считать проект создания надувного жилого модуля TransHab [4, 12]. Первоначально проект разрабатывался в НАСА в 1992–2000 гг., а затем был продолжен компанией Bigelow Expandable Activity Module (BEAM).

Конструктивной особенностью модуля TransHab является объединение жесткого каркаса и надувной оболочки в единую конструкцию.

Два надувных необитаемых модуля компании BEAM GENESIS I (запущен 12 июля 2006 года) и GENESIS II (запущен 28 июня 2007 года) уже прошли проверку на орбите, демонстрируя возможность создания из таких конструкций модулей целых космических станций. Оба модуля имели 15-сантиметровую оболочку и сохраняли герметичность как минимум два года после запуска. Объем каждого из модулей составлял 11,5 кубических метра, масса – около 1360 кг.

8 апреля 2016 года на МКС был доставлен модуль BEAM в негерметичном отсеке транспортного корабля США «Дракон». Основу модуля составила мягкая тканевая трансформируемая оболочка со встроенной противометеороидной и радиационной защитой, эквивалентной или даже более

эффективной, чем имеющаяся защита модулей МКС. В полностью развернутом состоянии толщина его оболочки составляет приблизительно 0,46 м. Оболочка состоит из нескольких слоев, в число которых входит материал вектран (Vectran). Этот материал уже поработал в космосе, в частности, использовался в амортизационных баллонах при посадке марсоходов Spirit и Opportunity. Модуль имеет 4 больших иллюминатора с защитой от проникновения ультрафиолетовых лучей, через которые можно будет наблюдать Землю.

ВЕАМ, в отличие от модулей Genesis, позиционируется как обитаемый модуль, однако после стыковки с МКС постоянно жить, работать и хранить материалы в нем не предусматривалось. Дистанционно в нем отслеживаются температура, давление, радиационная обстановка. Показания датчиков радиации сравнивались с данными таких же датчиков внутри МКС.

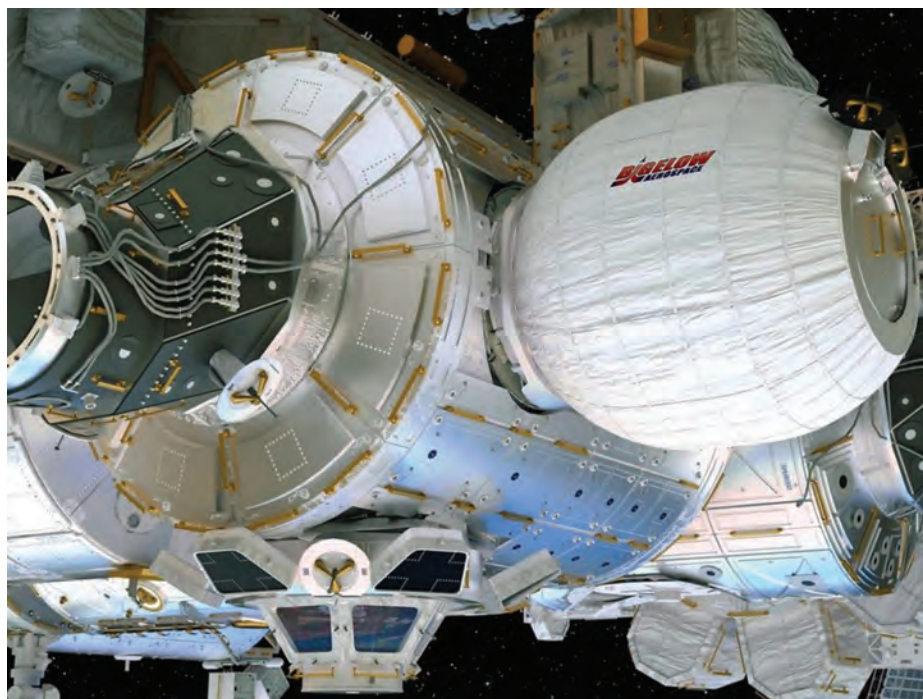


Рис. 1. Модуль компании ВЕАМ (НАСА)

Объем ВЕАМ в свернутом состоянии составил 3,6 куб. м, в развернутом – 16,0 куб. м. Длина модуля – около 6,7 м. После того, как модуль причалил к МКС, экипаж станции привел в действие систему герметизации для того, чтобы полностью развернуть конструкцию модуля, используя воздух, хранящийся внутри сложенного модуля (рис. 1). Космонавты периодически посещали модуль с целью оценки его эксплуатационных характеристик и проведения инспекции. Модуль рассчитан на нахождение в составе станции



в течение 2 лет, после чего он отстыковывается от МКС и сгорает в атмосфере Земли. Затраты на создание этого модуля составили 18 млн долларов. В таблице 1 представлены массовые и объемные характеристики модуля BEAM в сравнении с другими модулями.

Таблица 1

Массовые и объемные характеристики модулей (НАСА)

Модули МКС	Масса, кг	Объем, м <sup>3</sup>	Отношение: $\frac{\text{масса}}{\text{объем}} \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$	Фактор относительно BEAM
TransHab	13 200	340	39	0,44
BEAM	1 415	16	88	1,00
Columbus (ESA)	10 300	95	108	1,23
Destiny (US Lab)	14 520	106	137	1,56
Tranquility (N3)	13 600	70	194	2,20
Звезда (СМ)	20 295	89	228	2,59
Заря (ФГБ)	70 260	72	281	3,19

НАСА и компания Bigelow Aerospace планируют создание следующего ТМ (В 330), но уже намного больших размеров. Его внутренний объем составит около 330 куб. м, длина – 16,9 м, а диаметр – 6,7 м (на МКС он не превышает 4,2 м). В таком модуле могут свободно обитать 6 человек.

