

УДК 629.786.2

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-5-13

## ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС И УЧАСТИЕ МФ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА В ИХ РЕШЕНИИ

**М.Ю. Беляев**

ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Ленина, д. 4а

mikhail.belyaev@rsce.ru

Рассмотрены проблемы, возникшие при проведении экспериментов на МКС. Указаны способы их решения, позволяющие выполнять в полете МКС различные исследования, отрабатывать новые технологии и оборудование, а также ставить перспективные научные задачи. Приведены примеры участия ученых и специалистов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в их решении.

**Ключевые слова:** орбитальная станция, космические эксперименты, проблемы управления

**Ссылка для цитирования:** Беляев М.Ю. Проблемы управления при проведении экспериментов на российском сегменте МКС и участие МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана в их решении // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 4. С. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-5-13

*К 60-летию образования по инициативе С.П. Королева  
Космического факультета*

Успехи отечественной космонавтики (запуск первого искусственного спутника Земли, первый полет человека в космическое пространство, фотографии обратной стороны Луны и многие другие величайшие достижения [1]) во многом были предопределены созданием знаменитой ракеты Р-7 [1]. Наибольших достижений ученые нашей страны достигли в области пилотируемых космических полетов, обеспечивших выполнение научно-прикладных исследований на отечественных орбитальных станциях серии «Салют», «Мир» и российском сегменте Международной космической станции (МКС) [1–3]. В процессе подготовки и реализации программ исследований на орбитальных станциях «Салют», «Мир» была создана специальная технология проведения экспериментов [3–10].

Технология проведения экспериментов на орбитальной космической станции (ОКС) предусматривает решение следующих задач:

- планирование экспериментов;
- оптимизация программы экспериментов;
- математическое моделирование;
- реализация эксперимента;
- контроль состояния научной аппаратуры и управление ее работой в полете;
- экспресс-анализ научных данных по телеметрической (ТМ) информации;
- измерение и расчет дополнительной информации для анализа и интерпретации результатов экспериментов.

### Результаты и обсуждение

В период выполнения научно-исследовательских программ на станциях «Салют-4, -6, -7» были решены следующие проблемы управления при проведении экспериментов:

- планирование экспериментов: выбор оптимальных зон и построение оптимальных программ проведения экспериментов;
  - построение рациональных схем выполнения экспериментов;
  - создание математических моделей (движения орбитальных станций; физических условий на борту станции (микрперегрузки, магнитные возмущения) и т. д.);
  - разработка и использование экономичных методов проведения экспериментов;
  - автоматизированный контроль состояния научной аппаратуры по ТМ-информации и управление ее работой (МКФ-6М, БСТ-1М, КРТ-10, «Сплав-01» и т. д.);
  - экспресс-анализ научных данных («Рябина», «ММК», «Елена-Ф» и др.), реализация технологии управляемых научных экспериментов;
  - расчет дополнительных данных для интерпретации результатов экспериментов (данные магнитометров, солнечных датчиков, звездных фотометров и т. д.).
- Разработанные методы позволили при скромных ресурсах и возможностях станций «Салют-4, -6, -7» выполнить обширные программы экспериментов и исследований и решить важные задачи для обороноспособности страны.

При планировании и проведении экспериментов используются различные математические модели [3, 7]:

- движения центра масс космического аппарата по орбите и движения относительно центра масс;
- бортовых систем космического аппарата (системы управления движением, электропитания и т. д.);
- физических условий, возникающих на космическом аппарате (микротрегрузки, электромагнитные помехи и т. д.);
- деятельности экипажа;
- наземного контура управления;
- описания «внешних» факторов космического полета (магнитного поля Земли (МПЗ), метеорных частиц, облачности по трассе полета и т. д.).

Орбитальная космическая станция «Мир», выведенная на орбиту 20 февраля 1986 г., была станцией нового поколения. Управление ее полетом осуществлялось под руководством заместителя генерального конструктора РКК «Энергия» В.В. Рюмина, выпускника кафедры «Системы автоматического управления» (САУ) МЛТИ (с 2017 г. Мытищинский филиал (МФ) МГТУ им. Н.Э. Баумана). Отметим следующие особенности решения проблем управления при выполнении экспериментов на ОКС «Мир» [6–8]:

- постоянно ориентированный полет ОКС «Мир» с помощью гиродинов;
- необходимость создания комплекса математических моделей на персональных компьютерах для обеспечения исследований прогноза работы системы электропитания; процесса управления ориентацией ОКС «Мир» с помощью гиродинов; «затенения» полей зрения приборов элементами конструкции, прогноза сеансов связи ОКС через спутник-ретранслятор и т. д.;
- передача научных данных по каналам связи постановщикам экспериментов для экспресс-анализа, использование телеуправления для выполнения экспериментов;
- первое использование спутниковой навигационной системы.

Особенности управления ОКС «Мир» потребовали непрерывного использования в течение полета созданного комплекса математических моделей и разработанных методов управления. Это позволило выполнить беспрецедентную программу исследований и экспериментов, в том числе с рентгеновской аппаратурой на модуле «Квант», стереосканером MOMS на модуле «Природа» и др. [6–8]. В выполнении этих работ в РКК «Энергия» принимал активное участие выпускник кафедры «Системы автоматического управления», канд. техн. наук, доцент В.М. Стажков.

Одновременно с выполнением полета ОКС «Мир» шли работы по проекту МКС. Директором проекта МКС со стороны России был В.В. Рюмин.

20 ноября 1998 г. на орбиту был выведен первый модуль «Заря» и 23 марта 2001 г. полет ОКС «Мир» был завершен [8].

