

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 681.7.069.32:528.835.042

## КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ИСТОЧНИКАМ

Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, В. Я. Геча,  
М. Ю. Жилёнв, С. Г. Казанцев

*Рассмотрены основные мировые тенденции в создании космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) с оптико-электронной аппаратурой высокого пространственного разрешения, а также закономерности построения и функционирования орбитальных средств систем наблюдения Земли и оптико-электронной аппаратуры как уже эксплуатируемых, так и планируемых к запуску в ближайшей перспективе. Представлены основные характеристики КА ДЗЗ: южнокорейских – KompSat-1/Arirang-1 – KompSat-5; японского – ASNARO-1; французских – Pleiades-1A, Pleiades-1B; испанского – Deimos-2; турецких – Göktürk-1A, Göktürk-1B и американских – IKONOS-II, GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-4, SkySat-1, SkySat-2, BlackSky.*

**Ключевые слова:** оптико-электронная аппаратура высокого пространственного разрешения, спектральная энергетическая яркость, топографическая привязка, идентификация изображений, верификация и валидация, панхроматическая и мульти-спектральная съёмка.

**Введение.** В настоящее время в космическом ДЗЗ используются КА, созданные как государственными структурами различных стран, так и коммерческими организациями (в основном из США). К первым, например, относятся КА орбитальной группировки (ОГ) с оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) высокого пространственного разрешения южнокорейского космического агентства KARI

(KompSat) [1]. Общий вид её КА показан на рис. 1.

КА KompSat-1/Arirang-1 оснащён ОЭА с разрешением около 6 м и был выведен на орбиту 20.12.1999 г. Связь с ним была потеряна 30.12.2007 г. Таким образом, он работал 8 лет при номинальном сроке активного существования (САС) 3 года и выбыл из действующей ОГ. Остальные КА в настоящее время находятся в эксплуатации.

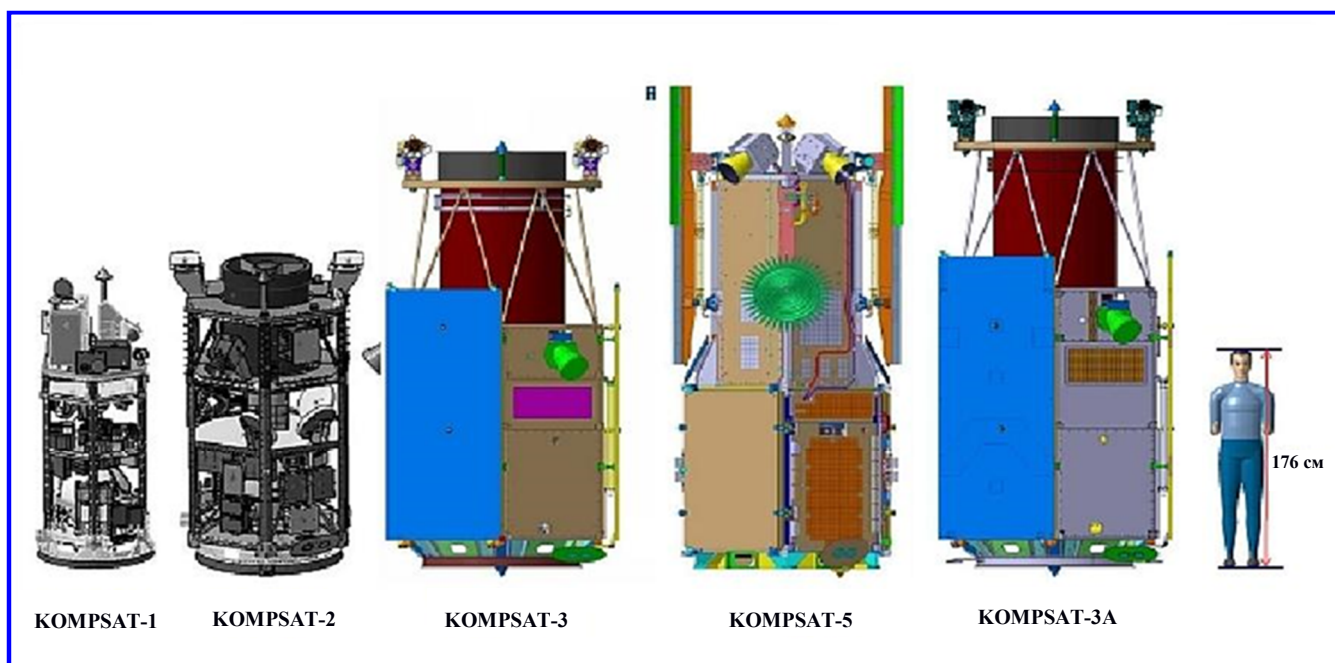


Рис. 1. Орбитальная группировка малых КА KompSat (Южная Корея)

КА KompSat-5 оснащён радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) высокого пространственного разрешения, а остальные КА оснащены ОЭА высокого пространственного разрешения.

Типичными представителями коммерческих ОГ являются КА компаний DigitalGlobe (IKONOS-II, GeoEye-1, WorldView-1, -2, -3, -4), TerraBella, Google (КА SkySat), BlackSky (60 КА с ОЭА высокого пространственного разрешения).

Анализ литературных данных свидетельствует, что государственные и коммерческие КА решают примерно одни и те же метрические задачи, кроме существующей ОГ SkySat. При этом считается вполне очевидным, что чем лучше качество ОЭА, тем лучше её совместимость со съёмкой через атмосферу Земли её покровов при минимально возможных отклонениях от заданного закона съёмки и возмущениях от КА как служебной платформы, тем эксплуатация данной космической системы (КС) будет экономичнее и эффективнее [2 – 11].

**Задачи ДЗЗ КА для наблюдения Земли из космоса с разрешением лучше 1 м и параметры применяемой ОЭА.** В зависимости от требуемой точности получаемых растров земной поверхности, их топографической привязки, идентификации изображений и т. п., задачи ДЗЗ можно условно разделить на две группы.

*Задачи ДЗЗ первой группы:*

- создание и обновление топографических и специальных карт и планов вплоть до масштаба 1:10 000, мониторинг океанов (береговых линий);
- инвентаризация сельскохозяйственных и лесных угодий, создание планов землепользования, точное земледелие, отслеживание развития горных работ;
- обновление топографической подосновы для разработки генпланов развития городов, схем территориального планирования муниципальных районов;
- экологические задачи;
- инвентаризация и мониторинг строительства объектов инфраструктуры, транспортных, энергетических, информационных коммуникаций, средств добычи нефти и газа, их транспортировки, оценки гарей, заболоченности, аномалий покровов земной поверхности и др.

Таким образом, в первой группе присутствуют задачи измерительного и наблюдательного плана с использованием достаточно точных радиометрических и геометрических свойств снимков, которые, в свою очередь, требуют формирования достаточно метрически точных растров с проведением их соответствующей верификации и валидации. Выиг-

рыш данного вида съёмки и снимков состоит в том, что они позволяют использовать автоматические и автоматизированные (интерактивные) пиксельные и субпиксельные методы распознавания, дешифрирования снимков и идентификации объектов на них. В частности, по мультиспектральным (МС) снимкам могут производиться как разного рода классификации и индексные (численные) оценки по яркостям изображений ландшафта, так и идентификации изображений объектов ландшафта с помощью множества библиотек спектральных сигнатур, которые обычно встроены в программные комплексы обработки ДЗЗ [12 – 15].

Для решения задач первой группы используются такие КА, как KompSat-3А, и ещё более 20 КА, сходных с ним по параметрам, произведённых в разных странах государственными и коммерческими организациями. Информация о них содержится на сайтах: eorportal.org, sovzond.ru, innoter.ru, ntc-omz.ru и др.

Основные технические характеристики КА KompSat-3А и бортовой ОЭА приведены в табл. 1.

Использование схемы Корша в конструкции ОЭА позволяет обеспечить наибольший продольный габарит ~2,1 м при фокусном расстоянии 8,6 м, т. е. менее  $\frac{1}{4}f$ . При обратной светосиле  $F = f_{об}/D_{вх} \approx 10,75$  соотношение сигнал/шум более 100.

Имеющийся в составе КА канал среднего ИК-диапазона в данной статье не анализируется из-за более низкого разрешения и множества особенностей ОЭА. Однако следует подчеркнуть, что данный канал даёт существенный вклад в энергопотребление и массу КА, так как имеет систему захлаживания фокальной плоскости с фотоприёмным устройством (ФПУ) ОЭА [16].

*Задачи ДЗЗ второй группы:*

- съёмка для отслеживания потока товаров и сырья в целях оценок цепей поставок, узких мест в них и т. п.;
- отслеживание развития горных и строительных работ;
- съёмка HD-видео местности для спасателей, которым они могут помочь оценить ущерб и оказать помощь при катастрофах;
- выявление по временным последовательностям снимков изменений инфраструктуры для определения зон риска и возможностей.

Таким образом, ко второй группе относятся задачи наблюдательного плана без точных оценок, которые требуют точных снимков с проведением верификации и валидации полученных изображений по соответствующим характеристикам.

Таблица 1

**Основные технические характеристики КА KompSat-3A [13, 17]**

Техническая характеристика	Значение
<b>Общие</b>	
Высота полёта	528 км
Масса КА	1100 кг
Энергопотребление	1100 Вт
Габариты КА	Ø 1,3 × 2,1 м
<b>Бортовая ОЭА</b>	
Оптическая схема	5-зеркальный телескоп на базе оптической схемы Корша
Диаметр эффективной входной апертуры объектива ОЭА, $D_{вх}$	0,8 м
Фокусное расстояние объектива ОЭА, $f_{об}$	8,6 м
Полоса захвата	12 км
Масса	80 кг
Собственная частота конструкции съёмочной камеры	> 70 Гц
<b>Панхроматический канал (ПК)</b>	
ФПУ	На базе линейного ПЗС-фотоприёмника (ЛФПЗС) с режимом временной задержки накопления (ВЗН)
Размер фоточувствительного элемента (ФЧЭ)	8,75 мкм
ВЗН	1 – 64 шага с $\Delta = 4$ ш
Потенциальная яма, $E_{кв}$	~500000 $\bar{\epsilon}$ ( $5 \times 10^5 \bar{\epsilon}$ )
Динамический диапазон	до 14 бит/пикс.
Пространственное разрешение	0,55 м
<b>МС-каналы</b>	
Используется аналогичное ФПУ	
Размер ФЧЭ	17,5 мкм
Пространственное разрешение	2,2 м
<b>Канал среднего ИК-диапазона с охлаждаемым ФПУ</b>	
Спектральный диапазон, $\lambda$	3 – 5 мкм