Внутреннее устройство перспективного трансформируемого модуля, который будет использоваться в качестве обитаемого отсека для экипажа, показано на рис. 2.

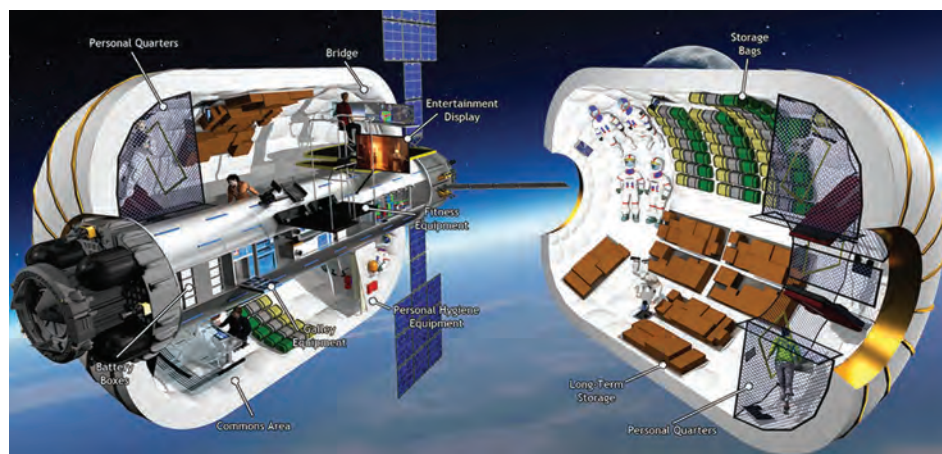


Рис. 2. Внутреннее устройство перспективного модуля компании BEAM

Наземные испытания показывают, что защитные свойства надувных модулей (от радиации, ударов частиц космического мусора и метеоритов) не хуже, чем у традиционных металлических конструкций.

Большой интерес представляет вариант орбитальной связки системы надувных модулей в составе орбитальной космической станции компании BEAM [13].

В распоряжении ее обитателей будет огромное свободное пространство, в котором планируется оборудовать места для работы и отдыха. Основными видами деятельности поселенцев отеля будут проведение научных экспериментов, наблюдений Земли и космоса, видео- и фотосъемки, ведение репортажей с Земли и т.п. Размеры модулей: длина около 14 м, диаметр – 6,7 м. Металлической частью станции будет только конструкция общей фермы для крепления надувных модулей и наружного служебного и научного оборудования. Возможный вид такой станции, состоящей из 3 надувных модулей, показан на рис. 3.

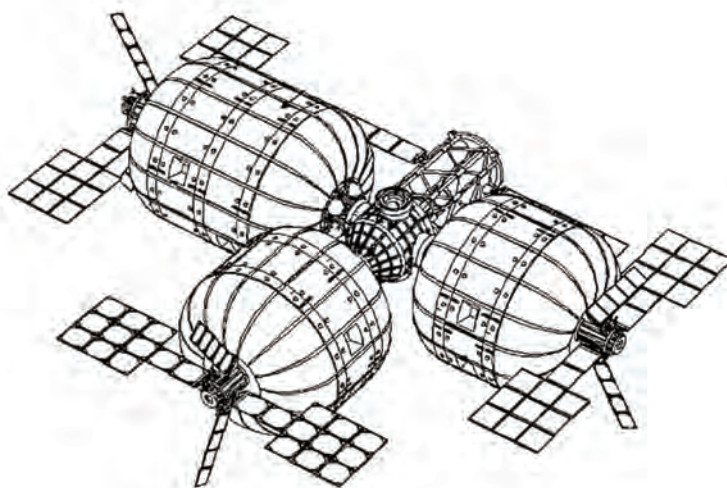


Рис. 3. Вид орбитальной космической станции, состоящей из ТМ (Bigelow Aerospace)

Компания Bigelow Aerospace рассматривает также различные варианты использования ТМ в лунных программах. В частности, совместно с United Launch Alliance она рассматривает возможность выведения на орбиту Луны околорунной станции, состоящей из двух трансформируемых модулей к 2022 году (рис. 4). Приведение модулей в рабочее состояние будет осуществляться на орбите Земли. Предполагается, что частная станция будет развернута параллельно с международной станцией Deep Space Gateway.

Аналогичная конструкция может быть размещена и на поверхности Луны (рис. 5).

