

УДК 681.7.069.32 +629 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.14.27

Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения (часть II)

А. И. Бакланов, к. т. н., optecs@samspace.ru

Филиал АО РКЦ «Прогресс»–НПП «ОПТЭК», Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. Настоящая статья является продолжением (второй частью) статьи, опубликованной ранее [1]. Рассмотрены основные тенденции развития мировой группировки космических оптико-электронных систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения. Большое внимание уделено построению больших группировок однотипных и разнотипных спутников зарубежными компаниями и операторами, такими как DigitalGlobe, Planet, BlackSky, Satellogic, а также планам развертывания таких группировок в Китае, Франции, Индии, Японии, Канаде и др. Дано описание некоторых микроспутников с оптико-электронной аппаратурой и новых схем наблюдения. Отмечается, что в составе КА ДЗЗ все чаще используются либо отдельная аппаратура, либо отдельные режимы съемки для получения данных (видеороликов) в форматах видео FHD и даже UFHD (4K). Режимы «живого видео» так же, как развертываемые многоспутниковые группировки, нацелены на высокооперативное получение и обновление данных. Подробно анализируются два основных направления развития оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли высокого и сверхвысокого разрешения на основе традиционных «больших» спутниковых платформ и инструментов, а также микро- и миниспутниковых группировок. Проводится сравнительный анализ применяемых технических решений и достигаемых характеристик, позволяющий оценить возможные области применения подобных систем в будущем.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, ДЗЗ, оптико-электронные спутники высокого и сверхвысокого разрешения, пространственное разрешение, информационная производительность, оперативность наблюдения, группировки спутников ДЗЗ, видео из космоса

New Horizons of Space Systems of Optical-Electronic Observation of High Resolution Earth (Part II)

A. I. Baklanov, Cand. Sci. (Engineering), optecs@samspace.ru

Branch of JSC RSC “Progress”, SPE “OPTEKS”, Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract. This article is a continuation (second part) of the article published earlier [1]. The main trends in the development of the global grouping of space optical and electronic observation systems of high and ultra-high resolution are considered. Much attention is paid to the construction of large groups of satellites of the same type and different types by foreign companies and operators, such as DigitalGlobe, Planet, BlackSky, Satellogic, as well as plans to deploy such groupings in China, France, India, Japan, Canada etc. The description of some microsatellites with optical-electronic equipment and new observation systems is given. It is noted that, Earth remote sensing satellites increasingly employ either separate equipment or separate recording modes for receiving data (videos) in FHD and even UFHD (4K) video formats. Live video modes, as well as the new multi-satellite groupings, are aimed at high-speed acquisition and update of information. Two main directions for the development of high-resolution and ultra-high resolution optical-electronic remote sensing systems based on traditional large satellite busses and instruments, as well as micro- and mini-satellite constellations, are analyzed in detail. A comparative analysis of the applied technical solutions and the achieved characteristics is carried out, allowing evaluating the possible applications of such systems in the future.

Keywords: Earth remote sensing, ERS, optical and electronic satellites of high and ultra-high resolution, spatial resolution, information performance, observation speed, ERS constellations, video from space

Группировки оптико-электронных спутников высокого и сверхвысокого разрешения

До недавнего времени основным способом обеспечения высокой периодичности был запуск спутника наблюдения на достаточно высокую орбиту, что позволяло расширить полосу обзора. В последние годы четко обозначился альтернативный способ обеспечения высокой периодичности наблюдения, основанный на развертывании многоспутниковых группировок оптико-электронного наблюдения высокого разрешения на относительно низких орбитах. Здесь можно провести определенную аналогию со связью через геостационарные спутники и низкоорбитальные группировки Iridium и Global-Star. Сегодня в ДЗЗ высокого разрешения происходят процессы подобные тем, что происходили в спутниковой телефонии и передаче данных в конце 90-х гг. прошлого века и начале 2000-х гг. Потенциальная стоимость услуг, создаваемых на основе постоянно и быстро обновляемых данных съемки, может оправдать создание многоспутниковых низкоорбитальных систем. Принципиальную роль в данном вопросе играет многократное снижение массы и стоимости как самих микро- и миниспутников ДЗЗ высокого разрешения, так и их полезной нагрузки, а также, соответственно, стоимости услуг по выведению КА малой массы на орбиту. Уже сегодня стало нормой выведение на орбиту сразу нескольких однотипных аппаратов или даже нескольких десятков аппаратов.