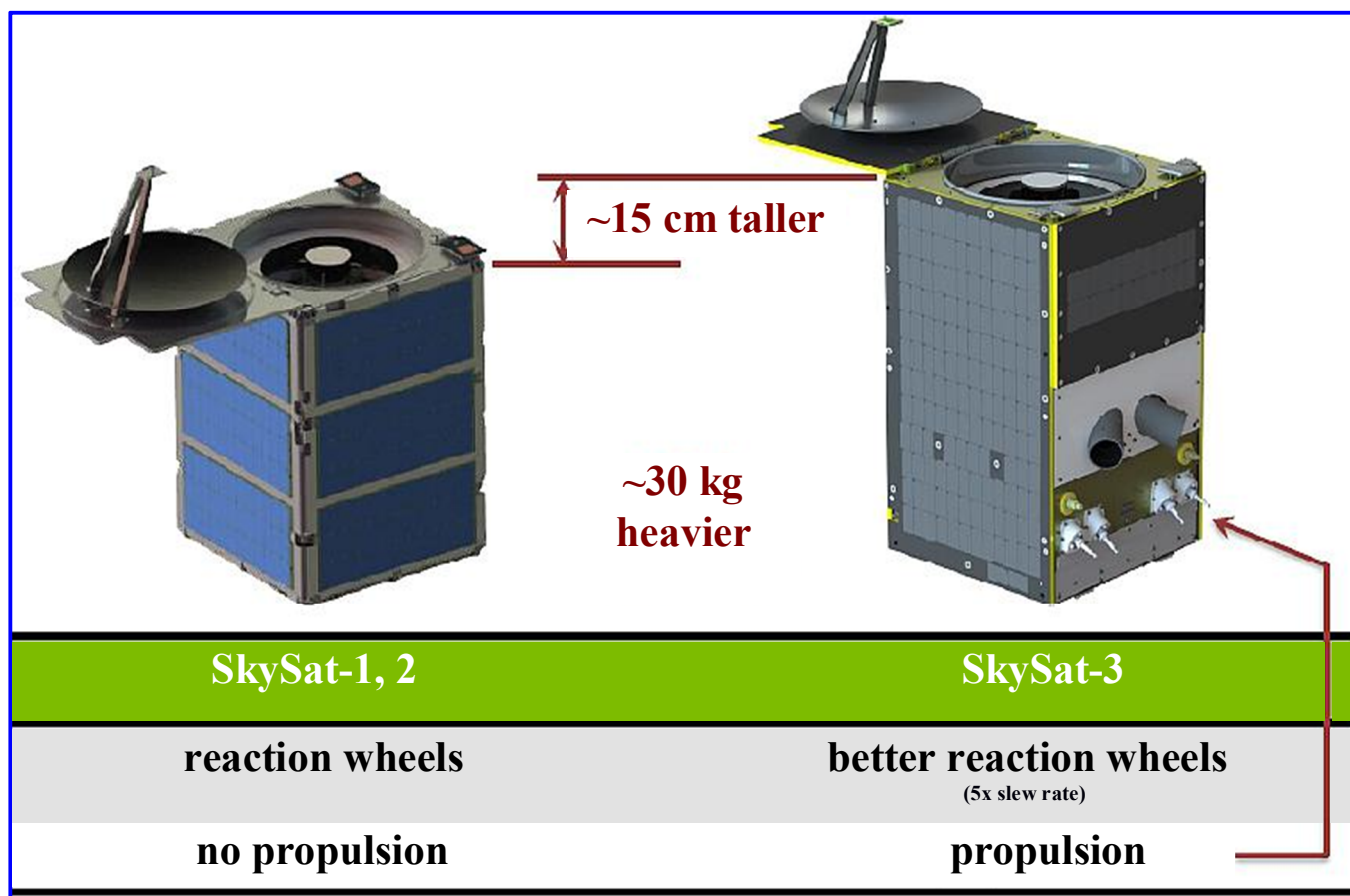


Рис. 2. Внешний вид малых КА SkySat-1, -2 и SkySat-3 [16]

Типичными представителями КА, предназначенных для решения задач второй группы, являются спутники ОГ SkySat, оснащённые ОЭА с разрешением ~0,9 м в ПК (компания Google, производитель BellaTerra) [18]. Компания-разработчик SkyBox планировала создать ОГ из 24-х таких КА, однако была куплена Google и продана в феврале 2017 компании Planet, США.

КА SkySat-1, -2 не имеют двигательной установки и топливных систем. Поэтому они не могут поддерживать стабильные параметры орбиты, которые необходимы для проведения съёмки в оптимальных условиях освещённости земной поверхности Солнцем, для сброса результатов съёмки при оптимальных сеансах связи с пунктами приёма информации (ППИ) и для решения других задач, связанных со стабильностью параметров орбитального построения КС ДЗЗ.

Внешний вид КА SkySat-1, -2 и SkySat-3 представлен на рис. 2.

Как следует из рис. 2, КА SkySat-3 на 15 см длиннее предыдущей модели и имеет на 30 кг большую массу, т. е. на 25%. Таким образом, производителям понадобились существенные доработки двигателей-

маховиков и установка корректирующей двигательной установки с необходимым оборудованием. Однако после выведения на орбиту в октябре 2016 г. однотипных SkySat-3, -7 информация об их состоянии и о полученных с них изображениях на указанных выше и других сайтах в настоящий момент отсутствует. В частности, она отсутствует и на сайте Всемирной метеорологической организации, где публикуются оценки изображений КА ДЗЗ [19].

Основные технические характеристики КА SkySat-1, -2 и кадровой бортовой ОЭА (съёмка методом PushFrame) приведены в табл. 2.

Данный КА имеет возможность видеосъёмки, но такие возможности в настоящей статье не рассматриваются.

Опираясь на анализ данных с SkySat-1, -2 [19], следует отметить, что КМОП-кадровые матрицы в ОЭА ДЗЗ в настоящее время из-за отсутствия антиблужинга и других своих особенностей могут не позволять иметь радиометрически верное изображение Земли, необходимое для классификаций, дешифрирования антропогенности и природных сущностей по снимкам высокого пространственного разрешения.

Таблица 2

Основные технические характеристики КА SkySat-1, -2 [36]

Техническая характеристика	Значение
<b>Общие</b>	
Высота полёта	600 км (фактическая высота полёта составила ~450 км [19])
Масса КА	120 кг
<b>Бортовая ОЭА</b>	
Оптическая схема	Предположительно Ричи – Кретьена, угол поля <1,0 град.
Фокусное расстояние объектива ОЭА, $f_{об}$	3,6 м
Полоса захвата	8 км
Масса	80 кг
Собственная частота конструкции съёмочной камеры	>70 Гц
ФПУ	4-кадровые КМОП-матрицы размером 5,5 Мпикс. (2560 × 2160 ФЧЭ)
Размер ФЧЭ	6,5 × 6,5 мкм
Потенциальная яма, $E_{кв}$	~35000 – 40000 $\bar{e}$ ( $3,5 \times 10^4\bar{e} - 4 \times 10^4\bar{e}$ )
Динамический диапазон	до 8 бит/пикс.
Пространственное разрешение	0,9 м

Таблица 3

КА с наклонной съёмкой до 45 – 50°

Техническая характеристика	Deimos-2*, Испания	KompSat-3A, Южная Корея	ASNARO-1, Япония	Göktürk-1A, -1B, Турция	Pleiades-1A, -1B, Франция
Высота, км	620 км	528 км	504 км	~700 км	705/694 км
Спектральные каналы ОЭА	ПК+4МС	ПК+4МС	ПК+6МС	ПК+4МС	ПК+4МС
Пространственное разрешение ПК/МС	0,7(1,0)/1,64 м	0,55/2,2 м	0,5/2,0 м	0,7/2,8 м	1,1(0,9)/1,64 м
Динамический диапазон	10 бит/пикс.	14 бит/пикс.	12 бит/пикс.	12 бит/пикс.	12 бит/пикс.
Фокусное расстояние объектива ОЭА, $f_{об}$	5,75 м	8,6 м	Нет данных	Нет данных	12,9 м
Диаметр эффективной входной апертуры объектива ОЭА, $D_{вх}$	0,42 м	0,8 м	Нет данных	Нет данных	0,65 м
Размер пикс. ПК/МС	Нет данных	8,75/17,5 мкм	Нет данных	Нет данных	13/52 мкм
Сверхразрешение	Нет данных	Есть	Нет данных	Нет данных	Supermode
Полоса захвата/скорость передачи ЦИ**	12 км /160 Мбит/с – QPSK	12 км/1000 Мбит/с	10 км/800 Мбит/с	20 км/Нет данных	20 км/465 Мбит/с
Масса без топлива	310 кг	1100 кг	450 кг	1060 кг	940 кг
САС	Нет данных	4 года	3 – 5 лет	7 лет	5 лет

\*Deimos-2, его реплики: DbaiSat-1,2; KhalifaSat-1 (2018) – однотипная ОЭА.

\*\*ЦИ – целевая информация.

Сравнивая характеристики ОЭА КА ДЗЗ высокого пространственного разрешения, кроме прочего, стоит отметить, что вероятная разность ёмкости потенциальной ямы кадровой ФПЗС ОЭА КА SkySat (динамический диапазон) в  $\Delta E_{кв}$  в десять и более раз ниже, чем у остальных. Это в первую очередь отражается на динамическом

диапазоне снимков, т. е. на их сравнительно низком контрасте и, соответственно, детальности, а именно на разрешаемых контурах, тенях и других дешифровочных признаках.

Сравнительные характеристики КА ДЗЗ высокого пространственного разрешения различных стран и основных производителей приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 4

## Характеристики КА ДЗЗ производства США

Техническая характеристика	GeoEye-1	WV-4	WV-3	WV-2	SkySat-1, -2
Высота орбиты, км	681	617	617	700	600*
Спектральные каналы ОЭА**	ПК+4 МС	ПК+4 МС	ПК+8 МС+ +SWIR+Desert	ПК+8 МС	ПК+4 МС
Пространственное разрешение ПК/МС	0,41/1,64 м	0,31/1,24 м	0,31/1,24 м	0,46/1,24 м	1,1(0,9***)/1,1 м
Динамический диапазон	11 бит	11 бит	11бит	11 бит	Нет данных
Фокусное расстояние объектива ОЭА, $f_{об}$	13,3 м	13,3 м	13,3 м	13,3 м	3,6 м
Диаметр эффективной входной апертуры объектива ОЭА, $D_{вх}$	1,10 м	1,10 м	1,10 м	1,10 м	Нет данных
Размер пикселя, ПК/МС	8/32 мкм	8/32 мкм	8/32 мкм	8/32 мкм	6,5/ 6,5 мкм
Погрешность ориентации ( $3\sigma$ )	0,4 угл. с (навед. 75 угл. с)	Нет данных	Нет данных	Нет данных	0,1°
Тип стабилизации	Трёхосная	Трёхосная	Трёхосная	Трёхосная	Нет данных
Погрешность стабилизации по осям ( $3\sigma$ )	0,007 угл. с/с (25 – 2000 Гц)	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Погрешность геопривязки, по бортовым данным	3,0 м СЕ90, надир	4,0 м СЕ90, надир	3,5 м СЕ90, надир	6,5 м СЕ90, надир	Нет данных
Полоса захвата	15,3 км	13,1 км	13,2 км	16,4 км	8 км
Отклонение от надира	$\pm 50^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 40^\circ$	Нет данных
Средняя скорость перенацеливания/(ускорения)	2,4°/с (0,16°/с <sup>2</sup> )	1,7°/с	1,55°/с	2,63°/с	Нет данных
Повторная съёмка на широте 40°, сут	<3	<1,0	<1,0	<1,1	Не регулируется
Стереосъёмка с одного прохода	3 пары, 45 × 112 км	2 пары, 26 × 112 км	2 пары, 26 × 112 км	4 пары, 63 × 112 км	Нет
Средства разворота КА вокруг его центра масс (ц. м.)	Двигатели-маховики	Гиросины	Гиросины	Гиросины	Нет данных
Скорость передачи ЦИ	740 Мбит/с и 150 Мбит/с	800 Мбит/с	1200 Мбит/с и 800 Мбит/с	800 Мбит/с	470 Мбит/с
Масса КА, кг	1955	2600	2800	2800	120
САС/фактическое время работы	7 лет/ 2008 г. – н. в.	10 – 12 лет/ 2016 г. – н. в.	7 лет / 2013 г. – н. в.	7 лет / 2009 г. – н. в.	4 г. / < 3 лет (н. в. режим Standbay)

\*SkySat-1, -2 высота 578 км; SkySat -4, -7 высота <510 км; SkySat-1, -2 не имеют системы поддержания параметров орбиты.