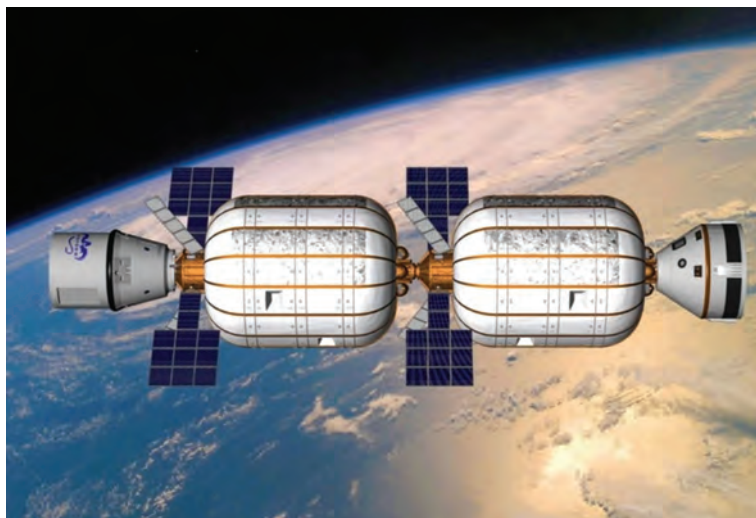


Рис. 4. Двухмодульная окололунная станция из ТМ (Bigelow Aerospace и United Launch Alliance)

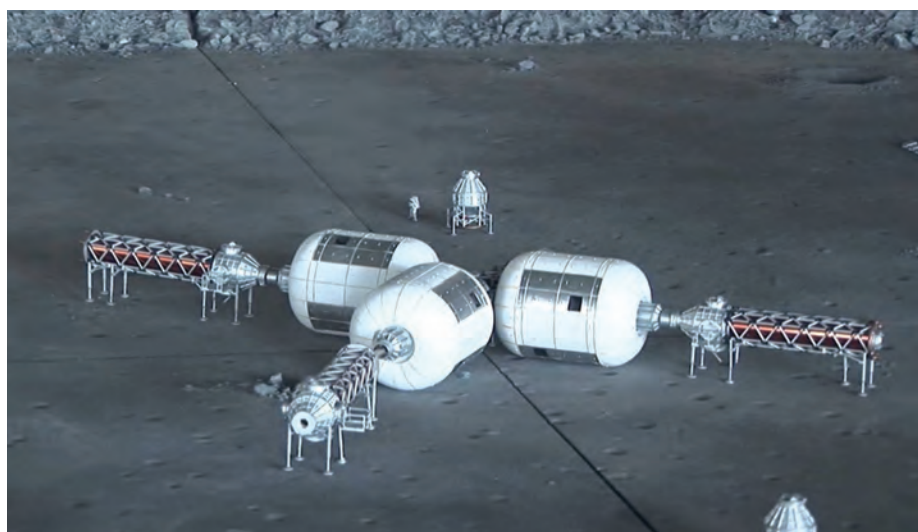


Рис. 5. Лунная база Bigelow Aerospace

***Концепция долговременного космического комплекса Nautilus-X***

Оригинальная идея использования ТМ представлена в проекте НАСА, получившим название «Наутилус-Икс» (Nautilus-X) [2, 3]. Ключевой идеей данного многоцелевого ПКК является использование надувных модулей для разработки всех основных функциональных отсеков, в том числе вращающегося тора, обеспечивающего искусственную гравитацию (рис. 6).

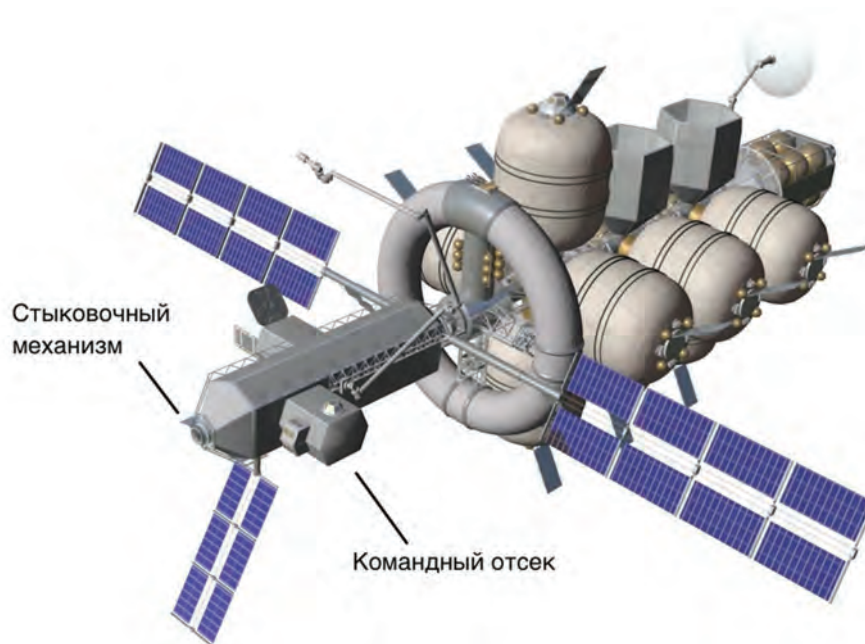


Рис. 6. Долговременный комплекс «Наутилус-X» на базе ТМ (НАСА)

Осевая часть «Наутилуса» представляет собой коридор длиной 14 м и шириной 6 м. Вокруг нее размещается несколько функциональных наддувных модулей, солнечные батареи, двигатели и тор, используемый в качестве спального отсека. Диаметр тора – от 9 до 12 м. По сути, он представляет собой центрифугу, вращающуюся со скоростью 10 оборотов в минуту и обеспечивающую гравитацию величиной 0,08–0,69 g. Модульная структура «Наутилуса» позволяет наращивание ПКК и изменение его конфигурации в зависимости от целей полета.

Сборка «Наутилуса» будет осуществляться на околоземной орбите, для чего потребуется 2–3 пуска ракет-носителей тяжелого класса.