Конечно, группировки оптико-электронного наблюдения спутников существовали и ранее. Они создавались и развертывались постепенно. Большинство таких космических систем, как, например, в американской компании DigitalGlobe, постепенно обновляются и наращиваются. Нужно отметить, что группировками оптико-электронных спутников высокого и сверхвысокого разрешения обладают не только США (DigitalGlobe), но и Россия [2, 3] (3 спутника «Ресурс-П», 3 спутника «Канопус-В», «Канопус-В-ИК»), Франция (Pleiades-1A, -1B и Spot-6, -7) [4, 5], Корея (KompSat-2, KompSat-3, KompSat-3A). После запуска КА IGS-O Demo и IGS-05 японская группировка спутников видовой

разведки увеличилась до 7 космических аппаратов. Кроме того, планируется развертывание группировки с разрешением 0,5 м на основе малогабаритных КА ASNARO, первый из которых был запущен в 2014 г. Китай постоянно наращивает свою группировку спутников ДЗЗ, причем движется сразу по нескольким направлениям: картография (Tianhui, Ziyuan-3), высокое и сверхвысокое разрешение (ряд спутников из серий Yaogan, Gaofen, Jilin-1) [6, 7]. Делая ставку в основном на собственные силы и промышленность, китайские специалисты не пренебрегают и зарубежным опытом. Так, в 2015 г. на орбиту одним пуском были выведены сразу три спутника ДМС-3 с разрешением 1 м, разработанные и изготовленные специалистами SSTL (Великобритания) по заказу Китая. В 2016 г. на орбиту одним пуском доставлена и приступила к работе пара легких (масса всего около 500 кг) китайских спутников, имеющих коммерческое наименование SuperView-01 и SuperView-02 (Gaojing-1-01 и Gaojing-1-02.) с разрешением 0,5 м [8]. В начале 2018 г. на орбиту выведены еще два таких аппарата, а до 2022 г. планируется развернуть группировку из 16 таких аппаратов и еще 4–6 КА PCA.

Идея создания группировок коммерческих спутников ДЗЗ высокого разрешения не нова. Еще в 2000 г., когда на орбиту был выведен израильский оптико-электронный спутник EROS-A с разрешением 1,9 м, планировалось, что в ближайшее время будет развернута группировка из 6 таких миниспутников. Однако время шло, а эта группировка так и не появилась. Только в 2006 г. на орбите появился еще один израильский гражданский спутник EROS-B с улучшенными характеристиками. По всей видимости, тогда, в начале 2000-х гг., еще не сложилась коммерческая потребность в быстром обновлении данных высокого разрешения и в высокочастотной съемке и контроле как отдельных объектов, так и больших территорий, вплоть до постоянного обновления данных на всю Землю.

Первым шагом к эре космических коммерческих группировок спутников ДЗЗ высокого разрешения можно считать вывод на орбиту в 2008 г. сразу пяти оптико-электронных миниспутников RapidEye с разрешением 6,5 м. Эта группировка спутников, с учетом характеристик аппаратуры, ориентирована в основном на оперативное

получение данных в интересах сельского и лесного хозяйств.

С 2013 г. компания Planet Labs начала реализовывать свои планы по созданию 3U-кубсатов Dove [9] (Flock) (рис. 1) с разрешением 3–5 м. В 2015 г. компания, переименованная в Planet, выкупила у Black Bridge обанкротившуюся к тому времени группировку RapidEye. Это объединение группировок одним оператором говорит не только о сохранении приоритетов сбора данных для сельского и лесного хозяйств, но и о постановке новых задач, нацеленных на постоянный оперативный контроль промышленных объектов, транспортных сухопутных и морских перевозок и т. п. По заявлениям компании Planet, именно за эти оперативные данные сегодня готовы платить заказчики. Поэтому компания поставила перед собой задачу оперативной съемки всей поверхности Земли за одни сутки.

