

КШМСА – КОМПЛЕКС ШИРОКОЗАХВАТНОЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «РЕСУРС-П»

© 2016 А. И. Бакланов, А. Н. Афонин, В. Д. Блинов, А. С. Забиякин

Филиал акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс» –
Научно-производственное предприятие
«Оптико-электронные комплексы и системы», г. Москва

В статье рассмотрен комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры (КШМСА), установленный на космическом аппарате «Ресурс-П». Представлены основные технические характеристики. В состав комплекса входят камера высокого разрешения (ШМСА-ВР), камера среднего разрешения (ШМСА-СР) и блок управления. В обеих камерах реализованы шесть спектральных каналов – панхроматический и пять мультиспектральных в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Отличительными особенностями КШМСА является использование светосильных объективов и единого линейного ПЗС фотоприёмника с большой длиной строки. Использование единого фотоприёмника обеспечивает бесшовное изображение и высокую геометрическую точность. Высокое качество получаемых изображений позволяет использовать КШМСА для решения широкого круга задач: создание и обновление топографических карт; мониторинг сельскохозяйственных и лесных угодий; выявление очагов лесных пожаров; мониторинг паводкоопасных регионов и др. В статье представлены примеры снимков КШМСА и перспективы модернизации аппаратуры.

Аппаратура дистанционного зондирования Земли, аппаратура наблюдения Земли, мультиспектральная аппаратура, оптико-электронная аппаратура космических аппаратов.

В составе полезной нагрузки космических аппаратов (КА) «Ресурс-П» №1 и №2 используется комплекс широкозахватной мультиспектральной съёмочной аппаратуры – КШМСА, разработанный в филиале АО «РКЦ «Прогресс» – НПП «ОПТЭКС». Комплекс состоит из двух оптико-электронных камер высокого (ШМСА-ВР) и среднего (ШМСА-СР) разрешения, работа которых может осуществляться как вместе, так и автономно под контролем единой системы (блока) управления. Внешний вид камер представлен на рис. 1.

Камеры обеспечивают одновременно панхроматическую и мультиспектральную съёмку в полосе захвата 96 км (ШМСА-ВР) и 480 км (ШМСА-СР) с высоты орбиты 475 км. В панхроматическом (ПХ) канале (0,43÷0,70 мкм) камеры высокого разрешения проекция пикселя со-

ставляет 12 м, а в пяти мультиспектральных (МС) каналах (0,43 ÷ 0,51 мкм; 0,51 ÷ 0,58 мкм; 0,60 ÷ 0,70 мкм; 0,70 ÷ 0,90 мкм; 0,80 ÷ 0,90 мкм) проекция пикселя составляет 24 м. Пространственное разрешение камеры среднего разрешения в пять раз меньше, чем ШМСА-ВР, и составляет 60 и 120 м соответственно. Конструктивно аппаратура КШМСА представляет собой две камеры и блок управления, расположенные на одном основании. Электроника камер практически полностью унифицирована. Они отличаются только объективами и управляющими программами.

В камере ШМСА-ВР используется объектив П-200 с фокусным расстоянием 200 мм и относительным отверстием 1:3, а в камере ШМСА-СР – объектив ТМ-40 с фокусным расстоянием 40 мм и относительным отверстием 1:4.

Цитирование: Бакланов А.И., Афонин А.Н., Блинов В.Д., Забиякин А.С. КШМСА – комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 22-29. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-22-29

