

Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции

М. Ю. Беляев

*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, 141070, Россия
E-mail: mikhail.belyaev@rsce.ru*

19 апреля 2021 г. исполнилось 50 лет с момента запуска на орбиту первой в мире орбитальной станции «Салют», которая в июне 1971 г. стала первой пилотируемой космической лабораторией. Дальнейшие исследования на околоземной орбите проводились в нашей стране на станциях серии «Салют», орбитальном комплексе «Мир». В этих исследованиях большое внимание уделялось изучению Земли и происходящих на ней процессов. Эксперименты по изучению Земли и возникающих на ней потенциально опасных и катастрофических явлений выполняются и на Российском сегменте (РС) Международной космической станции (МКС). В статье указаны особенности проведения экспериментов на МКС. Описана научная аппаратура (НА) космического эксперимента «Ураган», проводящегося на РС МКС и предназначенного для отработки аппаратуры и методов наблюдения Земли из космоса. Приведены характеристики НА и рассмотрены особенности её интеграции в состав РС МКС. Рассмотрено участие экипажа в проведении экспериментов на станции. Отмечены основные результаты и освещены планы дальнейших работ по повышению эффективности исследований наблюдения Земли на РС МКС.

Ключевые слова: космический эксперимент, научная аппаратура, МКС, наблюдаемые объекты

Одобрена к печати: 28.05.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107

Введение

Одно из основных направлений использования космической техники связано с наблюдением и изучением Земли (Котляков и др., 2011). Для нашей страны, имеющей обширную территорию, это направление особенно важно. Создание автоматических космических систем, осуществляющих непрерывный мониторинг земной поверхности и обработку поступающей информации, предполагает предварительную отработку используемых методов и средств наблюдения. Такую отработку наиболее удобно проводить на пилотируемой орбитальной станции, представляющей собой научную космическую лабораторию. Именно с этой целью на российском сегменте (РС) международной космической станции (МКС) был организован космический эксперимент (КЭ) «Ураган», цель которого заключается в отработке технических средств и методов наблюдения Земли с борта РС МКС (Беляев М. Ю. и др., 2009, 2011, 2013, 2015а–г, 2017, 2018а, б, 2019а–г, 2020; Беляев Б. И. и др., 2014а–в, 2016, 2018; Вишневская и др., 2016; Десинов и др., 2001; Котляков и др., 2003, 2011, 2012, 2020; Крамарева и др., 2019; Юрина и др., 2018а–г; Belyaev et al., 2013, 2018; Katkovsky et al., 2020).

Наибольшее внимание в КЭ «Ураган» уделяется наблюдению потенциально опасных и катастрофических явлений, возникающих на Земле. Изучение различных объектов и явлений на поверхности Земли и в её атмосфере выполняется приборами, работающими в различных областях спектра электромагнитного излучения. Поэтому в КЭ «Ураган» создаётся и используется научная аппаратура (НА), способная работать в различных спектральных диапазонах. Это позволяет комплексно исследовать изучаемые в эксперименте объекты и явления. Выявление какого-либо фактора в изучаемом явлении или процессе одним из используемых в КЭ «Ураган» приборов может сигнализировать о подготовке важного, порой даже катастрофического события на Земле и целесообразности применения для его изучения других приборов, входящих в состав КЭ.

Интеграция сложного комплекса научной аппаратуры в состав орбитальной станции — непростая задача. Для МКС эта задача усложнилась вследствие ряда причин, главная из которых заключается в отсутствии возможности выполнения разворотов и поддержания требуемой для наведения на исследуемые объекты ориентации станции (Беляев, 2019). Это следствие чрезвычайно больших размеров и массы МКС и довольно скромных возможностей системы управления ориентацией станции с использованием гиродинов на американском сегменте МКС. Система управления ориентацией МКС позволяет только поддерживать ориентацию станции в орбитальной системе координат. Поэтому на начальном этапе выполнения экспериментов по программе «Ураган» на МКС для наведения на исследуемые объекты использовались ручные приборы: фотоаппараты и спектрометры (рис. 1).



Рис. 1. Съёмка исследуемых объектов в КЭ «Ураган». Слева направо: космонавт Корзун В. Г. с фотоаппаратурой, космонавт Юрчихин Ф. Н. с фотоспектральной системой, космонавт Шкаплеров А. Н. с видеоспектральной системой

Ручные приборы для наблюдения Земли и их использование на РС МКС

Фотосъёмка земной поверхности на РС МКС осуществляется с помощью переносных цифровых фотокамер Nikon D3, Nikon D3S, Nikon D4, Nikon D3X и Nikon D800. Фотокамеры регистрируют объекты земной поверхности в оптическом диапазоне спектра электромагнитных волн в натуральных цветах.

В качестве примера в *таблице* приведено соотношение фокусного расстояния фотокамеры Nikon D3X, площади съёмки и пространственного разрешения получаемого изображения.

Соотношение фокусного расстояния фотокамеры Nikon D3X, площади съёмки и пространственного разрешения получаемого изображения

Фокусное расстояние, мм	Площадь съёмки, км	Разрешение на местности, м
1200	12×8	2
800	18×12	3
400	36×24	6

Как видно из *таблицы*, пространственное разрешение цветного снимка при фокусном расстоянии 1200 мм и охвате 12×8 км составляет около 2 м.

Кроме цифровых фотокамер в КЭ «Ураган» используют фото- и видеоспектральную системы (ФСС и ВСС) с возможностью регистрации спектральной плотности энергетической яркости излучения, отражённого от подстилающей поверхности (Беляев Б. И. и др., 2014а–в, 2016; Беляев М. Ю. и др., 2015а, б). Ниже приведены основные технические характеристики ФСС и ВСС (рис. 2, 3, см. с. 94).

Основные технические характеристики ФСС

Рабочий спектральный диапазон модуля спектрорадиометра	350–1050 нм
Число пикселей модуля изображения	12,1 млн
Количество зон спектрометрирования	1 шт.
Пространственное разрешение фотоспектрометра с высоты 400 км.	100 м
Масса	7,58 кг

Основные технические характеристики ВСС

Рабочий спектральный диапазон модуля видеоспектрометра (не менее 256 спектров на кадр)	400–950 нм
Спектральное разрешение видеоспектрометра	2,0 нм
Число пикселей модуля изображения	40,3 млн
Количество зон спектрометрирования	273 шт.
Пространственное разрешение фотоспектрометра с высоты 400 км.	50 м
Масса	13,55 кг



Рис. 2. Фотоспектральная система ФСС



Рис. 3. Видеоспектральная система ВСС: а — ВСС на юстировочном столе; б — ВСС на установочном кронштейне

Для обработки результатов экспериментов была разработана методика атмосферной коррекции спектров и изображений в видимой и ближней инфракрасной (ИК) области спектра, получаемых в процессе съёмки земной поверхности с борта МКС указанными съёмочными системами в рамках космического эксперимента «Ураган». В основе методики лежит использование аналитической аппроксимации для спектров излучения на верхней границе атмосферы, погрешность которой для безоблачной атмосферы составляет 2–5 %, что позволяет быстро и с высокой точностью восстанавливать спектры альbedo подстилающей поверхности.

Радиометрическая коррекция (энергетическая калибровка) и атмосферная коррекция RGB-изображений (R — *англ. red*, красный; G — *англ. green*, зелёный; B — *англ. blue*, синий) ФСС выполняется пространственной «привязкой» пикселей и их значений к соответствующим областям спектрометрирования и значениям спектров. Для этой цели была разработана корреляционная методика их уточнённой пространственной «привязки». В результате последующей атмосферной коррекции изображений ФСС получены средние значения альbedo по каждому из R-, G-, B-каналов, что, в свою очередь, важно для тематической обработки изображений с использованием квазисинхронных наземных измерений или спектров различных объектов из спектральных баз данных.