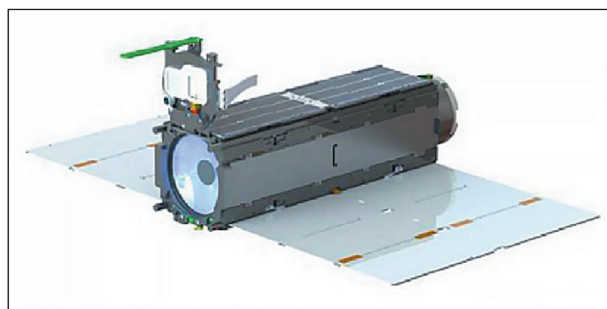


Рис. 1. Внешний вид спутника Dove (Flock)

На конец февраля 2017 г. на орбите работало уже 144 наноспутника Flock [10] различной модификации. На рис. 2 столбиками показано количество ежегодно запускавшихся спутников типа «Dove», а графиком — количество реально работающих наноспутников из общего числа выведенных на орбиту. На этом этапе было заявлено, что компания в этот период достигла своей основной цели и создала группировку, способную получать изображение каждой точки на Земле с разрешением до 3,7 м с интервалом не более 24 ч: «Селфи Земли каждые 24 часа». По замыслу, группировка этих спутников массой 4,5 кг должна насчитывать более 200 аппаратов.

Развертывание и поддержание численности группировки спутников Flock продолжилось,

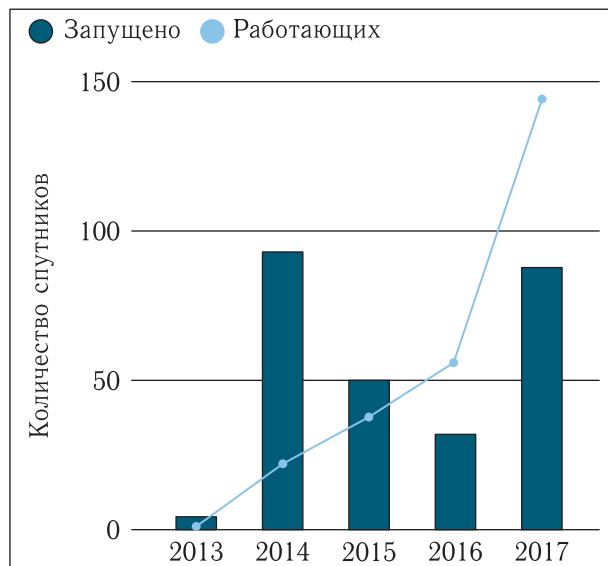


Рис. 2. График развертывания системы спутников Flock (Dove)

и 14 июля 2017 г., попутно с запуском КА «Канопус-В-ИК», на орбиту было доставлено еще 48 кубсатов типа Dove. В течение всего периода развертывания спутники выводились попутными запусками на орбиты, близкие к основным космическим аппаратам, а также к МКС. В результате группировка существует на самых разных орбитах как по высоте, так и по наклонению. Пространственное разрешение также различное и составляет от 2,7 до 5 м. Тем не менее основная часть (около 3/4) находится на солнечно-синхронных орбитах и имеет разрешение около 3,7 м. Планируется, что суточная производительность системы составит 150 млн км².

Полезная нагрузка типичного спутника Dove представляет собой телескоп Максудова–Кассегрена диаметром 90 мм и фотоприемное устройство на основе кадровой ПЗС-матрицы с фильтром Байера, обеспечивающим классические R (610–700 нм)-, G (500–590 нм)-, B (420–530 нм)-диапазоны цветного изображения. Фокусное расстояние телескопа 1140 мм. Интересно отметить, что собственно телескоп занимает 11/12 объема всего спутника. По мере развития было создано три генерации полезной нагрузки. У первого поколения оптическая система содержала всего два оптических элемента, а фотоприемная матрица имела формат 11 Мп. Спутники одного из первых поколений, запуская-

