

Kirill A. ZANIN,
Dr. Sci. (Tech.), Leading Researcher,
Lavochkin Association, Moscow, Russia, Россия,
rcda@laspace.ru



Nikolay N. KLIMENKO,
Cand. Sci. (Tech.), Deputy General Director,
Lavochkin Association, Moscow, Russia,
Klimenko@laspace.ru



Ivan V. MOSKATINEV,
Deputy General Designer for General Design,
Lavochkin Association, Moscow, Russia,
miv@laspace.ru



Кирилл Анатольевич ЗАНИН,
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
АО «НПО Лавочкина», Москва, Россия,
rcda@laspace.ru

Николай Николаевич КЛИМЕНКО,
кандидат технических наук, заместитель
генерального директора АО «НПО Лавочкина»,
Москва, Россия,
Klimenko@laspace.ru

Иван Владимирович МОСКАТИНЬЕВ,
заместитель генерального конструктора по общему
проектированию АО «НПО Лавочкина»,
Москва, Россия,
miv@laspace.ru

ABSTRACT | The article presents a review of modern foreign Earth remote sensing imagery satellites with different-type electro-optical equipment. Their basic design solutions and upgrade trends as well as their application for non-commercial users are considered.

Keywords: *Earth remote sensing space system, imagery satellite, quality indicators; electro-optical equipment; upgrade; resolution, governmental and military users, ICBM, SSBN, missile*

АННОТАЦИЯ | В статье приводится обзор современных зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, оснащенных разнотипной оптико-электронной аппаратурой. Рассмотрены их базовые проектные решения и пути их модернизации, а также их применение для некоммерческих пользователей.

Ключевые слова: *космическая система дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ), космический аппарат оптико-электронного наблюдения (КА ОЭН), показатели качества, оптико-электронная аппаратура, модернизация, разрешающая способность, государственные и военные пользователи, межконтинентальная баллистическая ракета (МБР), атомная подводная лодка с баллистическими ракетами (ПЛАРБ)*



MODERN ERS IMAGERY SATELLITES

PART 1. BASIC DESIGN SOLUTIONS AND UPGRADE TRENDS FOR ERS
IMAGERY SATELLITES

СОВРЕМЕННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

ЧАСТЬ 1. БАЗОВЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ И ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С АППАРАТУРОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Развитие информационных технологий делает общедоступными данные со спутников, получающих изображения Земли в различных диапазонах спектра. Наиболее востребованной продукцией космических систем дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) будут цифровые изображения поверхности Земли с детальным разрешением лучше 1 м. Уже сегодня в общем доступе, например на сайте maps.google.com, можно найти снимки Земли, сделанные из космоса самыми различными аппаратами, с разрешением до 0,5 м.

С целью увеличения частоты наблюдения интересующих районов и производительности обычно используется несколько космических аппаратов, объединяющихся в орбитальную группировку. Общемировой тенденцией является объединение разнотипных КА в единую КС ДЗЗ с объединенным информационным центром, предоставляющим потребителям не только готовые цифровые изображения, но и различные специализированные продукты на основе их обработки.

Совершенствование целевой аппаратуры КА ДЗЗ и создание единого информационного пространства позволило создать системы мониторинга Земли не только с высоким и детальным разрешением, но и высокой периодичностью наблюдения [1, 2, 5].

На мировом рынке данных сформировался устойчивый класс космических аппаратов, формирующих наиболее востребованные данные дистанционного зондирования Земли с разрешением от 0,5 м и лучше. Сложившийся баланс тактико-технических характеристик, высоты орбиты и количества КА достигнут в результате работы по замене дорогостоящей группировки тяжелых КА типа KeyHole на серию КА различных производителей с упором на коммерческое распространение данных.

Отработка технологии малоразмерных КА ДЗЗ высокого разрешения началась в 1999 году на КА Ikonos-2, успешно завершившем работу в 2015 году, и продолжилась на QuickBird с широкоугольной аппаратурой, запущенном

в 2001 году. Указанные КА позволили получить высококачественные цифровые снимки с разрешением 1 м.