Международная космическая станция — самый масштабный космический проект современности, в осуществлении которого принимают участие многие выпускники МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, решая сложные организационные и технические вопросы (А.И. Григорьев, К.Н. Жолобнюк и др.), выполняя значимые научно-технические задачи. Станция предназначена для проведения на ее борту различных экспериментов и исследований, а также для отработки новых технологий и оборудования в условиях орбитального полета [2]. Масса МКС еще до завершения ее полного развертывания более чем в 2 раза превышает массу ОКС «Мир» в последние годы его эксплуатации. Для МКС также характерны чрезвычайно крупные размеры и наличие большого количества сложных бортовых систем. Она представляет собой весьма протяженную конструкцию, состоящую из модулей стран — участниц программы создания и эксплуатации станции, объединенных в американский и российский сегменты.

Необходимость эксплуатации и управления таким сложным, массивным объектом, как МКС, потребовала решения некоторых новых научных и практических задач [8]. В процессе полета станции вследствие изменения конфигурации и массы за счет стыковок с новыми модулями, доставки и перемещения дополнительных грузов и расходования ресурсов, постоянно изменяются ее массово-инерционные характеристики. Поэтому для управления полетом МКС и проведения на ее борту научных исследований необходимо определение и уточнение в полете тензора инерции станции, ее массы, положения центра масс, параметров действующих аэродинамических моментов, микроускорений. В целях решения данных специфических задач динамики и управления полетом МКС были организованы космические эксперименты «Тензор», «Среда МКС», «Изгиб» и др. [11–23]. Мытищинский филиал МГТУ является участником космических экспериментов «Среда-МКС», «Изгиб», «Вектор-Т», «Таймер» и др.

Технические возможности МКС, связанные с ее оснащенностью современными бортовыми системами и наличием экипажа, позволяют выполнять на ней уникальные научные исследования и космические эксперименты [3]. Вместе с тем некоторые конструктивные решения и характеристики ряда бортовых систем МКС создают определенные помехи и специфические особенности для выполнения исследований. Для разработки методов и технологии создания благоприятных условий проведения экспериментов в области микрогравитации были организованы космические эксперименты на российском сегменте МКС и проведены специальные исследования.

## Изучение характеристик и возможностей МКС и отработка на ней методов управления, новых технологий и аппаратуры

В процессе подготовки и реализации космических экспериментов «Тензор», «Среда МКС» и др. были разработаны методы, алгоритмы и программно-математическое обеспечение уточнения динамических характеристик МКС в полете. С помощью разработанных методов периодически уточнялся тензор инерции станции и определялись некоторые другие динамические параметры МКС. При этом были разработаны и использовались разные способы оценки тензора инерции, определения положения центра масс и аэродинамических параметров [11–13]. Для определения массы станции были отработаны два способа — на основе использования двигателей транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» [12] и с помощью отделяемого от МКС спутника [13].

Разработанные методы и программно-математическое обеспечение уточнения динамических характеристик и полученные с их помощью данные регулярно использовались в процессе управления полетом МКС. Кроме того, они успешно использовались в процессе эксплуатации геостационарного спутника «Ямал-200» для управления ориентацией космического аппарата по прогнозу его углового движения, что было сделано впервые в мировой практике [14] и позволило эксплуатировать спутник более 10 лет. Такой успех во многом был обеспечен научными исследованиями и практической деятельностью выпускника кафедры «Системы автоматического управления» канд. техн. наук Ю.Р. Банита [11, 14], работающего в настоящее время главным инженером заместителем генерального директора АО «Газпром космические системы».

В рамках организованных на МКС космических экспериментов «Среда МКС», «Изгиб» исследуется микрогравитационная обстановка на станции [15–17]. Микроускорения на МКС обусловлены вращением станции вокруг центра масс, неоднородностью поля земного притяжения в пределах МКС, силами негравитационной природы (аэродинамическим торможением, работой двигателей станции и т. д.), а также функционированием бортовых систем и деятельностью экипажа станции. В микроускорениях выделяют квазистатические и вибрационные составляющие.

На основе большого количества измерений, выполненных различными датчиками, изучено поведение вибрационной составляющей микроускорений при различных режимах полета и при работе различных бортовых систем МКС.

Предложена методика обработки данных. Предусмотрено решение таких задач, как выделение циклических трендов из полученных результатов измерений, оценка спектральной плотности составляющей этих результатов с непрерывным спектром, их низкочастотная фильтрация. Исследованы колебания конструкции, вызванные работой двигателей. Изучены фоновые возмущения на МКС и возмущения при физических упражнениях экипажа [15–17]. С учетом крупных размеров МКС для изучения микрогравитационной обстановки на станции необходимы переносные измерители микроускорений. Их разработкой занимается заместитель заведующего кафедрой «Системы автоматического управления», канд. техн. наук, доцент Ю.П. Батырев.

При планировании и проведении многих экспериментов следует учитывать деформацию корпуса МКС, которая возникает после выведения ее на орбиту вследствие разности давления внутри и снаружи МКС. В процессе орбитального движения МКС деформация ее корпуса возникает вследствие изменения температуры за бортом, выполнения в полете динамических операций и др. Деформация может привести к отклонению чувствительных осей установленных на корпусе станции приборов на величину до  $1...2^\circ$ . Традиционно деформация корпуса орбитальных станций контролировалась и учитывалась в расчетах при наведении научных приборов на исследуемые объекты с помощью выполнения специальных юстировочных работ с использованием измерений от звездных датчиков. Такие исследования планируются на МКС в эксперименте «Качка». Кроме того, в рамках эксперимента «Среда МКС» был предложен новый метод определения деформации корпуса МКС на основе выполнения фото- и видеосъемки аппаратурой, устанавливаемой на иллюминаторе [18].

