

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,  
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.  
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 528.835.042.3 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.2.20.26

**Результаты эксплуатации аппаратуры МСУ-ГС  
на КА «Электро-Л» № 3  
и перспективы ее дальнейшего развития**

**Ю. М. Гектин**, к. т. н., доцент, [msu-optics@spacecorp.ru](mailto:msu-optics@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Р. В. Андреев**, [andreev.rv@spacecorp.ru](mailto:andreev.rv@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. А. Зайцев**, [zaytsev\\_aa@spacecorp.ru](mailto:zaytsev_aa@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Работа посвящена описанию технической эволюции аппаратуры МСУ-ГС, устанавливаемой на космические аппараты серии «Электро-Л». Аппаратура МСУ-ГС предназначена для съемки Земли с геостационарной орбиты в видимом и инфракрасном диапазонах спектра с разрешением от 1 до 4 км и периодичностью до 15 минут. Описываются проблемы, выявленные при эксплуатации аппаратуры на КА «Электро-Л» № 2. Основной проблемой являлось недостаточное охлаждение фотоприемных устройств инфракрасного диапазона. Подробно описано функционирование пассивной системы радиационного охлаждения инфракрасных приемников излучения. Модернизация данной системы позволила достигнуть требуемых температурных значений фотоприемников на КА «Электро-Л» № 3. Приведены основные результаты эксплуатации МСУ-ГС на КА «Электро-Л» № 3. Проведенные модернизации аппаратуры позволили значительно улучшить качество информации от инфракрасных каналов по сравнению с КА «Электро-Л» № 2. Большое внимание уделено оценке возможности повышения оперативности съемки. Возможные в будущем модернизации аппаратуры МСУ-ГС и КА серии «Электро-Л» могут увеличить оперативность съемки полного диска Земли до 5 минут, что превосходит характеристики лучших зарубежных аналогов.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, спутниковая аппаратура, модернизация аппаратуры, инфракрасный диапазон спектра, радиометрическая точность измерений

**Results of MSU-GS Equipment Operation  
on the Elektro-L No. 3 Spacecraft  
and Prospects for its Further Development**

**Yu. M. Gektin**, *Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof.*, [msu-optics@spacecorp.ru](mailto:msu-optics@spacecorp.ru)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**R. V. Andreev**, [andreev.rv@spacecorp.ru](mailto:andreev.rv@spacecorp.ru)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**A. A. Zaytsev**, [zaytsev\\_aa@spacecorp.ru](mailto:zaytsev_aa@spacecorp.ru)

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper is devoted to the description of the technical evolution of the MSU-GS equipment installed on spacecraft of the Elektro-L series. The MSU-GS equipment is designed for imaging the Earth from a geostationary orbit in the visible and infrared spectral ranges with a resolution of 1 to 4 km at intervals of up to 15 minutes. The problems identified during the operation of the equipment on the Elektro-L No. 2 spacecraft are described. The main problem was the insufficient cooling of infrared photodetectors. The operation of the passive system for radiation cooling of infrared radiation detectors is described in detail. The modernization of this system made it possible to reach the required photodetector temperature values on the Elektro-L No. 3 spacecraft. The main results of MSU-GS operation on the Elektro-L No. 3 spacecraft are presented. The modernization of the equipment made it possible to significantly improve the quality of information from infrared channels in comparison with the Elektro-L No. 2 spacecraft. Much attention is paid to assessing the possibility of improving the scanning efficiency. Possible future upgrades of the MSU-GS equipment and the Elektro-L series spacecraft can improve the full Earth disk coverage characteristic to up to 5 minutes, which exceeds the characteristics of best foreign counterparts.

**Keywords:** remote sensing of the Earth, satellite equipment, equipment modernization, infrared spectrum, radiometric accuracy of measurements

## Введение

В декабре 2019 г. на геостационарную орбиту Земли был успешно выведен космический аппарат «Электро-Л» № 3. В результате этого отечественная группировка метеорологических геостационарных спутников [1] была расширена до двух аппаратов. На рис. 1 приведено первое изображение Земли, полученное с КА «Электро-Л» № 3.