Достижение разрешающей способности в 0,5 м и лучше стало возможным на КА GeoEye-1 с четырехзеркальной оптической системой 1,1 м. Далее последовали WorldView-2 и его модификация WorldView-3 (GeoEye-2).

В настоящее время функционирует не менее шести зарубежных КА подобного класса (WorldView, Pleiades, CSO-1, EROS, KazEOSat-2 и др.). Многие КА продолжают эксплуатироваться за пределами гарантийного срока. Масса КА этого класса не более 3000 кг. Высота полета КА составляет от 600 до 800 км. Целевая аппаратура строится на основе зеркальной оптической системы диаметром от 0,7 до 1,3 м.

Основными поставщиками данных дистанционного зондирования Земли являются корпорации GeoEye и DigitalGlobe. С 2013 года корпорация GeoEye объединилась с DigitalGlobe. Создание КА проводится в рамках частно-государственного партнерства. Основное бюджетное финансирование покупки данных осуществляется по программе EnhancedView для задач геопрограммной разведки США. В объединенной орбитальной группировке Digital Globe основные этапы развития КА ДЗЗ прослеживаются наиболее наглядно.

Первоначально для замены тяжелых КА ДЗЗ разработаны КА Ikonos метрового разрешения (разработчик Lockheed Martin и Ratheon) и Early Bird обзорного наблюдения. Для обеспечения большой полосы захвата Early Bird оснащался полноапертурным сканирующим зеркалом. Первый КА Ikonos был потерян в результате аварии ракеты-носителя, а Early Bird отказал в первые дни после запуска.

Отработка оптико-электронного комплекса метрового разрешения с компактным трехзеркальным анастигматом Корша и приемником изображения Kodak на матрицах временной задержки и накопления успешно проведена на КА Ikonos-2.

Разрешение в 0,6 м в полосе захвата 16,5 км впервые обеспечил КА QuickBird-2 при помощи оптико-электронного комплекса (ОЭК) ВНРС60 фирмы Bell. Отказаться от сканирующего зеркала позволил внеосевой зеркальный анастигмат Кука с полем зрения 2,12 градуса. В качестве приемников изображения применялся отработанный на Ikonos-2 приемник изображения с удвоенной шириной и количеством элементов. Для обеспечения требуемой пропускной способности скорость радиопередачи и емкость запоминающего устройства КА QuickBird-2 увеличены в два раза по сравнению с КА Ikonos-2.

Совершенствование целевой аппаратуры и создание единого информационного пространства позволило создать системы мониторинга Земли не только с высоким и детальным разрешением, но и высокой периодичностью наблюдения.