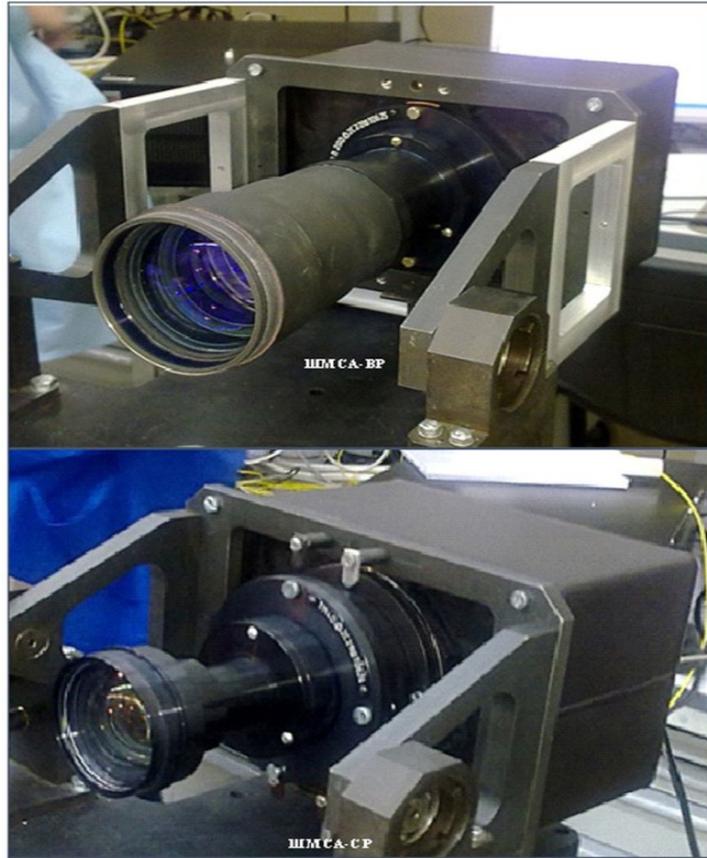


Рис. 1. Камеры КШМСА на стенде оптотехнических испытаний

Объективы ТМ-40 и П-200 были разработаны и изготовлены в ОАО «ЛЗЭС» специально для использования в оптико-электронных камерах КШМСА космического аппарата «Ресурс-П» и обладают хорошими стабильными термобарическими характеристиками.

Электроника камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР позволяет осуществлять по каждому спектральному каналу гибкое управление в широком диапазоне времён экспозиции и частот строк, адаптируясь к изменяющимся условиям освещённости, изменению дальности и скорости сканирования при кренах КА во время съёмки. В аппаратуре ШМСА-ВР частота строк может изменяться в диапазоне 184÷800 Гц в панхроматическом канале и 92÷400 Гц – в мультиспектральных каналах. В аппаратуре ШМСА-СР частота строк может изменяться в диапазоне 36,8÷160 Гц в панхроматическом канале и 18,4÷80 Гц – в мультиспектральных каналах. Управление

временем экспозиции осуществляется за счёт использования электронного затвора в диапазоне 0,007÷1 периода строки – для панхроматического канала и 0,05÷1 периода строки – для мультиспектральных каналов.

В качестве фотоприёмников в аппаратуре используются линейки приборов с зарядовой связью (ПЗС) с длиной строки 8 тысяч пикселей для панхроматического канала и 4 тысячи пикселей для каждого из пяти мультиспектральных каналов. Каналы видимого и ближнего инфракрасного диапазона конструктивно несколько разнесены по пространству. На выход камер с каждого спектрального канала поступает 12-разрядная видеoinформация в сопровождении бортовой шкалы времени (БШВ), соответствующей времени съёмки каждой строки, а также другой полезной служебной информации. Для передачи данных в бортовое запоминающее устройство в камерах используется опти-

ко-волоконный интерфейс, унифицированный с другими инструментами («Геотон» и ГСА) КА «Ресурс-П» и способный передавать до 960 Мбит/с по одной линии. Масса комплекса КШМСА равна 19,7 кг.

Максимальное энергопотребление составляет 41 Вт.

Характеристики комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики КШМСА

Параметр	Значение параметра	
	ШМСА-СР	ШМСА-ВР
Высота орбиты, км	475	
Разрешение, м (ПХ/МС)	60/120	12 / 24
Полоса захвата, км	480	96
Фокусное расстояние объектива, мм	40	200
Количество элементов (ПХ/МС)	8000 / 4000	
Разрядность квантования, бит	12	
Спектральные диапазоны, мкм	0.43÷0.70 (ПХ) 0.43÷0.51 (В), 0.51÷0.58(Г), 0.60÷0.70 (Р), 0.70÷0.90 (IR1) 0.80÷0.90 (IR2)	
Интерфейс передачи данных	Волоконно-оптический	
Интерфейс управления	МПИ, ГОСТ Р 52070-2003	
Масса, кг	19.7	
Габариты, мм	494 X 260 X 500	
Энергопотребление, Вт	41	

Камеры ШМСА-ВР и ШМСА-СР осуществляют съёмку в режиме сканирования «pushbroom», использующем движение КА для обеспечения развёртки по одной из координат. Электронная развёртка по второй координате обеспечивается применением многоэлементных линейных фотоприёмников на ПЗС.