\*\*ПК 0,45 – 0,90 (0,75) мкм, стандартные МС-каналы 450 – 520 нм; MS1, blue; 520 – 600 нм MS2, green; 630 – 690 нм; MS3, red; 760 – 900 нм MS4, NIR.

\*\*\*Сверхразрешение.

### Конструктивные особенности оптических систем съёмочной ОЭА современных КА ДЗЗ.

Анализ открытых данных по конструкциям ОЭА КА ДЗЗ свидетельствует, что для создания ОЭА высокого пространственного разрешения в основном используются оптико-электронные системы (ОЭС) с современными относительно светосильными оптическими схемами.

Обобщённые характеристики основных типов зеркальных схем оптических систем, которые могут применяться в ОЭА КА ДЗЗ, показаны в

табл. 5, а примеры прецизионных размеростабильных модулей конструкций КА ДЗЗ, на которых монтируются ОЭА высокого пространственного разрешения, звёздные датчики (ЗД) и волоконно-оптический измеритель вектора угловой скорости (ВОДУС) системы ориентации и стабилизации (СОС), с помощью которых получают метрически верные снимки Земли для решения задач высокоточного дешифрирования и картографирования с масштабом не хуже  $M = 1:10\,000$  – на рис. 3 – 7.

Таблица 5

Основные типы зеркальных схем

Схема	Длина	Число зеркал (линз)	Минимальное относительное фокусное расстояние	Центральное экранирование	Светопропускание*	Поле зрения, угл. град.
Ричи – Кретьен	$0,3 - 0,4f_{об}$	2	8	0,3 – 0,4	0,5	0,2 – 0,3
Ричи – Кретьен с линзовым корректором**	$0,2 - 0,25f_{об}$	2	8	0,3 – 0,4	0,5	1,0 – 1,5
Схема Корша	$0,3 - 0,4f_{об}$	3-4	4	0,3 – 0,4	0,25 – 0,35	1,0 – 1,5
Зеркальный триплет «Кука»	$0,3 - 0,4f_{об}$	3	4	0	0,35	10
4-зеркальная схема	$0,15 - 0,2f_{об}$	4	3	0,3 – 0,4	0,25	1,0 – 1,5
Линзовый апланат**	$1f_{об}$	3 – 4	3	0	0,8	10
Линзовая схема типа «Планар»**	$1f_{об}$	6 – 7	3	0	0,8	10 – 20
Кассергне с поверхностями Шварцшильда и линзовым корректором**	$0,2 - 0,25f_{об}$	2	5	0,3 – 0,4	0,5	1,0 – 1,5

\*При коэффициенте отражения от одной поверхности 0,7.

\*\*Системы, в которых сложно поддерживать фотограмметрические параметры и требуемые скорости движения изображения из-за линз.

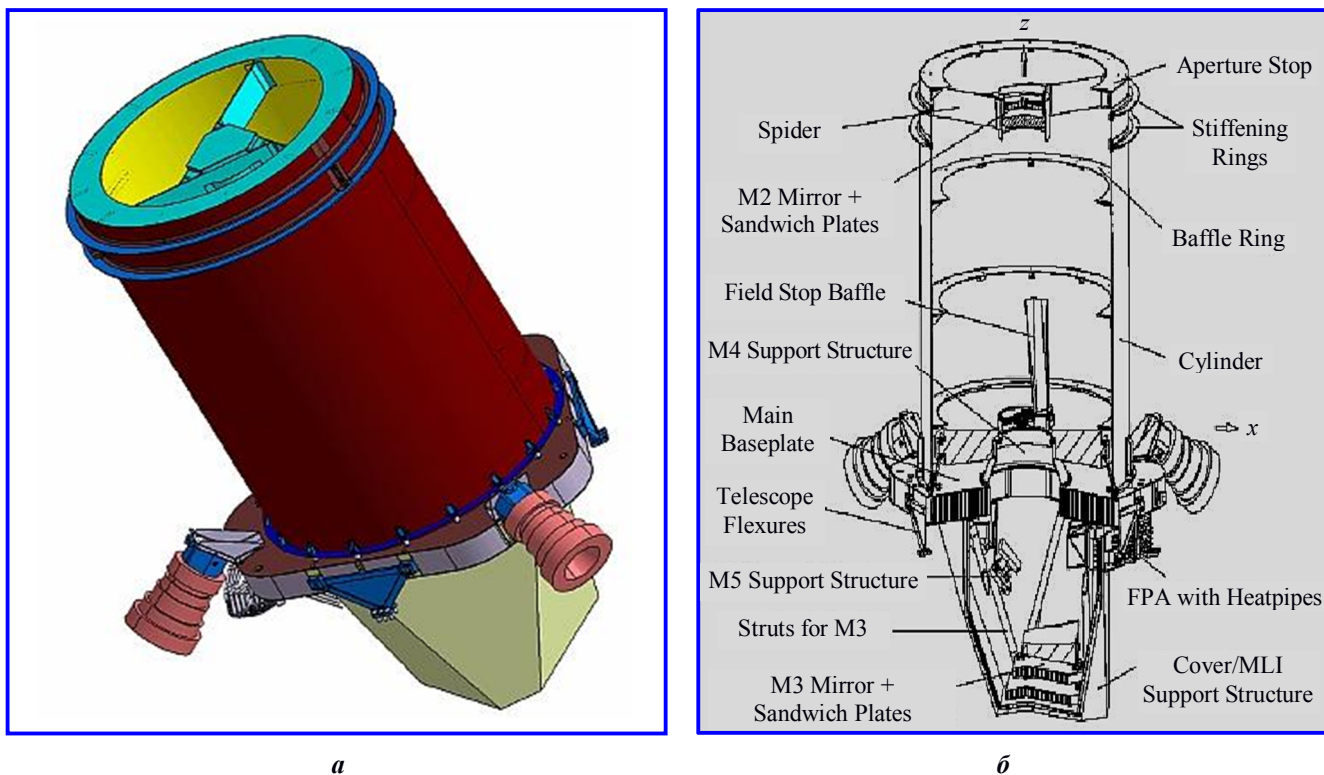


Рис. 3. КА KompSat-3A: конструкция ОЗА с 3Д и размеростабильным основанием (3D-схема) (а); вид ОЗА в разрезе (б)

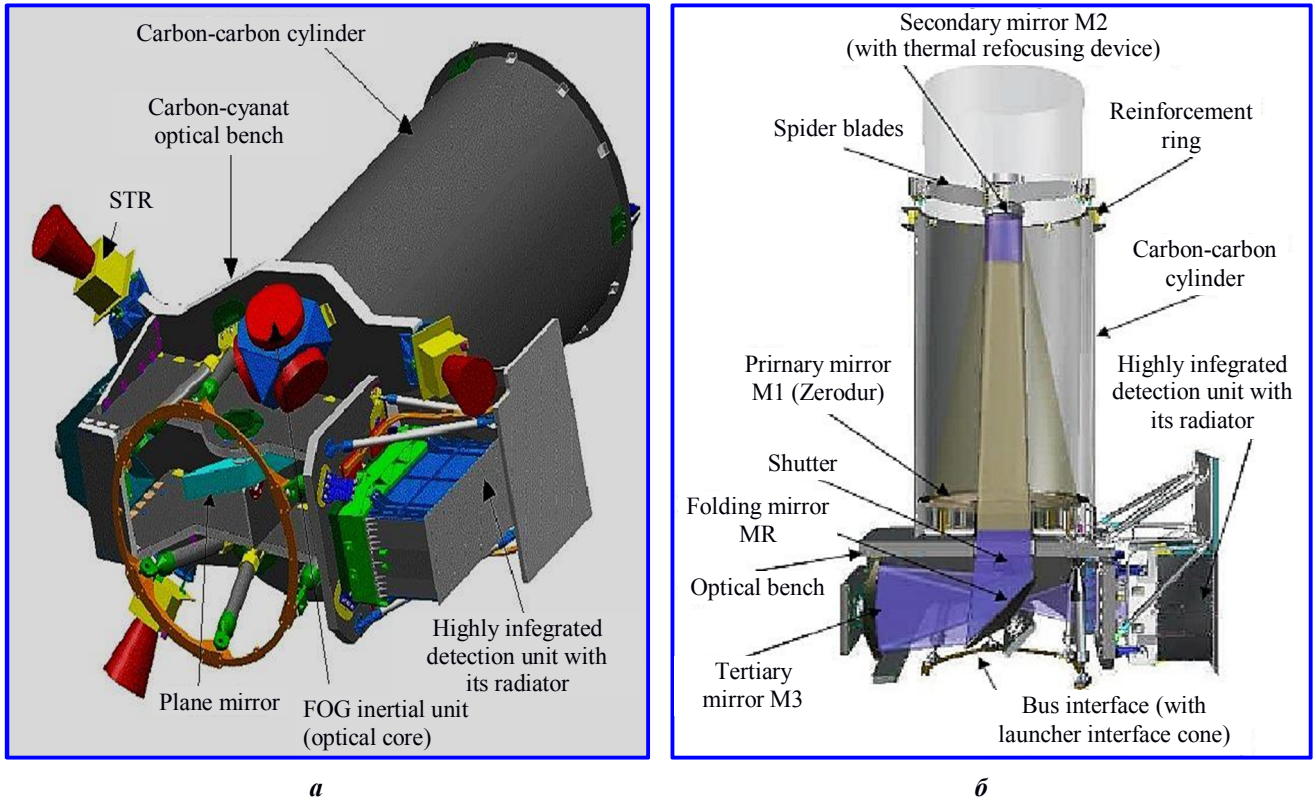


Рис. 4. КА Pleiads-1A, -1B: конструкция ОЭА с ЗД и размеростабильным основанием (3D-схема (а); вид ОЭА в разрезе (б))