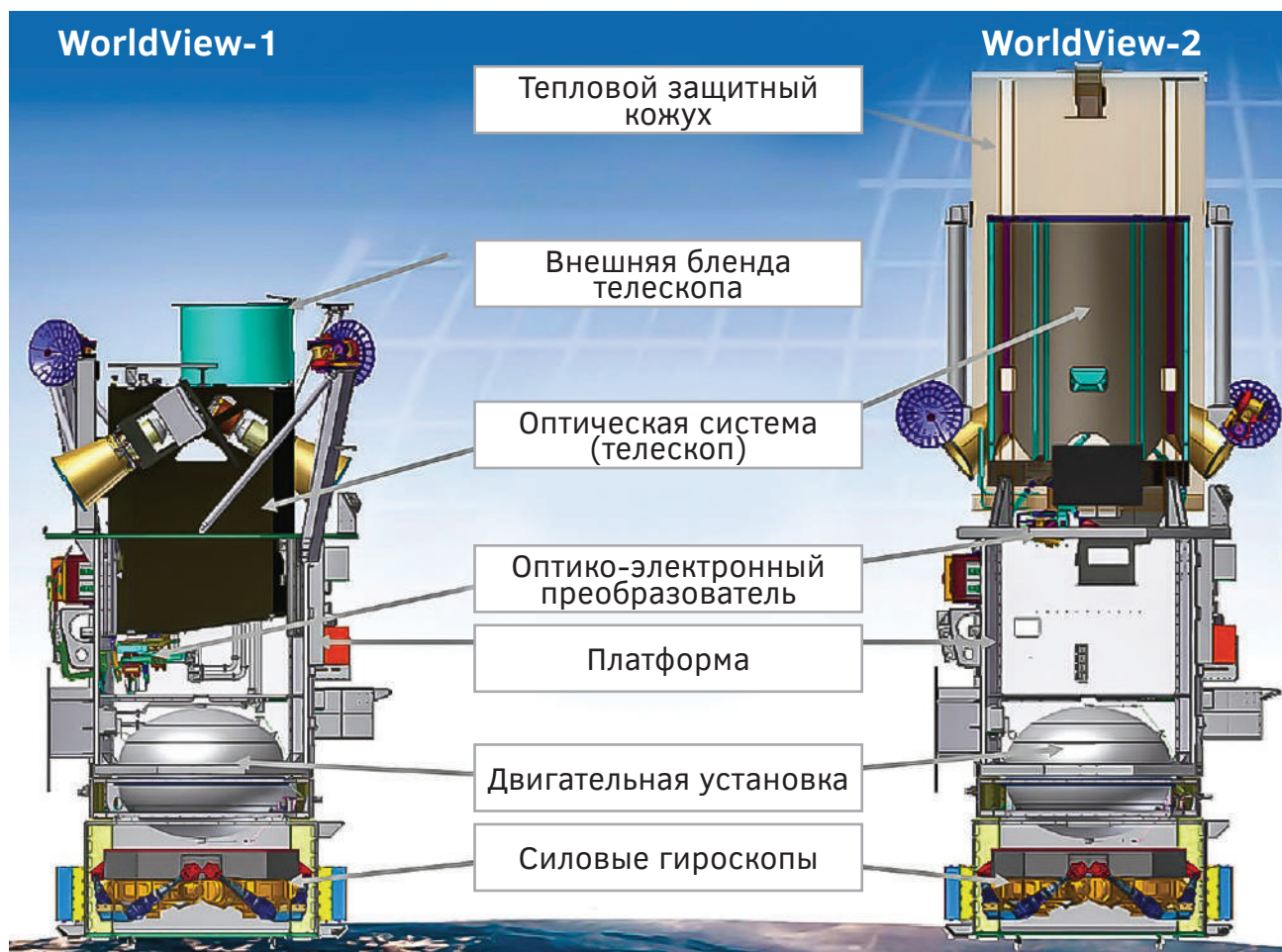


РИС. 1.

Размещение двух типов оптико-электронных комплексов КА WorldView-1, -2, -3 на унифицированной платформе

Космические платформы КА Iconos и QuickBird обеспечивали прецизионные режимы съемки с трехосным отслеживанием, что позволяло снимать сложные полигональные площади. Динамические характеристики указанных КА были невелики. В качестве исполнительных органов системы ориентации применялись двигатели-маховики.

Эксплуатация QuickBird показала возможность достижения высокого разрешения в широкой полосе захвата. Усовершенствованный внеосевой зеркальный анастигмат Кука WV100 фирмы Bell был установлен на КА WorldView-1 с лучшими динамическими характеристиками.

Улучшение пространственного разрешения до 0,3 – 0,5 м достигнуто в результате создания корпорацией ИТТ и входящей в нее Harris трехзеркального анастигмата Корша с диаметром 1,1 м и полем зрения до 1,3°. Одновременно в указанной компа-

нии создан оптико-электронный преобразователь с размером пикселя 8 мкм и шириной 35 000 пикселей. Оптико-электронный комплекс Harris SpaceView 110 с апертурой 1,1 м впервые применен на КА GeoEye-1, что позволило улучшить пространственную разрешающую способность до 0,4 м. С минимальными изменениями SpaceView 110 применяется на КА WorldView-1, -2, -3, -4.

Увеличение габаритов ОЭК потребовало применения более тяжелых космических платформ. КА GeoEye-1 разработан фирмой ИТТ с интегральной компоновкой на основе платформы SA-200 НР фирмы General Dynamics. Недостатком GeoEye-1 являлась невысокая скорость перенацеливания.

КА фирмы Bell WorldView-1, -2, -3 созданы на однотипной платформе ВСП-5000 (рис. 1). Динамические характеристики этой серии КА существенно улучшены за счет применения силовых гироскопов.