В настоящее время осуществляется набор статистики по изучению деформаций различных элементов конструкции МКС при изменениях воздействия на них солнечного излучения, проведении динамических операций (изменении ориентации станции, коррекции орбиты, стыковочных операций и др.).

В рамках технических экспериментов на МКС проводится также изучение собственного магнитного поля, ее собственной внешней атмосферы. Большое внимание в рамках экспериментов («Пилот», «Таймер» и др.) уделяется также изучению особенностей деятельности космонавтов в условиях орбитального полета [19]. В этих работах принимает активное участие выпускница кафедры Н.А. Тарасова.

При управлении полетом МКС, проведении экспериментов и решении других задач необ-

ходимо прогнозировать движение станции по орбите, поскольку она является объектом, обладающим значительными размерами и сложной, изменяющейся конфигурацией. Ориентация МКС изменяется при выполнении различных динамических операций. При решении задачи высокоточного прогнозирования движения МКС важно учитывать угловое движение станции вокруг ее центра масс, наличие гравитационных и аэродинамических возмущений, срабатывание двигателей ориентации станции, изменение сил аэродинамического сопротивления при изменениях конфигурации и ориентации МКС. Для отработки методов учета всех этих факторов при высокоточном прогнозировании движения станции на МКС разработан и успешно выполняется эксперимент «Вектор-Т».

Одной из задач этого эксперимента является уточнение параметров атмосферы на высоте полета для повышения точности определения траектории движения МКС. На плотность атмосферы влияют многие факторы: активность Солнца, геомагнитная активность и другие, из-за влияния которых значение плотности атмосферы может значительно отличаться от прогнозируемого. Это обстоятельство часто приводит к трудностям эксплуатации космических аппаратов.

Задаче уточнения прогноза движения космического аппарата в плотных слоях атмосферы посвящены многие работы, однако она далека от своего решения. В эксперименте «Вектор-Т» предложен следующий способ решения этой задачи.

От станции отделяется спутник идеальной сферической формы, размеры и масса которого точно известны [20]. С помощью наземных станций радиоконтроля орбиты непрерывно измеряются и рассчитываются параметры движения спутника. Поскольку масса и размеры сферического спутника точно известны, можно решить обратную задачу — по движению спутника по орбите можно рассчитать плотность атмосферы и уточнить параметры модели атмосферы. Спутник и МКС первое время движутся по близким орбитам, поэтому полученные уточненные параметры атмосферы могут быть использованы для прогноза траектории движения МКС.

Точное знание параметров атмосферы позволяет решить и многие другие задачи, например, уточнить значение квазипостоянных составляющих микроперегрузок, возникающих на МКС в полете из-за влияния атмосферы. Именно квазипостоянные значения микроперегрузок наиболее важны для проведения и анализа экспериментов в области микрогравитации.

17 августа 2017 г. был осуществлен запуск очередного спутника из серии «Сфера в рамках эксперимента «Вектор-Т»». В связи со значительным

усложнением конструкции МКС перед запуском спутника была смоделирована траектория его полета после запуска, исключая соударение спутника со станцией.

Для уточнения параметров атмосферы в рамках космического эксперимента «Вектор-Т» разработан также метод, основанный на определении движения свободно падающего тела внутри герметичного отсека станции [21]. Это движение вызвано тем, что на МКС действует сила сопротивления атмосферы Земли, а объекты на борту защищены от воздействия набегающего потока корпусом станции. В реализации данного метода на борту МКС и в обработке результатов космического эксперимента активное участие принимают сотрудники кафедры «Системы автоматического управления».

В целях отработки методов автономной навигации для планируемой лунной программы в рамках космического эксперимента «Вектор-Т» отработывается технология определения орбиты космического аппарата по фотоснимкам планеты [22].

Результаты работ, выполненных в рамках технических космических экспериментов «Вектор-Т», «Тензор», «Среда-МКС», «Изгиб», были удостоены премии Правительства Российской Федерации для молодых ученых за 2008 г. Среди лауреатов этой премии и выпускник факультета С.Н. Рожков.

В программе работы МКС используются российские ТГК «Прогресс», которые после выполнения основных задач в составе МКС нередко обладают запасом ресурсов основных систем. Использование по возможности этих ресурсов для решения исследовательских задач в автономном полете ТГК после расстыковки от станции увеличивает эффективность работы ТГК, а также программы исследований на МКС в целом.

Транспортные грузовые корабли могут применяться для проведения исследований в различных направлениях:

- отработка, тестирование и сертификация в полете различной аппаратуры, материалов, систем в интересах программ других космических аппаратов;

- выполнение экспериментов в области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с помощью дополнительно установленной аппаратуры;

- выполнение экспериментов в области микрогравитации с использованием особых возможностей ТГК;

- запуск микроспутников и зондов после расстыковки ТГК от МКС и выхода на определенную орбиту.

Для выполнения экспериментов в рамках космического эксперимента «Изгиб» с помощью ТГК «Прогресс» разработаны новые эффектив-

ные технологии [23], в том числе технология изучения верхних слоев атмосферы с помощью тростовой системы, разворачиваемой с ТГК.