С помощью спектрометров ФСС и ВСС получено большое количество интересных данных, и их использование продолжается не только в КЭ «Ураган», но и в других экспериментах на МКС: «Дубрава», «Сценарий», «Альbedo» и др.

С помощью спектрометрических измерений решаются задачи анализа состояния объектов по отражательным характеристикам, выраженным в виде спектральных сигнатур.

Продуктом анализа могут быть карты (литологические, геоботанические, таксационные и др.), отчёт о состоянии (качество почв, определение органических соединений, содержащихся в воде) и прогноз состояния объектов (урожайность, производительность рыболовных хозяйств), обнаружение техногенных выбросов промышленных предприятий, распространение пылевых – соляных бурь, выделение дымовых шлейфов, локализация источников задымления и оценки границ размывания шлейфов.

Несомненное преимущество ручных спектрометрических приборов, используемых на борту РС МКС, — возможность отслеживания объекта исследования. За счёт этого можно изучать изменение спектральных характеристик подстилающей поверхности в зависимости от угла визирования.

Измерение индикатрис отражения (рассеяния) объектов для каждого спектрального канала реализуется в режиме измерений непрерывной (покадровой) съёмкой с удержанием оператором объекта (фиксированной точки на подстилающей поверхности) в центре поля зрения системы. При этом происходит регистрация изображений и спектров объекта для различных углов рассеяния солнечного излучения за счёт движения МКС по орбите. Эти измерения представляют наибольший интерес для решения таких задач, как съёмка (диагностика) разливов нефти в море, пожаров, извержений вулканов, волновых движений (возмущений) в океане. В последнем случае индикатрисные измерения позволяют определять спектр наклонов водной поверхности и тонкую структуру волновых движений в океане. Индикатрисные измерения нефтяных плёнок дают возможность более надёжной их идентификации, а в случае регистрации дымов и аэрозольных выбросов позволяют оценивать концентрации и размеры частиц (Беляев М. Ю. и др., 2018а, б, 2019а, б; Katkovsky et al., 2020).

При этом, в отличие от автоматических аппаратов, на борту РС МКС при выполнении съёмок используются интеллектуальные возможности космонавтов и специально разработанное математическое обеспечение для поддержки КЭ на борту станции, которое позволяет космонавтам самим планировать и проводить съёмки в личное время и выходные дни (Беляев М. Ю. и др., 2015а).

В ходе реализации КЭ «Ураган» накоплен значительный банк данных по результатам исследований с РС МКС. Космические снимки и спектрометрическая информация, полученные при реализации КЭ на борту РС МКС, широко используются различными организациями в научных целях и в прикладной сфере деятельности. Данные КЭ «Ураган» используются также в системах семейства «Вега-Созвездие». Полученные в эксперименте «Ураган» на РС МКС данные использовались при изучении ледников, наводнений, вулканов, пожаров и т. д. (Беляев М. Ю. и др., 2013, 2015а–в; Вишневецкая и др., 2016; Десинов и др., 2001; Котляков и др., 2003, 2012, 2020; Крамарева и др., 2019).

Среди полученных в КЭ «Ураган» результатов большое значение имеет, например, исследование по катастрофе в районе г. Крымска, изложенное в докладе директора Института географии РАН академика Котлякова В. М. 25 июля 2012 г. в г. Геленджике Президенту РФ (Беляев М. Ю. и др., 2013; Котляков и др., 2012). В основе этого исследования были использованы данные, полученные в эксперименте. Проведённые исследования позволили объяснить причину возникновения произошедшей катастрофы и дать предложения по недопущению подобных катастрофических явлений. Доклад был заслушан также на Президиуме РАН. В обоих случаях доклад получил высокую оценку.

Разработанные технологии позволяют выполнять наблюдения ледников и определять их подвижки, оценивать развитие лесных пожаров, идентифицировать источники океанских кольцевых волн, выполнять исследования вулканов и т. д. (Беляев М. Ю. и др., 2015д, 2019г, д; Беляев М. Ю., Юрина, 2018; Юрина и др., 2018а–г). В разработке математических моделей для оценки развития потенциально опасных и катастрофических явлений большое участие принимали учёные Института проблем механики РАН (Беляев М. Ю. и др., 2009, 2011).

Дальнейшее проведение КЭ «Ураган» планируется с применением не только переносной, но и стационарной аппаратуры, имеющей большой угол поля зрения, а также с использованием подвижных платформ для наведения приборов на исследуемые объекты.

Подвижные платформы наведения исследовательской аппаратуры на изучаемые с РС МКС объекты

Использование возможностей космонавтов при выполнении научных наблюдений даёт определённые преимущества в процессе проведения исследований. К сожалению, постоянно нести такую «научную вахту» космонавты не могут, так как большую часть суток они должны заниматься другой работой, а ночью отдыхать.

Для устранения данной проблемы наведения научной аппаратуры на исследуемые объекты в настоящее время осуществляется доработка российского сегмента МКС. Для расширения возможностей выполнения целевых программ на станции уже установлены и разрабатываются дополнительные специальные подвижные платформы наведения (ППН) (рис. 4). Одна из таких ППН — система ориентации видеоспектральной аппаратуры СОВА — предназначена для обеспечения установки на иллюминаторах служебного модуля (СМ) российского сегмента МКС и многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ) МКС различной научной аппаратуры видео-, фото- и спектральной съёмки, наведения НА и съёмки по заданной программе оператором или без участия оператора.

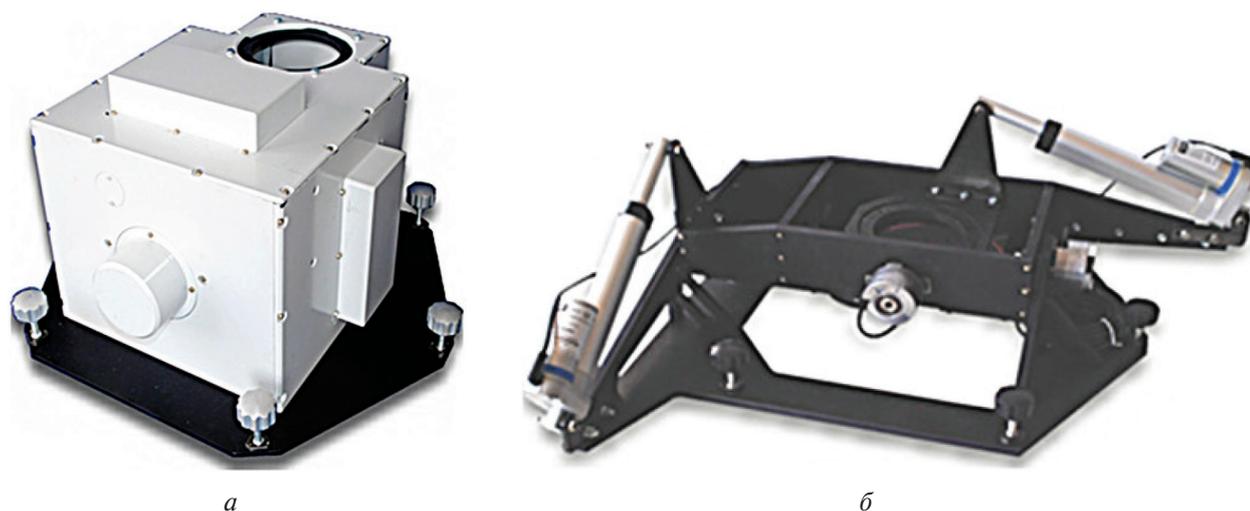


Рис. 4. Подвижные платформы наведения: а — СОВА-1; б — СОВА-2

Система СОВА разработана и создана с целью автоматизации процесса измерений на МКС оптических характеристик подстилающей поверхности при выполнении мониторинга земной поверхности в ходе проведения научно-прикладных исследований в космическом эксперименте «Ураган» (Беляев Б. И. и др., 2018). Система СОВА представляет собой платформу наведения, устанавливаемую на иллюминатор, на которой фиксируется съёмочная аппаратура, и управляющий ноутбук, расположенный рядом в 1,5–3 м от иллюминатора. Система СОВА позволяет обеспечивать возможность наведения полей зрения НА и отслеживания объекта по изображению на экране монитора ноутбука.