В дальнейшем на WorldView-4 корпорация ИТ также применила усовершенствованную платформу LM900 фирмы Lockheed Martin с увеличенной мощностью системы энергоснабжения и силовыми гироскопами в качестве исполнительных органов.

Увеличение апертуры позволило повысить высоту орбиты до 800 км и отказаться от использования сложного внеосевого анастигмата Кука для решения задач, требующих большой полосы захвата при умеренном разрешении.

В результате на WorldView-2 достигнута такая же полоса захвата, как и у QuickBird и WorldView-1, при несколько лучшем разрешении. Улучшение динамических характеристик платформ позволило снимать маршруты и площади за счет перенацеливания КА. Последующие КА WorldView-1, -2, -3, -4 запущены на более низкую орбиту для наблюдения с разрешением 0,4 м и лучше.

Совершенствование оптико-электронного преобразователя проводится увеличением количества каналов, скорости радиолинии и емкости запоминающего устройства. Например, для КА GeoEye-1, WorldView-1, -2, -3, -4 применен однотипный оптико-электронный преобразователь (ОЭП) с различным количеством мультиспектральных каналов. На КА WorldView-1 установлен только панхроматический приемник. В WorldView-2 по сравнению с GeoEye-1 увеличено количество мультиспектральных диапазонов с 4 до 8. На КА WorldView-3 дополнительно добавлено 8 каналов ближнего инфракрасного диапазона.

Развитие твердотельных запоминающих устройств позволило увеличить емкость запоминающего устройства до 2200 Гбит. Скорость радиолинии увеличена до 800 Мбит/с. Большое количество каналов в ОЭП WorldView-3 потребовало в единичном случае установки радиолинии 1200 Мбит/с.

Развитие и модернизация КА ДЗЗ, используемых компанией Digital Globe, осуществляется за счет совершенствования оптико-электронного преобразователя (увеличения количества кана-

лов) и радиолинии (увеличение скорости) вместе с применением уникальной крупногабаритной оптической системы (ОС) и отработанных космических платформ.

При этом повышение производительности и оперативности достигается, в основном, путем наращивания орбитальной группировки КА ДЗЗ. Требуемая детальность изображения обеспечивается двумя КА на орбите с высотой 620 км. Как минимум один КА такого же типа находится на повышенной до 770–800 км высоте орбиты с целью наблюдения с большей шириной полосы захвата и оперативностью.

Таким образом, можно обозначить подход при создании КА ДЗЗ, при котором в составе КА есть переменная (динамическая) составляющая (ОЭП, ЗУ, высокоскоростная радиолиния) и консервативная составляющие (крупногабаритная оптическая система, космическая платформа).

Пространственное разрешение в оптико-электронных комплексах наблюдения определяется дальностью наблюдения и угловым разрешением. Совершенствование КА ДЗЗ идет в направлении улучшения угловой разрешающей способности до уровня лучше 0,2 угл. с путем увеличения диаметра ОС (GeoEye-1, CSO-1). Это обусловлено тем, что КА ДЗЗ, имеющие ОС большого диаметра, имеют лучшее линейное разрешение на местности с большей высоты полета и, соответственно, более высокую периодичность наблюдения и оперативность доставки информации [3, 4, 9]. Кроме того, крупногабаритные ОС позволяют приблизить пространственное разрешение к ограничению, обусловленному турбулентностью атмосферы.

Методическое обеспечение создания КА ДЗЗ является сложной научно-технической проблемой [6], требующей увязки характеристик составляющих элементов космической системы. Увеличение диаметра ОС требует улучшения точности стабилизации.

Большинство ОЭК построено на основе оптической системы трехзеркального анастигмата Корша (ТМА) с относительным фокусным расстоянием не менее 12. Невысокое относительное фокусное расстояние определяется крупным размером пикселя приемника изображения менее 8–13 мкм. Использование достаточно крупного размера ячеек приемника изображения обусловлено требованием обеспечения достаточной потенциальной ямы для накопления сигнала обеспечения радиометрической чувствительности [7]. Кроме этого, обеспечивается ограничение на смаз изображения от вибраций, вызванных работой исполнительных органов системы стабилизации [8].