Для МКС, имеющей очень большие размеры и массу, гиродины, установленные на американском сегменте, не обладают располагаемым кинетическим моментом, достаточным для наведения станции на исследуемые объекты или даже для точного поддержания ориентации станции относительно орбитальной либо инерциальной системы координат. Понятно, что при таком ограничении на возможность ориентации МКС выполнять наведение на исследуемые объекты жестко закрепленных на корпусе станции приборов практически невозможно.

Для решения этой проблемы наведение исследовательской аппаратуры Российского сегмента МКС на изучаемые объекты без разворотов станции осуществляется с помощью подвижных платформ наведения (ППН). Наличие поворотных платформ предоставляет дополнительные возможности наведения аппаратуры независимо от ориентации станции. Их использование потребовало разработки специальных методов управления для наведения на исследуемые объекты космического эксперимента

Использование нескольких ППН позволяет также осуществлять одновременное наблюдение разных объектов. Одна двухосная ППН уже используется с начала 2014 г. на МКС для наведения в рамках космического эксперимента «МКС-Напор» на изучаемые объекты камеры высокого разрешения. В целях расширения возможностей исследования наземных объектов предполагается отправка на борт МКС новых ППН и использование разработанных в период полета ОС «Салют» и «Мир» методов оптимального планирования экспериментов [3, 9, 10]. Разработанные методы планирования позволяют определять оптимальные моменты времени выполнения наблюдений заданных объектов и получать оптимальные программы наблюдения объектов из каталогов [24]. При планировании наблюдений требуется выбрать оптимальный набор зон из общего числа возможных зон наблюдений. При этом сформированная программа наблюдений должна удовлетворять предъявляемому (выбранному) критерию. Критерий выбора зон может формироваться на основе различных требований — от максимизации эффективности наблюдений по выбранному критерию оценки эффективности (информативности) наблюдений до минимизации расхода выбранного вида ресурса. При этом должны выполняться задаваемые условия/требования/ограничения по другим сформулированным критериям эффективности и видам ресурсов. Множество одиночных критериев с различными

весовыми коэффициентами может быть сведено к единому объединенному критерию путем их свертки в единый критерий оптимальности [24].

Задача оптимизации программы наблюдений является частично целочисленной задачей линейного программирования и решается методами линейного и целочисленного программирования. В этом направлении имеется много важных и интересных научных задач для ученых Космического факультета Мытищинского филиала (особенно, в случае использования одновременно нескольких ППН).

Кроме того, следует заметить, что орбитальные станции обладают уникальными возможностями для обеспечения наблюдений исследуемых объектов даже без выполнения разворотов станции или аппаратуры. Поскольку орбиты орбитальных станций, как правило, имеют высоту ~400 км, то для поддержания орбиты станции постоянно проводятся коррекции, топливо для выполнения которых доставляется с помощью грузовых кораблей. При выполнении коррекций на подъем орбиты существует возможность их проведения в различные временные интервалы и с различной величиной импульса. Поэтому одновременно с подъемом высоты орбиты возможно обеспечивать прохождение станции над требуемыми исследуемыми объектами. Учет в программе выполнения коррекций орбиты такой разработанной методики позволяет не только поддержать полет станции на требуемой высоте, но и обеспечит возможность наблюдения с нее заданных объектов на земной поверхности и небесной сфере аппаратурой, жестко закрепленной на корпусе станции [8].

Изучение характеристик и возможностей МКС в технических космических экспериментах и разработанные методы управления и проведения научных экспериментов позволяют отрабатывать в полете станции новые технологии и конструкторские решения. Большое внимание в программе научно-прикладных исследований на МКС уделяется экспериментам по изучению Земли и ее атмосферы. Большое количество наблюдений и исследований было выполнено в космическом эксперименте «Ураган» [25], в котором использовались фото- и спектрометрические приборы, а также была создана новая аппаратура в ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах, спектрометрическая аппаратура с улучшенными характеристиками, серия ППН для автоматического наведения измерительной аппаратуры на исследуемые объекты. Создаваемая ИК-аппаратура позволяет, например, обнаруживать участки возгорания размером 2...3 м. В космическом эксперименте «Ураган» отрабатывается также технология оценки по фотоснимкам Земли развития потенциально опасных и катастрофических явлений: схода ледников, пожаров, наводнений.

В создании научной аппаратуры для космического эксперимента «Ураган», проведении эксперимента на Российском сегменте МКС и обработке получаемых результатов принимают активное участие выпускники Космического факультета и кафедры «Системы автоматического управления» Э.Э. Сармин, канд. техн. наук М.В. Черемисин, А.М. Есаков и др. [25, 26]. Научная аппаратура космического эксперимента «Ураган» используется и в других космических экспериментах: «Дубрава» (постановщик МФ МГТУ), «Сценарий» (МФ МГТУ — участник «Сценарий»).

В 2018 г. на МКС в соответствии с Рамочным соглашением между Роскосмосом и Германским аэрокосмическим центром DLR в рамках космического эксперимента «Ураган» доставлена научная аппаратура «ИКАРУС» [27], с помощью которой будут проводиться исследования миграции животных и птиц и решаться другие важные научные задачи. Предварительно на исследуемых животных и объектах будут размещаться миниатюрные датчики массой 5 г [27].

Важное место в программах работ на МКС занимают исследования в области робототехники, совершенствования систем космических аппаратов, а также отработка технологий, необходимых для выполнения планируемой лунной программы [22]. Успешному выполнению исследований и экспериментов на МКС способствуют разработанные методы управления и созданная высокоскоростная система передачи научных данных, информационно-управляющая система (ИУС), спутниковая навигационная система и др. [28].