Данный проект ориентируется на технологии Bigelow Aerospace. Предназначен для обеспечения длительных полетов, в том числе в качестве промежуточного порта между Землей и Луной. Из окололунного пространства «Наутилус» способен возвращаться на орбиту Земли для переоснащения, модернизации, дозаправки, смены экипажа, состоящего из 6 человек. Затем он снова может отправляться к Луне или даже в дальний космос. Доставка экипажей планируется на ПТК «Орион». Ориентировочная стоимость проекта составляет около 3,7 млрд долларов, срок создания комплекса – около 5,5 лет. Отдельно оцениваются ресурсы на создание вращающегося тора – центрифуги. Ее стоимость составляет от 84 до 143 млн долларов, время разработки – более 3 лет.

**ТМ РКК «Энергия»**

В 2015 году в РКК «Энергия» был создан и экспериментально отработан прототип (масштабный макет) надувного ТМ в 1/3 от натуральной величины: состав и структура фрагментов многослойной трансформируемой гермооболочки, основные конструктивные решения ключевых обеспечивающих систем. Были проведены прочностные и тепловакуумные испытания макета, а также испытания на стойкость к пробоям микрометеороидами до 10 см в диаметре [1, 5].

ТМ РКК «Энергия» состоит из центрального жесткого отсека постоянного объема и многослойной трансформируемой герметической оболочки, которая разворачивается вокруг него (рис. 7). Трансформируемая оболочка имеет внешний несущий слой, а также несколько функциональных слоев. Последние предназначены для защиты обитаемого объема от радиации, метеороидов и теплозащиты. Предлагаемый модуль адаптирован к классу ракет-носителей, используемых в настоящее время. В рабочее положение ТМ приводится в космосе, при этом его герметичный объем увеличивается в несколько раз. ТМ может использоваться в качестве складского или рабочего модуля в составе орбитальной космической станции (ОКС) (рис. 7, 8). На основе разработанной технологии могут быть созданы ТМ объемом до 300 куб. м [7, 8].

Как один из вариантов, после прекращения эксплуатации МКС рассматривалась возможность использования ТМ в составе отечественной орбитальной станции, создаваемой на основе новых модулей российского сегмента МКС (рис. 8).

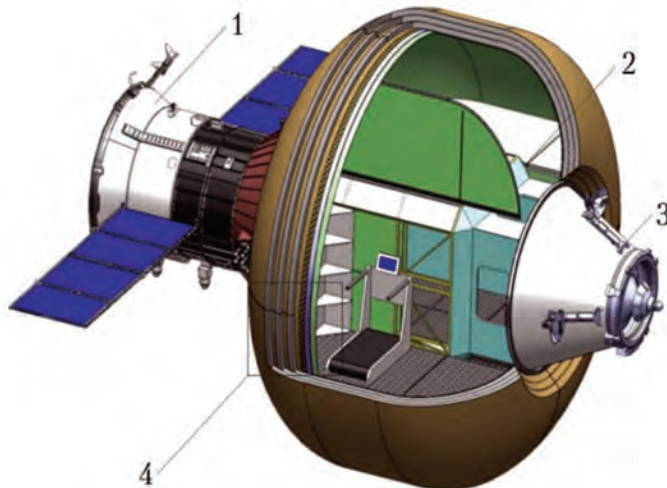


Рис. 7. Проектный облик ТМ РКК «Энергия»:

- 1 – приборно-агрегатный отсек ТТК «Прогресс»; 2 – внутренний жесткий отсек;  
3 – стыковочный агрегат; 4 – многослойная трансформируемая оболочка



Рис. 8. Вариант перспективной орбитальной станции с трансформируемым модулем

### *Другие варианты использования ТМ*

В ближайшей перспективе ТМ могут стать составными частями околоземных орбитальных космических станций, а в отдаленной перспективе могут быть использованы в составе ПКК для лунных и марсианских миссий, создания лунных и марсианских пилотируемых околопланетных и напланетных инфраструктур.

На рис. 9 показана конфигурация высокоширотной ОКС, которая, по представлениям авторов работы [6], могла бы быть создана после 2020 года. В ее составе, кроме лабораторного, энергетического и узлового модулей, имеются ТМ и модуль-лаборатория «ОКА-Т», предназначенный для экспериментального производства новых материалов в космосе. Данный модуль может отстыковываться от ОКС и некоторое время совершать автономный полет вблизи МКС. Затем он возвращается на станцию для обслуживания экипажем.

В связи с возможностью устройства жилища для человека в лавовых туннелях под поверхностью Луны, весьма эффективным может стать применение ТМ и для этих целей [9]. В подобных напланетных обитаемых комплексах требования к ТМ будут не столь жесткими, как для модулей размещаемых на поверхности Луны или на окололунных орбитах (рис. 10). В туннеле слой грунта защищает экипаж и конструкцию от радиации, метеоритов и космического мусора, обеспечивает стабильный температурный режим (около  $-30^{\circ}$  по Цельсию).

