

Создание и использование в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции научной аппаратуры «Гиперспектрометр»

М. Ю. Беляев¹, И. В. Вагнер², А. В. Горбунов², А. С. Гребёнкин²,
А. И. Григорьев³, А. М. Есаков¹, Г. Р. Касоев³, С. В. Конев¹, О. Д. Кононенко²,
Д. М. Коротков³, А. В. Кузьмин¹, А. С. Кузьмичёв³, М. И. Монахов¹,
С. С. Негодяев³, А. Н. Овчинин², М. В. Черемисин¹, Б. М. Шурыгин³

¹ *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, Московская обл., 141070, Россия
E-mail: post@rsce.ru*

² *Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов
им. Ю. А. Гагарина, п. Звёздный городок, Московская обл., 141160, Россия
E-mail: info@gctc.ru*

³ *Московский физико-технический институт (НИУ)
Долгопрудный, Московская обл., 141700, Россия
E-mail: info@mipt.ru*

Космический эксперимент (КЭ) «Ураган» на российском сегменте (РС) Международной космической станции (МКС) направлен на отработку научной аппаратуры (НА) и методов наблюдения Земли. В составе комплекса НА КЭ «Ураган» 30 июля 2024 г. начал работать новый прибор «Гиперспектрометр». Прибор обеспечивает получение и обработку гиперспектральных изображений подстилающей поверхности одновременно двумя гиперспектральными камерами: видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Эта информация предназначена для исследования спектральных свойств различных наземных образований, а также для автоматического поиска и идентификации объектов. Гиперспектральные камеры могут формировать изображения подстилающей поверхности во множестве спектральных каналов. В зависимости от поставленной задачи для конкретного сеанса съёмки космонавт может выбирать рабочие каналы (от 1 до 100) из 180 каналов спектрального разложения. В статье дан обзор работ, выполненных при создании и начале использования НА «Гиперспектрометр» на РС МКС. Кратко описаны конструкция прибора и этапы его создания и испытаний. Указаны задачи, решаемые с помощью НА «Гиперспектрометр». Описаны особенности работы с аппаратурой на борту МКС. Приведены используемые на МКС методы планирования наблюдений и некоторые полученные результаты обработки данных от НА «Гиперспектрометр».

Ключевые слова: Международная космическая станция, МКС, космический эксперимент «Ураган», Гиперспектрометр, планирование наблюдений, обработка данных, дистанционное зондирование Земли

Одобрена к печати: 24.10.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-29-46

Введение

Одно из основных направлений исследований на Международной космической станции (МКС) связано с наблюдением и изучением Земли. Для нашей страны, имеющей обширную территорию, это направление является особенно востребованным. Непрерывное наблюдение земной поверхности должно осуществляться с помощью автоматических космических аппаратов. Однако 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, являющейся научной космической лабораторией. Именно с этой целью на российском сегменте (РС) МКС одним из первых был организован космический эксперимент (КЭ) «Ураган», целью которого и стала

отработка технических средств и методов наблюдения Земли с борта РС МКС (Беляев, 2021). Наибольшее внимание в КЭ «Ураган» уделяется наблюдению потенциально опасных и катастрофических явлений, возникающих на Земле. Изучение разнообразных 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 разных спектральных диапазонах. Это позволяет комплексно исследовать изучаемые в эксперименте объекты и явления. Выявление какого-либо фактора в исследуемом явлении или процессе одним из используемых в КЭ «Ураган» прибором может сигнализировать о подготовке важного, порой даже катастрофического события на Земле и целесообразности применения для его изучения других приборов, входящих в состав КЭ (Беляев, 2021).

В составе комплекса НА КЭ «Ураган» РС МКС 30 июля 2024 г. начал работать новый прибор «Гиперспектрометр», изготовленный Московским физико-техническим институтом (МФТИ) и АО «НПО «Лептон» по техническому заданию ПАО «РКК «Энергия» (Беляев и др., 2019б).

Устройство и задачи НА «Гиперспектрометр»

Прибор обеспечивает получение и обработку гиперспектральных изображений подстилающей поверхности одновременно двумя гиперспектральными камерами: видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов. Эта информация предназначена для исследования спектральных свойств различных наземных образований, а также для автоматического поиска и идентификации объектов. Гиперспектральные камеры могут формировать изображения подстилающей поверхности во множестве спектральных каналов. В зависимости от поставленной задачи для конкретного сеанса съёмки космонавт может выбирать рабочие каналы (от 1 до 100) из 180 каналов спектрального разложения.

Программное обеспечение (ПО) прибора обеспечивает связь с информационной системой РС МКС и получение от неё данных о положении и ориентации МКС во время съёмки, которые привязаны к сохраняемой видеoinформации. Предусмотрена возможность проведения на борту анализа сохранённых видеоданных ПО прибора и передачи их для дальнейшей обработки на Землю.

С помощью НА «Гиперспектрометр» на МКС решаются следующие задачи:

- мониторинг потенциально опасных и катастрофических объектов и явлений;
- геологические, почвенные, климатологические, гидрологические исследования;
- изучение изменений земельного покрова;
- оценка состояний лесных угодий;
- оценка состояния сельскохозяйственных посевов;
- поиск и оценка концентрации различных минералов на обнажённых участках почвы;
- обнаружение загрязнения растительности и воды нефтью, мазутом и т.д., а также определение нанесённого этими факторами ущерба;
- построение карт концентрации хлорофилла в приповерхностных водах и т.д.

В состав научной аппаратуры входят: аппаратурный модуль (АМ), специальный иллюминаторный кронштейн (СИК) и вычислительно-управляющий модуль (ВУМ). Внешний вид прибора в сборе приведён на *рис. 1* (см. с. 31).

Основу прибора составляет АМ, созданный в АО «НПО «Лептон» под руководством О. Ю. Казанцева и М. В. Щербакова, в котором находятся панхроматическая камера (ПК) и гиперспектральные камеры (ГСК), работающие в видимом диапазоне (ВД) и ближнем инфракрасном диапазоне (БИК). В рабочем положении оптические оси камер направлены через иллюминатор № 9 МКС в сторону поверхности Земли. Съёмка происходит сканирующим способом, движением МКС по орбите вместе с прибором относительно Земли. Основные технические характеристики НА «Гиперспектрометр» приведены в *таблице*.