На рис. 2 представлены схемы расположения проекций элементов линеек фоточувствительного прибора с зарядовой связью (ФПЗС) различных спектральных каналов относительно друг друга в каждой камере, камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР относительно друг друга и относительно направления движения изображения. Расстояния на схеме приведены для высоты 475 км.

В настоящее время перед аппаратурой дистанционного зондирования Земли

(ДЗЗ) ставится задача служить средством измерения, в частности, в части радиометрических характеристик подстилающей поверхности.

Согласно [1] непосредственно измеряемой величиной в части радиометрических измерений является эффективная энергетическая яркость $L_{эфф}$ (ЭЭЯ):

$$L_{эфф} = \int_0^{\infty} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где $L(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) наблюдаемого объекта; $S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность камер КШМСА.

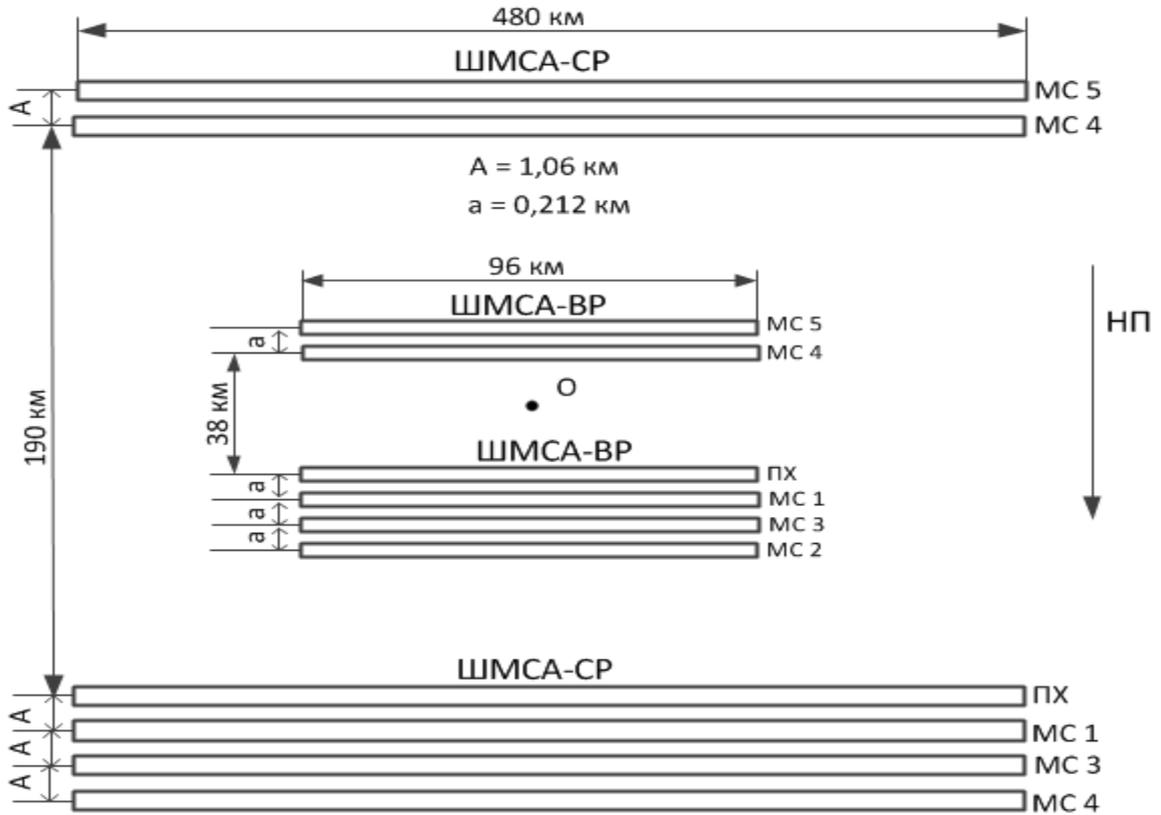


Рис. 2. Схема расположения проекций на местность элементов линеек ФПЗС камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР относительно друг друга и относительно направления полёта КА

В процессе изготовления камеры ШМСА-ВР и ШМСА-СР проходят в НПП «ОПТЭКС» процедуру радиометрической калибровки. Для этого используется аттестованное оборудование: фотометрическая сфера и спектрометр.