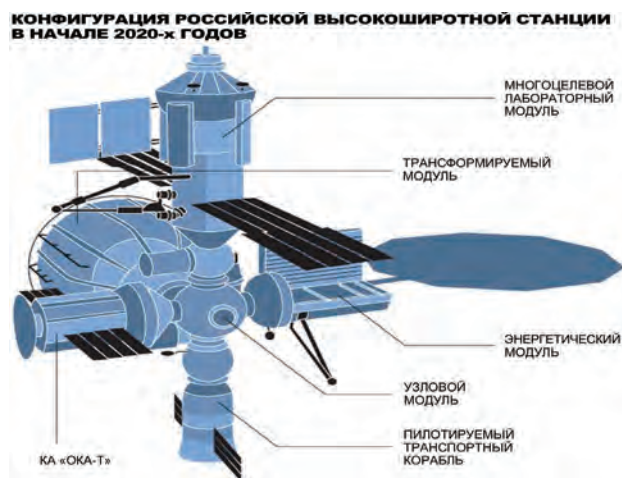


Рис. 9. Облик высокоширотной орбитальной станции с ТМ [6]

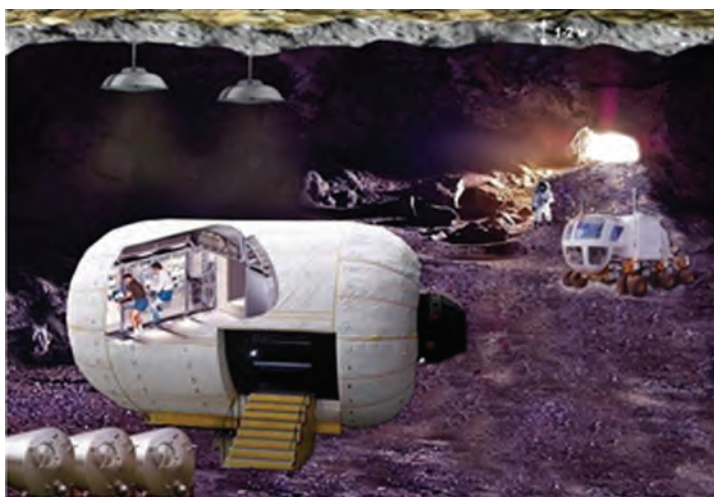


Рис. 10. Вариант размещения ТМ в лавовом туннеле на Луне

В 2018 году стало известно, что РКК «Энергия» нашла еще одно применение трансформируемым конструкциям [11]. Специалисты этой организации разрабатывают надувной каркас для солнечных батарей. Он представляет собой композитную трансформируемую конструкцию, состоящую из многослойной оболочки. Фактически оболочка – это пакет, состоящий из герметичного внутреннего слоя, силового среднего слоя, выполненного из углеродного материала с пропиткой, и наружной мембраны, не позволяющей конструкции в сложенном состоянии залипнуть. После доставки в компактном виде на орбиту производится надув ТМ, после чего он затвердевает и используется по назначению.

### **Особенности, влияющие на использование ТМ в составе ПКК**

Основным отличием ТМ от стандартных металлических модулей являются их конструктивно-технологические особенности: использование полимерных материалов для изготовления оболочки, многослойность оболочек, их способность к трансформации из сложенного состояния в полномасштабный модуль, возможности создания крупногабаритных ТМ, относительная простота создания ТМ с различными формами (цилиндр, тор и др.), совместимость ТМ с традиционными металлическими модулями ПКК. Более детально особенности конструкции ТМ рассмотрены на рис. 11.

Вопросы обеспечения прочности надувных (пневматических) конструкций при строительстве в наземных и подводных условиях отработаны достаточно хорошо [14, 15]. Специфические условия космического полета требуют учета ряда новых факторов, в первую очередь сохранения их герметичности при воздействии вакуума, микрометеоритов и космического мусора. Как в нашей стране [16], так и за рубежом [17] ведется поиск эффективных способов защиты оболочки ТМ от пробоя метеоритами или техногенными элементами. В частности, предлагаются варианты защиты с помощью специальных композитных экранов. Такие экраны могут эффективно дробить ударяющие частицы любого происхождения и снижать до безопасных величин нагрузку на мягкие стенки надувной конструкции ТМ.

В общем случае особенности конструкции ТМ определяют некоторые специфические требования к ним. Основными из них можно считать следующие:

- надувная оболочка ТМ не должна обладать канцерогенными свойствами;
- для изготовления оболочки должны применяться пожаростойкие и термостабильные полимерные материалы, не выделяющие токсичных веществ в случае пожара;
- огнегасящие материалы средств пожаротушения должны быть совместимы с материалами надувной оболочки;
- должно быть исключено попадание на внешнюю оболочку ТМ высокотемпературных газовых струй от сопел двигательных установок;
- температурно-влажностный режим внутри ТМ должен исключать развитие бактерий и плесени;
- устойчивость полимерных материалов ТМ к воздействию неблагоприятных факторов космического полета должна оцениваться по результатам натуральных испытаний в космосе;
- должны быть обеспечены возможности «каркасирования» ТМ с целью сохранения необходимой жесткости оболочки в течение всего срока эксплуатации;
- должны быть предусмотрены возможности совмещения надувных конструкций с жесткими фермами, на которых крепится оборудование (вне и внутри ТМ);