Для установки на РС МКС предусмотрено несколько модификаций аппаратуры СОВА.

ППН СОВА 228 устанавливается на иллюминатор диаметром 228 мм СМ РС МКС и обеспечивает возможность поворота закреплённой на ней съёмочной аппаратуры на $\pm 180^\circ$ вокруг оси визирования и наведения с углом отклонения не менее 20° в одной плоскости от оптической оси иллюминатора.

ППН СОВА 426 устанавливается на иллюминатор диаметром 426 мм как СМ, так и МЛМ РС МКС и обеспечивает возможность наведения съёмочной аппаратуры по двум взаимно перпендикулярным осям с углами отклонения не менее $\pm 30^\circ$.

В ходе проектирования были рассмотрены два варианта конструктивного построения ППН СОВА.

Вариант ППН СОВА-1 (см. рис. 4а) выполнен по несколько необычной схеме: съёмочная НА закрепляется на ППН неподвижно, а сканирование поверхности Земли осуществляется при помощи зеркала, установленного на подвесе, поворачивающемся при помощи электроприводов.

Вариант ППН СОВА-2 (см. рис. 4б) построен по «классической» схеме на основе ранее разработанных систем наведения с ручным управлением. В качестве электроприводов, обеспечивающих поворот установленной аппаратуры, использованы линейные актуаторы.

Скорость углового перемещения оптической оси платформ наведения СОВА-1 и СОВА-2 составляет 0,75–1,5 и 0,5–6,0 град/с соответственно.

Использование ППН позволяет значительно расширить возможности МКС по исследованию Земли и небесной сферы. Для выполнения наблюдений заданных объектов в этом случае могут использоваться методы оптимального планирования программы научных экспериментов (Беляев М. Ю., 2019). При использовании методов оптимизации программы экспериментов обеспечивается получение максимального объёма полезной научной информации при соблюдении заданных ограничений на планирование.

Первый экземпляр аппаратуры СОВА-1-426 уже доставлен на борт РС МКС и успешно используется при выполнении экспериментов. НА СОВА-1-426 может устанавливаться на иллюминатор диаметром 426 мм служебного модуля российского сегмента МКС и позволяет осуществлять как автоматическое наведение различной НА для видео-, фото- и спектральной съёмки под управлением бортового компьютера, так и съёмку по заданной оператором программе. При этом обеспечивается построение оптимальных программ наблюдения исследуемых объектов (Беляев М. Ю., 1984, 2019), что впервые в мире реализовано на борту космического аппарата. В следующем году планируется изготовление дополнительных комплектов НА «СОВА». Их совместное использование на РС МКС позволит существенно расширить возможности выполнения наблюдений различных объектов. Для оптимизации программы наблюдений заданных объектов несколькими комплектами НА разработаны специальные методы оптимизации управления ППН.

Реализуется также возможность наведения исследовательской аппаратуры, установленной на ППН, наземным оператором в телеоператорном режиме с помощью широкополосного спутникового канала связи.

Новая научная аппаратура КЭ «Ураган»

В настоящее время в рамках КЭ «Ураган» с целью дальнейшего развития системы мониторинга Земли создана и готовится к отправке на борт РС МКС научная аппаратура «Гиперспектрометр». НА «Гиперспектрометр» предназначена для выполнения космонавтами съёмки земной поверхности в спектральных диапазонах 0,43–0,9 и 0,9–1,6 мкм. Данная НА изготовлена Московским физико-техническим институтом и АО «НПО «Лептон». Обработка результатов съёмки НА «Гиперспектрометр» будет осуществляться на борту с участием космонавта. Это позволит повысить оперативность анализа полученных данных и качество планирования наблюдений, а также сократит потоки оперативно передаваемых данных на Землю.

Аппаратура предназначена для регистрации и обработки гиперспектральных изображений земной поверхности в нескольких спектральных каналах (по выбору космонавта от 1 до 100 из 180 каналов) в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, а также получения панхроматических изображений для визуализации заданной области земной поверхности.

Гиперспектрометр включает в свой состав: гиперспектральную камеру видимого диапазона (ГСК-ВД), гиперспектральную камеру ближнего инфракрасного диапазона (ГСК-БИК) и панхроматическую камеру (ПК). Спектральное разрешение ГСК-ВД и ГСК-БИК при расчётной высоте орбиты МКС 400 км составляет ≤ 25 и ≤ 30 нм соответственно, разрешение в надир — ≤ 45 и ≤ 70 м, максимальное число спектральных каналов, реализуемых одновременно во время съёмки, — ≥ 70 и ≥ 30 , а угол поля зрения $\geq 3,5^\circ$. У ПК разрешение в надир ≤ 120 м, а угол поля зрения $\geq 10 \times 10^\circ$.



Рис. 5. Аппаратура «Гиперспектрометр» на иллюминаторе № 9 РС МКС

Схема установки НА «Гиперспектрометр» на иллюминаторе № 9 РС МКС показана на рис. 5.

С помощью НА «Гиперспектрометр» планируется решение следующих задач:

- оценка состояния лесных угодий;
- оценка состояния сельскохозяйственных посевов;
- построение карт концентрации хлорофилла в приповерхностных водах;
- обнаружение участков наркотических растений среди другой растительности и т. д.

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

Базовые характеристики аппаратуры РИВР:

- число информационных каналов — 2;
- границы спектральных диапазонов информационных каналов по уровню 0,5: 3,5–4,1 и 8,0–10,0 мкм;
- пространственное разрешение с номинальной орбиты МКС (400 км) — 30 м;
- полоса обзора для орбиты $H = 400$ км — 70 км;
- эквивалентная шуму разность измеряемых температур на уровне 300 К: в диапазоне 3,5–4,1 мкм — $\leq 0,5$ К и в диапазоне 8,0–10,0 мкм — $\leq 0,2$ К.

Функционально аппаратура РИВР состоит из двух блоков:

- оптико-электронного блока (ОЭБ), формирующего видеоинформацию в двух спектральных диапазонах: 3,5–4,1 и 8,0–10,0 мкм;
- блока управления радиометром (БУР), предназначенного для управления и сопряжения ОЭБ с бортовыми системами МКС.

ОЭБ устанавливается на внешней поверхности МЛМ РС МКС. БУР — внутри МЛМ РС МКС. Электрическая связь ОЭБ и БУР осуществляется по кабельной связи.