В процессе калибровки камер определяется интегральная чувствительность $S_{инт_i}$ каждого из шести спектральных каналов камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР, значения которой заносятся в радиометрический формуляр КШМСА:

$$S_{инт_i} = \frac{U_{вых_i}}{L_{эфф}}$$

где $U_{вых_i}$ – усреднённый по элементам линеек выходной сигнал i -го спектрального канала в уровнях аналого-цифрового преобразователя; $L_{эфф}$ – усреднённое по

полю зрения камеры входное значение ЭЭЯ.

Основной вклад в погрешность определения $S_{инт_i}$ вносит неопределённость относительной спектральной чувствительности камер КШМСА. Использование рассчитанной спектральной чувствительности по спектральным характеристикам пропускания объектива, спектральным характеристикам применяемых в камерах светофильтров и спектральным характеристикам линеек ФПЗС может давать ошибку до 20 % по сравнению с непосредственно измеренными значениями относительной спектральной чувствительности камер КШМСА.

Полученные в процессе радиометрической калибровки значения $S_{инт_i}$ для каждого спектрального канала камер КШМСА используются в процессе эксплуатации для расчёта времени экспозиции с целью получения качественных изображений с высоким уровнем видео-

сигнала и, соответственно, высоким уровнем отношения сигнал/шум. Для аппаратуры КШМСА разработана методика расчёта времени экспозиции по исходным данным, включающим в себя угол Солнца, углы съёмки и альbedo подстилающей поверхности. Методика прошла отработку в процессе эксплуатации КШМСА в составе КА «Ресурс-П» №1.

Была проведена работа в части улучшения радиометрического разрешения камер – минимального приращения входной величины, которое может регистрироваться аппаратурой. За счёт применения соответствующих схемотехнических и конструктивных решений среднее квадратическое отклонение шума выходного темного сигнала удалось снизить до 1 уровня 12-разрядного АЦП и получить, таким образом, 12-разрядное радиометрическое разрешение.

По своим характеристикам обе мультиспектральные широкозахватные камеры ориентированы на проведение

наблюдений и получение информации о подстилающей поверхности Земли в интересах сельского хозяйства, землепользования, контроля состояния лесных и водных ресурсов, картографирования пахотных земель, составления прогнозов урожайности. Кроме того, оперативные данные КШМСА окажут пользу при мониторинге районов чрезвычайных ситуаций. Данные ШМСА-СР обзорного характера подходят для контроля районов лесных и степных пожаров, а также окажутся полезными для метеорологии, определения границ снежного и ледового покрова, развития процессов вегетации. За полтора года работы в составе КА «Ресурс-П» №1 отсняты десятки миллионов квадратных километров суши и морских акваторий.

На рис. 3 показан фрагмент снимка камеры ШМСА-СР – пожар в районе р. Вилюй (Республика Саха, Якутия). На рис. 4 показан фрагмент снимка камеры ШМСА-ВР – вулкан Шивелуч, Камчатка.