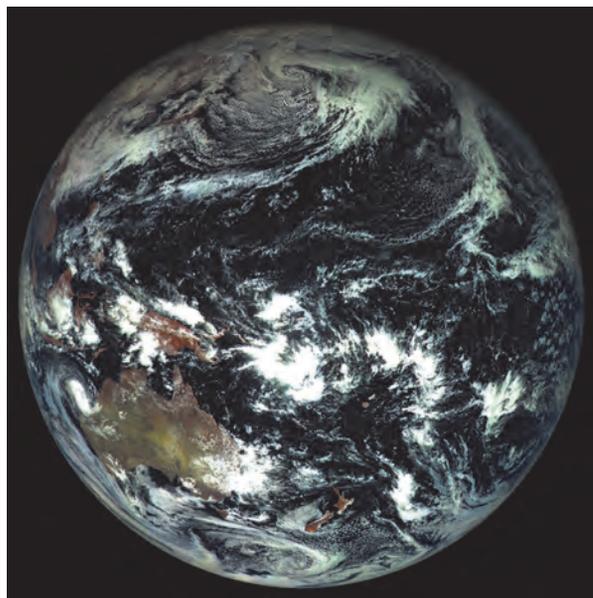


Рис. 1. Первое изображение Земли с КА «Электро-Л» № 3

КА «Электро-Л» № 2 был запущен в декабре 2015 г. и к моменту запуска КА «Электро-Л» № 3 уже в течение почти пяти лет успешно осуществлял непрерывную съемку Земли с интервалом 30 мин, находясь на геостационарной орбите в точке стояния  $76^\circ$  в.д.

Основной целевой аппаратурой обоих КА являются приборы МСУ-ГС [2], позволяющие получать изображения всего видимого диска Земли в десяти каналах в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Основные характеристики МСУ-ГС представлены в таблице [3].

Во время летных испытаний КА «Электро-Л» № 3 находился в точке стояния  $165,8^\circ$  в.д. Находящемуся в данной точке спутнику для непрерывного наблюдения доступны территории Дальнего Востока, Японии, Австралии, а также значительная часть акватории Тихого океана.

Таблица. Характеристики МСУ-ГС

Основные характеристики	МСУ-ГС-ВД	МСУ-ГС-ИК
Спектральный диапазон	0,5–0,9 мкм	3,5–12,5 мкм
Количество каналов	3	7
Размер элемента изображения (в надире)	1 × 1 км	4 × 4 км
Угловое поле зрения	$19^\circ \times 26,1^\circ$	$20^\circ \times 20^\circ$
Интервал времени между сеансами съемки	30 мин (15 мин в режиме учащенной съемки)	
Время формирования 1 изображения диска Земли	3 мин	1,5 мин
Количество изображений диска Земли за 1 сеанс	1	4
Масса	$\leq 155$ кг	
Срок эксплуатации	10 лет	

После завершения испытаний, КА «Электро-Л» № 3 был переведен в точку стояния  $76^\circ$  в.д., где заменил предыдущий аппарат. КА «Электро-Л» № 2 был переведен в точку стояния  $14,5^\circ$  з.д., откуда в настоящее время осуществляет непрерывную съемку акватории Атлантического океана, территорий Европы, Африки и Южной Америки.

## Модернизация аппаратуры МСУ-ГС

Основной проблемой, возникшей при эксплуатации аппаратуры МСУ-ГС на КА «Электро-Л» № 2, было недостаточно эффективное охлаждение фотоприемных устройств инфракрасного диапазона спектра.

Для формирования изображения в ИК-каналах аппаратуры МСУ-ГС используются многоэлементные (матричные) фотоприемники отечественного производства. Рабочий температурный диапазон данных фотоприемных устройств составляет  $78$ – $84$  К. Охлаждение фотоприемных устройств до криогенных температур осуществляется при помощи двухступенчатой системы пассивного охлаждения — радиационного холодильника (далее — РХ, разработчик АО «НИИЭМ»). РХ представляет

собой блок, состоящий из корпуса, первой ступени охлаждения, второй ступени охлаждения, теплоизоляционных металлизированных лавсановых экранов, фотоприемных устройств, блоков управления фотоприемными устройствами и системы нагрева первой и второй ступеней (для проведения сеансов очистки РХ от конденсирующихся на его ступенях молекул газового облака). Корпус РХ крепится к корпусу МСУ-ГС при помощи специальных винтов.