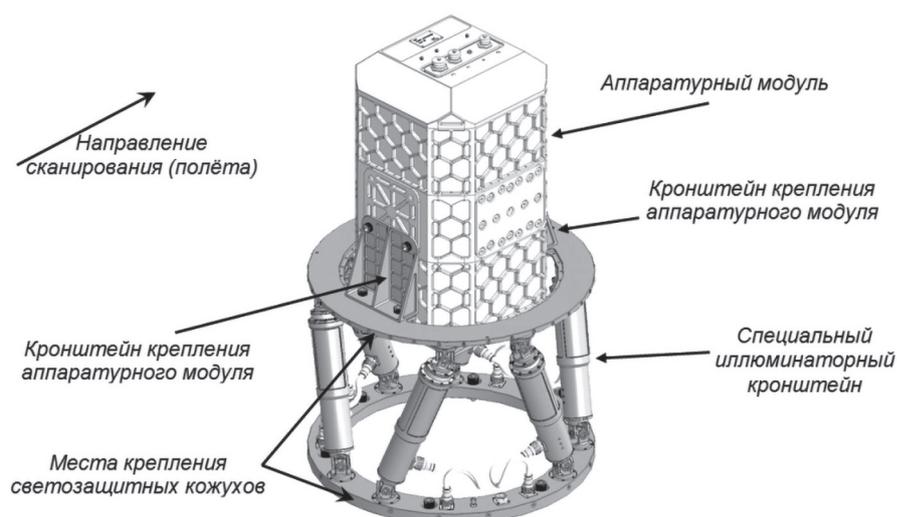


Рис. 1. Научная аппаратура «Гиперспектрометр» в сборе

Основные технические данные и характеристики прибора

Параметр	Устройства в составе АМ	Действительное значение
Спектральная полоса, мкм	ГСК-ВД-4	0,467–0,903
	ГСК-БИК-4	0,893–1,647
	ПК-4	0,470–0,780
Число каналов спектрального разложения, не менее	ГСК-ВД-4	110
	ГСК-БИК-4	113
	ПК-4	спектрального разложения нет
Максимальное число спектральных каналов, получаемых одновременно во время съёмки, не менее	ГСК-ВД-4	80
	ГСК-БИК-4	50
	ПК-4	–
Ширина спектрального канала (спектральное разрешение), нм, не более	ГСК-ВД-4	4,01
	ГСК-БИК-4	6,45
	ПК-4	–
Отношение сигнал/шум при зачётном угле Солнца над местным горизонтом в наилучшем канале (при коэффициенте отражения $p = 0,4$), не менее	ГСК-ВД-4	86
	ГСК-БИК-4	108
	ПК-4	110
Разрешение в надир (проекция пикселя), м, не более	ГСК-ВД-4	39,82
	ГСК-БИК-4	45,10
	ПК-4	118,69
Угол поля зрения, град, не менее	ГСК-ВД-4	3,61
	ГСК-БИК-4	4,01
	ПК-4	19,1×16,1

Аппаратурный модуль содержит две гиперспектральные камеры (ГСК-ВД и ГСК-БИК) с общей оптической системой объектива, отдельными оптическими системами спектральной части и отдельными фотоприёмниками (рис. 2, см. с. 32). Принимаемое электромагнитное излучение разлагается в спектр при помощи дифракционных решёток. Полученные спектры регистрируются матричными приёмниками изображений, оцифровываются, объединяются в общий поток и передаются через интерфейс USB.

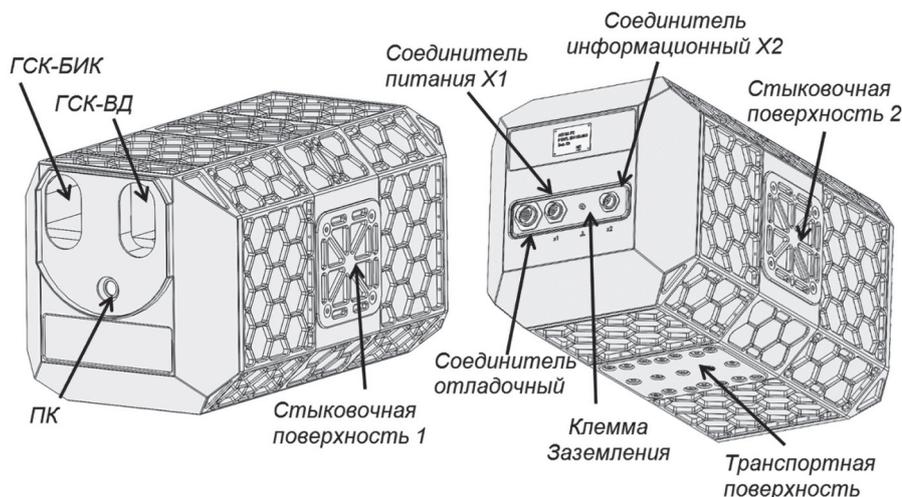


Рис. 2. Внешний вид АМ и его основные элементы

Камера ГСК-ВД имеет кремниевый фотоприёмник видимого диапазона на основе строчно-кадровой ПЗС-матрицы (ПЗС — прибор с зарядовой связью), а ГСК-БИК — фотоприёмник ближнего ИК-диапазона на основе сплава InGaAs с КМОП-схемой считывания (КМОП — комплементарная структура «металл-оксид-полупроводник»).

Каждая гиперспектральная камера имеет щелевое поле зрения. Гиперспектральное изображение получается сканированием наблюдаемой области в процессе пролёта МКС над ней.

Панхроматическая камера в составе АМ имеет отдельную оптическую систему и фотоприёмник, принимает электромагнитное излучение видимого диапазона. Видеосигнал с ПК объединяется в общий поток с сигналами от гиперспектральных камер и передаётся через интерфейс USB.

Все камеры жёстко закреплены друг относительно друга. Взаимное расположение поля зрения камер и проекции поля зрения на подстилающую поверхность схематически приведены на рис. 3. Относительно общего направления визирования блока направления визирования камеры ориентированы следующим образом:

- поле зрения ПК направлено вперёд, причём направление в надир оно немного не захватывает;
- поле зрения ГСК-ВД направлено на 5° вперёд и находится внутри поля зрения ПК, в его задней части;
- поле зрения ГСК-БИК направлено на 5° назад и не попадает в поле зрения ПК (следует за ним при сканировании).



Рис. 3. Ориентация поля зрения камер АМ вдоль направления сканирования

Корпус прибора выполнен из алюминиевого сплава АМгб со специальным покрытием. Аппаратурный модуль не имеет внешних органов ручного управления и регулировки, управ-

ление прибором и получение информации осуществляется через интерфейс USB. Направление оси визирования камер АМ можно изменять в пределах нескольких градусов с помощью СИК. Он представляет собой платформу наведения с электроприводом. Специальный иллюминаторный кронштейн содержит светозащитный кожух для защиты космонавта от попадания ультрафиолетового излучения через иллюминатор.

Специальный иллюминаторный кронштейн представляет собой конструкцию типа «гексапод» с электроприводом и обеспечивает (рис. 4):

- отклонение от симметричного положения на угол не менее 5° по двум осям;
- поворот вокруг своей оси на угол не менее $\pm 25^\circ$;
- фиксирование установленной ориентации;
- измерение своей ориентации.

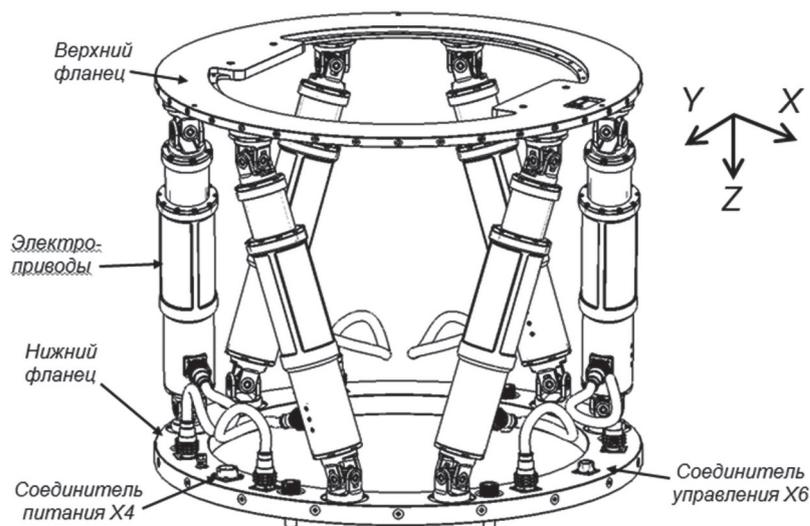


Рис. 4. Внешний вид СИК и его основные элементы

Специальный иллюминаторный кронштейн крепится на фланец иллюминатора № 9 служебного модуля РС МКС. Аппаратурный модуль устанавливается на подвижный (верхний) фланец специального иллюминаторного кронштейна. Крепление иллюминатора, СИК и АМ между собой производится кронштейнами крепления и винтами. Отработка заданных углов отклонений выполняется электроприводами специального иллюминаторного кронштейна по команде от ПО вычислительно-управляющего модуля по информации, полученной от электроприводов СИК.