Рис. 3. Фрагмент снимка камеры ШМСА-СР, р. Вилюй

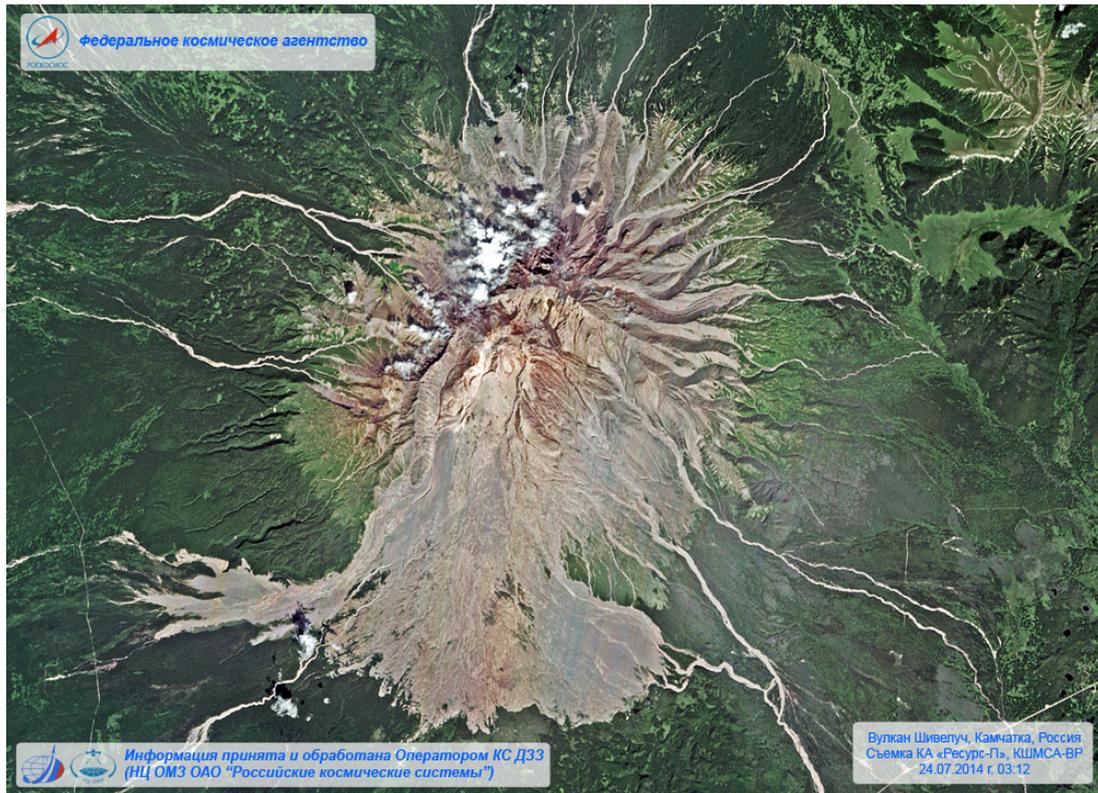


Рис. 4. Фрагмент снимка камеры ШМСА-ВР, вулкан Шивелуч

Полученный опыт эксплуатации широкозахватного мультиспектрального комплекса позволяет сделать вывод о востребованности информации КШМСА, а опыт её создания и запросов потребителей позволяет определить возможные пути её модернизации.

В частности, на основе разработанных камер ШМСА-ВР рассмотрена возможность построения комплекса, включающего в себя 2–3 такие камеры. Это позволит получить высокопроизводительную обзорную аппаратуру с разрешением порядка 12 м и полосой обзора 190÷300 км. Например, при применении двух камер ШМСА-ВР, установленных на посадочное основание с разворотом на угол $5,8^\circ$ в разные стороны относительно друг друга в плоскости, перпендикулярной направлению движения, получаем аппаратуру с разрешением 12 м в ПХ и 24 м в МС каналах с полосой захвата порядка 190 км с высоты полёта 475 км.

Опыт эксплуатации камеры ШМСА-ВР показал, что при съёмках максимальное значение времени экспозиции составляет не более половины времени периода строки. Этот факт наряду с большим динамическим диапазоном работы камер позволяет модернизировать КШМСА в сторону использования более длиннофокусной оптики для повышения разрешающей способности камер. При этом не потребуется увеличения светосилы объективов и применения фотоприёмных ПЗС с временной задержкой и накоплением сигнала (ПЗС ВЗН).

Специалистами НПП «ОПТЭКС» и ОАО ЛЗОС проработаны технические аспекты и показана возможность разработки и установки на КШМСА объектива с фокусным расстоянием от 300 до 500 мм для улучшения разрешающей способности до 8 м или даже 5 м. Неизбежное снижение полосы захвата отдельной камеры может быть компенсировано использованием 2–3 однотипных камер.

Библиографический список

1. Панфилов А.С., Гаврилов В.Р., Саприцкий В.И. Условия подготовки и проведения абсолютных радиометрических измерений с помощью оптико-электронной аппаратуры наблюдения Земли // Исследования Земли из космоса. 2014. № 1. С. 85-91. DOI: 10.7868/S0205961414010060

Информация об авторах

Бакланов Александр Иванович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО «РКЦ «Прогресс» – директор филиала – главный конструктор НПП «ОПТЭКС», г. Москва. E-mail: optecs@mail.ru. Область научных интересов: проектирование оптико-электронных приборов, датчиков и систем для дистанционного зондирования и наблюдения Земли из космоса.