На МСУ-ГС, установленном на КА «Электро-Л» № 2, достигнуть заданных температурных значений фотоприемников не удалось [4]. Рабочий температурный диапазон составил 88–92 К. Наиболее вероятной причиной недостаточного охлаждения является загрязнение зеркального отражателя, первой ступени, установленного вблизи второй ступени радиационного холодильника. В результате этого увеличилась тепловая связь между первой и второй ступенями радиационного холодильника, что привело к потере эффективности охлаждения второй ступени.

Повышенная на 10 К, по сравнению со штатной, рабочая температура фотоприемных устройств стала причиной значительного ухудшения качества работы аппаратуры МСУ-ГС. Дальний ИК-канал 11,2–12,5 мкм стал полностью неработоспособным. В остальных ИК-каналах присутствует значительная зашумленность сигнала.

АО «НПО Лавочкина» совместно с АО «Российские космические системы» провело ряд тепловакуумных испытаний РХ как автономно, так и в составе аппаратуры МСУ-ГС. Исследования показали, что существует достаточно сильная тепловая связь между температурой корпуса РХ и температурой его второй ступени: при уменьшении температуры корпуса РХ на 4 К температура второй ступени уменьшается приблизительно на 1 К. По результатам испытаний было принято решение доработать МСУ-ГС в целях повышения холодопроизводительности радиационного холодильника за счет снижения температуры его корпуса.

Для уменьшения теплопритока от корпуса МСУ-ГС к корпусу РХ в местах крепления были использованы сборные титановые шайбы общей толщиной около 1 мм. Это позволило уменьшить площадь непосредственного контакта между кор-

пусами более чем в 100 раз. Для дополнительного охлаждения корпус РХ был оснащен собственным радиатором. Внешний вид новой системы радиационного охлаждения фотоприемников МСУ-ГС представлен на рис. 2.

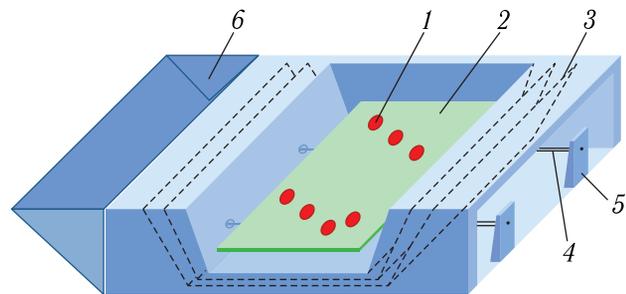


Рис. 2. Конструкция модернизированного радиационного холодильника прибора МСУ ГС. 1 — фотоприемники; 2 — вторая ступень радиатора; 3 — первая ступень радиатора; 4 — нити, удерживающие вторую ступень; 5 — стойки крепления нитей; 6 — радиатор корпуса РХ

Представленные доработки позволили охладить корпус РХ на МСУ-ГС для КА «Электро-Л» № 3 на 15 К ниже по сравнению с МСУ-ГС для КА «Электро-Л» № 2. Также были изменены регламенты процедур выведения космического аппарата и коррекции орбиты. Во время всех маневров КА был включен нагрев первой и второй ступеней радиационного холодильника, что снизило вероятность повреждения обычно холодных поверхностей РХ остаточной атмосферой и компонентами ракетного топлива.

Проведенные мероприятия позволили охладить фотоприемные устройства МСУ-ГС на КА «Электро-Л» № 3 до 77–80 К. Это позволило полностью решить проблему с зашумленностью информации от инфракрасных каналов и обеспечить устойчивую работу 10-го канала аппаратуры МСУ-ГС.

## Результаты первого года эксплуатации

В июле 2020 года КА «Электро-Л» № 3 был переведен в точку стояния 76° в. д., где заменил КА «Электро-Л» № 2. Начиная с августа 2020 года КА «Электро-Л» № 3 осуществляет регулярную (раз в 30 мин) съемку Земли при помощи аппаратуры МСУ-ГС.

