

УДК 528.8.042.6 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.34.45

Первые результаты работы ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ в составе КА «Канопус-В-ИК»

Н. П. Акимов, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

К. В. Бадаев, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Ю. М. Гектин, *к. т. н., petrov_sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Зайцев, *zaytsev_aa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Г. Фролов, *к. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются необходимость создания специализированной российской аппаратуры для космического мониторинга лесных пожаров на территории России и стран ближнего зарубежья, тактико-технические характеристики, принцип формирования изображения и конструктивные особенности ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ, обеспечивающего сеансную трассовую съемку в двух спектральных каналах теплового диапазона в полосе обзора 2000 км с пространственным разрешением в надире 200 м, и его информационные возможности.

Анализируются первые результаты работы радиометра на орбите в составе КА «Канопус-В-ИК». Летные испытания радиометра показали, что требования, предъявляемые к аппаратуре, реализованы полностью и могут быть в дальнейшем использованы при создании российской специализированной космической системы наблюдения за пожарной обстановкой лесных территорий. В частности, была подтверждена реальная способность детектирования очагов горения. За счет высокой детализации ИК-радиометр МСУ-ИК-СРМ позволяет получать принципиально новую информацию о высокотемпературных объектах.

За первый год летной эксплуатации радиометр провел более 1500 сеансов съемки территории России и других регионов мира.

Ключевые слова: ИК-радиометр, дистанционное зондирование Земли, сканирующее устройство, космический мониторинг лесных пожаров, мониторинг высокотемпературных объектов

First Results of Operation of the IR-Radiometer MSU-IK-SRM as Part of the Kanopus-V-IK Spacecraft

N. P. Akimov, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

K. V. Badaev, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Yu. M. Gektin, *Cand. Sci. (Engineering)*, *petrov_sv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Zaytsev, *zaytsev_aa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. G. Frolov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The necessity of creating a specialized Russian equipment for space monitoring of forest fires on the territory of the Russian Federation and countries of the near abroad is discussed in this paper. The technical characteristics, principle of image formation, design features of the IR-radiometer MSU-IK-SRM that provides a session route survey in two spectral channels of the thermal range in the swath of 2000 km with spatial resolution of 200 m in nadir, and its information capabilities are presented.

The first results of the operation of the radiometer in orbit as part of the Kanopus-V-IK spacecraft are analyzed. Flight tests have shown that all parameters of the apparatus meet the requirements and can be used for development of a Russian specialized space system of forest fire monitoring. In particular, a real ability to detect seats of fire was confirmed. Due to a relatively high resolution, the radiometer allows obtaining a fundamentally new information on high-temperature objects.

There were more than 1500 survey sessions of Russia and other territories during the first year of operation.

Keywords: IR-radiometer, Earth remote sensing, scanner, space monitoring of forest fires, monitoring of high-temperature objects

Введение

Начиная с середины 1990-х гг., в России стали активно развиваться технологии использования спутниковых данных для решения задач, связанных с мониторингом лесных пожаров, которые, наряду с другими видами информации (наземными и авиационными наблюдениями, данными грозопеленгации, метеоданными и др.), позволяют сформировать максимально полную картину пожарной ситуации для принятия оптимальных решений при организации работ по их обнаружению и тушению. В результате за последнее десятилетие было создано несколько информационных систем, которые сегодня активно используются на федеральном и региональных уровнях. Одна из таких систем — система спутникового мониторинга пожаров в интересах службы авиационной охраны лесов России («Авиалесоохрана»), которая является одним из блоков информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Министерства природных ресурсов и экологии РФ (ИСДМ МПР РФ) [1].

Информационная система космического мониторинга лесных пожаров России до недавнего времени создавалась в основном на базе информации, получаемой с зарубежной аппаратуры ДЗЗ (в основном гидрометеорологического назначения): радиометров AVHRR [2], установленных на спутниках серии NOAA, радиометров MODIS [3] на спутниках TERRA и AQUA и ряда других устройств, обеспечивающих съемку в оптическом диапазоне спектра от 0,4 до 12,0 мкм и имеющих для обнаружения высокотемпературных объектов специализированный канал 3,5–4,1 мкм. Создание в России начиная с 2009 г. полноценной отечественной метеорологической системы, включающей среднеорбитальный спутник «Метеор-М» №2 с широкозахватной многозональной аппаратурой МСУ-МР [4], являющейся аналогом радиометра AVHRR, позволило, наряду с зарубежной информацией, использовать и отечественные данные.

Однако очевидно, что в России с ее обширными и труднодоступными лесными территориями должна существовать собственная специализированная космическая система наблюдения за пожарной обстановкой лесных территорий, состоящая

не менее чем из двух космических аппаратов (КА). Задача создания аппаратуры для этой системы за последнее десятилетие ставилась неоднократно, и АО «Российские космические системы» активно участвовало в ряде НИР и ОКР по данной тематике [5]. Было показано, что наблюдение в тепловой области спектра может использоваться и для решения других тематических задач:

- мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций;
- поиска подземных вод и геотермических источников;
- различных видов тематического картографирования земной поверхности, в том числе геологического картирования (поисков полезных ископаемых, их идентификации, обнаружения возможных районов газовых и нефтяных месторождений);
- исследования вулканической деятельности и прогнозирования сейсмической активности;
- оценки состояния полигонов захоронения промышленных и бытовых отходов и их влияния на окружающую среду;
- обнаружения источников тепловых потерь и источников загрязнения и т. д.