Афонин Андрей Николаевич, заместитель начальника научно-технического комплекса, филиал АО «РКЦ «Прогресс» – НПП «ОПТЭКС», г. Москва. E-mail: optecs@mail.ru. Область научных интересов: проектирование оптико-электронной аппаратуры, цифровая и аналоговая схемотехника.

Блинов Валентин Дмитриевич, начальник отделения, филиал АО «РКЦ «Прогресс» – НПП «ОПТЭКС», г. Москва. E-mail: optecs@mail.ru. Область научных интересов: цифровая обработка изображений, методы обработки данных дистанционного зондирования Земли, проектирование целевой аппаратуры дистанционного зондирования Земли.

Забиякин Александр Сергеевич, начальник научно-технического комплекса – заместитель главного конструктора, филиал АО «РКЦ «Прогресс» – НПП «ОПТЭКС», г. Москва. E-mail: optecs@mail.ru. Область научных интересов: проектирование оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли, проектирование звёздных и солнечных датчиков.

CWSME – COMPLEX OF WIDE-SWATH MULTISPECTRAL EQUIPMENT FOR THE «RESOURCE-P» SPACECRAFT

© 2016 A. I. Baklanov, A. N. Afonin, V. D. Blinov, A. S. Zabiyaikin

Branch of Space Rocket Center «Progress» – State Research and Production Enterprise «OPTEKS», Moscow, Russian Federation

A complex of wide-swath multispectral equipment CWSME installed on the “Resource-P” spacecraft is discussed in the paper. The complex contains a high resolution camera, a medium resolution camera and a control unit. Each of the two cameras has 6 spectral channels – one panchromatic and five multispectral ones in the visible light and near infrared band. The use of a speed lens and a single linear CCD light sensor with a great line length is the distinguishing feature of the complex. The use of a single light sensor makes possible seamless background and ensures high accuracy. The CWSME can be used for a wide range of purposes: creation and revision of topographic maps; monitoring of agricultural and forest lands; identifying bodies of forest wildfire; monitoring flood hazard areas etc. Examples of CWSME shots and prospects of equipment modernization are presented in the paper.

Remote sensing, Earth observation instruments, multispectral equipment, spacecraft optical-electronic equipment.

Citation: Baklanov A.I., Afonin A.N., Blinov V.D., Zabiyaikin A.S. CWSME – complex of wide-swath multispectral equipment for the «Resource-P» spacecraft. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 22-29. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-22-29

References

1. Panfilov A.S., Gavrilov V.R., Sapritsky V.I. Framework for preparing and performing absolute radiometric measurements using electrooptical instruments for the earth observations. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50, Iss. 9. P. 1020-1025. DOI: 10.1134/S0001433814090163

About the authors

Baklanov, Alexander Ivanovich, Candidate of Science (Engineering), Deputy General Director of Corporation Space Rocket Center «Progress» – Branch Director – Chief Designer of Research and Production Enterprise «OPTECS», Moscow, Russian Federation. E-mail: optecs@mail.ru. Area of Research: design of optoelectronic devices, sensors and systems for Earth remote sensing and observation from space.

Afonin Andrey Nikolaevich, Deputy Head of Scientific and Technical Complex, Branch of Corporation Space Rocket Center «Progress» – Research and Production Enterprise «OPTECS», Moscow, Russian Federation. E-mail: optecs@mail.ru. Area of Research: design of optical and electronic instruments, digital and analog circuitry.

Blinov Valentin Dmitrievich, Head of Division, Branch of Corporation Space Rocket Center «Progress» – Research and Production Enterprise «OPTECS», Moscow, Russian Federation. E-mail: optecs@mail.ru. Area of Research: digital image processing, methods of remote sensing data processing, designing special-purpose remote sensing equipment.

Zabiyakin Alexander Sergeevich, Head of Scientific and Technical Complex – Deputy Chief Designer, Branch of Corporation Space Rocket Center «Progress» – Research and Production Enterprise «OPTECS», Moscow, Russian Federation. E-mail: optecs@mail.ru. Area of Research: design of optical-electronic equipment of remote sensing, design of star trackers and solar sensors.