Вычислительно-управляющий модуль представляет собой загрузочный жёсткий диск с установленными на нём операционной системой и ПО. Вычислительно-управляющий модуль обеспечивает:

- управление АМ и СИК;
- приём данных с камер АМ и информации обратной связи с СИК;
- приём навигационно-баллистических данных РС МКС через локальную вычислительную сеть;
- формирование файлов, содержащих как данные, полученные с камер АМ, так и навигационно-баллистические метаданные;
- отображение на экране персонального компьютера в реальном времени панхроматических изображений, получаемых с камер АМ;
- загрузки гиперспектральных данных, полученных с ГСК-ВД и ГСК-БИК;
- отображение гиперспектральных данных для выбранных каналов в виде изображения;
- проведение различных процедур обработки гиперспектральных данных;
- отображение результатов обработки;

- сохранение результатов обработки и информации о применённых процедурах обработки.

Электрическое питание научной аппаратуры осуществляется от источника постоянного напряжения 27 В. Максимальная общая мощность потребления в режиме наведения может достигать 250 Вт. В режиме съёмки потребление АМ составляет не более 11 Вт.

В декабре 2022 г. специалистами ПАО «РКК «Энергия» совместно со специалистами МФТИ и АО «Лептон» были успешно проведены комплексные испытания лётного образца научной аппаратуры на стенде контрольно-испытательной станции ПАО «РКК «Энергия» (рис. 5).

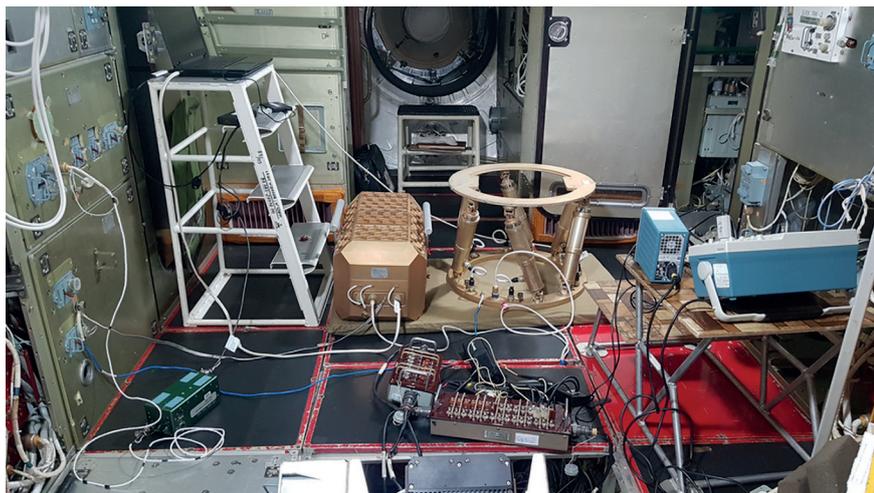


Рис. 5. Комплексные испытания научной аппаратуры в служебном модуле контрольно-испытательной станции

Для успешного выполнения экспериментов с НА «Гиперспектрометр» на борту РС МКС специалистами Центра подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина совместно с ПАО «РКК «Энергия» и МФТИ постоянно проводится подготовка космонавтов к работе с прибором.

В июне 2024 г. на транспортном грузовом корабле «Прогресс МС-27» на борт РС МКС была доставлена НА «Гиперспектрометр».

Первое включение аппаратуры 30 июля прошло успешно, получена ценная научная информация. Во время сеанса осуществлялась съёмка территории РФ, в том числе наземного полигона Института географии РАН. А. С. Гребенкин выполнил первое использование сложной аппаратуры на борту станции (рис. 6).



Рис. 6. А. С. Гребёнкин на борту РС МКС с НА «Гиперспектрометр» (слева); установленный на иллюминатор № 9 РС МКС прибор (справа)

Планирование сеансов наблюдения с помощью НА «Гиперспектрометр»

Для планирования сеансов экспериментов, связанных с наблюдением земной поверхности, с целью повышения информативности (количественной оценки ценности получаемой научной информации) был разработан метод оптимизации программы наблюдений (Беляев и др., 2023). Данный метод учитывает характеристики и особенности применения НА, накладывающие ограничения на планирование сеансов. Его использование позволяет повысить общую эффективность программы наблюдений: помимо увеличения информативности сеансов КЭ, экономить ресурсы применяемой аппаратуры, рабочее время экипажа и сократить продолжительность использования рабочего места на иллюминаторе.

При реализации научной программы с использованием НА «Гиперспектрометр» для заданного интервала планирования продолжительностью от нескольких суток до недель или месяцев может быть составлено несколько связанных последовательностей наблюдений объектов, выбираемых из заданного общего списка объектов. Такие последовательности традиционно называются зонами наблюдений (экспериментов) (Беляев и др., 2023). Их информативность при планировании и проведении наблюдений с помощью НА «Гиперспектрометр» рассчитывается следующим образом:

$$I_j = \sum_{i=1}^{N_j} p_{ji} o_{ji} l_{ji} s_{ji}, j = 1, \dots, M, \quad (1)$$

где M и j — количество зон и их номера; N_j и i — количество всех объектов в зоне и их номера; p_{ji} — приоритет i -го объекта j -й зоны ($1 \leq p_i \leq 10$); o_{ji} — коэффициент облачности при наблюдении i -го объекта ($0 \leq o_i \leq 1$); l_{ji} — коэффициент освещённости при наблюдении i -го объекта, $l_{ji} = 1 - \left| \frac{h_{ji}^{opt} - h_{ji}}{h_{ji}^{opt}} \right|$; h_{ji} и h_{ji}^{opt} — угол Солнца (угловая высота Солнца над местным горизонтом) и оптимальный угол Солнца для i -го объекта j -й зоны (определяется заказчиком съёмки), при этом $h_{ji} > h_{\min}$, где h_{\min} — ограничение по минимально допустимому углу Солнца для НА «Гиперспектрометр»; s_{ji} — коэффициент сканируемой площади объекта, $s_{ji} = S'_{ji} / S_{ji}$, где S_{ji} и S'_{ji} — площадь объекта и площадь снимаемой части объекта.

Таким образом значение информативности зоны I_j находится в диапазоне:

$$0 \leq I_j \leq \sum_{i=1}^{N_j} p_{ji}.$$

Научная информация в аппаратуре первоначально записывается на собственное запоминающее устройство — жёсткий диск, имеющий ограниченный объём. Кроме того, следует отметить, что «Гиперспектрометр» устанавливается на иллюминатор № 9 служебного модуля и требует участия экипажа для монтажа/демонтажа, а также для выдачи команд управления (задание углов наведения, времени начала и конца съёмки). В связи с этим время работы экипажа в ходе сеансов экспериментов с НА «Гиперспектрометр» и период использования рабочего места на иллюминаторе № 9, которое необходимо и для других исследований, рассматриваются как ресурсы. Введём обозначения: T_j — продолжительность работы экипажа с НА в j -й зоне; T^0 — ограничение на время привлечения экипажа для работы с НА на интервале планирования; τ_j — временной интервал, в течение которого рабочее место на иллюминаторе № 9 задействуется в j -й зоне; τ^0 — ограничение на время использования рабочего места на иллюминаторе № 9 для съёмки на интервале планирования; V_j — объём информации, получаемой в j -й зоне; V^0 — ограничение сверху на объём информации, которое определяется ёмкостью запоминающего устройства НА; I^0 — ограничение снизу на суммарную информативность выбранных зон; x_j — j -я компонента двоичного вектора \mathbf{X} , которая равна 1, если j -я зона выбрана для проведения эксперимента, и равна 0 в противном случае.