В основе методов решения всех вышеперечисленных задач лежит выявление областей, характеризующихся повышенной температурой или аномальными тепловыми контрастами.

Тактико-технические характеристики аппаратуры МСУ-ИК-СРМ и принцип ее построения

14 июня 2017 г. в России был запущен спутник «Канопус-В-ИК» (разработчик АО «Корпорация «ВНИИЭМ»»), предназначенный для мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций [6]. В состав комплекса «Канопус-В-ИК» был включен многозональный инфракрасный радиометр среднего разрешения — МСУ-ИК-СРМ, разработанный АО «Российские космические системы» [7,8]. К моменту публикации статьи радиометр успешно прошел летные испытания и имеет годовую наработку в режиме эксплуатации.

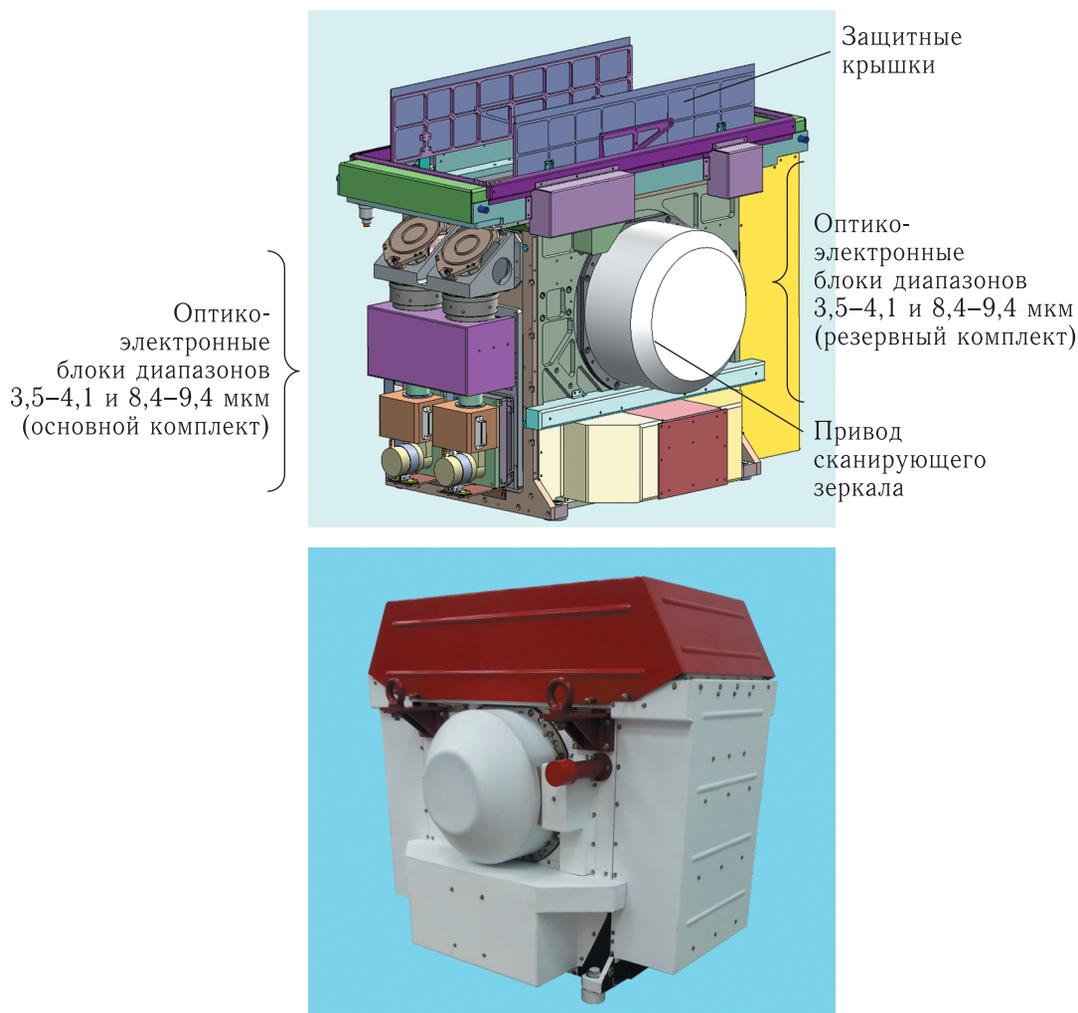


Рис. 1. 3D-модель радиометра МСУ-ИК-СРМ (вверху, защитный кожух не показан) и фотография прибора в сборе (внизу)

Основные тактико-технические характеристики ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ:

- количество спектральных каналов — 2;
- границы спектральных зон (по уровню 0,5) — 3,5–4,1 мкм, 8,4–9,4 мкм;
- полоса обзора (при высоте орбиты КА 510 км) — 2000 км;
- пространственное разрешение в надире (проекция пикселя) — 200 м;
- диапазон измеряемых температур — 230–500 К;
- эквивалентная шуму разность измеряемых температур на уровне 300 К — $\leq 0,30$ К (в среднем ИК-диапазоне) и 0,15 К (в дальнем ИК-диапазоне);
- режим работы — сеансный;
- масса — ≤ 85 кг.