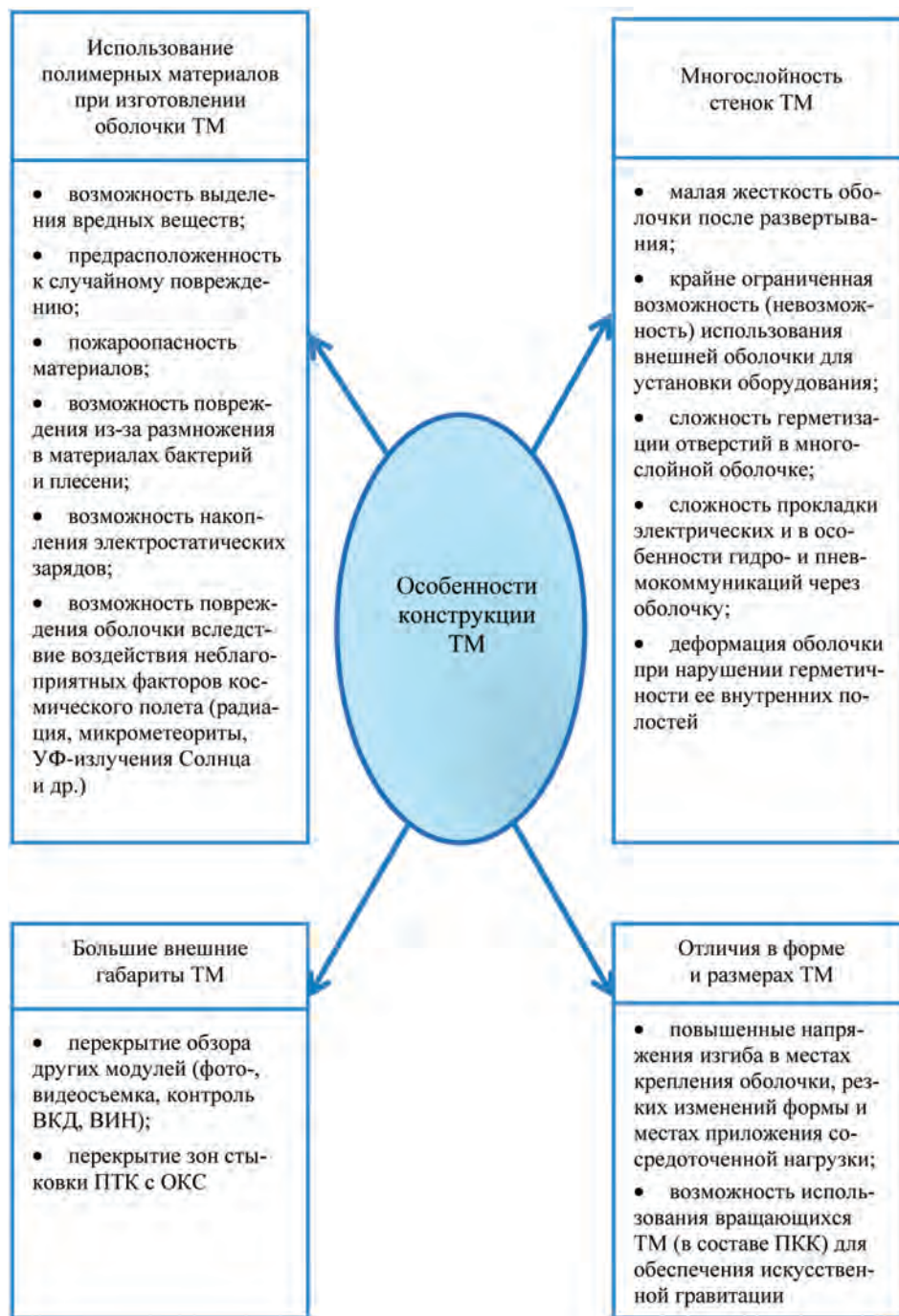


Рис. 11. Конструктивно-технологические особенности ТМ

- должны быть обеспечены возможности прокладки электро-, гидро- и пневмомагистралей через жесткие и гибкие элементы оболочки ТМ, а также между ТМ и традиционными металлическими модулями;
- должны быть предусмотрены способы и средства безопасного обслуживания ТМ в открытом космосе (ВКД, манипуляторы и др.);
- в случае изменения внутреннего давления в ходе эксплуатации форма модуля должна сохраняться;
- должны быть предусмотрены специальные меры по предотвращению разгерметизации ТМ (использование защитных противометеоритных экранов, средства самогерметизации, средства поиска мест пробоя надувной оболочки и их заделки, способы своевременного информирования экипажа и ЦУПа и др.).

## **Особенности эксплуатации ТМ**

### *1. Доставка ТМ на орбиту в сложенном виде*

Опыт доставки на орбиту ТМ крайне мал. Требуется тщательная наземная отработка операций выведения ТМ, их стыковки с ПКК и развертывания в рабочее состояние. При этом должны учитываться влияние перегрузок, вибраций, воздействие набегающего потока воздуха после сброса головного обтекателя при выведении, возможность слипания слоев оболочки и др.

### *2. Придание ТМ заданной формы*

После выведения на орбиту Земли ТМ в сложенном состоянии ему придается заданная форма за счет наддува воздухом. В зависимости от конструкции ТМ возможны технологии наддува как обитаемого отсека в целом, так и составных частей его оболочки. Должны предусматриваться сброс избыточного давления в процессе наддува и поддержание давления в ТМ в ходе эксплуатации модуля.

### *3. Температурный режим оболочки ТМ*

Следует учитывать, что в ходе эксплуатации ТМ возможны потеря эластичности и деформация внешней оболочки ТМ из-за ее неравномерного освещения Солнцем. В числе конструктивно-технологических мер поддержания номинального температурного режима внешней оболочки ТМ может быть, например, использование теплозащитных экранов.

### *4. Гелиофизические воздействия на ТМ*

В процессе длительной эксплуатации ТМ возможно образование высоких электрических потенциалов на его внешней поверхности. По этой причине должны быть предусмотрены меры (устройства) для снятия электрических зарядов.