## Выводы

Благодаря организованным на МКС техническим экспериментам и проведенным исследованиям были изучены реальные характеристики и возможности орбитальной станции, уточнены динамические характеристики МКС, определены магнитные помехи, возникающие на станции в полете, исследована деформация корпуса МКС из-за температурных и других факторов. Большое внимание при проведении технических космических экспериментов на МКС было уделено изучению микровозмущений, возникающих в процессе функционирования станции, особенностям деятельности космонавтов в условиях орбитального полета. Выполненные исследования показали необходимость разработки новых методов управления станцией и проведения на ней целевых работ в части прогнозирования движения крупногабаритной орбитальной станции, наведения научных приборов на изучаемые объекты и т. п. Разработанные и отработанные в полете методы управления станцией и проведения научных экспериментов позволили выполнять в полете МКС исследования,

отрабатывать различные технологии и оборудование и ставить новые научные задачи. В решении научных задач на МКС активное участие принимают выпускники и сотрудники Космического факультета МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Важнейшей для нашей страны задачей, решаемой с помощью космических технологий, является контроль территории (своей и прилегающей). Поскольку большую часть территории РФ составляют лесные угодья, задача, связанная с исследованием и контролем лесов с помощью космических методов, приобретает особое значение. Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, в состав которого входят Космический факультет и Факультет лесного хозяйства, лесопромышленных технологий и садово-паркового строительства, должен внести значительный вклад в решение этой важной для страны задачи.

Значимое место в программе исследований на МКС отводится также образовательным экспериментам. Мытищинский филиал МГТУ является участником одного из таких экспериментов (образовательный космический эксперимент «Великое начало», портал «Планета Королёва») и готовит новые научно-прикладные и образовательные космические эксперименты, которые будут способствовать подготовке высококвалифицированных специалистов для космической отрасли и народного хозяйства страны.

## Список литературы

- [1] Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва. 1946–1996 / под ред. Ю.П. Семенова. Королев: РКК «Энергия», 1996. 670 с.
- [2] Микрин Е.А. Перспективы развития отечественной пилотируемой космонавтики // Космическая техника и технологии, 2017. № 1. С. 5–11.
- [3] Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
- [4] Беляев М.Ю. Оперативное планирование научных экспериментов, проводимых с помощью КА // Космические исследования, 1980. № 2. С. 235–241.
- [5] Беляев М.Ю. Основные задачи и принципы построения наземно-бортового комплекса управления экспериментами, проводимыми с помощью космических аппаратов // Управляющие системы и машины, 1980. № 4. С. 103–108.
- [6] Математическое обеспечение экспериментов, выполняемых на орбитальных комплексах «Мир», «Салют-7» и научных модулях / под ред. В.В. Рюмина, М.Ю. Беляева // Ракетно-космическая техника, 1991. Сер. XII. Вып. 2. 176 с.
- [7] Математическое моделирование — основа создания и эксплуатации сложных орбитальных комплексов / под ред. Н.А. Брюханова, М.Ю. Беляева // Ракетно-космическая техника, 2008. Сер. XII. Вып. 1. 191 с.
- [8] Проблемы и задачи повышения эффективности программ исследований на космических кораблях и орбитальных станциях / под ред. В.П. Легостаева, М.Ю. Беляева // Ракетно-космическая техника, 2011. Сер. XII. Вып. 1–2. 205 с.