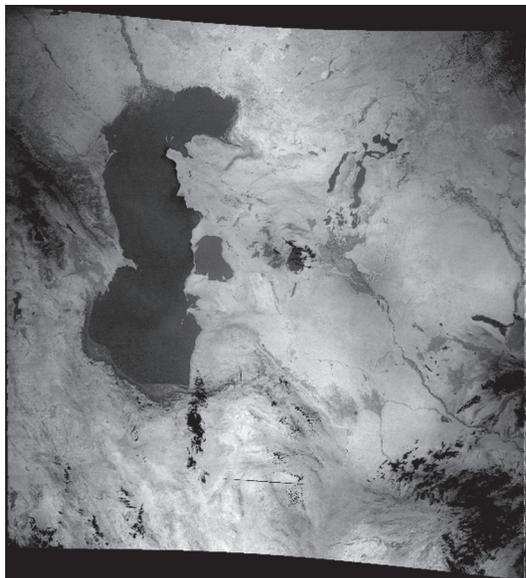
На рис. 1 представлены 3D-модель радиометра и его фотография в сборе. Радиометр МСУ-ИК-СРМ является модификацией радиометра МСУ-ИК-СР, разработанного ранее АО «Российские космические системы» при выполнении ОКР «Прибор-ИК» в соответствии с Федеральной космической программой России на 2006–2015 годы.

При разработке радиометра приоритетной задачей было обеспечение широкой полосы обзора при максимально высоком пространственном разрешении, что в итоге и определило принцип его построения и выбор элементной базы.

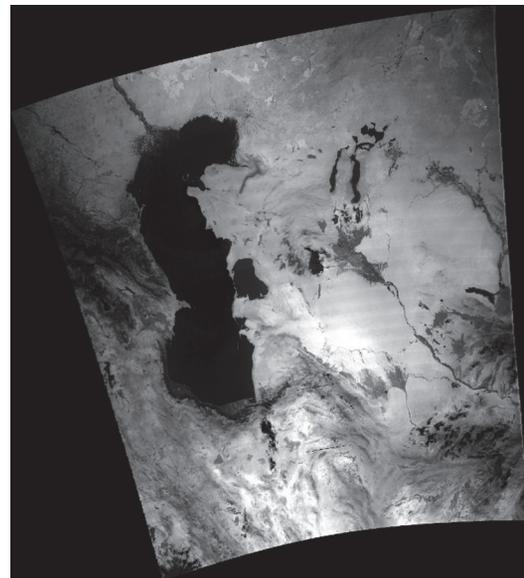
В МСУ-ИК-СРМ использован принцип многострочного механического сканирования, который позволяет даже при сравнительно небольшом числе чувствительных элементов приемника излучения



Рис. 2. Фрагмент исходного (сырого) трассового изображения с радиометра МСУ-ИК-СРМ в диапазоне 3,5–4,1 мкм



Уровень 1



Уровень 2

Рис. 3. Изображения радиометра МСУ-ИК-СРМ после 1-го и 2-го уровней геометрической обработки

реализовать пространственное разрешение 200 м и полосу обзора 2000 км [9].

Процесс сканирования по строке осуществляется двухсторонним плоским зеркалом, совершающим непрерывное круговое движение с помощью низкооборотного прецизионного привода (1 оборот за 15,2 с). В качестве приемников излучения используются отечественные многоэлементные (матричные) ИК-фотоприемники форматом 4×288 элементов, охлаждаемые микрокриогенными системами (МКС) до криогенных температур (80 К).

Ось вращения зеркала и линейки приемников излучения ориентированы вдоль направления полета КА, что позволяет за один цикл строчной развертки (скан) радиометра сформировать два микрокадра форматом 288×5296 элементов.

Формируемые радиометром микрокадры (рис. 2) имеют перекрытие 22 элемента в центре и, вследствие геометрических искажений, 288 на краю скана. При наземной обработке формируемое радиометром изображение подвергается двум уровням геометрической обработки [10]:

- 1-й уровень — сшивка микрокадров в единое трассовое изображение;

- 2-й уровень — трансформирование изображения 1-го уровня в картографическую проекцию.

Изображения 1-го и 2-го уровней обработки приведены на рис. 3.

Конструктивно радиометр МСУ-ИК-СРМ построен по модульной схеме: каждый информационный канал формируется независимым оптико-электронным блоком, включающим линзовый объектив,

приемник с МКС и блок обработки сигнала. Таких модулей в радиометре четыре: два для диапазона 3,5–4,1 мкм и два для диапазона 8,4–9,4 мкм. В процессе сеанса съемки задействованы два оптико-электронных блока, два других являются холодным резервом в случае выхода из строя приемников излучения или МКС основного комплекта. Использование резервных оптико-электронных блоков позволяет обеспечить работу радиометра при сеансной съемке длительностью 15–20 мин не менее 10 000 ч.

Для обеспечения радиометрической точности измерений и коррекции в процессе эксплуатации радиометра таких факторов, как [11]:

- неравномерность чувствительности отдельных элементов приемников излучения;
- изменение внутреннего температурного фона аппаратуры;
- изменение исходных значений пропускания оптической системы;
- изменение коэффициента передачи электронного тракта, в состав радиометра введены бортовые эталонные источники излучения — имитаторы абсолютно черного тела (ИАЧТ): «горячее» с температурой 320 К и «холодное» с температурой 268 К, формирующие стабильное опорное излучение при эксплуатации. Ввод излучения от ИАЧТ в оптический информационный тракт осуществляется через сканирующее зеркало в каждой строке вне ее информационной части. Охлаждение «холодного» ИАЧТ обеспечивается выносным радиатором КА через тепловые трубы.