Космические системы дистанционного зондирования Земли, имеющие оптические системы большого диаметра, имеют лучшее линейное разрешение на местности с большей высоты полета и, соответственно, более высокую периодичность наблюдения и оперативность доставки информации.

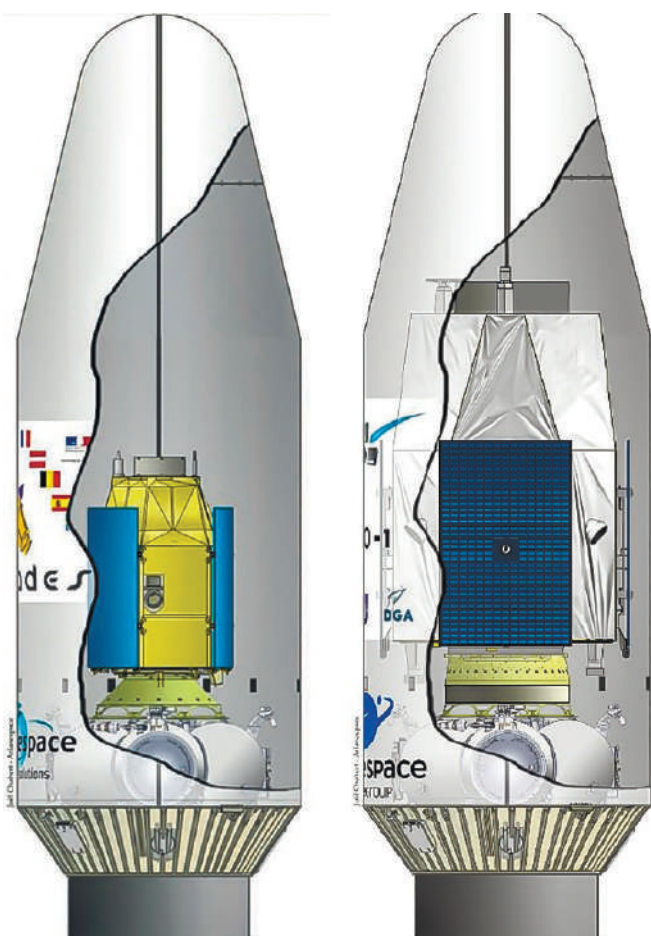


РИС. 2. Сравнение КА Pleiades и CSO

Согласование размера пикселя и относительного фокусного расстояния для большинства современных высокоразрешающих ОЭК производится по принципу равенства радиуса кружка рассеивания и размера пикселя. Дальнейшее увеличение фокусного расстояния теоретически может повысить разрешающую способность, однако на практике систематические и случайные смазы изображения и остаточная расфокусировка не позволяют этого сделать. Одновременно увеличение относительного отверстия более рациональных значений существенно снижает освещенность ячеек приемника изображения и радиометрическую чувствительность.

Увеличение диаметра апертуры оптической системы позволило улучшить периодичность и производительность путем увеличения высоты орбиты до 770–800 км (WorldView-2 и CSO-1). С целью улучшения разрешающей способности одновременно применяются КА на высотах 617–680 км (WorldView-3, -4 и Pleiades-1, -2).

Количество одновременно функционирующих однотипных КА в орбитальной группировке увеличивается от двух-трех в Pleiades и WorldView до планируемых четырех в CSO. Увеличение численности орбитальной группировки возможно в результате сокращения сроков производства КА с 3–4 лет до 2–3 лет.

Альтернативный путь развития КА ДЗЗ продемонстрирован фирмой Airbus Defence (бывшая Astrium) при переходе от КА Pleiades-1, -2 [10]. На Pleiades-1, -2 были отработаны методология и технология создания КА с интегральной компоновкой и крупногабаритным ОЭК. В КА CSO-1 отсутствует деление на модуль целевой аппаратуры и служебную платформу. Сохранились отработанные принципы интегральной компоновки КА типа Pleiades-1, -2 (рис. 2).

Переход от диаметров 0,7 м к 1,3 м производился без изменения основных расчетных параметров и относительного фокусного расстояния ОС.