В процессе полёта РС МКС возможны различные постановки задачи оптимизации программы наблюдений:

1. Максимизация информативности при заданных ограничениях на время работы экипажа, время использования иллюминатора и объём информации для записи в её записывающее устройство. Следовательно, требуется найти вектор \mathbf{X} , максимизирующий целевую функцию $L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M I_j x_j$ при ограничениях

$$\sum_{j=1}^M T_j x_j \leq T^0, \quad \sum_{j=1}^M \tau_j x_j \leq \tau^0 \quad \text{и} \quad \sum_{j=1}^M V_j x_j \leq V^0.$$

2. Минимизация объёма информации для записи в запоминающее устройство при заданной информативности и ограничениях на время работы экипажа и время использования. Соответственно в данном случае требуется найти вектор \mathbf{X} , минимизирующий целевую функцию $L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M V_j x_j$ при ограничениях

$$\sum_{j=1}^M I_j x_j \geq I^0, \quad \sum_{j=1}^M T_j x_j \leq T^0 \quad \text{и} \quad \sum_{j=1}^M \tau_j x_j \leq \tau^0.$$

3. Минимизация расходования рабочего времени экипажа при заданной информативности и ограничениях на время использования иллюминатора и количество информации для записи в запоминающее устройство. В этом случае требуется найти вектор \mathbf{X} , минимизирующий целевую функцию $L(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^M T_j x_j$ при ограничениях

$$\sum_{j=1}^M I_j x_j \geq I^0, \quad \sum_{j=1}^M \tau_j x_j \leq \tau^0 \quad \text{и} \quad \sum_{j=1}^M V_j x_j \leq V^0 \quad \text{и т. д.}$$

Следует отметить, что подзадачей (а зачастую и отдельной самостоятельной задачей) при составлении программы наблюдений является выбор оптимального набора объектов в зоне. Следовательно, при наличии вариативности в выборе объектов внутри зоны/зон требуется предварительно выбрать снимаемые объекты с учётом технических характеристик аппаратуры, таких как собственное поле зрения, углы наведения, минимальное требуемое время (скорость) наведения. Возможные задачи оптимизации формализуются аналогично описанному выше подходу.

Исчерпывающее и точное решение поставленных таким образом задач оптимизации даёт метод полного перебора всех возможных вариантов программ наблюдения. При этом время, необходимое для поиска решения задачи, существенно зависит от числа рассматриваемых зон наблюдения и быстродействия вычислительной техники. В связи с этим для решения задач планирования съёмки с относительно большим числом зон и/или объектов наблюдения целесообразно использовать быстрые алгоритмы, которые широко применяются в целочисленном линейном программировании, например симплекс-метод, а также эвристические алгоритмы, в частности различные модификации генетического алгоритма.

Впервые в условиях реального полёта метод оптимизации программы наблюдений был применён при планировании съёмки, проводившихся в ходе тестовых сеансов КЭ «Ураган» с НА «Гиперспектрометр» в сентябре 2024 г. Поиск решения осуществлялся при помощи генетического алгоритма. Задача оптимизации заключалась в максимизации информативности при ограничениях на время работы экипажа и использование рабочего места у иллюминатора. Объектами съёмки были «горячие точки» (*англ.* hot spots) (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>), зафиксированные автоматическими космическими аппаратами в течение двух суток, предшествующих дате составления программы съёмки, — сельскохозяйственные поля, а также районы со следами антропогенного загрязнения. Ниже в качестве примера на *рис. 7* (см. с. 37) приведена одна из выбранных зон проведения сеанса эксперимента 03.09.2024: белым цветом показана трасса МКС, метками-мишенями отмечены все объекты, доступные для наблюдения в зоне (всего 47 объектов). Метки, которые соответствуют выбранным с помощью генетического алгоритма для съёмки объектам, закрашены зелёным цветом (22 объекта), а остальные — красным (25 объектов).

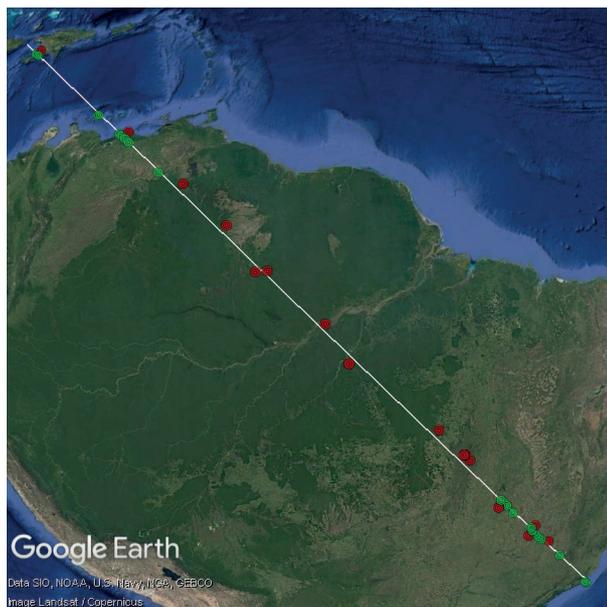


Рис. 7. Зона проведения сеанса КЭ «Ураган» с НА «Гиперспектрометр» 03.09.2024

Программа для поиска решения была реализована на языке Python с пакетом DEAP (<https://deap.readthedocs.io/en/master>). При этом был применён генетический алгоритм с использованием турнирного отбора, одноточечного скрещивания, мутации (вероятности 0,9 и 0,1 соответственно) и элитизма.

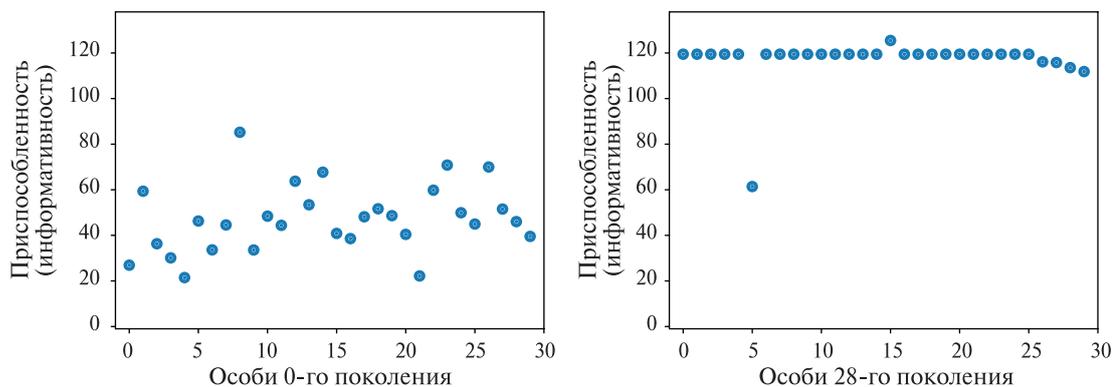


Рис. 8. Графики приспособленности отдельных особей начальной популяции (слева) и 28-го поколения (справа)

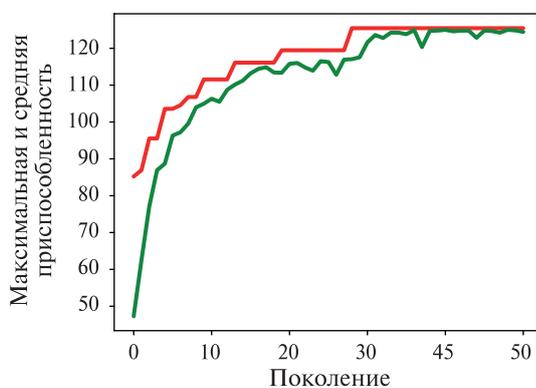


Рис. 9. Графики средней (зелёный цвет) и максимальной (красный) приспособленности в зависимости от поколения