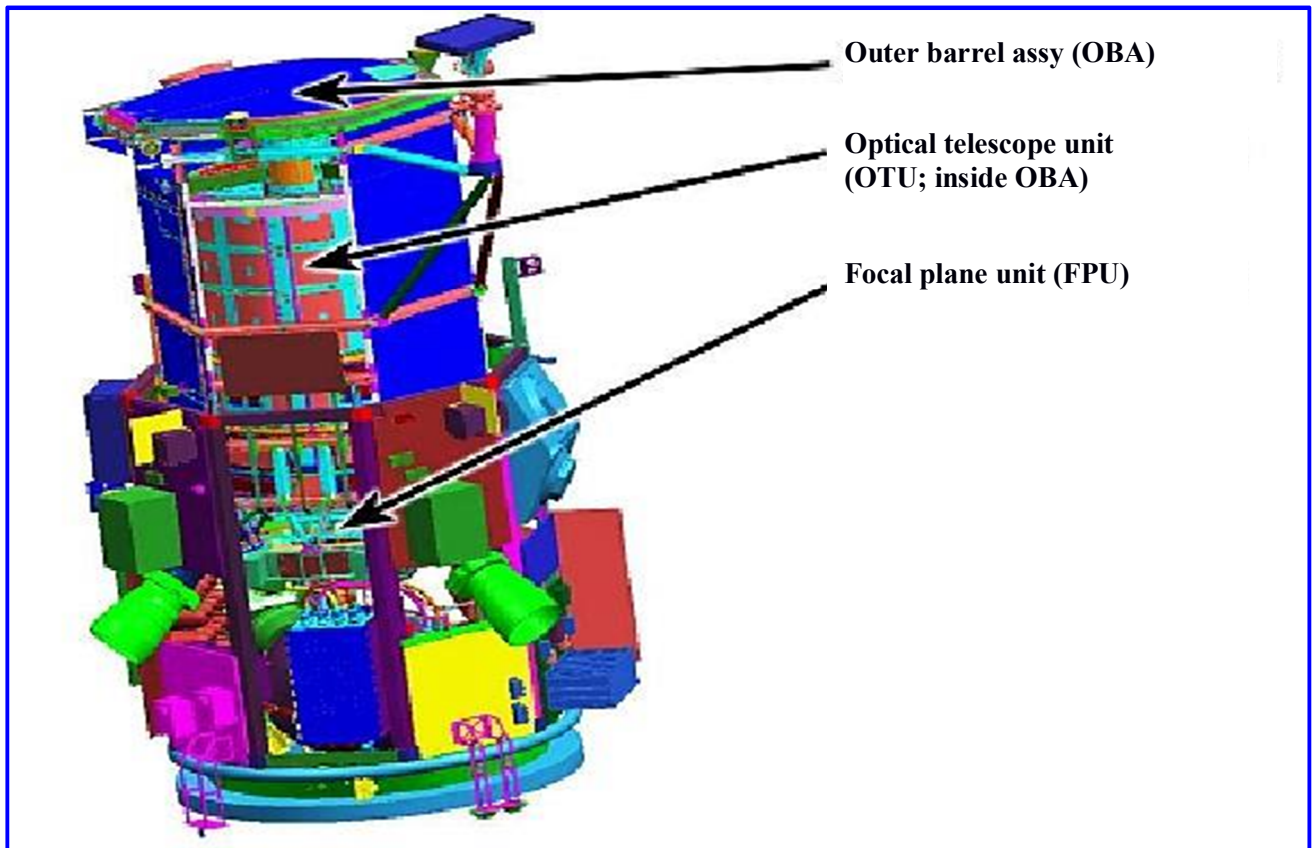
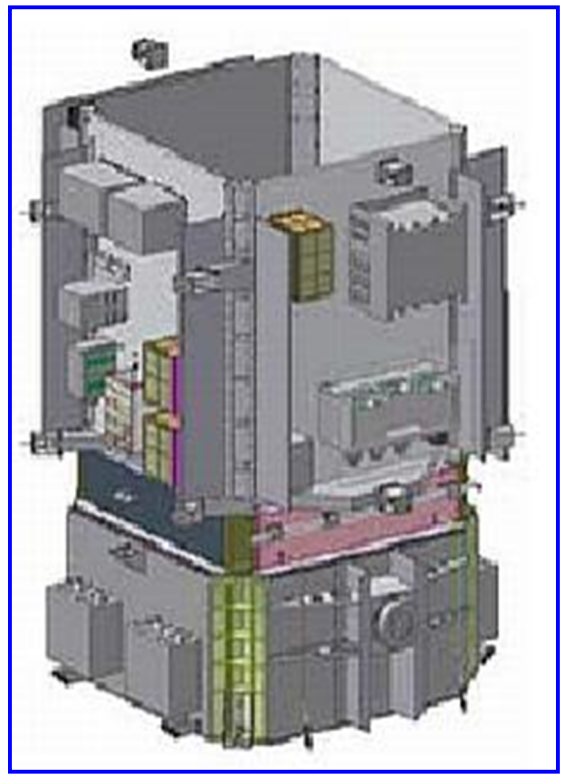


Рис. 5. КА GeoEye-1: конструкция ОЭА в сборе с ЗД (3D-схема)





*a*



*б*

Рис. 6. КА WorldView-2: *a* – конструкция ОЭА (3D-схема); *б* – компоновка

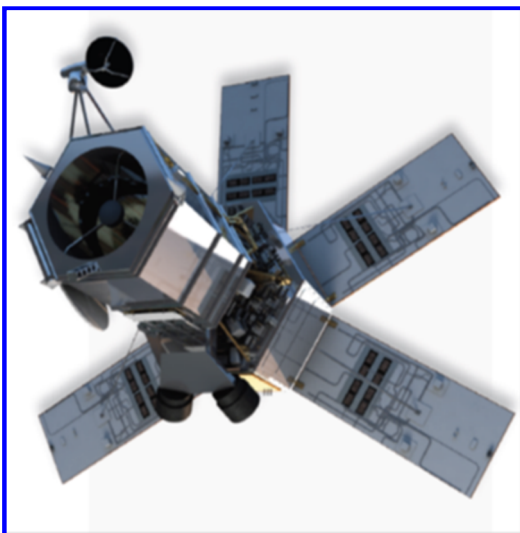


Рис. 7. Внешний вид КА WorldView-4

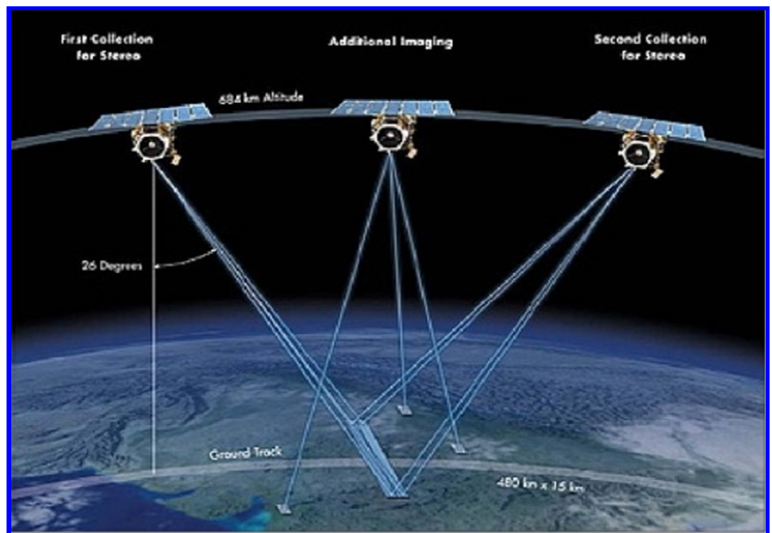


Рис. 8. Прямая и реверсная съёмка с одного прохода КА GeoEye-1 (в том числе для получения стереопары снимков). Сравнение снимков с КА с пространственным разрешением (проекцией фоточувствительного элемента фотоприёмника на Землю) лучше 1 м

Следует отметить такие характерные особенности конструкции КА WorldView-1, -2, -3, -4 и КА GeoEye-1, как наличие двух 3Д значительного размера и остронаправленной антенны высокоскоростной радиолинии (ВРЛ), проиллюстри-

рованные на рис. 7 на примере КА WorldView-4.

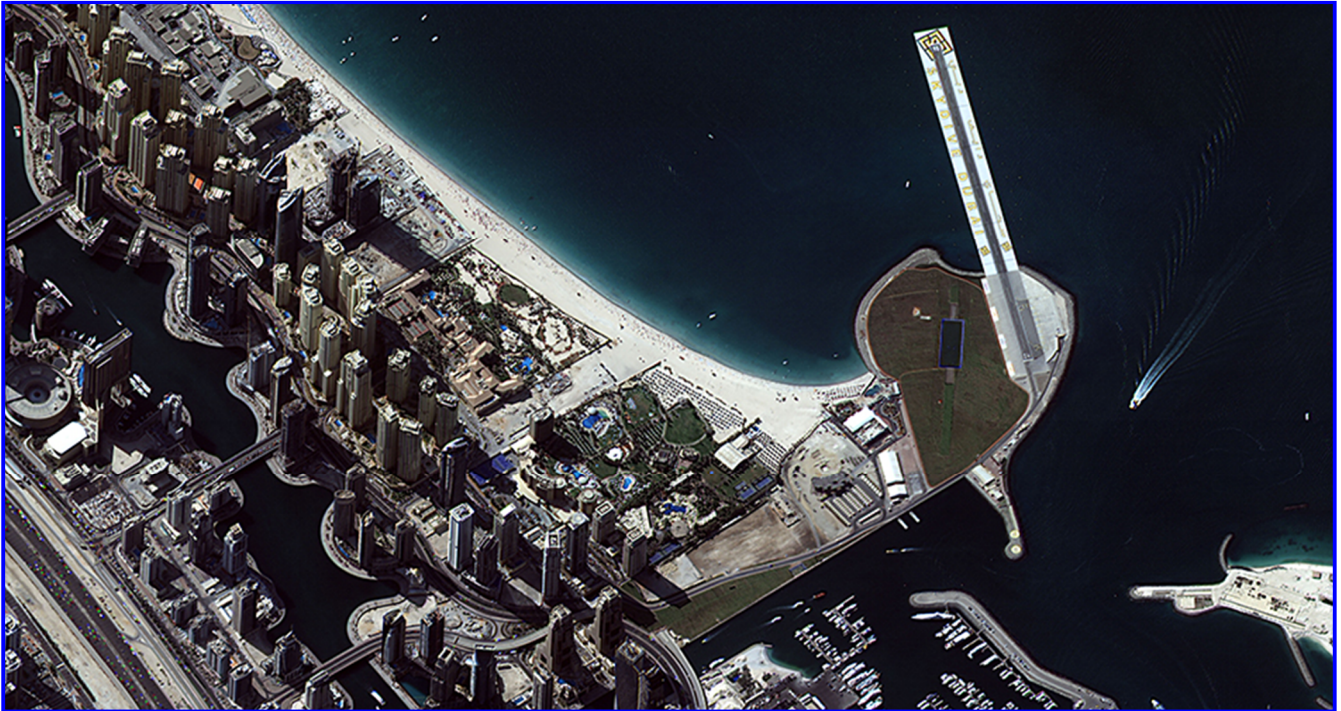
На рис. 8 показано проведение конвергентной стереосъёмки с КА GeoEye-1 с возможностью проведения объектовой съёмки на интервале времени между съёмкой «вперёд» и «назад».

Для сравнения на рис. 9 представлены снимки с КА KompSat-3A, полученные методом цветосинтезирования PanSharp, с разрешением около 0,55 м и с КА SkySat-2.

Как следует из сравнения, снимок с КА KompSat-3A (рис. 9, а) является высококонтрастным и высокодетальным, что объясняется не только его высо-

ким пространственным разрешением, но и высоким радиометрическим разрешением (динамический диапазон ОЭП ОЭА – 14 бит/пикс.).

Снимок на рис. 9, б не выглядит высококонтрастным и по оценкам специалистов, а также по данным сайта [19], разрешение снимков, полученных с помощью ОЭА КА SkySat, значительно хуже заявленного.