Радиометрическая модель объекта съемки

В соответствии с поставленной задачей основным объектом съемки радиометра МСУ-ИК-СРМ являются лесные пожары. Лесные пожары как объект наблюдения космической системой характеризуются (что также может быть распространено и на другие высокотемпературные объекты природного и техногенного происхождения — вулканы, гейзеры, нагретые газовые и воздушные массы, восходящие потоки продуктов сгорания

и различные высокотемпературные промышленные объекты):

– высокой температурой (800–1200 К), что позволяет уверенно фиксировать их в ИК-диапазоне спектра даже при их небольших физических размерах; например, обнаруживать костры или газовые факелы размером 4 × 4 м, так как температура пикселя, содержащего подобные объекты, будет превышать фоновую температуру поверхности на 20–30 °С;

– локальностью возникновения как по времени и месту, так и по площади территории охваченной пожаром (от 0,01 до сотен гектаров), вследствие чего фиксируемый аппаратурой лесной пожар будет отображаться как случайное событие одним пикселем, группой одиночных пикселей или несколькими десятками пикселей.

В табл. 1 приведены значения яркостной температуры пикселя (T_p) размерами 200 × 200 м, содержащего «горячий» объект с температурой $T_o = 800–1000$ К при фоновой температуре поверхности $T_\phi = 300$ К для основных типов лесных пожаров. Как следует из данных таблицы, фронтальные лесные и торфяные очаги пожаров, требующие оперативного вмешательства или кадастровой регистрации, при пространственном разрешении

Таблица 1. Яркостная температура пикселя (T_p) размером 200 м, содержащего точечный объект с температурой T_o при фоновой температуре поверхности $T_\phi = 300$ К

Тип очага пожара	Размеры очага пожара, м	Спектральный диапазон	
		3,5–4,1 мкм	8,4–9,4 мкм
		T_p , К	
Торфяной пожар ($T_o = 800$ К)	20 × 20	407	317
	40 × 40	483	355
Фронтальный пожар ($T_o = 1000$ К)	200 × 1	419	315
	200 × 2	453	327
	200 × 5	509	360
	200 × 10	560	395
Костер ($T_o = 1000$ К)	1 × 1	304	300
	2 × 2	313	301
	5 × 5	346	302
	10 × 10	390	308

200 м будут уверенно дешифрироваться одновременно в обоих спектральных каналах, так как $T_{\text{п}} \gg T_{\text{ф}}$. Однако, как будет показано ниже, это утверждение справедливо только для центральной зоны полосы обзора радиометра шириной 400–500 км.

Приведенные в табл. 1 значения $T_{\text{п}}$ были получены для подспутниковой точки и упрощенной (гомогенной) модели очага пожара, при которой принимается, что высокотемпературный объект (очаг пожара) имеет постоянную температуру (T_0) по всей площади объекта, его площадь меньше площади пикселя и он находится внутри области (пикселя) с более низкой температурой ($T_{\text{ф}}$). При такой модели яркостная температура пикселя — смесь температур гомогенного объекта и постоянного фона и находится в диапазоне $T_{\text{ф}} < T_{\text{п}} < T_0$. Хотя гомогенная модель не полностью соответствует действительности, она позволяет оценить необходимый максимальный уровень динамического диапазона измеряемых температур на этапе разработки аппаратуры и правильно ее настроить [12].

Более строгая модель пожара — негомогенная модель, несомненно, ближе к реальности, при этой модели температура «горячего» пикселя определяется тремя высокотемпературными компонентами: пламенной зоной (~1000 К), тлеющей зоной (~600 К), пожарищем (~350 К) и низкотемпературной компонентой — температурой окружающего фона (~300 К), а значит, в такой модели температура «горячего» пикселя будет выше температуры пикселя, чем при гомогенной модели, в которой не учитываются тлеющая зона и пожарище. Однако, полагая, что основной вклад в излучение очага лесного пожара вносит пламенная зона, а ее параметры зависят от целого ряда факторов — вида растительности, сомкнутости лесного полога, скорости ветра, времени горения и т. д., — было принято, что разница между потоками излучения по рассматриваемым моделям не будет критически большой. Для МСУ-ИК-СРМ верхняя граница динамического диапазона ($T_{\text{max}} = 500$ К) была выбрана по гомогенной модели и подтверждена результатами летных испытаний, показавших, что видеосигнал от наблюдаемых «горячих» объектов достиг приборного ограничения.

Учитывая, что на дневных изображениях в диапазоне 3,5–4,1 мкм могут присутствовать ложные

объекты тревоги, вызываемые отражением солнечного излучения от воды, верхних слоев атмосферы и нагретых участков земной поверхности, возможность регистрации очагов пожаров в тепловом диапазоне 8,4–9,4 мкм радиометром МСУ-ИК-СРМ крайне важна, так как позволяет осуществлять обнаружение очагов пожаров в любое время суток.

Характеристики преобразования (зависимость выходного сигнала от радиационной температуры $N = f(T_{\text{рад}})$) спектральных каналов радиометра МСУ-ИК-СРМ для диапазона радиационных температур от 220 К до 500 К при 16-разрядном кодировании приведены на рис. 4.