шиеся с МКС на орбиту высотой 420 км, имели разрешение 2,7 м и могли снимать площадку $10,9 \times 7,3 \text{ км}^2$ (79 км^2). В дальнейшем телескоп получил конструкцию из углепластика и стал содержать уже 5 оптических элементов (т.е. добавился линзовый корректор). Поле зрения телескопа увеличилось, качество изображения значительно улучшилось, и вместе с ним стала использоваться матрица форматом 29 Мп. Спутники с таким инструментом называют Flock-3P. С высоты 475 км проекция пиксела составляет 3,73 м, а размер снимаемого кадра $24,6 \text{ км} \times 16,4 \text{ км}$, т.е. 405 км^2 . Точность географической привязки — около 20 м (СЕ90). В некоторых публикациях указывается, что ожидается генерация аппаратуры с дополнительным четвертым спектральным каналом в области ближнего ИК-диапазона (760–900 нм).

Аппаратура радиолинии выполнена из коммерчески доступных компонентов (разработанных для сотовой связи) и работает в X-диапазоне (8025–8400 МГц) со скоростью от 12,5 до 120 Мбит/с. Мощность высокочастотного передатчика составляет 2 Вт.

Прием информации осуществляется наземными станциями с приемными антеннами диаметром 4,5–8 м. Для приема целевой информации могут использоваться 36 антенн, размещенных в 12 районах земного шара. Потенциально созданная наземная сеть может принимать и обрабатывать до 6 Тбайт информации в сутки от 150 спутников. Все процессы по управлению группировкой спутников и приемом информации максимально автоматизированы. По сообщениям компании, для этого постоянно задействовано всего несколько человек.

В 2017 г. компания Planet сделала следующий шаг в развитии своего бизнеса и приобрела у Google группировку спутников SkySat с разрешением лучше 1 м. 3 декабря 2018 г. на орбиты были доставлены уже 14-й и 15-й космические аппараты SkySat-C12 SkySat-C13. В настоящее время на орбите находятся 15 таких МКА (см. табл. 1, 2 [1]). Масса каждого из первых трех спутников SkySat около 90 кг [11]. Последующие аппараты SkySat-C2–C13 оснащаются двигательной установкой для поддержания орбиты и баллистического построения системы (рис. 3). Масса таких аппаратов на 30 кг больше. Планируется, что



Рис. 3. Два поколения КА SkySat

в будущем группировка будет доведена до 24 КА, что обеспечит возможность съемки любого объекта в средних широтах до 8–10 раз в сутки, т.е. с периодичностью 2–3 ч.

Каждый SkySat [12] оснащен телескопом по схеме Ричи–Кретьена–Кассегрена с фокусным расстоянием 3,6 м. В фокальной плоскости установлены 3 матричных КМОП-фотоприемника форматом 2560×2160 пикс (5,5 Мпикс). Размер пикселей 6,5 мкм. Расположение матриц в фокальной плоскости показано на рис. 4. Верхняя половина детектора используется для получения панхроматических изображений. Нижняя разделена на 4 полосы, накрытые светофильтрами с синим, зеленым, красным и ближним инфракрасным каналами. Проекция пикселей для первых двух аппаратов составляет 1,1 м. После наземной обработки (передискретизации) разрешение составляет 0,9 м. На последующих спутниках SkySat разрешение составляет 0,7 м и достигается за счет снижения высоты орбиты.

Основной особенностью оптико-электронной аппаратуры спутников Skysat является то, что съемка ведется кадрами с частотой около 40 Гц. Время накопления (экспозиции) минимизируется, чтобы не было «смаза» изображения. Каждый кадр сжимается с использованием алгоритма JPEG2000, сохраняется в памяти общим объемом 768 ГБ и передается на наземные станции со скоростью 450 Мбит/с. На наземной станции множество отдельных перекрывающихся кадров изображения накладываются друг на друга и суммируются, обеспечивая повышение сигнала и отношения сигнал/шум. В результате получается снимок