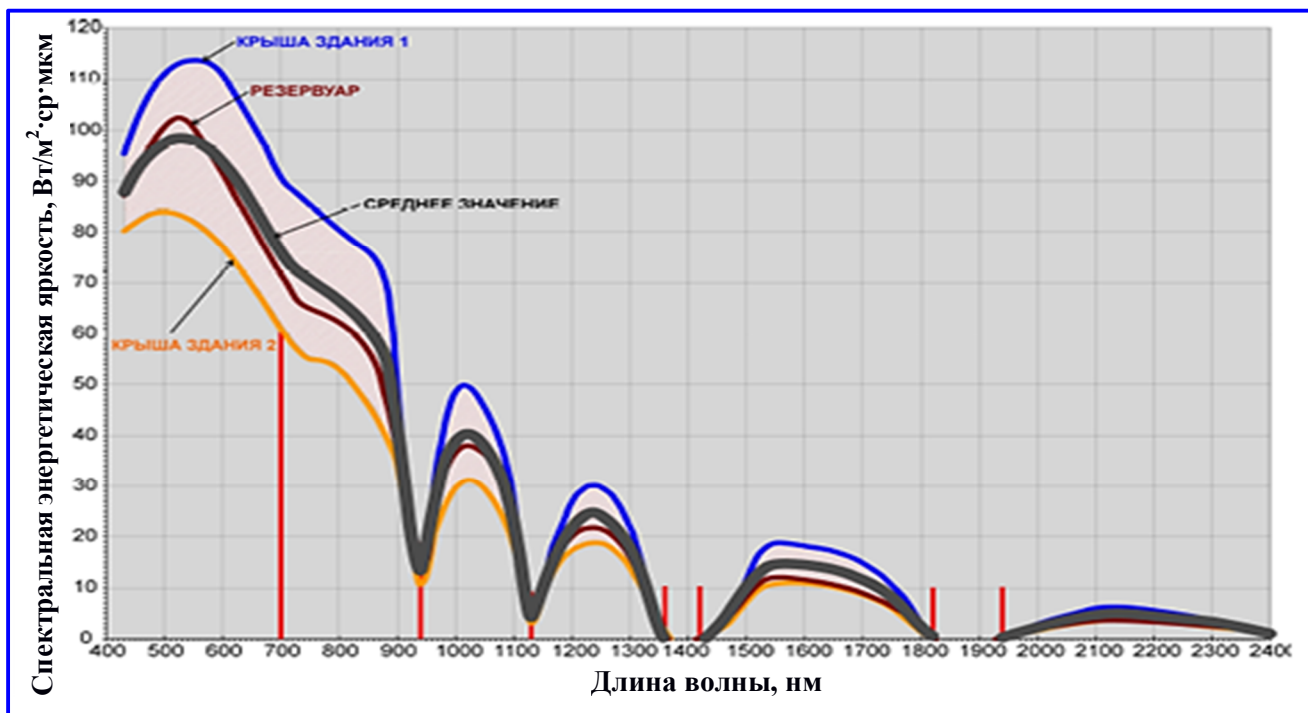


а

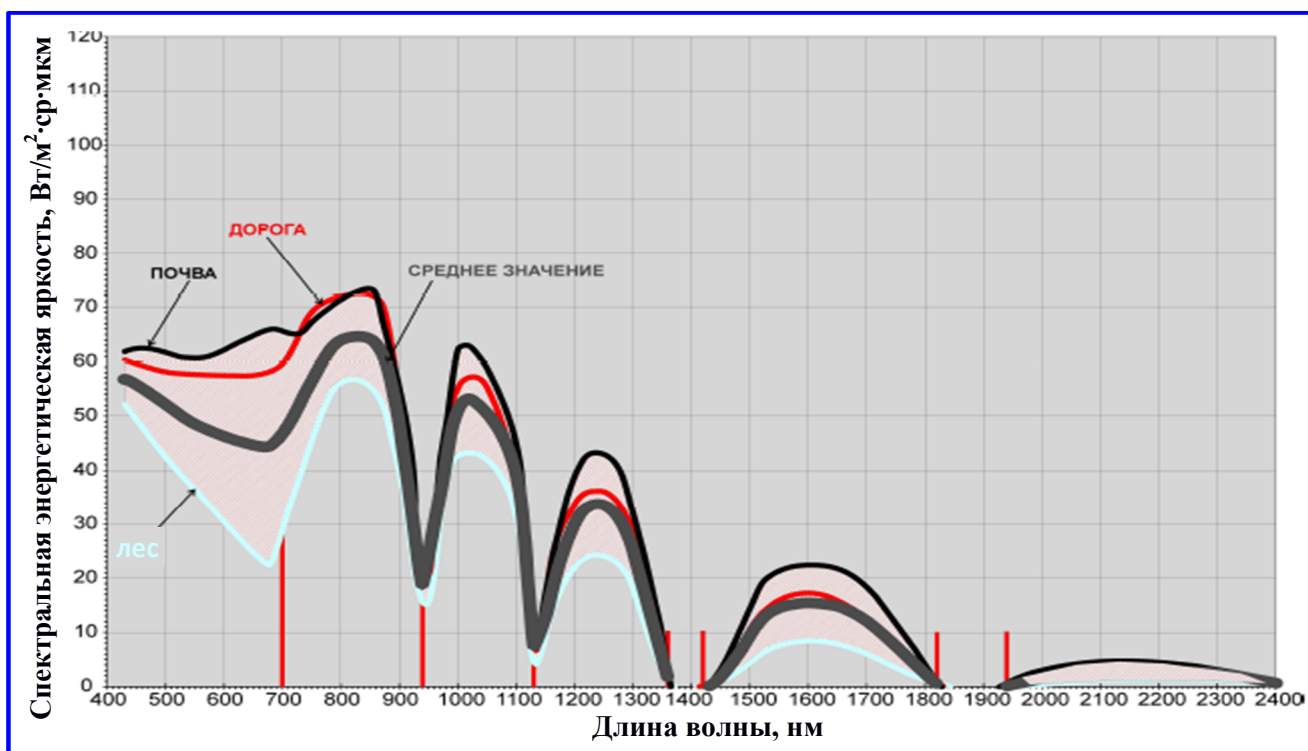


б

Рис. 9. Снимки, полученные средствами КА KompSat-3A (а) и SkySat-2 (б) (источник – ЗАО «Совзонд»)



a



b

Рис. 10. Спектральная энергетическая яркость объектов техносферы (a) и природной сферы (b)

Спектральная энергетическая яркость объектов ландшафта. Спектральные энергетические яркости (СЭЯ) объектов техносферы и природных объектов ландшафта заметно различаются [20, 21, 24]. Данное обстоятельство в обобщённом представлении видно из сравнения их спектральных плотностей энергетических яркостей (СПЭЯ), показанных

на рис. 10 [4]. Данные различия потребовали создания съёмочной МС ОЭА КА ДЗЗ с соответствующими спектральными параметрами. Во многих странах, включая Россию (КА «Ресурс-П», «Канопус-В»), КА с такой ОЭА высокого пространственного разрешения созданы, эксплуатируются и готовятся к запуску.

По материалам, например, [11 – 15, 18 – 26] можно оценить преимущества в дешифровочных возможностях МС-снимков Земли по сравнению с панхроматическими и цветными снимками (RGB), оптико-электронные каналы получения изображений которых сформированы без учёта особенностей СЭЯ природных покровов и объектов, окон пропускания атмосферы Земли.

Как следует из анализа литературных данных, эксплуатация значительного количества разными государствами КА ДЗЗ и создание новых аналогичных КА, оснащённых ОЭА высокого пространственного разрешения, имеющей панхроматический канал, а также четыре и более МС-каналов высокого пространственного разрешения, подтверждает их высокую эффективность в решении задач ДЗЗ как первой, так и второй группы.

**Стандартные растровые продукты КА ДЗЗ и их автоматическое дешифрирование.** Характеристики снимка с КА KompSat-3A (рис. 11):

- пространственное разрешение: PAN – 0,55/0,4 м (с обработкой);
- динамический диапазон – 14 бит/пикс.;
- полоса захвата – 12 км;
- высота полёта – 528 км.

Стандартные МС-каналы КА ДЗЗ, оснащённые ОЭА высокого пространственного разрешения [1 – 3, 16, 27, 28]:

- 450 – 520 нм MS1, blue;
- 520 – 600 нм MS2, green;
- 630 – 690 нм MS3, red;
- 760 – 900 нм MS4, NIR.

Стандартные калиброванные МС-каналы, подобранные под коэффициент спектральной яркости (КСЯ) земных ландшафтов и окна прозрачности атмосферы, дают возможность проведения автоматического дешифрирования с формированием раstra классификации без обучения, например, по NDVI. Относительный вегетационный индекс NDVI – показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Его значение вычисляется по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где RED и NIR – спектральные яркости в красном (3-й канал для снимков со спутника Landsat) и ближнем инфракрасном диапазонах (4-й канал). Идентичные 3-й и 4-й каналы имеют практически все КА ДЗЗ двойного назначения, оснащённые ОЭА с пространственным разрешением лучше 1 м в панхроматическом канале.

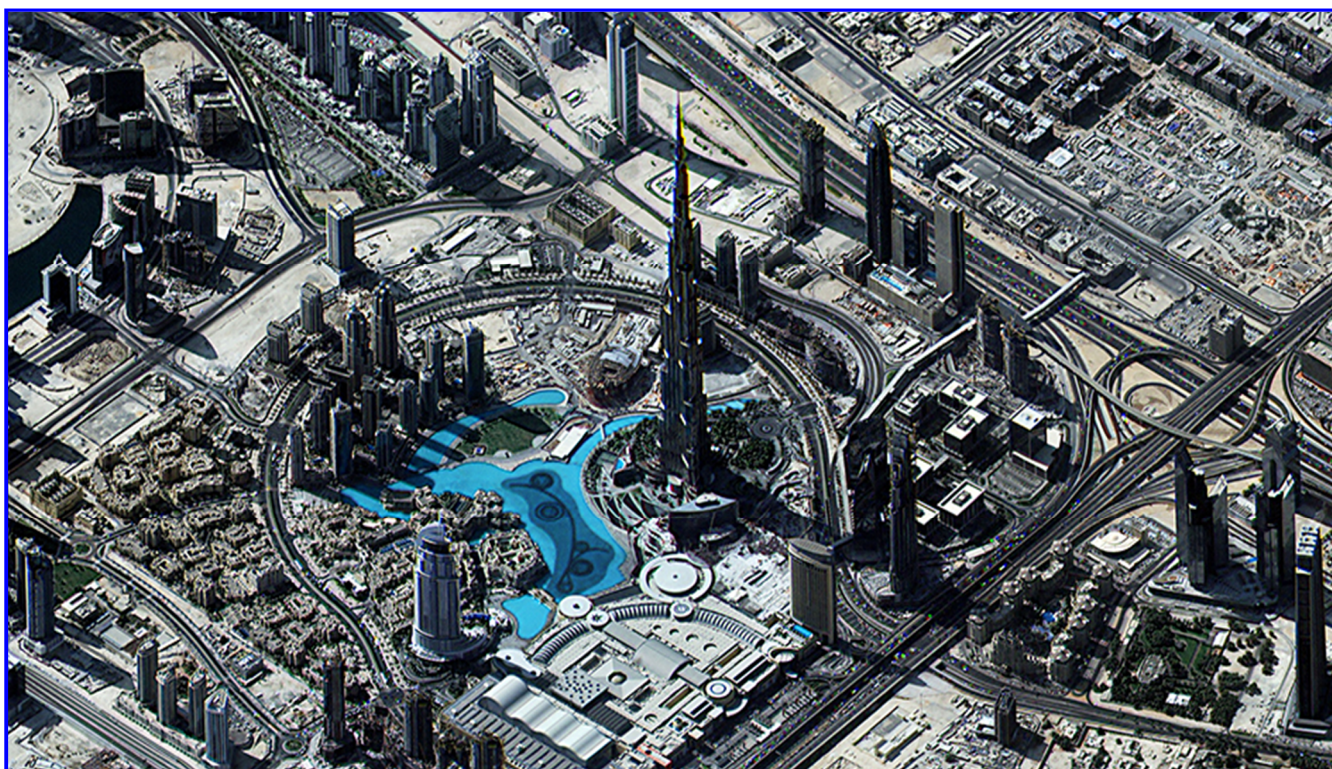


Рис. 11. Снимок, полученный путём синтеза изображений из ПХ- и МС-каналов ОЭА КА KompSat-3A

Расчёт NDVI базируется на двух наиболее стабильных участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом; в инфракрасной – находится область максимального отражения клеточных структур листа, т. е. высокая фотосинтетическая активность ведёт к меньшему отражению в красной области спектра и к большему в ИК. Использование нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений позволяет уменьшить влияние таких явлений, как различия в освещении снимка, дымки, поглощения радиации атмосферой и пр. Для отображения индекса NDVI используется непрерывная градиентная или дискретная шкала, показывающая значения в диапазоне от  $-1$  до  $1$ , или так называемая масштабированная шкала в диапазоне от  $0$  до  $255$ , соответствующая количеству градаций серого цвета.