### *5. Этап экспериментальной отработки ТМ в составе ПКК на орбите Земли*

До начала штатной эксплуатации ТМ в составе ПКК они должны пройти всестороннюю отработку в реальных условиях космического полета. При этом особое внимание должно быть уделено безопасности экипажа ПКК.

На первоначальном этапе работ ТМ должен быть изолирован от обитаемых отсеков ПКК. Должны быть предусмотрены дистанционные средства контроля герметичности ТМ, строго регламентирован режим посещения модуля экипажем ПКК, разработаны процедуры контроля состава атмосферы обитаемого объема ТМ.

## Особенности деятельности экипажей при эксплуатации ТМ (табл. 2)

Таблица 2

Функции экипажей при эксплуатации ТМ и особенности их подготовки

№ п/п	Функции экипажей	Особенности подготовки
1	Проведение стыковки доставляемого в сложенном виде ТМ с ПКК	Тренировки на тренажерах и специализированных стендах по стыковке ТМ с ПКК
2	Выполнение (контроль выполнения) наддува и раскрытия оболочки ТМ	Отработка операций наддува (контроля наддува) и раскрытия ТМ на натуральных макетах и виртуальных моделях
3	Периодический контроль: жесткости и герметичности ТМ, состава газовой смеси в обитаемых отсеках	Тренировки на натуральных макетах, тренажерах и стендах с использованием аналогов бортовой аппаратуры
4	Ликвидация аварийных ситуаций, связанных с негерметичностью ТМ или пожаром в обитаемых отсеках	Тренировки на тренажерах по устранению АС и срочному покиданию ТМ. Поддержание в полете навыков экипажа по действиям в случае АС в ходе бортовых тренировок
5	Штатная деятельность экипажа в (на) эксплуатируемом ТМ (работа с грузами, НПИ, эксплуатация СЖО, операции ТОР)	Отработка на тренажере ТМ штатных операций, а также операций ТОР

## Выводы

Современные достижения в области создания технологий надувных трансформируемых модулей и достигнутые характеристики экспериментальных образцов свидетельствуют о перспективности их использования в составе будущих пилотируемых орбитальных комплексов и напланетных баз.

В ближайшие годы могут быть созданы обитаемые ТМ, обеспечивающие значительные герметичные объемы внутреннего пространства для комфортного и безопасного пребывания экипажей в космосе. Предварительные теоретические оценки и результаты наземных экспериментов показывают, что ТМ способны обеспечить необходимую защиту экипажей, длительно работающих в надувных модулях, от космического мусора, метеоритов, радиации и других вредных факторов космического полета.

Вместе с тем, несмотря на определенные преимущества, технологии ТМ, по сравнению с существующими традиционными технологиями создания модулей жесткой конструкции, разработка и использование надувных модулей имеют свои особенности, которые порождают ряд проблем, требующих решения как на этапах их разработки, так и в процессе эксплуатации. Анализ осо-

бенностей конструкции и особенностей эксплуатации модулей показывает, что при существующем уровне развития космической техники, имеющихся и разрабатываемых технологиях создания и применения новых материалов, все технические и эксплуатационные проблемы, связанные с ТМ, могут быть решены в ближайшие годы. При соответствующем уровне квалификации экипажей ПКК, в составе которых имеются ТМ, может быть обеспечена их надежная и безопасная эксплуатация в длительных космических полетах.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Трансформируемые крупногабаритные конструкции для перспективных пилотируемых комплексов / Хамиц И.И., Филиппов И.М., Бурылов Л.С. и др. // Космическая техника и технологии. – № 2(13). – 2016. – С. 23–33.
- [2] Mark L. Holderman. NAUTILUS-X: Multi-Mission Space Exploration Vehicle, Future in Space Operations (FISO) Colloquium, 2011-01-26.
- [3] Электронный ресурс. <https://www.popmech.ru/technologies/11402-nautilus-korabl-dlya-dalnikh-plavaniy/>
- [4] Paul Zarchan. Gossamer Spaceraft: Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications. 2001. pp. 527–529.
- [5] Патент RU 2561888 С2. Российская Федерация. Космический трансформируемый модуль. Хамиц И.И., Бурылов Л.С., Чернецова А.А.; заявитель и патентообладатель – ОАО «РКК «Энергия»; заявка 2013154017/11; приоритет от 05.12.2013 г. // Изобретения и полезные модели. 10.09.2015. № 25.
- [6] Электронный ресурс. <https://masterok.livejournal.com/2850281.html>
- [7] Электронный ресурс. <http://tass.ru/kosmos/3454296>
- [8] Электронный ресурс. <http://rusvesna.su/future/1417088195>
- [9] Б.И. Крючков, А.А. Курицын, В.И. Ярополов. Концепции, направления и перспективы развития мировой пилотируемой космонавтики. НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2013.
- [10] Руководство для специалистов по эргономическому обеспечению процессов создания и эксплуатации пилотируемых космических комплексов / В.И. Ярополов, Б.И. Крючков, Ю.Б. Сосюрка, А.Г. Ларин. – НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2017. – 205 с.
- [11] Электронный ресурс. [https://www.energia.ru/ru/news/news-2018/news\\_06-29\\_1.html](https://www.energia.ru/ru/news/news-2018/news_06-29_1.html)
- [12] Selig, Molly M., Valle, Gerard D., James, George H., Oliveras, Ovidio M., Jones, Thomas C., Doggett, William R. Creep Burst Testing of a Woven Inflatable Module. (NASA Johnson Space Center, Houston, TX, United States). Jan 01, 2015. Document ID 20140017032/.
- [13] Patent Application Publication US 2014/0319282 A1. Space Station Configuration. Robert T. Bigelow. Assignee: Bigelow Development Aerospace / Oct. 30, 2014. Int. Cl. B64G 1/12 (2006/01).
- [14] В.В. Ермолов, У.У. Бэрд, Э. Буднер и др. Пневматические строительные конструкции. – М.: Стройиздат, 1983. – 439 с.
- [15] Л.Д. Луганцев. Расчет оболочечных конструкций. Ч.1. – МГУИЭ, 2007. – 32 с.
- [16] Е.П. Буслов, Н.А. Голженко, В.В. Устилов. Исследование эффективности композитных защитных экранов космических аппаратов при ударе высокоскоростных частиц. Доклад ЦНИИмаш., электронный ресурс: [conf.nsc.ru/files/conferences/explosion/160083/](http://conf.nsc.ru/files/conferences/explosion/160083/) / Голденко НА. doc, 2016.