Обсуждая главную тематическую задачу — обнаружение высокотемпературных объектов — следует отметить, что радиометр МСУ-ИК-СРМ сконструирован как широкоугольное оптико-механическое устройство с углом сканирования $2W = 118^\circ$ и имеет переменное пространственное разрешение по строке и кадру в зависимости от угла отклонения визирной оси, а следовательно, переменную площадь проекции пикселя S по строке (рис. 5). Так, в надире $S = 0,04$ км² при $W = 35^\circ$ — $S = 0,08$ км² и на краю строки при $W = 59^\circ$ — $S = 0,55$ км², что в итоге приводит к значительному снижению детализации наблюдаемого объекта на краях поля зрения и должно учитываться при определении параметров очага пожара. На рис. 6 эта ситуация смоделирована на примере отображения на микрокадре одного и того же объекта (очага пожара с тремя фронтами горения) в центре и на краю поля зрения.

Принимая во внимание, что очаг пожара отображается как случайное событие одним пикселем, группой одиночных пикселей или несколькими десятками пикселей, а регистрируемая яркостная температура пикселя характеризует параметры высокотемпературного объекта (тип, размеры, состояние и т. д.), обнаружение и анализ очагов пожаров с учетом геометрических искажений следует проводить по исходной информации до геометрической коррекции, которая может существенно исказить реальную картину пожарной ситуации.

В табл. 2 на примере торфяных пожаров рассмотрена возможность фиксации очагов пожаров на краях поля зрения.

Из табл. 2 следует, что при съемке очага пожара с одинаковыми параметрами в центре и на краю

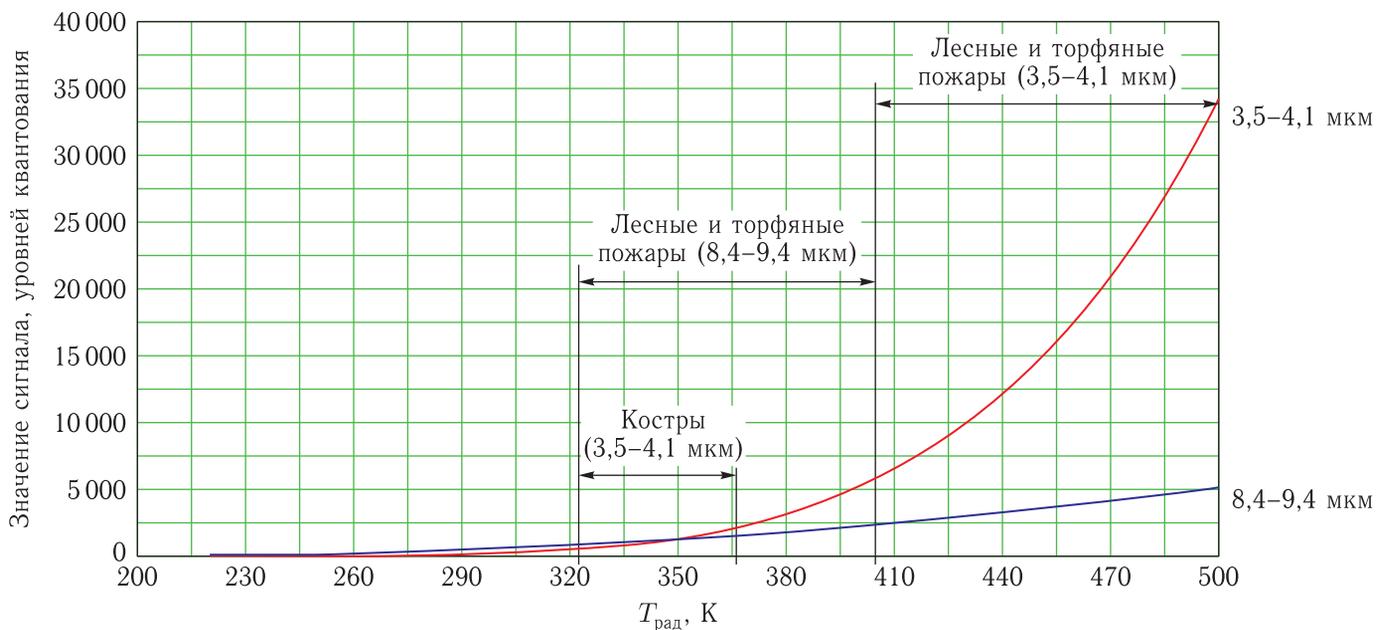


Рис. 4. Характеристики преобразования (зависимости выходного сигнала от радиационной температуры $N = f(T_{\text{рад}})$) для диапазона радиационных температур от 220 до 500 К при 16-разрядном кодировании

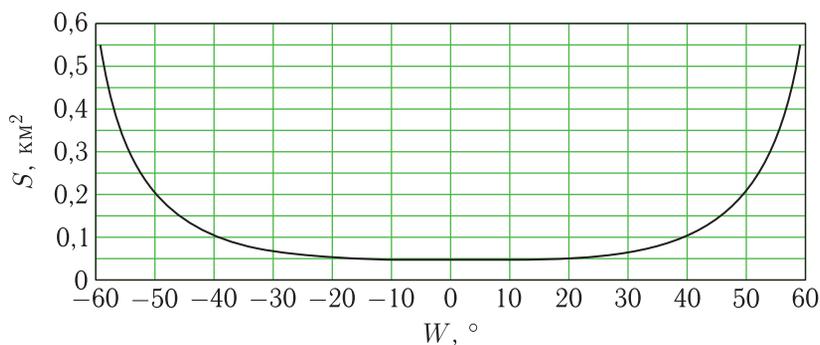


Рис. 5. График изменения площади проекции пикселя S по строке от угла визирования W