NDVI подчёркивает контраст обнажённых пород и почв с зелёной растительностью.

NDVI для водных объектов принимает отрицательные значения при расчёте в интервале от  $-1$  до  $1$ , для почв, для грунтов и сухой растительности близок к  $0$ , максимальные значения принимает для вегетирующей растительности и промежуточные – для разных состояний растительного покрова. Его значения возрастают с развитием зелёной биомассы и уменьшаются с её усыханием. В связи с этим NDVI широко используется в сельском хозяйстве при наблюдениях за развитием сельскохозяйственных посевов в течение одного вегетационного периода. В целом главным преимуществом NDVI является лёгкость его получения, так как для его вычисления не требуется никаких дополнительных данных, кроме данных дистанционного зондирования и знания параметров съёмки.

На рис. 12 показан результат вычисления NDVI

по изображениям, полученным космическим комплексом (КК) KompSat-3A. Данное изображение в качестве демонстрационного находится на сайте производителя данного комплекса [17].

Для обработки МС-снимков аэрокосмического ДЗЗ в целях дешифрирования имеется множество методов различного уровня затрат времени и сложности. В рамках настоящей статьи они не рассматриваются, так как являются значительным расширением её тематики. Основные методы обработки МС-данных ДЗЗ можно представить в виде схемы, представленной на рис. 13 [2, 20].

Результаты дешифрируемости снятой местности с помощью МС-снимков космического ДЗЗ при поканальном использовании и использовании стандартных сочетаний данных спектральных каналов ОЭА представлены в табл. 6.

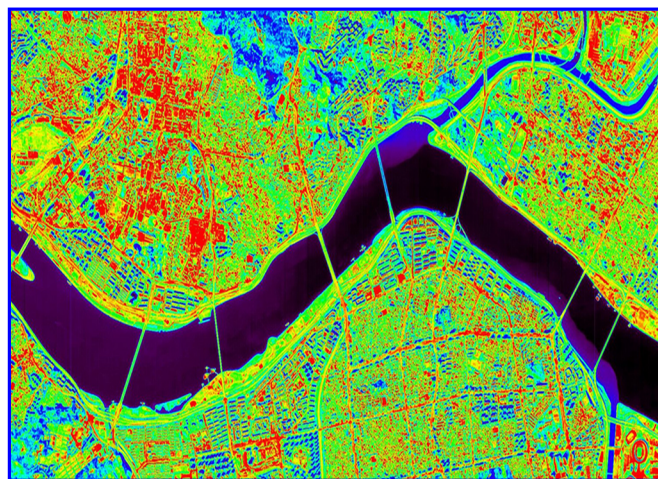


Рис. 12. Пример оценки индекса вегетации по МС-снимкам, полученным КК KompSat-3A



Рис. 13. Диаграмма основных видов дешифрирования МС-снимков, полученных ОЭА ДЗЗ высокого пространственного разрешения

**Спектральные каналы ОЭА ДЗЗ с пространственным разрешением 1 м и лучше  
и возможное применение информации, полученной с её помощью [2, 3, 12 – 15, 20, 21, 23 – 25, 27, 29]**

Наименование спектрального канала аппаратуры	Диапазон длин волн спектрального канала, мкм	Применение спутниковой информации в ДЗЗ и других приложениях
Видимый синий/Blue (Violet)	0,42 – 0,55	Получаемые данные используются для океанографических приложений и проведения атмосферных радиометрических коррекций данных ДЗЗ, в частности, при вычислении некоторых биофизических индексов, например, вегетации, NDVI, ARVI, SVI, EVI и т. д., а также – индекса IronOxide.
Видимый синий	0,42 – 0,52	Данная зона предназначена для лучшего отображения побережий, батиметрии, наносов, дифференциации грунта от растительности, а также – лиственной флоры от хвойной для определения типов леса, обнаружения искусственных сооружений и облегчения распознавания лесных пожаров на безоблачных снимках. В ней, кроме того, хорошо фрагментируются некоторые структурные горные породы, сильно рассеивающие синий свет и иногда – в зоне 2, т. е. в видимом зелёном.
Видимый зелёный	0,52 – 0,60	Данная зона соответствует максимальному коэффициенту отражения зелёной (здоровой) растительности и используется для таксации леса. Также используется для идентификации искусственных объектов ландшафта. Зона предназначена для отображения побережий, батиметрии, наносов; дифференциации осадков в мутных водах составления карт побережий. Она лучше подходит для выявления горных пород богатых 2-валентным железом по сравнению с 3-валентным.
Видимый красный	0,52 – 0,60	Зона канала нужна для того, чтобы различать множество разновидностей растений, т. е. для определения видового состава растений. Также она используется для определения границ почв и геологического оконтуривания (залежей, рудного тела, нефтяных полей), искусственных объектов. Она предпочтительна для горных пород и почв, богатых железом, особенно 3-валентным.
Ближний инфракрасный (NIR)	0,76 – 0,90	Зона особенно чувствительна к количеству вегетационной биомассы, представленной снятой сцене. Это полезно для идентификации сельскохозяйственных почв/культур, оценки урожайности, а также для определения береговых линий водных объектов на местности. Максимум интенсивности излучения хлорофилла от здоровой растительности получается в характеристике «красной границы» по разнице между сигналами в 3-й и 4-й зонах спектра. Растительность, загрязнённая нефтепродуктами, может также показать измеримое смещение на «красной границе». Канал NIR является очень важным для классификации лесов, определения породного состава, а также для мониторинга заражения лесов насекомыми-вредителями. Также он является ключевым при картографировании последствий ураганного ветра и при расчёте некоторых показателей, определяющих биофизические параметры растительности. Кроме того, используя данные ДЗЗ-канала NIR в комбинациях с изображениями в некоторых других спектральных каналах, вычисляются и оцениваются более 14 индексов, характеризующих снятый ландшафт, помогающих, кроме прочего, ускорять классификацию и дешифрирование его изображений, например, по количеству растительности или водных объектов и более точных контуров их береговых линий.
Крайний красный (RedEdge -RE)	0,69 – 0,73	Видеоданные данного канала служат для оценок содержания хлорофиллов а и b, протеина и нитрогенов растительности, а также позволяют использовать методики расчёта положения точки Red Edge, которая меняется в том числе и от возраста растения. Они могут применяться в сочетании с информацией, полученной в ближнем инфракрасном канале для расчёта относительно нового индекса $NDVIRE = (NIR-RE)/(NIR+RE)$ , который очень чувствителен к изменениям содержания растительного хлорофилла [3]. Индекс NDVIRE позволяет точно определить снижение содержания хлорофилла в листе лесного полога на самых ранних стадиях, в частности, из-за нашествия насекомых-вредителей или техногенных загрязнений, например, утечек природного газа из трубопроводов и хранилищ и т. д. Комбинируя данные каналов RE, БИК-2 и «зелёный», можно лучше анализировать детали по внутренней продуктивности с/х полей.

Данные по эффективности цветосинтеза PanShar-  
ping и аналогичным в обобщенном виде не найдены,  
но съёмочная ОЭА практически всех рассмотренных  
КА ДЗЗ двойного назначения позволяет его произве-  
сти при оптимальной пропорции 4:1 с помощью гео-  
информационной системы (ГИС) ArcGIS, некоторых  
свободно распространяемых ГИС и стандартных  
программных комплексов обработки данных ДЗЗ  
Image Processat, Image media centre (РФ), PCI Geoma-  
tica (Канада), ENVI, ERDAS IMAGINE (США) и др.

**Заключение.** Проведённый анализ данных, со-  
держащихся в рассмотренных источниках, позво-  
ляет сделать следующие выводы и замечания.

КК и КА ДЗЗ по уровню сложности ОЭА высо-  
кого пространственного разрешения можно услов-  
но разделить на две группы, обеспечивающие по-  
лучение исходно:

- метрических (геометрических и радиометриче-  
ских) точных снимков в целях многопрофильного  
оперативного автоматического и интерактивного  
дешифрирования, в том числе с «обучением» гео-  
привязки и ортотрансформирования, с использова-  
нием специальных программных комплексов  
(ERDAS IMAGINE, ENVI (оба – США), PCI  
Geomatica (Канада); Image processat, Image media  
centre (оба – Россия), Cognnition (Германия) и др.;

- неметрических снимков, в целях визуального  
дешифрирования и возможного ортотрансформи-  
рования, в основном с применением наземной опо-  
ры – цифровых моделей рельефа, снимков более  
высокого пространственного разрешения и других  
опорных данных, но с возможной потерей в части  
детальности и информативности.

Соответственно, производимые космические  
комплексы ДЗЗ с ОЭА по решаемым задачам мож-  
но разделить на:

- КА вспомогательного наблюдения (SkySat,  
DMC, CubeSat и др.), т. е. в основном второй груп-  
пы, не обеспечивающей метрические высококаче-  
ственные изображения;

- КА двойного назначения (независимо от фор-  
мы собственности): например, правительства США,  
Испании, Канады, Германии закупают метрически  
точные снимки у коммерческих операторов в госу-  
дарственных целях – в основном второй группы;

- разведывательные, которые по характери-  
стам ненамного превосходят аналоги двойного  
назначения или равны им (принадлежат госуда-  
рственным структурам) – только второй группы  
(в основном зарубежных производителей);

- КА двойного назначения с ОЭА высокого  
пространственного разрешения обеспечивают ре-

шение задач топографического и тематического  
(природного, хозяйственно-инфраструктурного) кар-  
тографирования территорий государств с масшта-  
бами от 1:10 000 и лучше.

Судя по числу строк формируемого изображения  
в секунду при режимах ВЗН [1, 3, 11, 16, 23, 24, 30] и  
развиваемым скоростям вращения вокруг осей их  
связанных систем координат (ССК), КА двойного  
назначения с ОЭА высокого пространственного  
разрешения обладают возможностями высокоско-  
ростной асинхронной съёмки. Об этом же свиде-  
тельствуют их возможности съёмки стереопар  
снимков с одного прохода на одном витке объек-  
тивом ОЭА с одним полем обзора.