Использование нового космического аппарата позволило значительно повысить качество информационных продуктов, формируемых геостационарным гидрометеорологическим комплексом «Электро-Л». Добиться этого удалось благодаря низкой температуре фотоприемных устройств инфракрасного диапазона, достигнутой за счет проведенных модернизаций аппаратуры МСУ-ГС. Более низкая рабочая температура (78–82 К) фотоприемников обеспечила меньшую зашумленность изображений ИК-каналов. Улучшение по точности и стабильности измерений составило в среднем 1,5–2 раза по сравнению с аппаратом «Электро-Л» №2.

Отдельно стоит отметить, что по сравнению с предыдущим космическим аппаратом, аппаратура МСУ-ГС, установленная на КА «Электро-Л» №3, позволяет осуществлять съемку во всех спектральных каналах. Как уже говорилось, в МСУ-ГС на КА «Электро-Л» №2 длинноволновый ИК-канал (11,2–12,5 мкм) не работал из-за недостаточного охлаждения фотоприемных устройств. Наличие функционирующего ИК-канала длинноволнового диапазона сделало возможным решение таких тематических задач, как определение температуры воды, температуры и высоты верхней границы облачности. Ранее эти задачи решались с серьезными ограничениями, так как для корректного решения этих задач необходимо наличие двух отдельных спектральных каналов в диапазоне 10–13 мкм.

Одной из нерешенных на сегодняшний день проблем остаются криоосадки. Из-за криогенных рабочих температур фотоприемников на окнах фильтров постепенно осаждаются молекулы воды, оставшиеся внутри корпуса РХ после запуска космического аппарата. Этот постепенно увеличивающийся слой водяного льда уменьшает коэффициент пропускания оптического тракта аппаратуры и приводит к медленному уменьшению чувствительности оптико-электронного тракта и росту зашумленности информации [5].

В целях устранения криоосадков с фильтров фотоприемников раз в несколько месяцев проводится процедура очистки РХ. Осуществляется нагрев ступеней радиационного холодильника до температуры +30 °С продолжительностью в одни сутки. После завершения процедуры очистки и отключения нагревателей первой и второй ступеней начина-

ется процесс захлаживания РХ, занимающий 4 сут. Во время очистки съемка Земли в ИК-диапазоне аппаратурой МСУ-ГС не осуществляется.

На КА «Электро-Л» №3 был испытан новый режим очистки, заключающийся в нагреве до +30 °С только второй ступени РХ. Этот режим получил название «доочистка». Первая ступень при этом остается холодной. По завершении процедуры доочистки захлаживание РХ занимает в 2 раза меньше времени по сравнению с обычной очисткой. Эксперименты подтвердили эффективность доочистки РХ. Она позволяет полностью восстановить чувствительность оптико-электронного тракта до состояния на момент последней полноценной очистки.

Нужно отметить, доочистка помогает избавиться от криоосадков непосредственно на фильтрах, но общую концентрацию газового облака в полости РХ уменьшает незначительно. Это подтверждается тем, что скорость уменьшения пропускания оптического тракта остается такой же, как и перед доочисткой (рис. 3). Полноценный же нагрев РХ приводит не только к устранению криоосадка с фильтров фотоприемников, но и уменьшает общую концентрацию газового облака. Таким образом, на начальном этапе эксплуатации (первые 1,5–2 года) необходимо проводить полноценные очистки РХ.

## Дальнейшее развитие аппаратуры МСУ-ГС

Несмотря на достигнутые результаты, нужно отметить, что отечественная гидрометеорологическая геостационарная аппаратура на настоящий момент времени уступает лучшим зарубежным аналогам по ряду характеристик. Лидером в данной области космической техники на сегодня является США. Самый передовой на сегодняшний день геостационарный прибор ДЗЗ — аппаратура АВ1, позволяющая осуществлять съемку в 6 видимых и ближних ИК-каналах с разрешением 0,5–1 км и в 10 ИК-каналах с разрешением 2 км. Сложная двухкоординатная сканирующая система позволяет получать изображения всего диска Земли каждые 15 мин, фрагмент размером 5000 × 3000 км — каждые 5 мин плюс два фрагмента размером 1000 × 1000 км каждые 60 с [6]. Кроме того, существует