В радиометре РИВР использован принцип многострочного механического сканирования, который даже при сравнительно небольшом числе чувствительных элементов приёмника излучения позволяет реализовать пространственное разрешение 30 м и полосу обзора 70 км (угол обзора 10°) при эквивалентной шуму разности измеряемой температуры не менее 0,2 К на фоновом уровне температуры в 300 К.

ОЭБ радиометра включает: плоское сканирующее зеркало, совершающее колебательные движения с периодом 1,144 с с помощью низкооборотного прецизионного привода, зеркально-линзовый объектив, систему спектроделения и многоэлементные приёмники излучения. В качестве приёмников излучения используются отечественные многоэлементные (матричные) ИК-фотоприёмники форматом 4×288 элементов, охлаждаемые микрокриогенной системой до криогенных температур (80 К) и имеющие наработку на отказ не менее 6000 ч. Ось колебания сканирующего зеркала и линейки приёмников излучения ориентированы вдоль направления полёта космического аппарата, что позволяет за один цикл строчной развёртки (скан) радиометра сформировать микрокадр форматом 288×2350 элементов. Микрокадры имеют перекрытие 10–40 элементов. При наземной обработке микрокадры подвергаются геометрической коррекции и «сшиваются» в единое трассовое изображение.

Для обеспечения радиометрической точности измерений в состав радиометра введены бортовые эталонные источники излучения — имитаторы абсолютно чёрного тела: «горячее»

и «холодное». Калибровка по эталонным источникам осуществляется в начале и конце сеанса съёмки. Выход аппаратуры на рабочий режим (съёмка) — 7 мин.

Радиометр РИВР планируется установить на многофункциональном лабораторном модуле российского сегмента Международной космической станции. Общий вид РС МКС после ввода в эксплуатацию многоцелевого лабораторного модуля приведён на *рис. 6*.

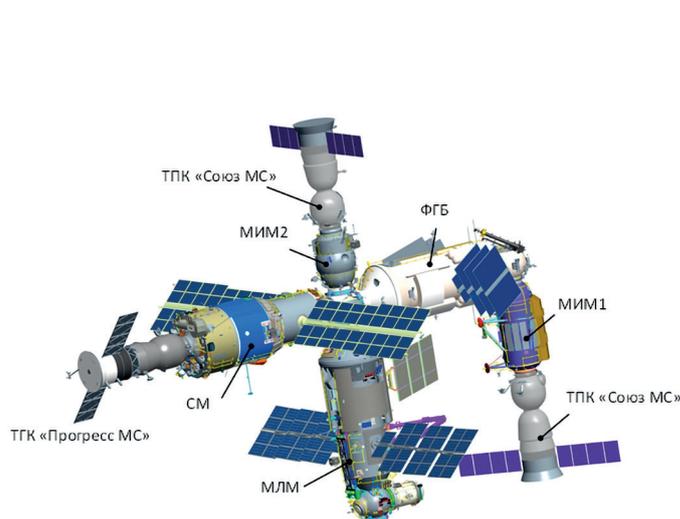


Рис. 6. Российский сегмент МКС после ввода в эксплуатацию МЛМ (ФГБ — функциональный грузовой блок)

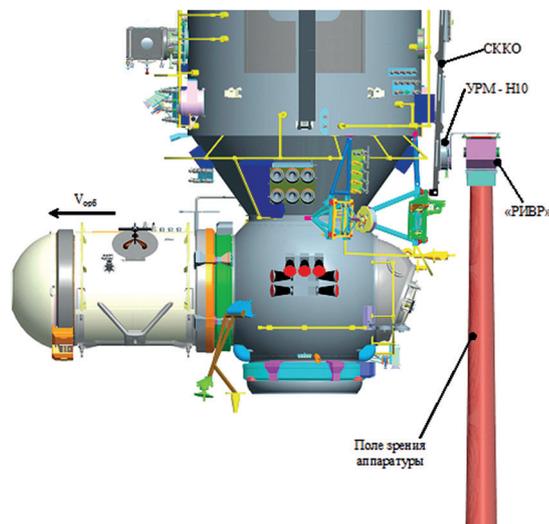


Рис. 7. Размещение ОЭБ РИВР на УРМ-Н10 МЛМ РС МКС

Для размещения научной аппаратуры на МЛМ РС МКС предусмотрено применение технологии сменных полезных нагрузок с использованием универсальных рабочих мест (УРМ), расположенных как внутри модуля, так и на внешней его поверхности. Установка аппаратуры на конкретном рабочем месте или её замена проводится непосредственно экипажем в процессе эксплуатации модуля на орбите после доставки в составе грузовых или пилотируемых кораблей.

Данная технология подразумевает создание УРМ с унифицированными интерфейсами. Наружные УРМ-Н обслуживаются экипажем и оборудованы механическими адаптерами, рядом с которыми расположены фиксирующие платы с электросоединителями, что обеспечивает возможность механической установки и электрического подключения аппаратуры. Основным вариантом установки ОЭБ РИВР выбрано размещение на УРМ-Н10. Это рабочее место расположено на раме средств крепления крупногабаритных объектов (СККО) и ориентировано против направления полёта (*рис. 7*).

РИВР будет интегрирован с информационно-управляющей системой (ИУС) РС МКС. ИУС будет обеспечивать передачу управляющих цифровых массивов и рассылку баллистических данных. Кроме того, с помощью ИУС будет осуществляться промежуточное хранение полученной от РИВР информации с последующим сбросом на Землю по широкополосной линии связи.

Интеграция с РС МКС обеспечит все необходимые условия для работы радиометра РИВР в рамках космического эксперимента «Ураган», что открывает новые возможности для участников эксперимента.

Использование в КЭ «Ураган» радиометра РИВР позволит обеспечить получение изображений в инфракрасном диапазоне для решения широкого круга задач, таких как:

- мониторинг и оценка развития техногенных и природных катастрофических и потенциально опасных явлений;
- обнаружение очагов лесных и подземных пожаров, крупных тепловых выбросов загрязняющих веществ в природную среду;

- различные виды тематического картографирования земной поверхности, в том числе геологическое картирование (поиски полезных ископаемых, их идентификация, обнаружение возможных районов газовых и нефтяных месторождений);
- исследование вулканической и сейсмической активности;
- оценка состояния полигонов захоронения промышленных и бытовых отходов и их влияния на окружающую среду;
- обнаружение источников тепловых потерь, источников загрязнения и т. д.

Данная информация будет востребована Федеральной службой охраны леса, Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, экологическими и природоохранными службами, службами геологоразведки, а также региональными, отраслевыми и частными организациями.

КЭ на РС МКС позволит также осуществить отработку образца ИК-радиометра высокого разрешения в штатных условиях эксплуатации для дальнейшего его использования в различных автоматических информационных комплексах дистанционного зондирования Земли.

Контроль перемещения животных и птиц на земной поверхности с РС МКС

Примером комплексного применения различной научной аппаратуры КЭ «Ураган» может служить использование данных от научной аппаратуры «Икарус» (ICARUS) (Беляев М. Ю. и др., 2015г, Belyaev et al., 2018), разработанной по Соглашению между Роскосмосом и Германским центром авиации и космонавтики DLR (нем. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) и входящей в КЭ «Ураган». НА «Икарус» в КЭ «Ураган» позволяет отслеживать перемещения животных и птиц на земной поверхности. С этой целью на исследуемых объектах размещаются миниатюрные (массой 5 г) датчики (теги), в состав которых входят приёмники спутниковой навигационной системы, вычислительное устройство, аккумулятор, солнечная батарея, приёмопередатчик, акселерометр, магнитометр, датчик температуры (рис. 8) (Беляев М. Ю. и др., 2015г).