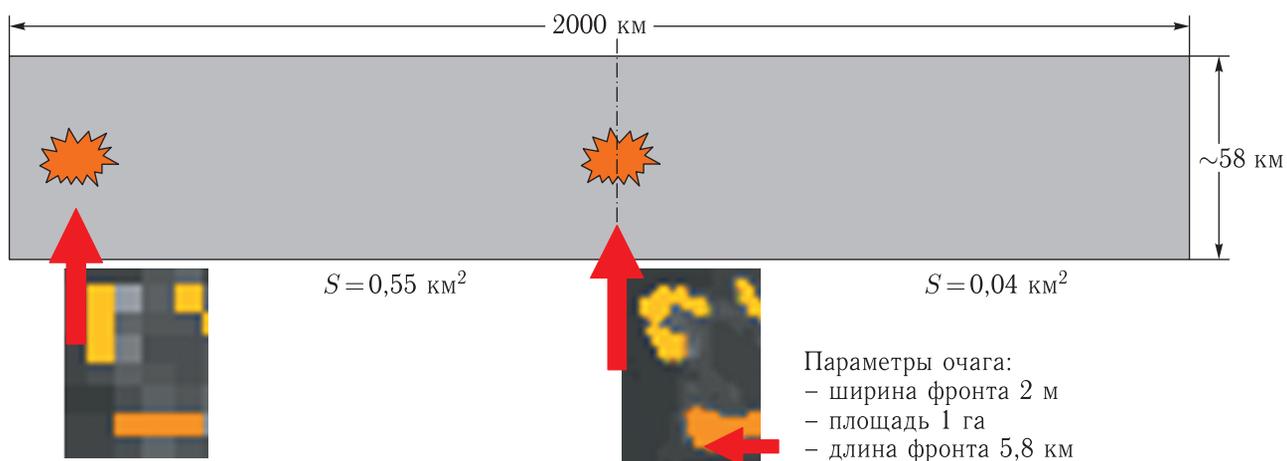


Рис. 6. Отображение очага пожара с тремя фронтами горения в центре и на краю поля зрения

Таблица 2. Температура пикселя (T_p), содержащего торфяной пожар при фоновой температуре поверхности $T_\phi = 300$ К

Параметры объекта	$W = 0^\circ$ $S = 0,04 \text{ км}^2$		$W = \pm 35^\circ$ $S = 0,08 \text{ км}^2$		$W = \pm 59^\circ$ $S = 0,55 \text{ км}^2$	
	3,5–4,1 мкм	8,4–9,4 мкм	3,5–4,1 мкм	8,4–9,4 мкм	3,5–4,1 мкм	8,4–9,4 мкм
20 × 20 м	407 К	317 К	357 К	305 К	327 К	303 К
40 × 40 м	483 К	355 К	407 К	317 К	363 К	306 К

поля зрения будет изменяться не только детализация, но и фиксируемая аппаратурой яркостная температура «горячего» пикселя, что должно учитываться при определении истинных параметров очага пожара.

Несмотря на снижение обнаружительной способности на краях полосы обзора, можно уверенно заявлять, что МСУ-ИК-СРМ будет иметь явное преимущество перед аппаратурой AVHRR, MODIS и МСУ-МР, имеющей в надире пространственное разрешение 1 км^2 и аналогичные геометрические искажения по углу поля зрения, так как задача обнаружения лесных пожаров этими приборами вследствие малого разрешения решается только в надирной зоне полосы обзора.

С учетом данных табл. 1 и 2 для радиометра МСУ-ИК-СРМ следует разработать индивидуальный алгоритм выявления очагов горения.

Информационные возможности радиометра МСУ-ИК-СРМ

1. Глобальное информационное покрытие территории России

Реализованная в радиометре МСУ-ИК-СРМ полоса обзора 2000 км позволяет обеспечить за 5–6 последовательных витков (при длительности сеанса 15–20 мин) съемку всей территории России, что крайне важно для оперативной оценки чрезвычайных ситуаций на территории России. Подобная информация может быть востребована и странами ближнего зарубежья (СНГ и ЕС). На рис. 7 приведено изображение Европы и европейской части России, полученное путем компиляции информации с трех последовательных витков.

2. Высокая детализация и обнаружительная способность высокотемпературных объектов природного и техногенного происхождения

На рис. 8 и 9 приведены фрагменты изображений с МСУ-ИК-СРМ с многочисленными фронтальными пожарами и газовыми факелами на нефтяных вышках.

Сравнительный анализ изображений МСУ-ИК-СРМ и метеорологических систем, имеющих пространственное разрешение 1 км, показывает, что на изображениях с МСУ-ИК-СРМ более подробно прослеживаются фактические фронты пожаров и их локальные особенности, что позволяет более полно оценить пожарную ситуацию в районе съемки: характер и тип пожара, направление его распространения, площадь огневой зоны, локальную интенсивность пожара. Детализация картины пожаров крайне важна при автоматизации процесса обнаружения. При грубом разрешении, характерном для метеорологических систем, где фиксируются только группы очагов пожаров, оценка ситуации может искажаться, так как мелкие очаги на изображениях вследствие низкого уровня сигнала могут не дешифроваться или интерпретироваться алгоритмом неоднозначно.

Сравнение МСУ-ИК-СРМ с другими специализированными системами космического мониторинга пожаров, например с системой FireBIRD, включающей спутники TET-1 [13] и BIROS [14], на которых установлены аналоги радиометров, используемых ранее на спутнике BIRD [15], показывает, что эти системы значительно менее информативны, так как имеют недостаточную полосу обзора.