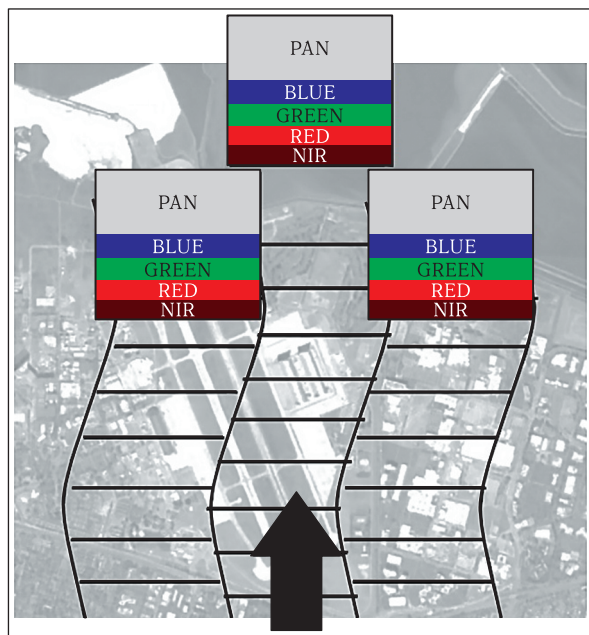


Рис. 4. Расположение КМОП-матриц SkySat и схема съемки

с полосой захвата 8 км и динамическим диапазоном 11 разрядов.

Положительным моментом такого режима съемки является существенное снижение требований к точности ориентации и стабилизации космического аппарата в момент съемки (рис. 4). Это облегчает и удешевляет системы космического аппарата и дает выигрыш в массе и стоимости. Основная тяжесть обработки ложится на наземные алгоритмы, реализующие такой цифровой ВЗН. Однако «платой» за это является существенное увеличение объема передаваемой на Землю информации в расчете на один пиксель. Даже с учетом сжатия количество информации на один пиксель вырастет приблизительно пропорционально количеству кадров, используемых при суммировании. Соответственно уменьшится суточная производительность съемки, выраженная в отснятой площади. Кроме того, для получения качественного изображения с высоким отношением сигнал/шум требуется прибегать к тангажному замедлению и увеличению экспозиции в каждом отдельном кадре. Это сближает спутники SkySat с КА EROS-A и OrbView-3, а также Cartosat-2, имевшими в фокальной плоскости только линейные фотоприемники ПЗС и осуществлявшими съемку

с тангажным замедлением. Однако использование двухкоординатных матриц дает возможность увеличения сигнала за счет суммирования отдельных кадров, как это описано выше. Можно показать, что при прочих равных условиях качество изображения, полученное с использованием «классических» матриц ПЗС-ВЗН, будет лучше, особенно в режимах с синхронной съемкой без тангажного замедления. То же можно сказать и об информационной производительности. Однако в данном проекте приоритеты были, видимо, расставлены в пользу массовых и стоимостных характеристик.

Сочетание тангажного отслеживания и покадровой съемки с частотой до 40 Гц обеспечивает получение видеороликов, как это было описано выше. За время съемки одного видеоролика, которое составляет 90 с, спутник пролетает около 640 км. При этом существенно изменяются дальность, углы визирования и масштаб наблюдаемого объекта (сцены). Очевидно, что при формировании единой сцены, приведенной к одной проекции и масштабу, используются алгоритмы трансформирования и передискретизации изображений. Это в равной степени относится и к формированию видео ($2,0 \times 1,1 \text{ км}^2$ с разрешением 1,1 м), и к формированию единой сцены шириной 8 км. Сама обработка данных и получение изображения целой сцены или фильма в необходимом формате происходят на наземной станции. При суммировании нескольких кадров разрешение повышают на величину около 20%.

Анализ технических решений, использованных при создании спутников Flock и SkySat позволяет сделать вывод об источниках и причинах этого «прорыва» в сторону резкого скачкообразного уменьшения массы и стоимости космических аппаратов ДЗЗ, за которым, очевидно, последует уменьшение стоимости информации и услуг на основе ее. Дорогу таким системам проложила история создания наноспутников типа CubeSat. Опыт их создания продемонстрировал, что используемые для их изготовления современные промышленные электронные компоненты в большинстве своем обладают достаточно высокой надежностью и стойкостью к космическим факторам, а степень ее интеграции и низкая цена позволяют изготовить очень