- [9] Беляев М.Ю., Рулев Д.Н. Оптимизация программы экспериментов при оперативном планировании исследований, выполняемых с КА // Космические исследования, 1987. № 1. С. 30–36.
- [10] Ryumin V.V., Belyaev M.Yu. Problems of control arised during the implementation of scientific research program onboard the multipurpose orbital station // Acta Astronautica, 1987, v. 15, pp. 739–746.
- [11] Банит Ю.Р., Беляев М.Ю., Добринская Т.А., Ефимов Н.И., Сазонов В.В., Стажков В.М. Определение тензора инерции МКС по телеметрической информации // Космические исследования, 2005. Т. 43. № 2. С. 135–146.
- [12] Беляев М.Ю., Завалишин Д.А., Егоров Н.А., Спаржин Ю.В., Хамиц И.И., Шутиков М.А., Сазонов В.В. Определение массы Международной космической станции в полете // Космонавтика и ракетостроение, 2005. № 4. С. 224–232.
- [13] Беляев М.Ю., Завалишин Д.А. Способ определения массы космической станции в полете. Пат. 2301181 Российская Федерация, МПК В64G 1/10. Приор. 24.03.2005; заявитель и патентообладатель ПАО РКК «Энергия»; опублик. 20.06.2007, Бюл. № 17.
- [14] Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Беляев М.Ю., Завалишин Д.А., Платонов В.Н., Банит Ю.Р., Сазонов В.В. Исследование возможности управления КА «Ямал-200» с использованием математической модели движения // XIV Санкт-Петербургская Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электронприбор», 28–30 мая 2007 г. СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2007. С. 196–203.
- [15] Беляев М.Ю., Бабкин Е.В., Рябуха С.Б., Рязанцев В.В. Микроускорения на Международной космической станции при физических упражнениях экипажа // Космические исследования, 2011. Т. 49. № 2. С. 167–181.
- [16] Беляев М.Ю., Волков О.Н., Рябуха С.Б. Микровозмущения на Международной космической станции // Космическая техника и технологии, 2013. № 3. С. 14–24.
- [17] Завалишин Д.А., Беляев М.Ю., Сазонов В.В. Определение характеристик частот упругих колебаний конструкции МКС // Космические исследования, 2010. Т. 48. № 4. С. 362–370.
- [18] Монахов М.И., Беляев М.Б., Волков О.Н. Способ определения деформации корпуса космического аппарата в полете. Пат. 2605232 Российская Федерация, МПК В64G 1/22. Приор. 15.06.2015; заявитель и патентообладатель ПАО РКК Энергия; опублик. 20.12.2016. Бюл. № 35.
- [19] Belyaev M.Y., Bronnikov S.V., Petrov V.M., Sekerzh-Zenkovich S.Ya. Integrated study of the iss as an environment for human-operator 'life and activities // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC Sep. «63<sup>rd</sup> International Astronautical Congress. 2012, IAC 2012» Naples, 01–05 October 2012. Agenzia Spaziale Italiana (ASI), pp. 4078–4082.
- [20] Алямовский С.Н., Беляев М.Ю., Рулев Д.Н., Сазонов В.В., Тарасова М.М. Сферические спутники — от начала космической эры до современных экспериментов // Космическая техника и технологии, 2017. № 4 (19). С. 5–14.
- [21] Беляев М.Ю., Рулев Д.Н., Алямовский С.Н. Способ определения плотности атмосферы на высоте полета космического аппарата. Пат. 2016150068 Российская Федерация, МПК В64G 3/00. Приор. 19.12.2016; заявитель и патентообладатель ПАО «РКК «Энергия»; опублик. 20.06.2018. Бюл. № 17.
- [22] Микрин Е.А., Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваев Д.Ю. Отработка на МКС технологии автономной навигации с помощью съемок экипажа для задачи облета Луны // XXV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электронприбор», 28–30 мая 2018 г. СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2018. С. 7–13.
- [23] Беляев М.Ю., Матвеева Т.В., Рулев Д.Н. Возможные технологии управления транспортными грузовыми кораблями «Прогресс» при проведении экспериментов в автономном полете // Гироскопия и навигация, 2017. Т. 25. № 3 (98). С. 32–48.
- [24] Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Караваев Д.Ю., Рулев Д.Н. Управление подвижными платформами при наведении научной аппаратуры на изучаемые объекты в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // XXIV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электронприбор», 29–31 мая 2017 г. СПб.: ОАО «Концерн» ЦНИИ «Электронприбор», 2017. С. 44–47.
- [25] Беляев М.Ю., Десинев Л.В., Караваев Д.Ю., Сармин Э.Э., Юрина О.А. Аппаратура и программно-математическое обеспечение для изучения земной поверхности с борта российского сегмента Международной космической станции по программе «Ураган» // Космонавтика и ракетостроение, 2015. № 1. С. 63–70.
- [26] Belyaev M.Y., Cheremisin M.V., Esakov A.M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment // 69th International Astronautical Congress («IAC 2018 - involving everyone»), Bremen, Germany, Center of Applied Space Technology and Microgravity, 1–5 October 2018. Published by the IAF, pp. 1–9.
- [27] Беляев М.Ю., Викельски М., Лампен М., Легостаев В.П., Мюллер У., Науманн В., Тертицкий Г.М., Юрина О.А. Технология изучения перемещения животных и птиц на Земле с помощью аппаратуры ICARUS на российском сегменте МКС // Космическая техника и технологии, 2015. № 3. С. 38–51.
- [28] Микрин Е.А., Беляев М.Ю. Пилотируемая космонавтика — основа для развития ракетно-космической техники // Тр. LI Научных чтений К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники», Казань, 20–22 сентября 2016. Казань: КГТУ, 2017. С. 5–15.

## Сведения об авторе

**Беляев Михаил Юрьевич** — д-р техн. наук, профессор, зам. руководителя научно-технического центра ПАО РКК «Энергия», [mikhail.belyaev@rsce.ru](mailto:mikhail.belyaev@rsce.ru)

Поступила в редакцию 19.04.2019.

Принята к публикации 15.07.2019.

# MANAGEMENT ISSUES IN CONDUCTING EXPERIMENTS AT ISS RUSSIAN SEGMENT AND PARTICIPATION OF BMSTU MYTISHCHI BRANCH IN THEIR SOLUTION

**M.Y. Belyaev**

RSC «Energia» by S.P. Korolev, 4a, Lenina st., 141070, Korolev, Moscow reg., Russia

mikhail.belyaev@rsce.ru

In the process of carrying out research at the Salyut and Mir orbital stations, special control methods and technologies for conducting space experiments were developed, which made it possible to implement extensive scientific programs. The need to operate the International Space Station (ISS), the first module of which was put into orbit on November 20, 1998, required the solution of a number of new scientific and practical problems caused by certain features of the experiments conducted on it. The report describes the problems that have arisen during the experiments on the ISS, and indicates their solutions, allowing to perform various studies in the ISS flight, to work out new technologies and equipment, and also to set promising scientific tasks. Examples are given of the participation of scientists and specialists from the Mytishchi branch of the Bauman Moscow State Technical University in their decision.