- [17] Rudolph M., Schaefer F., Destefanis R., Farand M., Lambert M. Fragmentation of aluminium projectiles on fabrics, IAC 61 Internat.

## REFERENCES

- [1] Flexible Large Structures for Advanced Manned Complexes / Khamits I.I., Filipov I.M., Burylov L.S. and others. // Journal "Space Engineering and Technologies". – No 2(13). – 2016. – pp. 23–33.
- [2] Mark L. Holderman. NAUTILUS-X: Multi-Mission Space Exploration Vehicle, Future in Space Operations (FISO) Colloquium, 2011-01-26.
- [3] Electronic source. <https://www.popmech.ru/technologies/11402-nautilus-korabl-dlyadalnikh-plavaniy/>
- [4] Paul Zarchan. Gossamer Spasecraft: Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications. 2001. pp. 527-529.
- [5] Patent RU 2561888 C2. Russian Federation. Space Flexible Module. Khamits I.I., Burylov L.S. Chernetsova A.A.; applicant and patentee –RSC Energia; application 2013154017/11; priority: 05.12.2013. // Inventions and Utility Models. 10.09.2015. No 25.
- [6] Electronic source. <https://masterok.livejournal.com/2850281.html>
- [7] Electronic source. <http://tass.ru/kosmos/3454296>
- [8] Electronic source. <http://rusvesna.su/future/1417088195>
- [9] B.I. Kryuchkov, A.A. Kuritsyn, V.I. Yaropolov. Concepts, Directions and Prospects for the Development of Global Manned Cosmonautics. Gagarin Research&Test CTC, 2013.
- [10] Manual for Specialists on Ergonomic Support of the Processes of Design and Operation of Manned Space Complexes / V.I. Yaropolov, B.I. Kryuchkov, Yu.B. Sosurka, A.G. Larin. – Gagarin Research&Test CTC, 2017. – p. 205.
- [11] Electronic source. [https://www.energia.ru/ru/news/news-2018/news\\_06-29\\_1.html](https://www.energia.ru/ru/news/news-2018/news_06-29_1.html)
- [12] Selig, Molly M., Valle, Gerard D., James, George H., Oliveras, Ovidio M., Jones, Thomas C., Doggett, William R. Creep Burst Testing of a Woven Inflatable Module. (NASA Johnson Space Center, Houston, TX, United States). Jan 01, 2015. Document ID 20140017032/.
- [13] Patent Application Publication US 2014/0319282 A1.Space Station Configuration. Robert T. Bigelow. Assignee: Bigelow Development Aerospace / Oct. 30, 2014. Int. Cl.B64G 1/12 (2006/01).
- [14] V.V. Ermolov, U.U. Berd, E. Budner and others. Pneumatic Building Constructions. – Moscow: "Stroyizdat" Publ., 1983. – p. 439.
- [15] L.D. Lugantsev. Design of Shell Constructions. Part 1. – MSUEE, 2007. – p. 32.
- [16] E.P. Buslov, N.A. Gylgenko, V.V. Ustilov. Efficiency of Spacecraft's Composite Protective Shields on Impact with Hypervelocity Particles. TSNIIMash Report, electronic source: [conf.nsc.ru/files/conferences/explosion/160083/Goldenko N.A. doc, 2016](http://conf.nsc.ru/files/conferences/explosion/160083/Goldenko N.A. doc, 2016).
- [17] Rudolph M., Schaefer F., Destefanis R., Farand M., Lambert M. Fragmentation of aluminium projectiles on fabrics, IAC 61 Internat.

**ПИЛОТИРУЕМЫЕ  
ПОЛЕТЫ В КОСМОС**  
(научный журнал)

Выпускающий редактор *Л.К. Васильева*

Редактор *С.Г. Токарева*

Технический редактор *Е.Н. Бондарева*

Художественный редактор *Л.Г. Попова*

Корректор *Т.И. Лысенко*

Перевод *С.Б. Беляковская, С.А. Дедова*

Подписано в печать 14.03.19.

Формат 70х108/16. Бумага ксероксная.

Усл. печ. л. 11,38. Тираж 120 экз. Зак. 1-19.

Отпечатано в редакционно-издательском отделе

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»