Рис. 10. Композитное RGB-изображение (R = 598 нм, G = 554 нм, B = 470 нм) с камеры видимого диапазона НА «Гиперспектрометр», съёмка 03.09.2024 с борта РС МКС (КЭ «Ураган»)

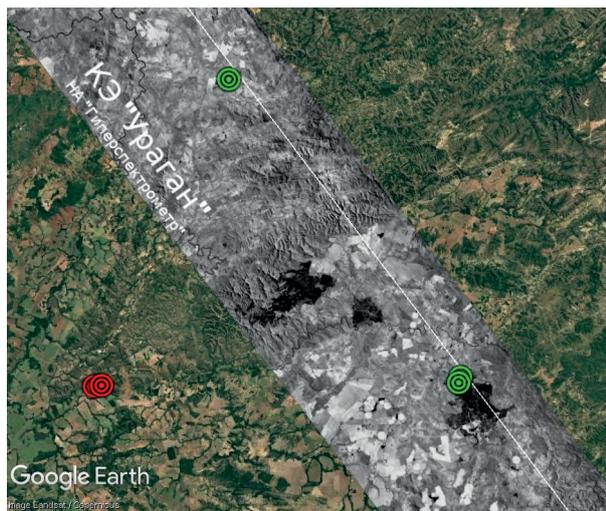


Рис. 11. Чёрно-белое изображение (1056 нм) камеры ближнего ИК-диапазона НА «Гиперспектрометр», съёмка 03.09.2024 с борта РС МКС (КЭ «Ураган»)

В функции оценки приспособленности использовалась формула информативности (1). Помимо этого при оценке учитывались технические параметры аппаратуры (собственное поле зрения, углы наведения и скорость наведения), влияющие на совместимость снимаемых объектов между собой: геном особей с несовместимыми объектами корректировался. Ниже на рис. 8 и 9 (см. с. 37) приведены графики, иллюстрирующие ход поиска решения генетическим алгоритмом для популяции из 30 особей.

Из графиков на рис. 8 и 9 видно, что максимум приспособленности (информативности) был достигнут в 28-м поколении. Все выбранные для съёмки объекты были успешно отсняты. Ниже на рис. 10 и 11 соответственно приведены примеры полученных данных в видимом и ближнем ИК-диапазонах, совмещённые с ортофотопланом (Google Earth): по данным съёмки в видимом диапазоне было сформировано композитное RGB-изображение (R = 598 нм, G = 554 нм, B = 470 нм) с камеры видимого диапазона НА «Гиперспектрометр»; по данным съёмки в ближнем ИК-диапазоне было создано чёрно-белое изображение (1056 нм).

Аналогично рис. 7 белым цветом показана трасса МКС, мишенями отмечены объекты, доступные для наблюдения в зоне, при этом те из них, которые соответствуют выбранным с помощью генетического алгоритма для съёмки объектам, закрашены зелёным цветом, остальные — красным.

Применение описанного подхода позволило добиться требуемой информативности сеансов наблюдений при экономии ресурсов аппаратуры и станции, а также автоматизировать процесс создания программы наблюдений. Автоматизация данного процесса позволяет не только сократить трудозатраты на составление программы наблюдений, но и даёт возможность оперативно корректировать программу наблюдений в зависимости от изменения метеоусловий в районе исследуемых объектов и приоритетности (актуальности) их съёмки, что особенно важно при планировании съёмок различных катастрофических явлений: лесных пожаров, наводнений и т. д.

Использование программного обеспечения обработки информации и некоторые примеры данных НА «Гиперспектрометр»

Гиперспектральная съёмка предоставляет целый ряд новых возможностей, ранее недоступных при дешифрировании данных дистанционного зондирования Земли. Полная спектральная характеристика каждого элемента изображения, получаемого в результате гиперспек-

тральной съёмки, позволяет выполнять тематическую классификацию объектов съёмки, а также обнаруживать на земной поверхности объекты по их известным спектральным характеристикам (Беляев и др., 2014; Еремеев и др., 2003; Кашницкий и др., 2015; Козинцев и др., 2002; Лебедев и др., 2019; Лупян и др., 2011, 2012; Чабан, 2013; Чабан и др., 2009; Черепанов, 2011; Шовенгердт, 2010).

Углублённый анализ конкретных целевых съёмок даёт возможность выполнять детальную диагностику состояния растительного покрова, сельскохозяйственных культур, водных ресурсов, льдов, оценивать результаты природных катастроф, антропогенное воздействие на природу и т. д. Вместе с тем необходимо отметить, что продолжением достоинств гиперспектральной съёмки являются трудности, с которыми приходится сталкиваться при её реализации и обработке получаемых результатов. К ним относятся дороговизна и сложность применяемой аппаратуры, а также огромные объёмы получаемой в процессе съёмки информации, требующие соответствующих вычислительных мощностей, разработки специального ПО и глубоких профессиональных знаний для её анализа и эффективного использования.

В настоящее время для обработки гиперспектральной информации разработан целый ряд программных продуктов. К наиболее применяемым можно отнести ENVI® (США), ArcGIS (США), Erdas Imagine (США). В нашей стране, кроме перечисленных, широкое применение нашли такие отечественные продукты, как SCANEX IMAGE PROCESSOR, NextGIS QGIS и ряд других.

Программное обеспечение для НА «Гиперспектрометр» разрабатывалось на основе существующих программных средств обработки гиперспектральных данных с учётом технических характеристик НА «Гиперспектрометр» и особенностей, связанных с выполнением съёмок с борта МКС.

Техническая реализация комплекса НА «Гиперспектрометр» характеризуется тем, что в её состав помимо оптического комплекса входит вычислительно-управляющий модуль, содержащий ПО, позволяющее космонавту непосредственно на борту станции не только задавать параметры и управлять процессом съёмки, но и оперативно обрабатывать получаемую гиперспектральную информацию. С этой целью разработан протокол информационного взаимодействия ВУМ с бортовой сетью РС МКС, который даёт возможность получать от системы управления бортовой аппаратурой навигационно-баллистические данные об орбитальных координатах станции, её угловом положении, координатах астроориентиров, координатах подспутниковой точки, а также выполнять синхронизацию времени по протоколу NTP (*англ.* Network Time Protocol).

Вычислительно-управляющий модуль обеспечивает выполнение следующих функций:

- загрузка гиперспектральных данных, полученных с камер видимого и инфракрасного диапазонов;
- отображение гиперспектральных данных в виде изображения;
- проведение различных процедур обработки гиперспектральных данных;
- отображение результатов обработки;
- сохранение как результатов обработки, так и информации о применённых процедурах обработки.

Данное ПО позволяет выполнять в процессе обработки получаемой информации следующие задачи:

- радиометрическая коррекция;
- спектральная коррекция;
- геометрическая коррекция;
- атмосферная коррекция;
- географическая привязка;
- определение информативных каналов спектра;
- отображение снимка в псевдоцветах;
- проведение тематической классификации объектов съёмки;
- снижение размерности данных;

- отображение отдельных комбинаций спектральных каналов;
- расчёт и применение спектральных индексов;
- создание спектрального профиля области снимка;
- обнаружение объекта по его спектральному профилю;
- создание библиотеки спектральных профилей объектов съёмки;
- реализация возможности экспорта результатов обработки в растровые форматы ERDAS Imagine, GeoTIFF, ENVI BSQ HDR labeled, ENVI BIL HDR labeled; CSV (для спектров и таблиц), KML и Shapefile (для областей интереса), PNG (для готовых результатов обработки).