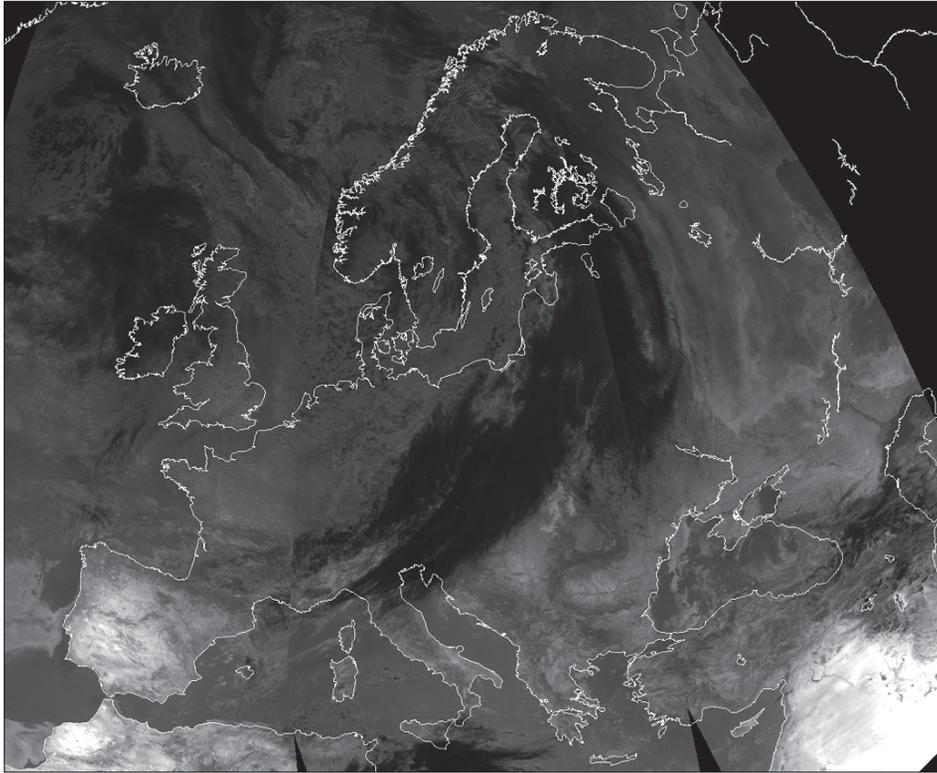
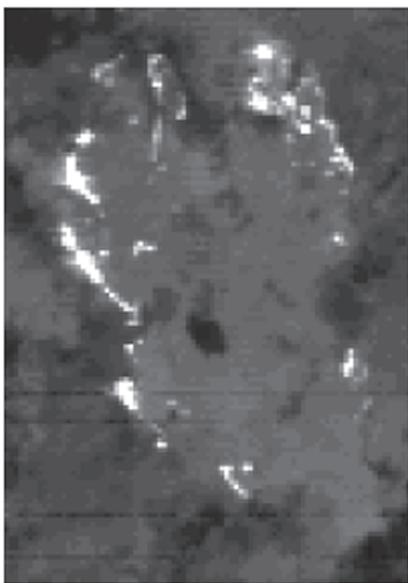
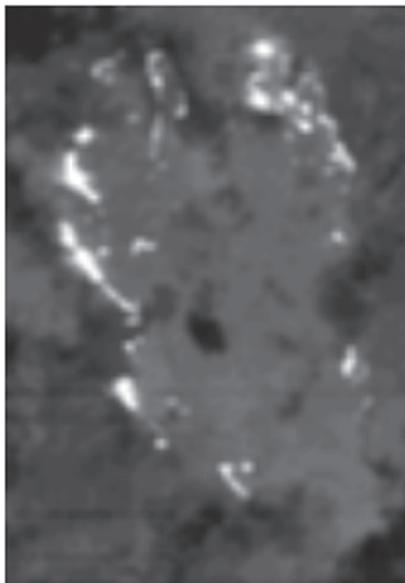


Рис. 7. Изображение Европы и европейской части России, полученное с МСУ-ИК-СРМ за три последовательных орбитальных витка



МСУ-ИК-СРМ,
разрешение 200×200 м



BIRD,
разрешение 400×400 м



МСУ-МР,
разрешение 1×1 км

Рис. 8. Фрагмент изображения с МСУ-ИК-СРМ (28.08.2017) с фронтальными пожарами в диапазоне 3,5–4,1 мкм (без радиометрической обработки) и смоделированные на его основе изображения с аппаратуры BIRD и МСУ-МР