На рис. 9а (см. с. 101) представлено размещение антенн научной аппаратуры ICARUS на РС МКС. На рис. 9б показан общий вид блока электроники, установленного внутри гермоотсека и предназначенного для хранения и обработки данных, а на рис. 9в приведён общий вид передатчика, закрепляемого на животном. Основные технические характеристики аппаратуры ICARUS и передатчика представлены ниже.



Рис. 8. Дратхаар Рэй готов к проведению эксперимента

Информация от тега поступает на РС МКС, снабжённый специальными мощными приёмными антеннами, и затем по штатным каналам связи доставляется в московский ЦУП-М (Центр управления полётами). Пройдя предварительную проверку и обработку в ЦУП-М, данные от тегов передаются российским и немецким учёным — участникам эксперимента. По информации от тегов учёные отслеживают миграции животных и их состояние. Важно отметить, что комплексное использование всех данных КЭ «Ураган» позволяет не только отследить пути перемещения животных, но и понять причины изменения их миграционных путей с помощью оценки экологической обстановки аппаратурой из состава эксперимента «Ураган» (Беляев М. Ю. и др., 2015г; Wikelski et al., 2020).

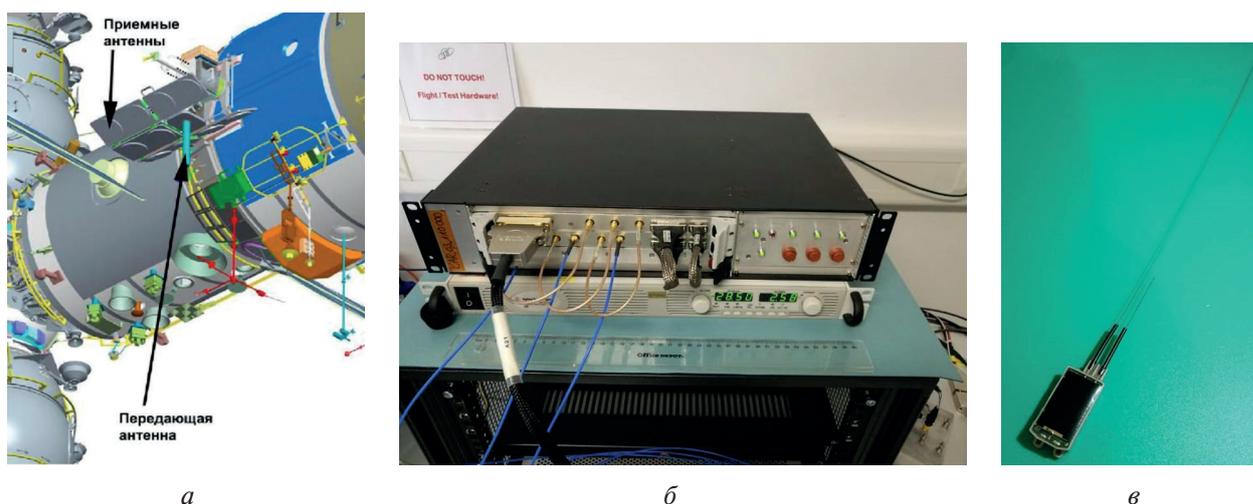


Рис. 9. Аппаратура ICARUS: а — размещение бортового оборудования ICARUS на служебном модуле РС МКС; б — блок электроники; в — общий вид передатчика, закрепляемого на животном

Летом 2020 г. были завершены тесты НА «Икарус», размещённой на РС МКС, и 18.09.2020 начался первый этап реализации проекта. Российскими и немецкими учёными осенью 2020 г. были установлены теги на мигрирующих животных и птиц. В России теги были установлены на чёрных дроздов, кабанов, сайгаков. Информация с тегов оперативно передаётся в ЦУП-М и в научные организации, где оцениваются миграции животных и их состояние. В 2021 г. помимо установки тегов на животных и птиц планируется контроль подвижек ледников и оползней.

Основные технические характеристики аппаратуры ICARUS

Восходящая линия связи (приём данных):

Частота	401,688–402,812 МГц
Ширина полосы	1,1 МГц
Скорость передачи данных	656 бит/с
Мгновенная область покрытия поверхности Земли	30×800 км
Количество передатчиков в поле зрения антенн	500 шт.

Нисходящая линия связи (передача):

Частота	468,065–468,135 МГц
Ширина полосы	42 кГц
Скорость передачи данных	656 бит/с

Основные технические характеристики передатчика

Масса	<5 г
Размер	<26×15×9 мм
Длина антенны	200 мм
Длина антенны GPS	7,5 мм
Датчики	GPS-приёмник, акселерометр, магнитометр, датчик температуры
Определение местоположения	GPS/ГЛОНАСС/ (Galileo)
Интервал определения местоположения	1 ч (регулируемый)
Срок службы конструкции передатчика	>9 мес

Одновременное создание и использование целого комплекса НА в рамках одного КЭ даёт ряд существенных преимуществ. Следует отметить, что интеграция аппаратуры на борт орбитальной станции является сложной научно-технической задачей, нередко сопоставимой

по затратам с созданием самой НА. Кроме того, для планирования наблюдений и интерпретации данных каждого прибора обычно требуется большое количество дополнительной информации: баллистической, информации по ориентации и физическим условиям на МКС, позволяющей учесть различные помехи на измерения, например от влияния атмосферы (Беляев М. Ю. и др., 2018а,б), и т. д. Разработка методов и программного обеспечения расчёта такой информации в рамках одного КЭ для разных используемых приборов даёт существенную экономию и облегчает решение данной задачи. И конечно, главное достоинство одновременного использования в КЭ «Ураган» различной аппаратуры заключается в возможности решать совершенно новые задачи, объясняющие, например, причины изменения миграций животных (Belyaev et al., 2018; Wikelski et al., 2020), что является уникальным результатом для мировой практики.

Заключение

На РС МКС в рамках КЭ «Ураган» отрабатываются методы, технологии и аппаратура для изучения земной поверхности. Отрабатываемые методы и аппаратура учитывают специфику МКС, прежде всего отсутствие возможности у этой станции менять ориентацию, в отличие от станций «Салют» и «Мир». По этой причине с начала полёта на РС МКС используются ручные приборы (ФСС, ВСС, фотоаппаратура), с помощью которых космонавты исследуют различные объекты и явления на земной поверхности. Для наведения используемой аппаратуры на российском сегменте применяются также специальные подвижные платформы, размещаемые как снаружи, так и внутри станции на иллюминаторах РС МКС. Использование автоматических подвижных платформ наведения позволяет изучать исследуемые объекты даже в период сна экипажа. Для управления наведением подвижных платформ используются разработанные методы оптимизации (Беляев М. Ю., 1984, 2019).

С учётом отсутствия возможности переориентации МКС для наведения на изучаемые объекты исследовательская аппаратура, жёстко закрепляемая на корпусе станции, должна иметь достаточно большое поле зрения. Такая аппаратура, используемая в КЭ «Ураган», размещается на корпусе РС МКС во время выхода космонавтов в открытый космос. Научная аппаратура «Икарус» уже размещена на станции, и в сентябре 2020 г. после успешно проведённых тестов началась её эксплуатация. По информации от НА «Икарус» российские и зарубежные учёные получают данные о миграциях животных и птиц.