**Keywords:** orbital station, space experiments, control problems

**Suggested citation:** Belyaev M.Yu. *Problemy upravleniya pri provedenii eksperimentov na rossiyskom segmente mks i uchastie MF MGTU im. N.E. Baumana v ikh reshenii* [Management issues in conducting experiments at ISS Russian segment and participation of BMSTU Mytishchi branch in their solution]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 5–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-5-13

## References

- [1] *Raketno-kosmicheskaya korporatsiya «Energia» imeni S.P. Koroleva. 1946–199* [The Energia Rocket and Space Corporation named after S.P. Korolev. 1946–1996]. Ed. Yu.P. Semenov. Korolev: RSC Energia, 1996, 670 p.
- [2] Mikrin E.A. *Perspektivy razvitiya otechestvennoy pilotiruemykh kosmonavtiki* [Prospects for the development of domestic manned space flight] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2017, no. 1, pp. 5–11.
- [3] Belyaev M.Yu. *Nauchnye eksperimenty na kosmicheskikh korablyakh i orbital'nykh stantsiyakh* [Scientific experiments on spacecraft and orbital stations]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 264 p.
- [4] Belyaev M.Yu. *Operativnoe planirovanie nauchnykh eksperimentov, provodimykh s pomoshch'yu KA* [Operational planning of scientific experiments conducted using spacecraft] *Kosmicheskie issledovaniya* [Space research], 1980, no. 2, pp. 235–241.
- [5] Belyaev M.Yu. *Osnovnye zadachi i printsipy postroyeniya nazemno-bortovogo kompleksa upravleniya eksperimentami, provodimymi s pomoshch'yu kosmicheskikh apparatov* [The main tasks and principles of building a ground-on-board complex for controlling experiments conducted with the help of spacecraft]. *Upravlyayushchie sistemy i mashiny* [Control Systems and Machines], 1980, no. 4, pp. 103–108.
- [6] *Matematicheskoe obespechenie eksperimentov, vypolnyaemykh na orbital'nykh kompleksakh «Mir», «Salyut-7» i nauchnykh modulyakh* [Mathematical support of experiments performed on the Mir, Salyut-7 orbital complexes and scientific modules] Ed. V.V. Ryumin, M.Yu. Belyaev. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket and space technology], 1991, ser. XII, iss. 2, 176 p.
- [7] *Matematicheskoe modelirovanie — osnova sozdaniya i ekspluatatsii slozhnykh orbital'nykh kompleksov* [Mathematical modeling — the basis of the creation and operation of complex orbital complexes] Ed. N.A. Bryukhanov, M.Yu. Belyaev. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket and space technology], 2008, ser. XII, iss. 1, 191 p.
- [8] *Problemy i zadachi povysheniya effektivnosti programm issledovaniy na kosmicheskikh korablyakh i orbital'nykh stantsiyakh* [Problems and tasks of increasing the effectiveness of research programs on spacecraft and orbital stations] Ed. V.P. Legostaev, M.Yu. Belyaev. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika* [Rocket and space technology], 2011, ser. XII, iss. 1–2, 205 p.
- [9] Belyaev M.Yu., Rulev D.N. *Optimizatsiya programmy eksperimentov pri operativnom planirovanii issledovaniy, vypolnyaemykh s KA* [Optimization of the program of experiments in the operational planning of research performed with spacecraft]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 1987, no. 1, pp. 30–36.
- [10] Ryumin V.V., Belyaev M.Yu. *Problemy kontrolya stantsii na multipurpose orbital station*. *Acta Astronautica*, 1987, v. 15, pp. 739–746.
- [11] Banit Yu.R., Belyaev M.Yu., Dobrinskaya T.A., Efimov N.I., Sazonov V.V., Stazhkov V.M. *Opreделение тензора инерции MKS по телеметрической информации* [Determination of the inertia tensor of the ISS using telemetric information]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 2005, v. 43, no. 2, pp. 135–146.
- [12] Belyaev M.Yu., Zavalishin D.A., Egorov N.A., Sparzhin Yu.V., Khamits I.I., Shutikov M.A., Sazonov V.V. *Opreделение массы Международной космической станции в полете* [Determination of the mass of the International Space Station in flight]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Science], 2005, no. 4, pp. 224–232.
- [13] Belyaev M.Yu., Zavalishin D.A. *Sposob opredeleniya massy kosmicheskoy stantsii v polete* [The method of determining the mass of the space station in flight]. Pat. 2301181 Russian Federation, IPC B64G 1/10. Prior March 24, 2005; applicant and patent holder of RSC Energia PJSC; publ. 20.06.2007, Bul. No. 17.
- [14] Sevast'yanov N.N., Branets V.N., Belyaev M.Yu., Zavalishin D.A., Platonov V.N., Banit Yu.R., Sazonov V.V. *Issledovanie vozmozhnosti upravleniya KA «Yamal-200» s ispol'zovaniem matematicheskoy modeli dvizheniya* [Study of the possibility of controlling the Yamal-200 satellite using a mathematical model of motion] XIV Sankt-Peterburgskaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po integriruyemykh navigatsionnykh sistemam, Sankt-Peterburg, TsNII «Elektropribor», 28–30 maya 2007 g. [XIV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Central Research Institute Elektropribor, May 28–30, 2007] St. Petersburg: Concern Central Research Institute. Electrical device, 2007, pp. 196–203.