Процедуры, применяемые в обработке гиперспектральных съёмок, существенным образом различаются по требуемой квалификации оператора и необходимости использования дополнительных данных, которые могут быть получены, например, в результате квазисинхронных съёмок другой аппаратурой дистанционного зондирования или по результатам непосредственно полевых исследований территории съёмки. Учитывая высокую контекстную нагруженность и сложность процедур обработки гиперспектральных съёмок, в ПО НА «Гиперспектрометр» реализованы два возможных режима обработки, условно «бортовой» и «наземный»: в бортовом режиме процедуры обработки данных являются типовыми и не требующими активного вмешательства оператора в процесс обработки, наземный же режим требует гораздо более глубокого вовлечения в тематику дистанционного зондирования Земли. Технически оба режима обработки доступны и на борту МКС, и в наземных условиях.

На *рис. 12–15* в качестве примеров приведены некоторые результаты обработки полученных изображений ПО НА «Гиперспектрометр». На *рис. 12* показан пример обработки изображения (город Ле-Ман, Франция) в видимом диапазоне в естественных цветах: R = 679 нм, G = 540 нм, B = 474 нм. Программное обеспечение НА «Гиперспектрометр» даёт возможность представления изображений и в условных цветах, что в ряде случаев обладает большей информативностью при дешифрировании. На *рис. 13* приведён пример такого изображения, где R = 753 нм, G = 553 нм, B = 474 нм.



Рис. 12. Изображение в естественных цветах

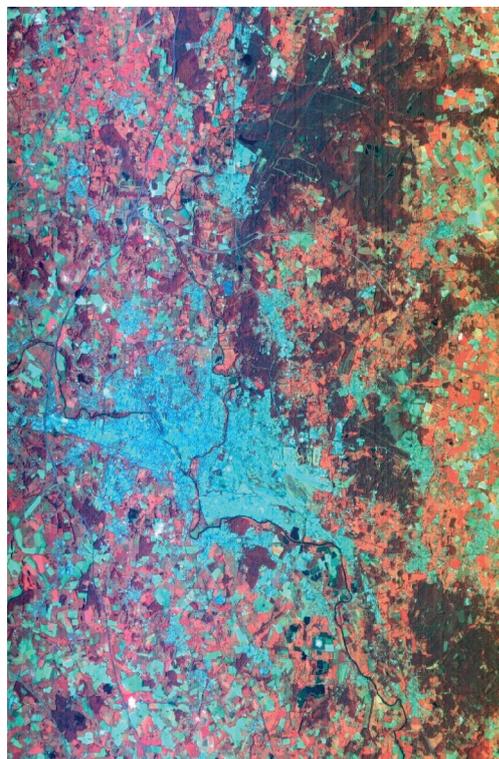


Рис. 13. Изображение в условных цветах

Для оценки состояния растительного покрова используются спектральные индексы растительности, применение которых основано на способности растений с разной степенью интенсивности поглощать и отражать излучение различных длин волн в видимом и ИК-диапазонах. Программное обеспечение НА «Гиперспектрометр» содержит библиотеку таких индексов, которая может пополняться и редактироваться. Одним из наиболее часто используемых спектральных индексов растительности является индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index). На *рис. 14* приведён пример применения индекса NDVI в условных цветах. Густота листового покрова характеризуется насыщенностью оранжевого цвета.

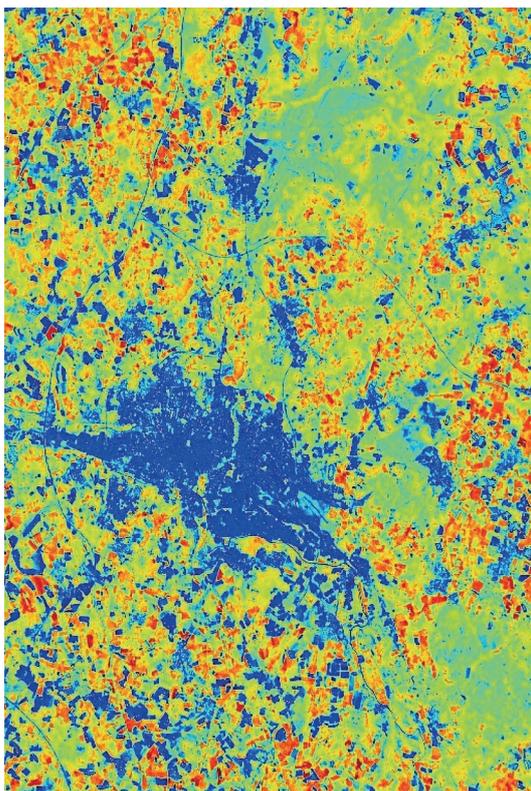


Рис. 14. Отображение вегетативного индекса растительности NDVI

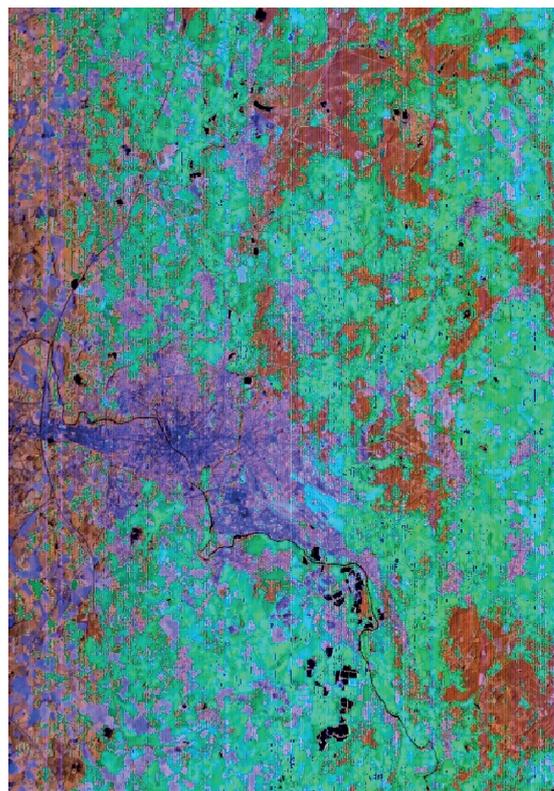


Рис. 15. Изображение в условных цветах ИК-диапазона

Важно отметить, что до настоящего времени не было представлено данных гиперспектральных съёмок из космоса в ИК-диапазоне, выполненных отечественной аппаратурой. Научная аппаратура «Гиперспектрометр» даёт возможность получать изображения земной поверхности не только в видимом, но и в ближнем ИК-диапазоне. Это принципиально увеличивает информативность выполняемых съёмок и позволяет получить данные о подстилающей поверхности, недоступные для съёмки в видимом диапазоне. На *рис. 15* показан пример обработки изображения в ИК-диапазоне с использованием условных цветов: $R = 1056$ нм, $G = 1172$ нм, $B = 1509$ нм.

Важным свойством гиперспектральной съёмки является возможность классификации отснятых объектов в зависимости от их спектральных характеристик.