Массовые характеристики оптической системы, вероятнее всего, были улучшены за счет применения карбида кремния SiC в зеркалах телескопа и нитрида кремния SiN в элементах конструкции. Удельная масса главного зеркала Pleiades-1, -2 с оправой составляет около 68 кг/м². В космической обсерватории Euclid установлена ОС типа Корша с диаметром 1,25 м, предположительно являющаяся аналогом ОС CSO-1. Удельная масса 1,25 м зеркала Euclid равна 30 кг/м².

Зарубежные КА ДЗЗ с диаметрами оптической системы в 0,3...0,4 м получили развитие в направлении упрощенных малых КА типа SkySat с массой не более 100 кг. Разрешающая способ-

ность таких КА составляет 1 – 2 м. Количество КА в группировке более двадцати, что обеспечивает высокую периодичность наблюдения.

В условиях планов развертывания группировок КА типа SkySat применение сложных высокопрецизионных платформ для установки целевой аппаратуры диаметром 0,3...0,4 м уже не имеет смысла.

Готовые оптико-электронные комплексы диаметром до 0,7 м предлагаются на коммерческом рынке. Аналогичная Iconos-2 коммерческая модификация ОЭК Kodak-1000TMA может быть изготовлена за два года по цене около 1 млн долл. Разработчик целевой аппаратуры для КА WorldView-1, -2 и -3 Harris Corporation предлагает ряд ОЭК трех типоразмеров: с диаметром 25, 35 и 40 см для малых КА и 50, 65, 70 и 110 см — для больших КА. Существуют предложения готовых КА, например упрощенная копия КА Pleiades типа KazEOSat-2 предлагается Airbus Defence and Space (Astrium).

Существенное улучшение пространственной разрешающей способности до 0,3–0,5 м зарубежных КА ДЗЗ достигнуто за счет применения новых крупногабаритных оптико-электронных комплексов. В силу уникальности таких ОЭК Harris и Astrium построение КА производится путем выбора служебной платформы с требуемыми характеристиками по динамике и точности стабилизации от различных производителей или путем интегральной компоновки КА со служебными системами.

В настоящее время наибольшим диаметром ОС типа Корша до 1,3 м обладает КА CSO-1. Дальнейшее совершенствование ОС продолжится в направлении создания трехзеркальных анастигматов Корша с диаметром 1,5 – 2 м с зеркалами и элементами конструкции из карбида с массой от 500 до 800 кг.

Увеличение диаметра апертуры до 1,5 – 2 м позволит создать два типа КА: для решения задач в полосе обзора до 25 – 30 км с разрешением 0,5 м на высоте выше 1200 км и для детального наблюдения с полосой захвата 15 км и пространственным разрешением лучше 0,25 м на высоте 700 – 800 км.

Увеличение размеров фокальной плоскости таких ОС потребует создания следующего поколения ОЭК с количеством пикселей более 40 000. В орбитальном построении неизменным является использование солнечно-синхронных орбит. В будущем можно прогнозировать создание КА на наклонных орбитах для улучшения периодичности наблюдения определенных широтных поясов.



Литература

1. **Бакланов А.И.** К вопросу о пространственном разрешении и точности привязки изображений космических систем наблюдения высокого разрешения // *Геоматика*. 2010. № 3. С. 25 – 30.
2. **Бакланов А.И., Блинов В.Д., Горбунов И.А., Забиякин А.С. и др.** Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2016. Т. 15. № 2. С. 30 – 35.
3. **Ефанов В.В., Клименко Н.Н., Семункина В.И., Шостак С.В.** Космическая система дистанционного зондирования Земли на базе космического аппарата «Аркон»: к 20-летию первого запуска // *Вестник НПО им. С. А. Лавочкина*. 2017. № 4. С. 25 – 34.
4. **Ефанов В.В., Семункина В.И., Шостак С.В.** Особенности баллистического проектирования КС ДЗЗ оптико-электронного наблюдения типа «Аркон-1» // *Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина*. 2009. № 1. С. 46 – 52.
5. **Занин К.А., Москатиныйев И.В.** Основные направления развития зарубежных оптико-электронных космических систем дистанционного зондирования Земли (обзор) // *Вестник НПО им. С. А. Лавочкина*. 2019. № 2. С. 28 – 36.
6. **Золотой С.А.** Методические основы научного сопровождения процессов создания космических систем дистанционного зондирования Земли // *Вестник НПО им. С. А. Лавочкина*. 2017. № 1. С. 83 – 86.
7. **Хартон В.В., Ефанов В.В., Занин К.А.** Основы проектирования орбитальных оптико-электронных комплексов: учеб. пособие. М: Изд-во МАИ, 2011. 127 с.
8. **Макриденко Л.А., Волков С.Н., Геча В.Я., Жилинев М.Ю. и др.** Основные источники снижения качества изображений Земли, получаемых при орбитальной оптической съемке с борта МКА // *Вопросы электромеханики*. Труды ВНИИЭМ. 2017. Т. 160. № 5. С. 3 – 19.
9. **Тимофеев В.Н.** Основные принципы создания современных информационных космических систем оптико-электронного наблюдения поверхности Земли // *Космонавтика и ракетостроение*. 2003. № 3. С. 42 – 48.
10. **Costes V., Cassar G., Escarrat L., Conseil S.** Optical design of a compact telescope for the next generation earth observation system, Proc. SPIE 10564, International Conference on Space Optics — ICSO 2012, 1056416 (20 November 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2309055>