С помощью научных приборов КЭ «Ураган» к настоящему времени уже получено большое количество ценной информации, на основе которой проводилось изучение ледников (Колка, Медвежий, Бивачный и др.), наводнений, вулканов, возникающих пожаров и т. д. Разработаны специальные методы, позволяющие эффективно планировать и проводить наблюдения с МКС, а также оценивать развитие некоторых потенциально опасных и катастрофических явлений и процессов. По результатам выполненных исследований опубликовано более 100 научных статей, получены десятки патентов. Доставка на борт РС МКС новых создаваемых приборов (гиперспектрометр, РИВР) позволит расширить исследования в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения. Отработанные в космическом эксперименте «Ураган» технические средства и методы будут использованы при создании автоматизированных спутниковых систем мониторинга и контроля земной поверхности.

Литература

1. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Роговец А. В., Рязанцев В. В., Сармин Э. Э., Сосенко В. А. (2014а) Летная отработка исследовательской аппаратуры «Фотоспектральная система» на борту Российского сегмента Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2014. № 1. С. 22–28.
2. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Катковский Л. В., Крот Ю. А., Сармин Э. Э. (2014б) Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 27–39. DOI: 10.7868/S0205961414060013.

3. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Катковский Л.В., Сармин Э.Э. (2014в) Обработка спектров и изображений с фотоспектральной системы в космическом эксперименте «Ураган» на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 54–65. DOI: 10.7868/S0205961414060025.
4. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Сармин Э.Э., Гусев В.Ф., Десинов Л.В., Иванов В.А., Крот Ю.А., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сосенко В.А. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2016. № 2. С. 70–79.
5. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Боровихин П.А., Голубев Ю.В., Ломако А.А., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Сосенко В.А. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2018. № 4(23). С. 70–80.
6. Беляев М.Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях. М.: Машиностроение, 1984. С. 264.
7. Беляев М.Ю. Проблемы управления при проведении экспериментов на Международной космической станции // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018): сб. тр. 6-й Международной науч. конф., посвященной 85-летию Ю.А. Гагарина / под ред. А.А. Львова, М.С. Светлова. 2019. С. 7–16.
8. Беляев М.Ю., Юрина О.А. Способ определения с космического аппарата координат источника кольцевых волн на водной поверхности. Патент РФ 2640944. Оpubл. 12.01.2018.
9. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Крикалев С.К., Кумакишев С.А., Секерж-Зенькович С.Я. Идентификация системы океанских волн по космическим снимкам // Изв. Российской акад. наук. Теория и системы управления. 2009. № 1. С. 116–126.
10. Беляев М.Ю., Виноградов П.В., Десинов Л.В., Кумакишев С.К., Секерж-Зенькович С.Я. Идентификация по фотоснимкам из космоса источника океанских кольцевых волн около острова Дарвин // Изв. Российской акад. наук. Теория и системы управления. 2011. № 1. С. 70–83.
11. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Легостаев В.П. Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса // Изв. Российской акад. наук. Энергетика. 2013. № 4. С. 75–90.
12. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Сармин Э.Э., Юрина О.А. (2015а) Аппаратура и программно-математическое обеспечение для изучения земной поверхности с борта российского сегмента Международной космической станции по программе «Ураган» // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1. С. 63–70.
13. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Сармин Э.Э., Юрина О.А. (2015б) Изучение с борта российского сегмента Международной космической станции в рамках программы «Ураган» катастрофических явлений, вызывающих экологические проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1. С. 71–79.
14. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Караваев Д.Ю., Легостаев В.П., Рязанцев В.В., Юрина О.А. (2015в) Особенности проведения и использования результатов съемки земной поверхности, выполняемой экипажами российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2015. № 1. С. 17–30.
15. Беляев М.Ю., Викельски М., Лампен М., Легостаев В.П., Мюллер У., Науманн В., Тертицкий Г.М., Юрина О.А. (2015г) 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.
16. Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Юрина О.А. (2015д) Способ определения скорости движения фронтальной части ледника с космического аппарата. Патент РФ 2568152. Оpubл. 10.11.2015.
17. Беляев М.Ю., Рудаков В.А., Десинов С.Л., Бурицев М.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю. Опыт использования данных эксперимента «Ураган», выполняемого на МКС, в системах семейства «Вега-Созвездие» // 15-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва. 13–17 нояб. 2017. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 72.
18. Беляев М.Ю., Беляев Б.И., Иванов Д.А., Катковский Л.В., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Силюк О.О., Шукайло В.Г. (2018а) Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть I. Методика для спектров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 213–222. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-213-222.
19. Беляев М.Ю., Беляев Б.И., Иванов Д.А., Катковский Л.В., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Силюк О.О., Шукайло В.Г. (2018б) Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть II. Методика для изображений и результаты применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 223–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-223-234.
20. Беляев М.Ю., Беляев Б.И., Катковский Л.В., Ломако А.А., Мартинов А.О., Рязанцев В.В., Сармин Э.Э., Силюк О.О. (2019а) Кросс-калибровка данных «Фотоспектральной системы» с борта

- МКС в космическом эксперименте «Ураган» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 45–55. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-45-55.
21. Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Катковский Л. В., Мартинов А. О., Сармин Э. Э., Силук О. О., Чумаков А. В. (2019б) Классификация водных объектов по спектрам, измеренным с борта МКС в космическом эксперименте «Ураган» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 201–208. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-201-208.
 22. Беляев М. Ю., Воронин Ф. А., Харчиков М. А. (2019в) Контроль перемещения животных на Земле с помощью научной аппаратуры, установленной на российском сегменте Международной космической станции // Лесной вестн. Forestry Bulletin. 2019. Т. 23. № 4. С. 49–58. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-49-58.
 23. Беляев М. Ю., Рулев Д. Н., Есаков А. М., Рулев Н. Д. (2019г) Способ контроля лесного пожара с космического аппарата. Патент РФ 2683142. Оpubл. 26.03.2019.
 24. Беляев М. Ю., Рулев Д. Н., Есаков А. М., Рулев Н. Д. (2019д) Способ контроля лесного пожара с космического аппарата. Патент РФ 2683143. Оpubл. 26.03.2019.
 25. Вишневская И. А., Десинов Л. В., Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Шапоренко С. И., Киреева М. Б., Фролова Н. Л., Рец Е. П., Голубчиков С. И. Географо-гидрологическая оценка наводнений в российском Причерноморье // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2016. № 1. С. 131–146. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-1-131-146.
 26. Десинов Л. В., Котляков В. М., Осипова Г. Б., Цветков Д. Г. Снова дал о себе знать ледник Медвежий // Материалы гляциологических исследований. 2001. № 91. С. 249–253.
 27. Котляков В. М., Рототаева О. В., Десинов Л. В., Зотиков И. А., Осокин Н. И. Катастрофические последствия грандиозной подвижки ледника Колка на Северном Кавказе // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2003. № 1. С. 45–54.
 28. Котляков В. М., Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Юрина О. А. Съёмка Земли из космоса: задачи, проблемы, перспективы // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. Вып. 1–2: сб. ст. / под ред. В. П. Легостаева, М. Ю. Беляева. Королёв: РКК «Энергия» им. С. П. Королева, 2011. С. 181–205.
 29. Котляков В. М., Десинов Л. В., Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Медведев А. А. Наводнение 6–7 июля 2012 г. в городе Крымске // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2012. № 6. С. 80–88.
 30. Котляков В. М., Десинов Л. В., Десинов С. Л., Рудаков В. А. Подвижки ледников Памира в первые 20 лет XXI века // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 1. С. 64–68. DOI: 10.31857/S2686739720110080.
 31. Крамарева Л. С., Лупян Е. А., Амельченко Ю. А., Беляев М. Ю., Бурцев М. А., Суханова В. В., Шамилова Ю. А., Есаков А. М. Наблюдение за динамикой прорана, устроенного в зоне схода скальных пород на реке Бурея // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 278–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-278-283.
 32. Юрина О. А., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н. (2018а) Способ контроля движения наблюдаемого с космического аппарата ледника. Патент РФ 650779. Оpubл. 17.04.2018.
 33. Юрина О. А., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н. (2018б) Способ определения параметров движения наблюдаемого с космического аппарата ледника. Патент РФ 2643224. Оpubл. 31.01.2018.
 34. Юрина О. А., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н. (2018в) Способ наблюдения наземных объектов с движущегося по околокруговой орбите космического аппарата. Патент РФ 2629694. Оpubл. 31.08.2018.
 35. Юрина О. А., Беляев М. Ю., Рулев Д. Н. (2018г) Способ определения положения фронтальной части ледника с находящегося на околокруговой орбите космического аппарата. Патент РФ 2642544. Оpubл. 25.01.2018.
 36. Belyaev M. Yu., Dessinov L. V., Karavaev D. Yu. Specifics of conducting and using imagery of the earth's surface performed by the Russian ISS crew // 64th Intern. Astronautical Congress. 2013. IAC-13. B3.5.7. P. 3744.
 37. Belyaev M. Y., Cheremisin M. V., Esakov A. M. Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment // 69th Intern. Astronautical Congress. 2018. IAC-18. B.3.3.4. Paper No. 46752.
 38. Katkovsky L. V., Beliaev B. I., Beliaev M. Yu., Esakov A. M., Ivanov D. A., Martinov A. O., Siliuk V. O., Sarmin E. E. Method and results of comparing multilevel spectral reflectance measurements of various Earth surfaces // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. No. 6. P. 30–36. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-30-36.
 39. Wikelski M., Mueller U., Scocco P., Catorci A., Desinov L. V., Belyaev M. Y., Keim D., Pohlmeier W., Fichteler G., Mai M. Potential short-term earthquake forecasting by farm animal monitoring // Ethology. 2020. V. 126(9). P. 931–941. DOI: 10.1111/eth.13078.