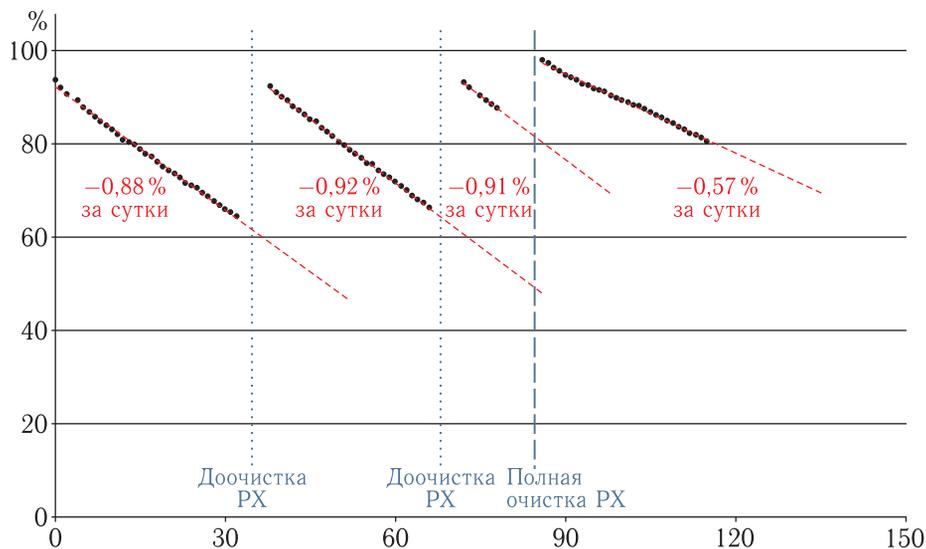


Рис. 3. График зависимости пропускания оптического тракта в канале № 10 от времени (в сутках)

специальный режим съемки, позволяющий получать изображения полного диска Земли каждые 5 мин. Данный прибор устанавливается на американские КА серии GOES, а также на японские (HIMAWARI) и корейские (GEO-KOMPSAT) геостационарные аппараты.

Анализ развития американских геостационарных спутников наблюдения показывает, что для создания новой геостационарной гидрометеорологической системы необходимо в среднем 20 лет, 10 из которых занимает создание прототипа нового прибора, а еще 10 — развертывание системы. За это время осуществляется запуск 8–10 космических аппаратов, первые из которых являются экспериментальными и служат для доработки и отладки целевой аппаратуры. По завершении развертывания и заполнения орбитальной группировки система способна функционировать 20–30 лет. Каждое следующее поколение системы наблюдения обладает в среднем в два раза лучшими характеристиками по сравнению с предыдущей (в два раза лучшее пространственное разрешение, увеличение числа каналов, повышение оперативности). Это приводит в свою очередь к примерно двукратному росту массогабаритных характеристик аппарата и целевой аппаратуры и к многократному росту стоимости.

По своему состоянию отечественный геостационарный гидрометеорологический комплекс «Элек-

тро-Л» находится на уровне развития геостационарного сегмента американской программы NOAA 1995–2000 годов, когда были запущены первые аппараты GOES, оснащенные сканером IMAGER. Ключевые характеристики аппаратуры МСУ-ГС (пространственное разрешение и оперативность) сравнимы скорее с прибором IMAGER, чем с прибором АВИ. Отладка целевой аппаратуры МСУ-ГС должна полностью завершиться на КА «Электро-Л» № 4, так как даже на «Электро-Л» № 3 остается ряд нерешенных на сегодняшний день проблем. Только тогда система полностью будет готова к полноценному развертыванию (тиражированию КА).

Для создания геостационарной системы наблюдения, аналогичной той, основу которой составляют современные космические аппараты с целевой аппаратурой АВИ, необходима разработка отечественного геостационарного прибора ДЗЗ следующего поколения (МСУ-ГСМ). Тем не менее аппаратура МСУ-ГС обладает потенциалом, позволяющим приблизиться по некоторым характеристикам к аппаратуре АВИ, а в чем-то ее даже превзойти. Одной из таких характеристик является оперативность.