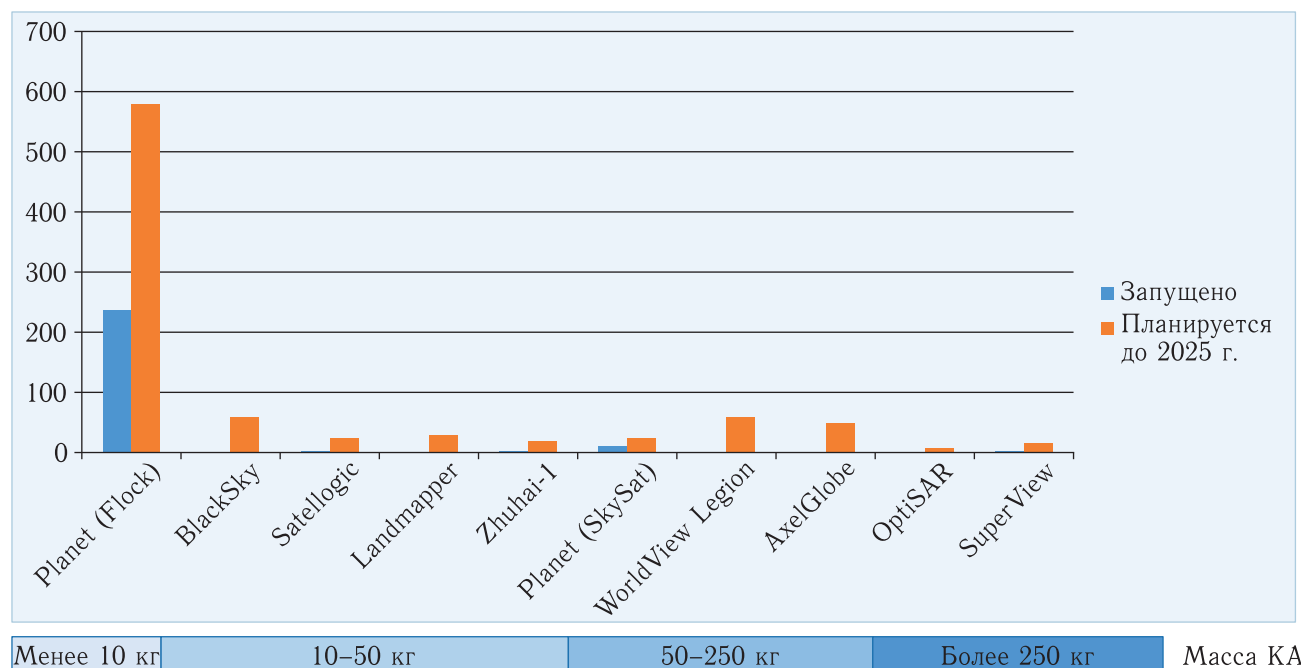


Рис. 5. Численность планируемых и развертываемых до 2025 г. группировок (не менее 6 микроспутников) высокого и сверхвысокого разрешения

легкие, надежные и функционально сложные космические аппараты.

В сочетании с опытом традиционной промышленности, задействованной в космическом приборостроении и области обработки данных ДЗЗ, это позволило строить по-настоящему грандиозные планы для создания и развертывания группировок, насчитывающих сотни микроспутников ДЗЗ. Неспроста же проекты, начинавшиеся как стартапы, очень быстро попали в поле зрения промышленных гигантов (в т. ч. компании Google) и получили инвестиции.

На сегодняшний день только в области систем оптико-электронного ДЗЗ высокого разрешения находятся в различных стадиях реализации (от обсуждения идей до начала развертывания) около десятка таких проектов. Интересно отметить, что в основном с проектами развертывания микроспутниковых группировок заявляются компании, уже предоставляющие услуги по распространению данных ДЗЗ и материалы на их основе. Таким образом, они, видимо, хотят максимально гарантировать себе оперативное получение информации и максимально удешевить эту составляющую в стоимости своих услуг. Планы по численности некото-

рых таких группировок (не менее 6 микроспутников ДЗЗ) и состояние по их развертыванию показаны на диаграмме (рис. 5), а некоторые основные характеристики — в табл. 1. Там же приведены сведения о массе отдельных спутников.