Scientific equipment and Earth studies techniques in space experiment Uragan on board the International Space Station

M. Yu. Belyaev

S. P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev 141070, Russia
E-mail: mikhail.belyaev@rsce.ru

April 19, 2021, saw the 50th anniversary of the launch in orbit of the world's first orbital station Salyut, which in June 1971 became the first manned space laboratory. Further research on low Earth orbit was conducted in our country on board stations of the Salyut series and orbital complex Mir. This research focuses on the studies of Earth and the processes that take place on its surface. Experiments to study Earth and potentially hazardous and disastrous events that occur on its surface are also being carried out on board the Russian Segment (RS) of the International Space Station (ISS). The paper describes some aspects of conducting experiments that are specific to the ISS. It describes the scientific equipment of the Uragan space experiment that is being conducted on ISS RS and is designed to test the equipment and techniques for Earth observations from space. It provides the characteristics of the scientific equipment and considers some special aspects of its integration into the ISS RS. The involvement on the crew in conducting the experiments on board the station is discussed. The main results and plans for further activities to improve the efficiency of ISS RS Earth observation studies are highlighted.

Keywords: space experiment, scientific equipment, ISS, objects under observation

Accepted: 28.05.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107

Reference

1. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Rogovets A. V., Ryazantsev V. V., Sarmin E. E., Sosenko V. A. (2014a), Flight testing of research equipment “Photospectral System” onboard ISS RS, *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2014, No. 1, pp. 22–28 (in Russian).
2. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Katkovsky L. V., Krot Yu. A., Sarmin E. E. (2014b), Photospectral System Test Results on ISS, Spectral Brightness Distributions of the Outgoing Radiation, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 27–39 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414060013.
3. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Katkovsky L. V., Sarmin E. E. (2014c), Spectral and Images Processing from Photospectral System in Space Experiment “Hurricane” on the ISS, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 54–65 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414060025.
4. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Sarmin E. E., Gusev V. F., Desinov L. V., Ivanov V. A., Krot Yu. A., Martynov A. O., Ryazantsev V. V., Sosenko V. A., Design and flight tests of scientific hardware video-spectral system on board the Russian segment of the ISS, *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2016, No. 2, pp. 70–79 (in Russian).
5. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Borovikhin P. A., Golubev Yu. V., Lomako A. A., Ryazantsev V. V., Sarmin E. E., Sosenko V. A., Automatic positioning system for science hardware in Uragan experiment on the ISS, *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2018, No. 4(23), pp. 70–80 (in Russian).
6. Belyaev M. Yu., *Nauchnye eksperimenty na kosmicheskikh korablyakh i orbital'nykh stantsiyakh* (Experiments Onboard Spacecraft and Orbital Stations), Moscow: Mashinostroenie, 1984, 264 p. (in Russian).
7. Belyaev M. Yu., Problems in control during conduct of experiments onboard the International Space Station, *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii (UOPI-2018)* (Problems of control, processing and transmission of information), Proc. 6th Intern. Scientific Conf. Dedicated to the 85th Anniversary of Yu. A. Gagarin, A. A. Lvov, M. S. Svetlov (eds.), 2019, pp. 7–16 (in Russian).
8. Belyaev M. Yu., Yurina O. A., *Sposob opredeleniya s kosmicheskogo apparata koordinat istochnika kol'tsevykh voln na vodnoi poverkhnosti* (Method of determining ring wave source coordinates on water surface from spacecraft), Patent RU 2640944, Published 12.01.2018 (in Russian).
9. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Kumakshev S. A., Sekerzh-Zenkovich S. Ya., Krikalev S. K., Identification of a system of oceanic waves based on space imagery, *J. Computer and Systems Sciences Intern.*, 2009, Vol. 48, No. 1, pp. 110–120.