Изображение в инфракрасных каналах аппаратуры МСУ-ГС формируется при помощи многорядных фотоприемных устройств и двухкоординатной сканирующей системы. Плавным поворотом сканирующего зеркала в направлении, перпендикулярном ориентации линеек фотоприемника, и дискретным

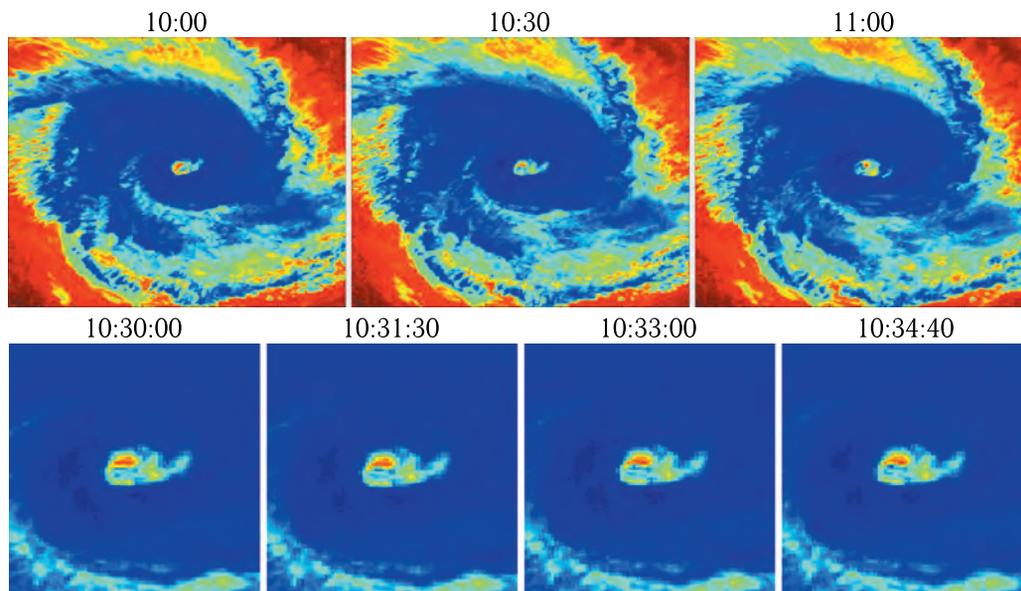


Рис. 4. Серия изображений циклона над Индийским океаном, полученных инфракрасным каналом аппаратуры МСУ-ГС. Сверху — изображения с периодичностью в 30 мин. Снизу — изображения с периодичностью в 90 с, полученные путем раздельной обработки четырех кадров МСУ-ГС-ИК

поворотом в направлении, параллельном ориентации линеек фотоприемника, осуществляется строчная и кадровая развертки сканирования соответственно. В результате сканирования изображение имеет скановую структуру, каждый скан которого пространственно перекрывается с соседним сканом. Каждый отдельный снимок диска Земли содержит 35 сканов, приводимых к единому изображению в ходе наземной геометрической обработки. Время формирования одного кадра составляет 1,5 мин. Для улучшения радиометрической точности информации за время одного сеанса формируется 4 таких кадра. При наземной обработке эти кадры могут суммироваться.

Поскольку между отдельными кадрами имеется временной интервал в 1,5 мин, при объединении кадров динамически меняющиеся объекты (облака) смазываются. Перемещение облаков за время формирования 4 кадров может составлять величины до нескольких пикселей. Достигнутые значения эквивалентной шуму разности температур ИК-изображений на КА «Электро-Л» № 3 позволило отказаться от объединения 4 кадров, что повысило детальность наблюдения облаков на изображениях. В настоящее время в стандартном выходном продукте наземного комплекса обработки и распро-

странения информации для каждого ИК-канала используется информация только от одного кадра, полученного за сеанс съемки.

При использовании раздельной обработки кадров становится возможным более детальное изучение быстрых динамических атмосферных процессов, таких как циклоны и тайфуны (рис. 4). Такая сверхвысокая 90-секундная периодичность съемки доступна уже сейчас при соответствующих доработках комплекса приема и обработки информации от аппаратов «Электро-Л».