Высоты полёта КА ДЗЗ со съёмочной с ОЭА с  
разрешением лучше 1 м в основном находятся в  
диапазоне от примерно 500 до 700 км, что наряду с  
разрешением увеличивает полосу обзора при отно-  
сительно невысоких геометрических искажениях  
изображений, которые первично получаютсЯ ОЭП  
ОЭА [30]. Также данные КА имеют возможности  
наклонной съёмки с отклонениями от надира до  
45 – 50° в конусе возможностей и малые времена  
перенацеливания с одного маршрута съёмки на  
другой в указанной полосе обзора; с учётом участ-  
ков траектории (интервалов времени) разгона, тор-  
можения и успокоения вращения КА и переходных  
процессов для обеспечения потребных угловых  
скоростей и ускорения вращения вокруг ц. м. во  
время съёмки Земли [3, 16, 28].

Следовательно, изученные выше КА ДЗЗ с ОЭА  
высокого пространственного разрешения – это в  
основном маневренные высокопроизводительные  
КА с асинхронной съёмкой поверхности Земли  
двойного назначения, у которых, вероятно, управ-  
ление ориентацией и стабилизацией непосредствен-  
но связано с параметрами съёмочной ОЭА и фор-  
мированием изображения её фотоприёмниками при  
съёмке заданных территорий.

Все рассмотренные современные иностранные  
КА двойного назначения с ОЭА высокого про-  
странственного разрешения, независимо от страны  
и фирмы производителя, для обеспечения высоких  
значений отношения сигнал/шум и контраста изоб-  
ражения, его сжатия и стандартных коррекций, как  
правило, имеют в своём составе:

1. ОЭА с высоким радиометрическим разрешением  
(т. е. с большим динамическим диапазоном, числом  
уровней квантования) от 11 до 14 бит/пикс., и для  
этого, соответственно, фотоприёмник с зарядовой  
связью (ФПЗС) с большой потенциальной ямой в  
40 0000 – 50 0000 ē и высокой квантовой эффективно-  
стью ~0,7 и более в зависимости от длины волны.

2. Фотоприёмники на основе ФПЗС с режимом ВЗН (или Time daley integration – TDI) заряда:

– с размером ФЧЭ (пикселя) не менее  $\sim 7,5 - 8$  мкм в ПК-каналах и не менее  $\sim 12 - 13$  мкм в МС-каналах;

– с антиблужингом (для исключения пропуска объектов за счёт перенасыщения ФПЗС);

– с аналоговым бинированием и другими видами обработки зарядового «изображения»;

– фотоприёмники на основе линейек ФПЗС (ЛФПЗС) с режимом ВЗН, имеющие два считывающих регистра, т. е. «передний» и «задний», для обеспечения реверсивной съёмки (вперед и назад по отношению к орбитальному движению с заданными азимутами съёмки и разворотами КА) без значительных разворотов (около  $180^\circ$ ) КА вокруг ц. м. для донациливания по заданному маршруту при его съёмке, что значительно повышает производительность КА, а также позволяет обеспечить равенство кинематических условий съёмки земной поверхности на нисходящем и на восходящем витке орбиты и конвергентную стереосъёмку с одного прохода на одном витке.

3. Достаточно светосильные, как правило, полностью зеркальные, длиннофокусные оптические системы ( $f_{\text{об}} = 5,5 - 13,3$  м) съёмочной ОЭА, преимущественно с применением оптической схемы Корша (более 10 КА), с полем обзора  $1,2 - 1,5^\circ$  и более.

4. ОЭС с достаточно высоким угловым разрешением, составляющим примерно  $\sim 0,20 - 0,21$  угл. с, практически мало зависящим от высоты КА (по совокупности проанализированных); исключение составляют КА WorldView-1, -2, -3, -4, у которых данное соотношение составляет  $\sim 0,124$  угл. с при пространственном разрешении  $0,5 - 0,31$  м при высоте съёмки, сравнимой с другими аналогичными КА.

Исключением из перечисленного выше являются краудфандинговые экспериментальные коммерческие КА SkySat-1,-2 (США), имеющие узкополосную ОЭА ( $\sim 0,5^\circ$ ) с зеркальной ОЭС с узкой полосой захвата, с фокусным расстоянием 3,6 м и размером ФЧЭ каждой из 4-х кадровых матриц  $6,5 \times 6,5$  мкм, используемых в ПК- и МС-каналах (по режиму ВЗН данные отсутствуют). Фактическая высота полёта данных малых КА составляет около 450 км на не корректируемых орбитах в отличие от заявленной солнечно-синхронной орбиты с высотой 600 км. При этом изображения Земли с данных КА не считаются эталоном [19].

В части применяемых ЛФПЗС с ВЗН некоторое исключение представляют собой ФПЗС с режимом ВЗН ОЭА российских КА «Ресурс-П2», «Барс-1», размер пикселя ФПЗС которых в

ПК-канале составляет 6 мкм [3]. Аналогично неметрическим снимкам изображения Земли снимки, полученные средствами данных КА и КС, далеки от эталонов [1, 19].

Анализ конструкции съёмочной ОЭА высокого пространственного разрешения, с помощью которой получают метрически верные снимки Земли для решения задач высокоточного дешифрирования и картографирования с масштабом не хуже  $M = 1:10000$ , кроме прочего, показал следующее.

Конструкция съёмочной ОЭА имеет [16]:

– высокие собственные частоты 70 Гц и более, т. е. является достаточно жёсткой;

– небольшие относительно фокусного расстояния габариты и, соответственно, массу и энергопотребление, что в основном достигаются за счёт применения прогрессивных на настоящее время оптических схем Корша, Кука, а также современных материалов, из которых изготовлены зеркала (Zerodur, карбид кремния) и несущие конструкции телескопов.

Анализ сопряжения конструкции ОЭА с конструкцией КА в части датчиков, служащих для её наведения на заданные территории Земли и измерений её фактического положения в пространстве, показал следующее:

– съёмочная ОЭА монтируется статически определимо на конструкции, созданной в виде специального прецизионного размеростабильного конструктивного модуля (ПРСМ) с платформой, имеющей достаточно большую строительную высоту, жёсткость и другие характеристики;

– на конструкциях такого ПРСМ монтируются ОЭА и все ЗД системы управления движением (СУД) КА, а также её инерциальные измерители (датчики) угловой скорости (ИИУС) вращения КА вокруг осей его связанной системы координат (ССК), например, типа волоконно-оптического датчика угловых скоростей (ВОДУС) или аналогичных приборов, функционирующих на ином принципе измерений.

Для реализации задачи получения исходных снимков высокого пространственного разрешения производителями КА широко используется математическое моделирование движения КА совместно с работой ОЭА и системой ориентации. Результатом такого моделирования является оптимальное проектирование КА (и ОГ из нескольких КА), с точки зрения выполнения требований по геометрическим и радиометрическим искажениям снимков, производительности и др. [5, 10, 22, 30 – 34].



Такое моделирование значительно экономит время и ресурсы, необходимые для проектирования и испытаний ОЭА, КА и КК в целом, а также нивелирует нештатные ситуации принципиально неустраняемые при эксплуатации КА.

### Литература

1. Меньшиков В. А., Перминов А. Н., Рембеза А. И., Урличич Ю. М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф / В. А. Меньшиков и др. – М. : Машиностроение, 2014. – 706 с.
2. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.
3. Еремеев В. В. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В. В. Еремеева. – М. : Физматлит, 2015. – 460 с.
4. Шухостанов В. К., Ведешин Л. А., Цыбанов А. Г. Исследование тонкой структуры гиперспектральной космической информации объектов техносферы и биосферы. Отделение «Диагностика и безопасность техносферы РАЕН, РАН» / В. К. Шухостанов и др. // Тез. докл. Седьмой открытой Всероссийской конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – М. : ИКИ РАН, 2009.
5. Батраков А. С. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67. – № 7. – С. 92 – 97.
6. Остриков В. Н. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке методом слепого поиска // Сб. трудов научно-технической конф. «Техническое зрение в системах управления 2011» / Санкт-Петербургский филиал ОАО «КБ «Луч».
7. Сикорский Д. А. Метод оценки пороговой частотно-энергетической характеристики оптико-электронного тракта. Исследовано в России : [Электронный журнал]. – Режим доступа : <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/112.pdf>.
8. Шеннон Р. Проектирование оптических систем. – М. : Наука, 1983. – 431 с.
9. Константинов И. С., Щербинина Н. В., Жилев М. Ю., Винтаев В. Н., Ушакова Н. Н. Адаптивная коррекция процесса восстановления резкости космических изображений высокого пространственного разрешения / И. С. Константинов и др. // Научные ведомости БГУ. – 2014. – № 8 (179). – С. 189 – 200.
10. Edited by Wiley J. Larson, James R. Wertz. Space Mission Analysis and Design. Microcosm. Inc. Published Jointly by Microcosm. Inc., Torrance, California, Kluwer Academic Publishers Dordrecht. Boston, London, 1999.
11. Gwendoline Blanchet, Laurent Lebegue, Sébastien Fourest, Christophe Latry, Florence Porez-Nadal, Sophie Lacherade, Carole Thiebaut / Pleiades-HR innovative techniques for radiometric image quality commissioning. CNES, France // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
12. Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика, 2009. – № 3. – С. 28 – 33.
13. Жилев М. Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинации при цифровой обработке // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 56 – 66.
14. Eitel Jan, Vierling Lee, Litvak Marcy, Long Dan, Schulthess Urs, Ager Alan. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland, Elsevier Editorial System(tm) for Remote Sensing of Environment, in Print. [www.fs.fed.us/wwetac/old/projects/PDFs/Eitel.Remoute.SensEnv.2011.pdf](http://www.fs.fed.us/wwetac/old/projects/PDFs/Eitel.Remoute.SensEnv.2011.pdf).
15. Buhler Yves, Meier Lorenz, Meister Roland. Continuous, high resolution snow surface type mapping in high alpine terrain using WorldView-2 data / WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF.
16. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : // <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/>.
17. Официальный сайт Корейского института аэрокосмических разработок (KARI) – агентство по космосу и авиации Республики Корея : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.kari.re.kr/eng.do>.
18. Информация о космических аппаратах SkySat на сайте компании «Терра Белла», входящей в Google : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : // [terrabella.google.com/?s=in-action&c=case-us/](http://terrabella.google.com/?s=in-action&c=case-us/).
19. Сайт Всемирной метеорологической организации : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : // [www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/1105](http://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/1105).
20. Bishop Christopher M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer Science+Business Media, LLC, 2006.
21. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.
22. The role of small satellites in NASA and NOAA earth observation programs Committee on Earth Studies Space Studies Board Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications National Research Council NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington, D.C. Copyright 2000 by the National Academy of Sciences. All rights reserved. Printed in the United States of America.
23. WHITE PAPER. The Benefits of the 8 Spectral Bands of WorldView-2, August 2009 : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.digitalglobe.com](http://www.digitalglobe.com).
24. GMES Sentinel-2 Mission Requirements Document. issue1, revision 5. Data: 15/07/2005. GMES Sentinel-2 Mission Team, MikeRast (EOP-SML) : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://sentinel.esa.int/documents/247904/1848151/Sentinel-3-Mission-Requirements-Traceability>.
25. Ковалевская Н. М., Хабидов А. Ш., Фёдорова Е. А. Определение пространственного распределения глубин на основе многоспектральных данных высокого пространственного разрешения на Новосибирском водохранилище // Тез. докл. десятой Всероссийской открытой ежегодной конф. «Современные проблемы дистанционного зондиро-

вания Земли из космоса». – М. : ИКИ РАН, 2012.

26. Дворкин Б. А. Импортзамещение в сфере геоинформационных технологий и ДЗЗ // Геоматика, 2015. – № 1. – С. 17 – 28.

27. Richards John A., Jia Xiuping. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. – Germany. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.

28. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга : Уч. пособие. – М. : Бином, 2009. – 234 с.

29. Жиленёв М. Ю., Винтаев В. Н. Формула расчёта движения изображения при орбитальной съёмке планет опико-электронной аппаратурой // Телекоммуникации. – 2011. – № 7. – С. 2 – 7.

30. Jacobsen K. Characteristics of very high resolution optical satellites for topographic mapping : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/ISPRS-Hannover\\_2011/contribution161.pdf](https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/ISPRS-Hannover_2011/contribution161.pdf).

31. Батраков А. С. Общая модель для расчёта и анализа скорости сдвига изображения при съёмке земной поверхности // Исследование Земли из космоса. – 1989. – № 4. – С. 99 – 106.

32. Бутырин С. А. Кинематический синтез программного углового движения космического аппарата при опико-электронной съёмке Земли // Известия Самарского научного центра РАН. – 2007. – Т. 9. – № 3.

33. Сомов Е. И., Бутырин С. А., Бутко А. В. Гиросиловое наведение спутника при площадном землеобзоре на основе последовательности маршрутов сканирующей съёмки / Е. И. Сомов и др. // Сб. материалов XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб. : ОАО «ЦНИИ Электроприбор», 2011. – С. 267 – 276.

34. Лебедев В. В., Гансвинд И. Н. Проектирование систем космического мониторинга. – М. : Наука, 2010. – 388 с.

Поступила в редакцию 10.08.2017

*Леонид Алексеевич Макриденко, доктор технических наук, генеральный директор, т. (495) 365-56-10.*

*Сергей Николаевич Волков, доктор технических наук, 1-й заместитель генерального директора, т. (495) 366-42-56.*

*E-mail: vniiem@orc.ru.*

*Владимир Яковлевич Геча, доктор технических наук, заместитель генерального директора, т. (495) 365-26-69.*

*Михаил Юрьевич Жиленёв, старший научный сотрудник, т. (495) 366-71-89.*

*Сергей Геннадьевич Казанцев, доктор технических наук, начальник отдела, т. (495) 366-71-89, e-mail: sg.kazantsev@gmail.com.*

*(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## HIGH RESOLUTION EARTH REMOTE SENSING SATELLITES. ANALYTICAL REVIEW OF FOREIGN INFORMATION RESOURCES

**L. A. Makridenko, S. N. Volkov, V. Ia. Gecha,  
M. Iu. Zhilenev, S. G. Kazantsev**

*The article discusses major trends in design technology of Earth Remote Sensing Satellites (ERS Satellites) equipped with high resolution optoelectronics. Regularities have been also considered in construction and operation of orbital facilities and optoelectronic equipment of Earth Observing Systems being in operation now and also planned for launch in the near future. The article provides information about basic technical characteristics of the following ERS Satellites – KompSat-1/Arirang-1 – KompSat-5 of South Korea; ASNARO-1 of Japan; Pleiades-1A, Pleiades-1B of France; Deimos-2 of Spain; Göktürk-1A, Göktürk-1B of Turkey; IKONOS-II, GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-4, SkySat-1, SkySat-2, BlackSky of the USA.*

**Key words:** *high resolution optoelectronics; spectral radiance, topographic survey, identification of images, verification and validation, pan-chromatic and multi-spectral imaging.*

### List of References

1. Menshikov V. A., Perminov A. N., Rembeza A. I., Urlichich Iu. M. Fundamentals of evaluating and designing space systems for monitoring and forecasting natural and man-made disasters / V. A. Menshikov et al. – М. : Mashinostroenie [Машиностроение], 2014. – 706 p.

2. Shovengerdt R. A. Remote sensing. Methods and models in image processing / R. A. Shovengerdt. – М. : Tekhnosfera [Техносфера], 2010. – 560 p.

3. Ereemeev V. V. Modern technologies for processing Earth's remotely-sensed data / Under the editorship of V. V. Ereemeev. – М. : Phizmatlit [Физматлит], 2015. – 460 p.

4. Shukhostanov V. K., Vedeshin L. A., Tsybanov A. G. Fine structure analysis of hyperspectral space data from technospheric and biospheric objects. Department «Diagnostic Assessment and Safety of Technosphere» of the RUNS RAN (Russian Academy of Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences) / V. K. Shukhostanov et al. // Abstracts of

- the VII<sup>th</sup> Open All-Russia Conference «Contemporary issues of the Earth remote sensing from space». – M. : IKI RAN (Space Research Institute of the RAN), 2009.
5. Batrakov A. S. Mathematical model for forecasting linear resolution of space optoelectronic remote sensing systems // *Opticheskii Zhurnal* [Оптический журнал]. – 2000. – Vol. 67. – Issue 7. – Pp. 92 – 97.
6. Ostrikov V. N. Evaluation of point spread function of an arbitrarily selected image using blind scan method // Proceedings of Scientific-Technical Conference «Computer Vision in Control Systems, 2011» / St. Petersburg branch office of JSC «Design Bureau «Lutch» [«KB LUTCH»].
7. Sikorskii D. A. Method for evaluating threshold frequency-energetic characteristic of optoelectronic channel. Study conducted in Russian Federation: [Electronic journal]. – Available at: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/112.pdf>.
8. Shannon R. Design of optical systems. – M. : Nauka [Наука], 1983. – 431 p.
9. Konstantinov I. S., Shcherbinina N. V., Zhilenev M. Iu., Vintaev V. N., Ushakova N. N. Adaptive correction method for restoration of high resolution space image sharpness / I. S. Konstantinov et al. // *Scientific Bulletin of BGU* [Belgorod National Research University]. – 2014. – Issue 8 (179). – Pp. 189 – 200.
10. Edited by Wiley J. Larson, James R. Wertz. Space Mission Analysis and Design. Microcosm. Inc. Published Jointly by Microcosm. Inc., Torrance, California, Kluwer Academic Publishers Dordrecht. Boston, London, 1999.
11. Gwendoline Blanchet, Laurent Lebegue, Sébastien Fourest, Christophe Latry, Florence Porez-Nadal, Sophie Lacherade, Carole Thiebaut / Pleiades-HR innovative techniques for radiometric image quality commissioning. CNES, France // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
12. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indexes // *Geomatika* [Геоматика], 2009. – Issue 3. – Pp. 28 – 33.
13. Zhilenev M.Iu. Review of ERS multispectral data applications and their combinations in digital processing // *Geomatika* [Геоматика]. – 2009. – Issue 3. – Pp. 56 – 66.
14. Eitel Jan, Vierling Lee, Litvak Marcy, Long Dan, Schulthess Urs, Ager Alan. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland, Elsevier Editorial System(tm) for Remote Sensing of Environment, in Print. [www.fs.fed.us/wwetac/old/projects/PDFs/Eitel.RemouteSensEnv.2011.pdf](http://www.fs.fed.us/wwetac/old/projects/PDFs/Eitel.RemouteSensEnv.2011.pdf).
15. Buhler Yves, Meier Lorenz, Meister Roland. Continuous, high resolution snow surface type mapping in high alpine terrain using WorldView-2 data / WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF.
16. [Electronic source]. – Available at: // <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/>.
17. Official website of Korea Aerospace Research Institute (KARI): Space and Aeronautic Agency of Korea Republic : [Electronic source]. – Available at: <http://www.kari.re.kr/eng.do>.
18. Information on SkySat Satellites published on the official website of Terra Bella Company (Google's affiliated Company): [Electronic source]. – Available at: // [terrabella.google.com/?s=in-action&c=case-us/](http://terrabella.google.com/?s=in-action&c=case-us/).
19. Website of the World Meteorological Organization : [Electronic source]. – Available at: // [www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/1105](http://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/1105).
20. Bishop Christopher M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer Science+Business Media, LLC, 2006.
21. Chandra A. M., Gosh S. K. Remote sensing and geographic information systems. – M. : Tekhnosfera [Техносфера], 2008. – 312 p.
22. The role of small satellites in NASA and NOAA earth observation programs Committee on Earth Studies Space Studies Board Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications National Research Council NATIONAL ACADEMY PRESS. Washington, D. C. Copyright 2000 by the National Academy of Sciences. All rights reserved. Printed in the United States of America.
23. WHITE PAPER. The Benefits of the 8 Spectral Bands of WorldView-2, August 2009 : [Electronic source]. – Available at: [www.digitalglobe.com](http://www.digitalglobe.com).
24. GMES Sentinel-2 Mission Requirements Document. issue1, revision 5. Data: 15/07/2005. GMES Sentinel-2 MissionTeam, MikeRast (EOP-SML) : [Electronic source]. – Available at: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/1848151/Sentinel-3-Mission-Requirements-Traceability>.
25. Kovalevskaja N. M., Khabidov A. Sh., Fedorova E. A. Evaluation of water depth spatial distribution of the Novosibirsk reservoir performed on the basis of high resolution multispectral imagery // Abstracts of the X<sup>th</sup> All-Russia Open Conference «Contemporary issues of the Earth remote sensing from space». – M. : IKI RAN (Space Research Institute of the RAN (Russian Academy of Sciences)), 2012.
26. Dvorkin B. A. Import substitution in geo-information technologies and ERS (Earth remote sensing) // *Geomatika* [Геоматика]. – 2015. – Issue 1. – Pp. 17 – 28.
27. Richards John A., Jia Xiuping. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. – Germany. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
28. Baklanov A. I. Monitoring and observing systems: Tutorial. – M. : Binom [Бином], 2009. – 234 p.

29. Zhilenev M. Iu., Vintaev V. N. Formula for image motion computation performed during on-orbit imaging of planets using optoelectronic imaging cameras // Telekommunikatsii [Телекоммуникации]. – 2011. – Issue 7. – Pp. 2 – 7.
30. Jacobsen K. Characteristics of very high resolution optical satellites for topographic mapping : [Electronic source]. – Available at: <https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/ISPRS-Hannover 2011/ contribution161.pdf>.
31. Batrakov A. S. General model for computing and evaluating speed of image motion occurring during Earth's surface imaging // Earth exploration from Space [Исследования Земли из космоса]. – 1989. – Issue 4. – Pp. 99 – 106.
32. Butyrin S. A. Kinematic synthesis of Satellite's program angular motion occurring during Earth optoelectronic imaging // Bulletin of the Samara Scientific Center of the RAN (Russian Academy of Sciences). – 2007. – Vol. 9. – Issue 3.
33. Somov E. I., Butyrin S. A., Butko A. V. Satellite guidance using powered gyros for coarse Earth surveying according to scanning tracks sequence / E.I. Somov et al. // Informational package of the XVIII<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg : «Concern CSRI Electropribor» JSC, 2011. – Pp. 267 – 276.
34. Lebedev V. V., Gansvind I. N. Design of space monitoring systems. – М. : Nauka [Наука], 2010. – 388 p.

*Leonid Alexeevich Makridenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Director General,*  
*tel.: (495)365-56-10, e-mail: vniiem@orc.ru.*

*Sergei Nikolaevich Volkov, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), First Deputy Director General,*  
*tel.: (495)366-42-56, e-mail: vniiem@orc.ru.*

*Vladimir Iakovlevich Gecha, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Deputy Director General,*  
*tel.: (495)365-26-69.*

*Mikhail Iurevich Zhilenev, Senior Researcher, tel.: (495)366-71-89.*

*Sergei Gennadevich Kazantsev, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Department,*  
*tel.: (495)366-71-89, e-mail: sg.kazantsev@gmail.com.*  
*(JC «VNIEM Corporation»).*