Реализованный в ПО ВУМ НА «Гиперспектрометр» метод классификации основан на преобразовании данных путём выявления главных переменных. Для снижения размерности был выбран метод главных компонент (*англ.* Principal Component Analysis — PCA), который позволяет сократить размерность данных, сохраняя при этом наибольшее количество информации. Главные компоненты максимально коррелируют с исходными данными и при этом ортогональны друг другу, что позволяет формировать новый базис в пространстве признаков,

исключая лишнюю информацию и снижая размерность. Оператором ПО ВУМ выбираются компоненты (подмножество каналов) наиболее актуальные для решения необходимой тематической задачи. Программное обеспечение разбивает в процессе обработки всё изображение на ряд кластеров. После выбора синтезируется изображение, имеющее меньший объём, но сохраняющее всю необходимую информацию. Классификация производится методом *k*-means. В результате возможна количественная оценка природных ресурсов, сельскохозяйственных культур, водного баланса и т.д. Пример такой классификации представлен на *рис. 16*, где кластеры 1, 4, 9 — городская застройка и открытый грунт; кластер 2 — древесная растительность; кластеры 3, 10 — растительность на обрабатываемых землях; кластеры 5, 6, 7 — водные объекты и тени облаков; кластер 8 — облака.



Рис. 16. Пример композитного изображения в видимом диапазоне с классификацией объектов



Рис. 17. Вырубки лесов Амазонии

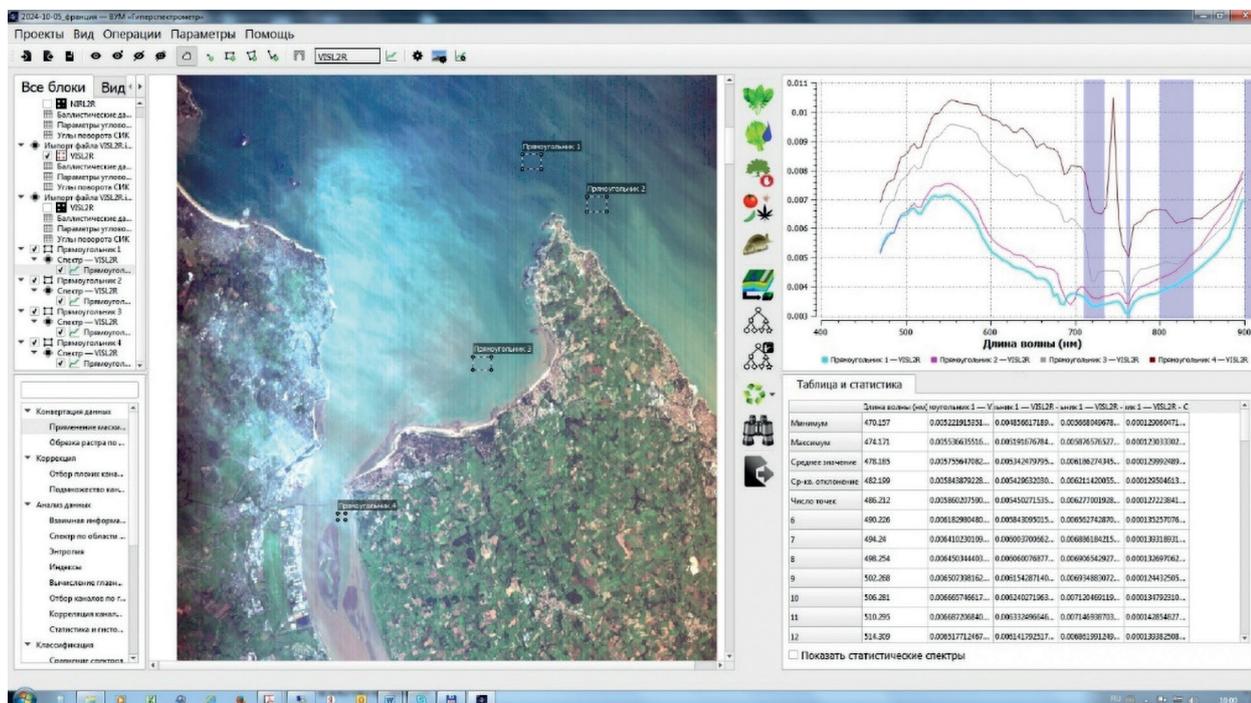


Рис. 18. Устье реки Луары (Франция), спектральные профили воды различной степени загрязнённости

В качестве примеров использования съёмок НА «Гиперспектрометр» в экологических целях можно привести результаты, приведённые на *рис. 17, 18* (см. с. 42).

На *рис. 17* показан фрагмент съёмок лесов Амазонии. Отчётливо наблюдаются вырубки различных сроков давности.

На *рис. 18* приведён пример обработки изображения, показывающего степень загрязнённости воды в устье реки Луары. На графиках представлены спектральные профили различных участков водной поверхности с характерной зависимостью спектральной яркости выбранных зон поверхности от длины волны отражённого излучения.

Заключение

На РС МКС в рамках КЭ «Ураган» доставлен и начал успешно работать новый научный прибор «Гиперспектрометр». Информация от НА «Гиперспектрометр» используется участниками экспериментов «Ураган», «Сценарий», «Дубрава» и др. Большой интерес представляет применение данных НА «Гиперспектрометр» совместно с информацией от других приборов КЭ «Ураган» РС МКС (Беляев, 2021, 2024; Беляев и др., 2018а, 2018б, 2019а, 2022). Это позволяет, например, изучая миграции животных с помощью НА «Икарус» (Беляев и др., 2022), определять не только пути их перемещения, но и понять причины, приводящие к изменению многолетних путей миграции животных.

С помощью научных приборов КЭ «Ураган» к настоящему времени уже получено большое количество ценной информации, на основе которой проводилось изучение ледников (Колка, Медвежий, Бивачный и др.), наводнений, вулканов, возникающих пожаров и т. д. Разработаны специальные методы, позволяющие эффективно планировать и проводить наблюдения с МКС, а также оценивать развитие некоторых потенциально опасных и катастрофических явлений и процессов. По результатам выполненных исследований опубликовано более 100 научных статей, получены десятки патентов. Доставка на борт РС МКС нового прибора «Гиперспектрометр» позволяет расширить исследования в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения (Беляев, 2021).

Литература

1. Беляев М. Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107.
2. Беляев М. Ю. Изучение Земли в эксперименте «Ураган» // Земля и Вселенная. 2024. № 2. С. 24–43. DOI: 10.7868/S0044394824020026.
3. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др. 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 М. Ю., Беляев Б. И., Иванов Д. А. и др. (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.
5. Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Иванов Д. А. и др. (2018б) Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть II. Методика для изображений и результаты применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 223–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-223-234.
6. Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Катковский Л. В. и др. (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.
7. Беляев М. Ю., Коротков Д. М., Кузьмичев А. С., Николенко А. А., Черемисин М. В., Шибанов С. Ю., Щербаков М. В., Щербина Г. А. (2019б) Дистанционное зондирование Земли с российского сегмента МКС с использованием перспективной научной аппаратуры Гиперспектрометр // Материалы