References

1. **Baklanov A.I.** K voprosu o prostranstvennom razreshenii i tochnosti privyazki izobrazheniy kosmicheskikh sistem nablyudeniya vysokogo razresheniya. *Geomatika*, 2010, no. 3, pp. 25 – 30.
2. **Baklanov A.I., Blinov V.D., Gorbunov I.A., Zabyakin A.S. et al.** Apparatura vysokogo razresheniya dlya perspektivnogo kosmicheskogo apparata „Resurs-PM“. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 30 – 35.
3. **Efanov V.V., Klimentko N.N., Semunkina V.I., Shostak S.V.** Kosmicheskaya sistema distantsionnogo zondirovaniya Zemli na baze kosmicheskogo apparata „Arkon“: k 20-letiyu pervogo zapuska. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 2017, no. 4, pp. 25 – 34.
4. **Efanov V.V., Semunkina V.I., Shostak S.V.** Osobennosti ballisticheskogo proektirovaniya KS DZZ optiko-elektronnogo nablyudeniya tipa „Arkon-1“. *Vestnik FGUP NPO im. S. A. Lavochkina*, 2009, no. 1, pp. 46 – 52.
5. **Zanin K.A., Moskatinyev I.V.** Osnovnye napravleniya razvitiya zarubezhnykh optiko-elektronnykh kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli (obzor). *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 2019, no. 2, pp. 28 – 36.
6. **Zolotoy S.A.** Metodicheskie osnovy nauchnogo soprovozhdeniya protsessov sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 2017, no. 1, pp. 83 – 86.
7. **Khartov V.V., Efanov V.V., Zanin K.A.** Osnovy proektirovaniya orbital'nykh optiko-elektronnykh kompleksov. Moscow, MAI Publ., 2011. 127 p.
8. **Makridenko L.A., Volkov S.N., Gecha V.Ya., Zhilenev M.Yu. et al.** Osnovnye istochniki snizheniya kachestva izobrazheniy Zemli, poluchaemykh pri orbital'noy opticheskoy s"emke s borta MKA. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEEM*, 2017, vol. 160, no. 5, pp. 3 – 19.
9. **Timofeev V.N.** Osnovnye printsipy sozdaniya sovremennykh informatsionnykh kosmicheskikh sistem optiko-elektronnogo nablyudeniya poverkhnosti Zemli. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2003, no. 3, pp. 42 – 48.
10. **Costes V., Cassar G., Escarrat L., Conseil S.** Optical design of a compact telescope for the next generation earth observation system, Proc. SPIE 10564, International Conference on Space Optics — ICSO 2012, 1056416 (20 November 2017); <https://doi.org/10.1117/12.2309055>

© Занин К.А., Клименко Н.Н., Москатиныйев И.В., 2020

История статьи:

Поступила в редакцию: 24.01.2020
Принята к публикации: 09.02.2020

Модератор: Плетнер К.В.

Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:

Занин К.А., Клименко Н.Н., Москатиныйев И.В. Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 2. С. 82 – 89.