- [15] Belyaev M.Yu., Babkin E.V., Ryabukha S.B., Ryazantsev V.V. *Mikrouskoreniya na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii pri fizicheskikh uprazhneniyakh ekipazha* [Microaccelerations on the International Space Station during crew physical exercise]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 2011, v. 49, no. 2, pp. 167–181.
- [16] Belyaev M.Yu., Volkov O.N., Ryabukha S.B. *Mikrovozmushcheniya na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii* [Micro-perturbations on the International Space Station]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2013, no. 3, pp. 14–24.
- [17] Zavalishin D.A., Belyaev M.Yu., Sazonov V.V. *Opreделение характеристик частот упругих колебаний конструкции MKS* [Characterization of the frequencies of elastic vibrations of the ISS design]. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Research], 2010, v. 48, no. 4, pp. 362–370.
- [18] Monakhov M.I., Belyaev M.B., Volkov O.N. *Sposob opredeleniya deformatsii korpusa kosmicheskogo apparata v polete* [The method for determining the deformation of the spacecraft body in flight]. Pat. 2605232 Russian Federation, IPC B64G 1/22. Prior 06/15/2015; applicant and patent holder of RSC Energia PJSC; publ. 12/20/2016. Bul. No. 35.
- [19] Belyaev M.Y., Bronnikov S.V., Petrov V.M., Sekerzh-Zenkovich S.Ya. Integrated study of the iss as an environment for human-operator 'life and activities. Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC Cep. «63rd International Astronautical Congress. 2012, IAC 2012» Naples, 01–05 oktyabrya 2012 g. Agenzia Spaziale Italiana (ASI), pp. 4078–4082.
- [20] Alyamovskiy S.N., Belyaev M.Yu., Rulev D.N., Sazonov V.V., Tarasova M.M. *Sfericheskie sputniki — ot nachala kosmicheskoy ery do sovremennykh eksperimentov* [Spherical satellites — from the beginning of the space age to modern experiments] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2017, no. 4 (19), pp. 5–14.
- [21] Belyaev M.Yu., Rulev D.N., Alyamovskiy S.N. *Sposob opredeleniya plotnosti atmosfery na vysote poleta kosmicheskogo apparata* [The method of determining the density of the atmosphere at the altitude of the spacecraft]. Pat. 2016150068 Russian Federation, IPC B64G 3/00. Prior. 12/19/2016; applicant and patent holder of RSC Energia PJSC; publ. 06/20/2018. Bul. No. 17.
- [22] Mikrin E.A., Belyaev M.Yu., Borovikhin P.A., Karavaev D.Yu. *Otrabotka na MKS tekhnologii avtonomnoy navigatsii s pomoshch'yu s'emok ekipazha dlya zadachi obleta Luny* [Testing autonomous navigation technology on the ISS using crew surveys for the task of circling the moon] XXV Sankt-Peterburgskaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam [XXV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems], St. Petersburg, Central Research Institute Elektropribor, May 28–30, 2018. St. Petersburg: Institute of Electrical Instruments, 2018, pp. 7–13.
- [23] Belyaev M.Yu., Matveeva T.V., Rulev D.N. *Vozmozhnye tekhnologii upravleniya transportnymi gruzovymi korablyami «Progress» pri provedenii eksperimentov v avtonomnom polete* [Possible technologies for the management of transport cargo ships «Progress» when conducting experiments in autonomous flight] *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2017, v. 25, no. 3 (98), pp. 32–48.
- [24] Belyaev M.Yu., Borovikhin P.A., Karavaev D.Yu., Rulev D.N. *Upravlenie podvizhnymi platformami pri navedenii nauchnoy apparatury na izuchaemye ob'ekty v eksperimente «Uragan» na Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii* [Managing mobile platforms while hovering scientific equipment on objects under study in the Uragan experiment on the International Space Station] XXIV Sankt-Peterburgskaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam [XXIV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems], St. Petersburg, Central Research Institute Elektropribor, May 29–31, 2017. St. Petersburg: Concern OJSC of the Central Research Institute Elektropribor, 2017, pp. 44–47.
- [25] Belyaev M.Yu., Desinov L.V., Karavaev D.Yu., Sarmin E.E., Yurina O.A. *Apparatura i programmno-matematicheskoe obespechenie dlya izucheniya zemnoy poverkhnosti s borta rossiyskogo segmenta Mezhdunarodnoy kosmicheskoy stantsii po programme «Uragan»* [Equipment and software for the study of the earth's surface from the Russian segment of the International Space Station under the Uragan program] *Kosmonavtika i raketostroenie* [Astronautics and Rocket Engineering], 2015, no. 1, pp. 63–70.
- [26] Belyaev M.Y., Cheremisin M.V., Esakov A.M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment. 69th International Astronautical Congress («IAC 2018 — involving everyone»), Bremen, Germany, Center of Applied Space Technology and Microgravity, 1–5 October 2018. Published by the IAF, pp. 1–9.
- [27] Belyaev M.Yu., Vikel'ski M., Lampen M., Legostaev V.P., Myuller U., Naumann V., Tertitskiy G.M., Yurina O.A. *Tekhnologiya izucheniya peremeshcheniya zhivotnykh i ptits na Zemle s pomoshch'yu apparatury ICARUS na rossiyskom segmente MKS* [Technology of studying the movement of animals and birds on Earth using ICARUS equipment on the Russian segment of the ISS] *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space equipment and technology], 2015, no. 3, pp. 38–51.
- [28] Mikrin E.A., Belyaev M.Yu. *Pilotiruemaya kosmonavtika — osnova dlya razvitiya raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Piloted cosmonautics — the basis for the development of rocket and space technology] *Trudy LI Nauchnykh chteniy K.E. Tsiolkovskogo. Sektsiya «Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki»* [Works of LI Scientific readings of K.E. Tsiolkovsky. Section «Problems of rocket and space technology»], Kazan, September 20–22, 2016. Kazan: KSTU, 2017, pp. 5–15.

## Author's information

**Belyaev Mikhail Yur'evich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Deputy Head of the Scientific and Technical Center of RSC Energia, mikhail.belyaev@rsce.ru

Received 19.04.2019.

Accepted for publication 15.07.2019.