- 17-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2019. С. 508.
8. Беляев М. Ю., Волков О. Н., Соломина О. Н., Тертицкий Г. М. Исследование миграций животных с помощью научной аппаратуры «Икарус» в космическом эксперименте «Ураган» в РС МКС // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. № 3(118). С. 3–19. DOI: 10.17285/0869-7035.0095.
 9. Беляев М. Ю., Боровихин П. А., Есаков А. М., Караваев Д. Ю., Рассказов И. В. Оптимизация наведения научной аппаратуры на наблюдаемые объекты в эксперименте «Ураган» НА МКС // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. № 4(123). С. 118–137.
 10. Еремеев В. А., Мордвинцев И. Н., Платонов Н. Г. Современные гиперспектральные сенсоры и методы обработки гиперспектральных данных // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 6. С. 80–91.
 11. Кашницкий А. В., Балашов И. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Уваров И. А. Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156–170.
 12. Козинцев В. И., Орлов В. М., Белов М. Л. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2002. 528 с.
 13. Лебедев Л. И., Ясаков Ю. В., Утешева Т. Ш. и др. Комплексный анализ и мониторинг состояния окружающей среды на основе данных ДЗЗ // Компьютер. оптика. 2019. Т. 43. № 2. С. 282–295. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-282-295.
 14. Лупян Е. А., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Флитман Е. В., Крашенинникова Ю. С. Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26–43.
 15. Лупян Е. А., Саворский В. П., Шокин Ю. И., Алексанин А. И., Назиров Р. Р., Недолужко И. В., Панова О. Ю. Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 21–44.
 16. Чабан Л. Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации при картографировании геопространственных данных: учеб. пособие. М.: МИИГАиК, 2013. 96 с.
 17. Чабан Л. Н., Вечерук Г. В., Гаврилова Т. С. Исследование возможностей классификации растительного покрова по гиперспектральным изображениям в пакетах тематической обработки данных дистанционного зондирования // Тр. МФТИ. 2009. Т. 1. № 3. С. 171–180.
 18. Черепанов А. С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
 19. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

Development and use of the Hyperspectrometer scientific instrument in the Uragan space experiment on the International Space Station

M. Yu. Belyaev¹, I. V. Vagner², A. V. Gorbunov², A. S. Grebenkin², A. I. Grigoriev³,
A. M. Esakov¹, G. R. Kasoev³, S. V. Konev¹, O. D. Kononenko², D. M. Korotkov³,
A. V. Kuzmin¹, A. S. Kuzmichev³, M. I. Monakhov¹, S. S. Negodyaev³,
A. N. Ovchinin², M. V. Cheremisin¹, B. M. Shurygin³

¹ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”
Korolev, Moscow Region 141070, Russia
E-mail: post@rsce.ru

² Yu. A. Gagarin Research and Test Cosmonaut Training Centre
Zvyozdny Gorodok, Moscow Region 141160, Russia
E-mail: info@gctc.ru

³ Moscow Institute of Physics and Technology
Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russia
E-mail: info@mipt.ru

The Uragan space experiment in the Russian Segment (RS) of the International Space Station (ISS) is aimed at developing scientific instrumentation and methods of Earth observation. On July 30, 2024, a new instrument named Hyperspectrometer went into operation as part of Uragan scientific instrumentation package. The instrument provides acquisition and processing of hyperspectral images of the underlying terrain using simultaneously two hyperspectral cameras: for visible and near-infrared wavebands. These data are intended for studies of spectral properties of various terrain features, as well as automatic search and identification of targets. Hyperspectral cameras can generate images of the underlying terrain in multiple spectral channels. Depending on the assigned task, for a specific imaging session the crew may choose working channels (from 1 to 100) out of 180 spectral channels. The paper provides a review of work done in the course of developing and initial operational phase of Hyperspectrometer on board the ISS RS. It provides a brief description of the instrument design and its development and testing phases. It describes the tasks carried out with the use of Hyperspectrometer. It describes special aspects of operating the hardware on board the ISS. It also provides a description of observation planning methods used on the ISS and some results obtained by processing the data received from Hyperspectrometer.

Keywords: International Space Station, ISS, Uragan space experiment, Hyperspectrometer, observation planning, data processing, remote sensing

Accepted: 24.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-29-46

References

1. Belyaev M. Y., Scientific equipment and Earth studies techniques in space experiment Uragan on board the International Space Station, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 3, pp. 92–107 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107.
2. Belyaev M. Y., Studying Earth in the “Uragan” experiment, *Zemlya i Vselennaya*, 2024, No. 2, pp. 24–43 (in Russian), DOI: 10.7868/S0044394824020026.
3. Belyaev B. I., Belyaev M. Y., Desinov L. V. et al., Processing spectra and images from the photospectral system in space experiment “Uragan” onboard the ISS, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 54–65 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414060025.
4. Belyaev M. Yu., Belyaev B. I., Ivanov D. A. et al. (2018a), Atmospheric correction of data registered on board the ISS. Part I. Methodology for spectra, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 6, pp. 213–222 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-213-222.
5. Belyaev M. Yu., Belyaev B. I., Ivanov D. A. et al. (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, V. 15, No. 6, pp. 223–234 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-223-234.
6. Belyaev M. Yu., Belyaev B. I., Katkovsky L. V. et al. (2019a), Cross-calibration of Photospectral System data measured from the ISS in the Uragan space experiment, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 5, pp. 45–55 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-45-55.
 7. Belyaev M. Yu., Korotkov D. M., Kuzmichev A. S., Nikolenko A. A., Cheremisin M. V., Shibanov S. Yu., Shcherbakov M. V., Shcherbina G. A. (2019b), Earth remote sensing from the ISS Russian Segment using advanced scientific equipment Hyperspectrometer, *Materialy 17-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 17th All-Russia Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from space”), Moscow: IKI RAS, 2019, p. 508 (in Russian).
 8. Belyaev M. Yu., Volkov O. N., Solomina O. N., Tertitsky G. M., Animal migration studies with the use of Icarus scientific equipment in Uragan space experiment onboard the ISS RS, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, V. 30, No. 3(118), pp. 3–19 (in Russian), DOI: 10.17285/0869-7035.0095.
 9. Belyaev M. Yu., Borovikhin P. A., Esakov A. M., Karavaev D. Yu., Rasskazov I. V., Optimizing of scientific equipment pointing at survey targets in the Uragan experiment on board the ISS, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2023, V. 31, No. 4(123), pp. 118–137 (in Russian).
 10. Eremeev V. A., Mordvintsev I. N., Platonov N. G., Modern hyperspectral sensors and hyperspectral data processing methods, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2003, No. 6, pp. 80–91 (in Russian).
 11. Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 1, pp. 156–170 (in Russian).
 12. Kozintsev V. I., Orlov V. M., Belov M. L., *Optiko-ehlektronnye sistemy ehkologicheskogo monitoringa prirodnoi sredy* (Optoelectronic systems for ecological monitoring of the natural environment), Moscow: Moscow Bauman Technical University, 2002, 528 p. (in Russian).
 13. Lebedev L. I., Yasakov Yu. V., Utesheva T. Sh. et al., Complex analysis and monitoring of the environment based on the Earth sensing data, *Computer Optics*, 2019, V. 43, No. 2, pp. 282–295 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-282-295.
 14. Loupian E. A., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Flitman E. V., Krasheninnikova Yu. S., Technologies for building remote monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 1, pp. 26–43 (in Russian).
 15. Loupian E. A., Savorsky V. P., Shokin Yu. I., Aleksanin A. I., Nazirov R. R., Nedolugko I. V., Panova O. Yu., Up-to-date approaches and technology arrangement of Earth observation data applications aimed to solve scientific tasks, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 5, pp. 21–44 (in Russian).
 16. Chaban L. N., *Avtomatizirovannaya obrabotka aehrokosmicheskoi informatsii pri kartografirovanii geoprostranstvennykh dannykh: uchebnoe posobie* (Automated processing of aerospace data during mapping of geospatial data: Textbook), Moscow: MIIGAiK, 2013, 96 p. (in Russian).
 17. Chaban L. N., Vecheruk G. V., Gavrilova T. S., A study of feasibility of classifying vegetation based on hyperspectral images in packages for thematic processing of Earth remote sensing data, *MIPT Proc.*, 2009, V. 1, No. 3, pp. 171–180 (in Russian).
 18. Cherepanov A. S., Vegetative indices, *Geomatika*, 2011, No. 2, pp. 98–102 (in Russian).
 19. Shovengerdt R. A., *Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenii* (Remote sensing. Models and image processing methods), Moscow: Tekhnosfera, 2010, 560 p. (in Russian).