Другим путем увеличения оперативности наблюдений является увеличение числа сеансов съемки. В ходе летно-конструкторских испытаний был проведен эксперимент по использованию МСУ-ГС в учащенном режиме съемки (с 15-минутным интервалом между сеансами) на постоянной основе. Ранее данный режим являлся опциональным и не предполагался к использованию более 1 ч подряд с последующим перерывом на 2 ч. Ограничение на продолжительность работы в учащенном режиме съемки было связано с повышенным тепловыделением фотоприемников при более частой их работе. Один из определяющих факторов для повышения оперативности съемки — снижение энергопотребления (а значит, и тепловыделения)

фотоприемных устройств и элементов электронного тракта. В будущем будет осуществлен переход на использование таких фотоприемников новой разработки, что позволит снизить тепловыделение на второй ступени РХ приблизительно в 2 раза. Однако уже сейчас эксперимент продемонстрировал возможность работы аппаратуры в режиме учащенной съемки без ограничений.

Режим съемки с 15-минутным интервалом между сеансами уже принят как штатный режим работы начиная с КА «Электро-Л» №4. На КА «Электро-Л» №3 переход на такой режим работы возможен при внесении определенных изменений в программное обеспечение служебных систем.

Небольшие модернизации КА серии «Электро-Л», использование современных ИК-фотоприемников и соответствующие изменения циклограммы работы прибора МСУ-ГС могут повысить оперативность получения изображений всего диска Земли до 4–5 мин, что уже сопоставимо с характеристиками передовых зарубежных приборов. Более серьезные модернизации КА, такие как увеличение скорости радиолинии, увеличение емкости аккумуляторов и размеров солнечной батареи, позволят повысить оперативность изображений всего диска Земли до 90 с, что будет значительно превосходить мировые аналоги.

## Заключение

Можно с уверенностью говорить о наличии положительной динамики роста качества информации, получаемой российской группировкой метеоспутников в целом и ее геостационарным сегментом в частности. Качество информационных продуктов, получаемых на основе данных с КА «Электро-Л» №3, не уступает качеству продуктов на основе данных с европейских и китайских геостационарных КА. Существует значительный потенциал аппаратуры МСУ-ГС в части повышения оперативности получения данных наблюдения. Модернизация будущих КА серии «Электро-Л» и аппаратуры МСУ-ГС позволит по ряду параметров сравняться и даже превзойти лучшие зарубежные аналоги.

Сейчас геостационарная группировка КА «Электро-Л» дополняется высокоэллиптическими КА «Арктика-М». Это позволит на регулярной осно-

ве наблюдать полярные области, играющие важную роль в формировании погоды северного полушария Земли [7]. КА серии «Арктика-М» создаются на аппаратурной основе «Электро-Л» с использованием модифицированных приборов МСУ-ГС. Первый КА «Арктика-М» уже запущен в феврале 2021 года. Данный КА стал первым в мире гидрометеорологическим спутником, позволяющим осуществлять постоянную съемку полярных областей Земли.

## Список литературы

1. *Асмус В.В. и др.* Развитие космического комплекса гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2012. № 1. С. 3–14.
2. Патент 2589770 Российской Федерации, G02B 26/10. Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображений полного диска Земли с геостационарной орбиты: заявл. 15.05.2015, опублик. 10.07.2016 / Ю. М. Гектин, М. Б. Смелянский, А. В. Рыжаков. Бюлл. № 19.
3. *Андреев Р.В., Акимов Н.П., Бадаев К.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Рыжаков А.В., Смелянский М.Б., Сулиманов Н.А., Фролов А.Г.* Многозональное сканирующее устройство для геостационарного метеоспутника «Электро-Л» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2, вып. 3. С. 33–44.
4. *Москатынцев И.В., Балиев А.В., Павлова Т.В., Гектин Ю.М., Акимов Н.П., Смелянский М.Б., Сулиманов Н.А., Бадаев К.В., Рыжаков А.В., Фролов А.Г., Андреев Р.В., Зайцев А.А.* Основные результаты эксплуатации аппаратуры МСУ-ГС на КА «Электро-Л» №2 // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 2. С. 108–114. ISSN 2075-6941.
5. *Wang L., Wu X., Weng F., Goldberg M.D.* Effects of Ice Decontamination on GOES-12 Imager Calibration // Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions. March 2013. Vol. 51, Issue 3. P. 1224–1230.
6. *Schmit T.J., Griffith P., Gunshor M.M., Daniels J.M., Goodman S.J., Lehair W.J.* A closer look at the ABI on the GOES-R series // American meteorological society. 2017. P. 681–698.
7. *Хартон В.В. и др.* Новая высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 3 (24). С. 3–108.