10. Belyaev M. Yu., Vinogradov P. V., Desinov L. V., Kumakshev S. K., Sekerzh-Zenkovich S. Ya., Identification of a source of oceanic ring waves near Darwin's Island based on space photos, *J. Computer and Systems Sciences Intern.*, 2011, Vol. 50, No. 1, pp. 67–80.
11. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Legostaev V. P., Use of ground surface survey from the ISS for the benefit of fuel and energy complex, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*, 2013, No. 4, pp. 75–90 (in Russian).
12. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Sarmin E. E., Yurina O. A. (2015a), Providing hardware and mathematical software for the study of the earth's surface onboard the Russian segment of the International space station under the program "Hurricane", *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, No. 1, pp. 63–70 (in Russian).
13. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Sarmin E. E., Yurina O. A. (2015b), The study of catastrophic events that may lead to environmental challenges under the program "Hurricane" onboard the Russian segment of the International space station, *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, No. 1, pp. 71–79 (in Russian).
14. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Legostaev V. P., Ryazantsev V. V., Yurina O. A. (2015c), Features of imaging the earth surface and using the results of the imaging made by the ISS Russian segment crews, *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, No. 1, pp. 17–30 (in Russian).
15. Belyaev M. Yu., Wikelski M., Lampen M., Legostaev V. P., Muller U., Naumann V., Tertitsky G. M., Yurina O. A. (2015d), Technology for studying movements of animals and birds on earth using ICARUS equipment on the Russian segment of the ISS, *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, No. 3, pp. 38–51 (in Russian).
16. Beljaev M. Yu., Desinov L. V., Jurina O. A. (2015e), *Sposob opredeleniya skorosti dvizheniya frontal'noi chasti lednika s kosmicheskogo apparata* (Method to determine speed of motion of frontal glacier part from spacecraft), Patent RU 2568152, Published 10.11.2015 (in Russian).
17. Belyaev M. Yu., Rudakov V. A., Desinov S. L., Burtsev M. A., Balashov I. V., Efremov V. Yu., Experience of using data from the Uragan experiment carried out onboard the ISS in systems of the Vega-Sozvezdiye family, *15-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (15th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of abstr., Moscow, 13–17 Nov. 2017, Moscow: IKI RAN, 2017, p. 72 (in Russian).
18. Belyaev M. Yu., Belyaev B. I., Ivanov D. A., Katkovsky L. V., Martinov A. O., Riazantsev V. V., Sarmin E. E., Siliuk O. O., Shukajlo V. G. (2018a), Atmospheric correction of data registered on board the ISS. Part I. Methodology for spectra, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 213–222 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-213-222.
19. Belyaev M. Yu., Belyaev B. I., Ivanov D. A., Katkovsky L. V., Martinov A. O., Riazantsev V. V., Sarmin E. E., Siliuk O. O., Shukajlo V. G. (2018b), Atmospheric correction of data registered on board the ISS. Part II. Methodology for images and application results, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 223–234 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-223-234.
20. Belyaev M. Yu., Belyaev B. I., Katkovsky L. V., Lomako A. A., Martinov A. O., Riazantsev V. V., Sarmin E. E., Siliuk O. O. (2019a), Cross-calibration of Photospectral System data measured from the ISS in the Uragan space experiment, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 45–55 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-45-55.
21. Belyaev M. Yu., Belyaev B. I., Katkovsky L. V., Martinov A. O., Sarmin E. E., Siliuk O. O., Chumakov A. V. (2019b), Classification of water surfaces by spectra measured from the ISS during the Uragan space experiment, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 201–208 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-201-208.
22. Belyaev M. Yu., Voronin F. A., Kharchikov M. A. (2019c), Animal movement control on earth using scientific equipment installed on the ISS RS, *Lesnoi vestnik. Forestry Bulletin*, 2019, Vol. 23, No. 4, pp. 49–58 (in Russian), DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-49-58.
23. Belyaev M. Yu., Rulev D. N., Esakov A. M., Rulev N. D. (2019d), *Sposob kontrolya lesnogo pozhara s kosmicheskogo apparata* (Forest fire from the spacecraft monitoring method), Patent RU 2683142, Published 26.03.2019 (in Russian).
24. Belyaev M. Yu., Rulev D. N., Esakov A. M., Rulev N. D. (2019e), *Sposob kontrolya lesnogo pozhara s kosmicheskogo apparata* (Forest fire from the spacecraft monitoring method), Patent RU 2683143, Published 26.03.2019 (in Russian).
25. Vishnevskaya I. A., Desinov L. V., Dolgov S. V., Koronkevich N. I., Shaporenko S. I., Kireeva M. B., Frolova N. L., Rets E. P., Golubchikov S. I., Geographical and hydrological assessment of floods in the Russian Black Sea region, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2016, No. 1, pp. 131–146 (in Russian), DOI: 10.15356/0373-2444-2016-1-131-146.
26. Desinov L. V., Kotlyakov V. M., Osipova G. B., Tsvetkov D. G., Snova dal o sebe znat' lednik Medvezhii (Medvezhi glacier draws attention to itself once again), *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*, 2001, No. 91, pp. 249–253 (in Russian).

27. Kotlyakov V. M., Rototaeva O. V., Desinov L. V., Zotikov I. A., Osokin N. I., Catastrophic consequences of a huge surge of the Kolka glacier in the Northern Caucasus, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Ser. geograficheskaya*, 2003, No. 1, pp. 45–54 (in Russian).
28. Kotlyakov V. M., Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Yurina O. A., Earth imaging from space: objectives, problems and future prospects, *Raketno-kosmicheskaya tekhnika, Ser. XII, Vypusk 1–2*, V. P. Legostaev, M. Yu. Belyaev (eds.), Korolev: RKK “Energiya” im. S. P. Koroleva, 2011, pp. 181–205 (in Russian).
29. Kotlyakov V. M., Desinov L. V., Dolgov S. V., Koronkevich N. I., Medvedev A. A., Flash Flood in Krymsk, July 6–7, 2012, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk, Ser. geograficheskaya*, 2012, No. 6, pp. 80–88 (in Russian).
30. Kotlyakov V. M., Desinov L. V., Desinov S. L., Rudakov V. A., Surges of Pamir glaciers in the first 20 years of the 21st century, *Doklady Earth Sciences*, 2020, Vol. 495, No. 1, pp. 854–857 (in Russian), DOI: 10.31857/S2686739720110080.
31. Kramareva L. S., Loupian E. A., Amelchenko Yu. A., Belyaev M. Yu., Burtsev M. A., Sukhanova V. V., Shamilova Yu. A., Esakov A. M., Dynamics of the channel on the Bureya River in the hill slope collapse area, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 278–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-278-283.
32. Yurina O. A., Belyaev M. Yu., Rulev D. N. (2018a), *Sposob kontrolya dvizheniya nablyudaemogo s kosmicheskogo apparata lednika* (Method of the observed from the space craft glacier movement control), Patent RU 2650779, Published 14.04.2018 (in Russian).
33. Yurina O. A., Belyaev M. Yu., Rulev D. N. (2018b), *Sposob opredeleniya parametrov dvizheniya nablyudaemogo s kosmicheskogo apparata lednika* (Method for determining motion parameters of glacier observed from spacecraft), Patent RU 2643224, Published 31.01.2018 (in Russian).
34. Yurina O. A., Belyaev M. Yu., Rulev D. N. (2018c), *Sposob nablyudeniya nazemnykh ob'ektov s dvizhushchegosya po okolokrugovoi orbite kosmicheskogo apparata* (Method of onshore facilities observation from spacecraft moving on circular orbit), Patent RU 2629694, Published 31.08.2018 (in Russian).
35. Yurina O. A., Belyaev M. Yu., Rulev D. N. (2018d), *Sposob opredeleniya polozheniya frontal'noi chasti lednika s nakhodyashchegosya na okolokrugovoi orbite kosmicheskogo apparata* (Method for determining position of front part of glacier from spacecraft on near-circular orbit), Patent RU 2642544, Published 25.01.2018 (in Russian).
36. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu. Specifics of conducting and using imagery of the earth's surface performed by the Russian ISS crew, *64th Intern. Astronautical Congress*, 2013, IAC-13, B3.5.7, p. 3744.
37. Belyaev M. Y., Cheremisin M. V., Esakov A. M., Integrated monitoring of earth surface from onboard ISS Russian segment, *69th Intern. Astronautical Congress*, 2018, IAC-18, B.3.3.4, Paper No. 46752.
38. Katkovsky L. V., Beliaev B. I., Beliaev M. Yu., Esakov A. M., Ivanov D. A., Martinov A. O., Siliuk V. O., Sarmin E. E., Method and results of comparing multilevel spectral reflectance measurements of various earth surfaces, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 6, pp. 30–36, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-30-36.
39. Wikelski M., Mueller U., Scocco P., Catorci A., Desinov L. V., Belyaev M. Y., Keim D., Pohlmeier W., Fechteler G., Mai M., Potential short-term earthquake forecasting by farm animal monitoring, *Ethology*, 2020, Vol. 126(9), pp. 931–941, DOI: 10.1111/eth.13078.