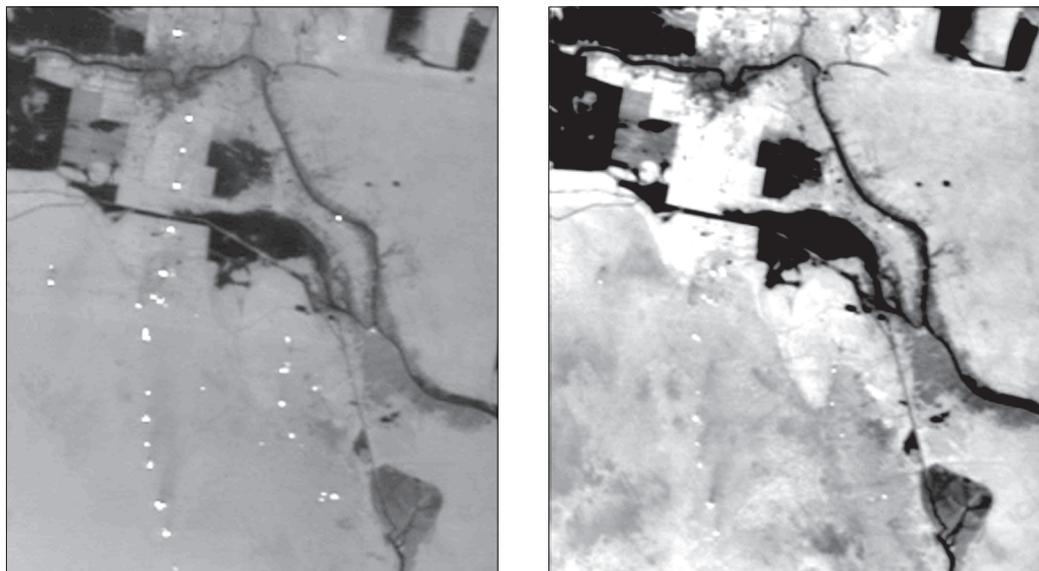


Рис. 9. Фрагменты изображений МСУ-ИК-СРМ с газовыми факелами на нефтяных месторождениях в Ираке в двух спектральных каналах: 3,5–4,1 мкм (слева) и 8,4–9,4 мкм (справа)

Заключение

1. ИК-радиометр МСУ-ИК-СРМ, входящий в состав КА «Канопус-В-ИК», позволяет получать принципиально новую информацию о высокотемпературных объектах, природных и техногенных, за счет повышения детализации не только по сравнению с существующими системами (AVHRR, MODIS, МСУ-МР), но и с перспективными (МСУ-МР-МП) с разрешением 0,5 км.

2. Получение информации о пожарной ситуации с радиометра обеспечивается в широкой полосе обзора, что крайне важно для России с ее обширными лесными территориями, а значит, позволит повысить оперативность обнаружения очагов лесных пожаров и контроля их динамики средствами ДЗЗ.

3. Результаты летных испытаний радиометра показали, что требования, предъявляемые к аппаратуре, реализованы полностью и могут быть в дальнейшем использованы при создании российской специализированной космической системы наблюдения за пожарной обстановкой лесных территорий.

4. Оперативное выявление очагов возгорания в автоматическом режиме по информации, получаемой с аппаратуры МСУ-ИК-СРМ, требует разработки специального программного обеспечения.

Радиометр МСУ-ИК-СРМ является важным дополнением к многозональному съемочному комплексу — ПСС и МСС, обеспечивающему съемку в видимом и ближнем ИК-диапазонах в полосе 20 км с разрешением 2,5 и 12 м, так как позволяет расширить круг задач, решаемых КА «Канопус-В-ИК».

Список литературы

1. Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Тащилин С.А. Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров. Сб. науч. ст. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2004, вып. 1. С. 47–57.
2. Обзор параметров аппаратуры AVHRR. <https://lta.cr.usgs.gov/AVHRR> (дата обращения: 15.08.2018).
3. Официальный сайт проекта MODIS — NASA, США. <http://modis.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 15.08.2018).
4. Акимов Н.П., Бадаев К.В., Гектин Ю.М., Рыжиков А.В., Смелянский М.Б., Фролов А.Г. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 4. С. 30–39.

5. *Акимов Н.П., Гектин Ю.М., Смелянский М.Б., Фролов А.Г.* ИК-радиометры нового поколения на основе многоэлементных приемников излучения // Мехатроника, автоматизация, управление, приложение, 2007, №5. С. 52.
6. *Горбунов А.В., Ильина И.Ю., Саульский В.К.* Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 4. С. 14–19.
7. *Акимов Н.П., Бадаев К.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Смелянский М.Б., Рыжаков А.В., Фролов А.Г.* Перспективный ИК-радиометр для оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций на территории России // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли (Материалы III Международной научной конференции), Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.
8. Патент №2324151 РФ. G01J 3/06. Многоканальный радиометр с широким углом обзора // Акимов Н.П., Гектин Ю.М., Смелянский М.Б., Фролов А.Г. Заявлено 11.09.2006. Опубликовано 10.05.2008.
9. *Шовенгердт Р.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: Монография. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
10. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В. В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с.
11. *Андреев Р.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Смелянский М.Б.* Специальные алгоритмы радиометрической коррекции изображений ДЗЗ в ИК-диапазоне // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2016, т. 3, вып. 4. С. 32–40.
12. *Гектин Ю.М., Зорин С.М., Новикова Н.В. и др.* Метрологическое обеспечение радиометрической калибровки сканирующих систем ДЗЗ в видимой и инфракрасной областях спектра // Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности: Тез. докл. науч.-техн. конф. (о. Городомля, 07–10 сентября 2015 г.). Городомля, 2015. С. 22–25.
13. Обзор параметров аппаратуры TET-1. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tet-1> (дата обращения: 15.08.2018).
14. Обзор параметров аппаратуры BIROS. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/b/biros> (дата обращения: 15.08.2018).
15. *Zhukov B., Briess K., Lorenz E., Oertel D., Skrbek W.* BIRD Detection and Analysis of High-temperature Events: First Results. Proc. SPIE, 2003, 4886. P. 160–171.