Аналогично тому как развертывание группировок спутников Dove и SkySat начиналось с запуска 1–2 аппаратов, так и другие компании, нацелившиеся на этот сегмент, перед началом полномасштабного развертывания уже тестируют свои системы и первые аппараты.

Компания BlackSky [13] рассчитывает к 2020 г. развернуть группировку BlackSky Globe из 60 микроспутников с разрешением 1 м и массой около 44–50 кг каждый. Спутники должны функционировать на орбитах высотой 450 км. Первый такой спутник BlackSky-1 Pathfinder-1 (рис. 6) для отработки технологий был выведен 26.09.2016 попутным запуском на орбиту высотой 690 км. С этой более высокой орбиты (чем планируется) он передал первые снимки. В ноябре 2016 г. специалисты компании продемонстрировали первые изображения с этого аппарата — сцены 10 × 3 км с разрешением около 2 м. Полезной нагрузкой микроспутников BlackSky является оптико-электронная камера

Таблица 1. Характеристики спутников, входящих в состав планируемых и развертываемых до 2025 г. группировок (не менее 6 микроспутников) высокого и сверхвысокого разрешения

Группировка (Спутники)	Компания	Страна	Разрешение, м	Масса КА, кг
Flock (Dove)	Planet	США	3,7	4,5
BlackSky-1 (Pathfinder)	BlackSky Globe	США	0,9–1,1	44–50
ÑuSat (Aleph-1)	Satellologic	Аргентина	1,0	37
Landmapper-HD	Astrodigital	США	2,5	20
Zhuhai-1	—	Китай	1,98	55
SkySat	Planet	США	0,7–0,9	83/120
WorldView Legion	DigitalGlobe	США	0,35–0,5	500–700
AxelGlobe	AxelSpace	Япония	2,5	80
OptiSAR Optical	UrtheCast	Канада	0,25–0,50	340–670
SuperView	SuperView	Китай	0,5	500

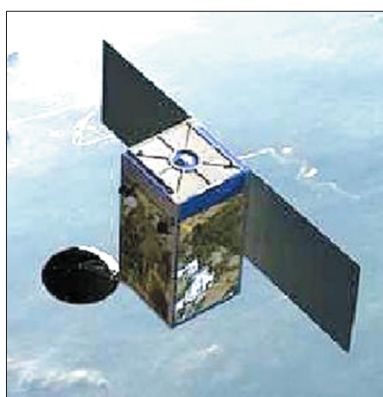


Рис. 6. Микроспутник BlackSky

SV-24TM на основе легкого телескопа с апертурой диаметром всего 24 см. Камера производится американской компанией Harris Corporation и является «младшей» моделью в целом семействе оптико-электронных полезных нагрузок (под общей торговой маркой SpaceViewTM) с апертурой от 24 см до 70 см для микро- и миниспутников. Модель SV-24 имеет массу менее 10 кг. Масса и некоторые другие характеристики оптико-электронных полезных нагрузок SpaceViewTM компании Harris Corporation приведены на рис. 7 [14].

Интересно отметить, что перечень оптико-электронных полезных нагрузок (камер) компании Harris Corporation не исчерпывается инструмен-

тами, приведенными на рис. 7, и не ограничивается диаметром апертуры телескопа 70 см. Есть в серии SpaceViewTM инструменты и помощнее. Например, SpaceViewTM110 имеет диаметр 1,1 м. И это тот самый инструмент, который установлен на космических аппаратах WorldView-3 и WorldView-4 с разрешением 31 см, принадлежащих DigitalGlobe. Сам по себе инструмент способен обеспечить разрешение в 25 см. Harris Corporation сейчас продолжает линию космических оптико-электронных приборов, перешедших к ней от ITT Exelis Inc., которой это направление, в свою очередь, досталось от Eastman Kodak, стоявшей у истоков аппаратуры коммерческих систем ДЗЗ и создавшей оптико-электронную аппаратуру для КА Ikonos-2 и QuickBird-2.

На рис. 7 обращает на себя внимание очень небольшая масса инструментов, рассчитанных на высокое и сверхвысокое разрешение (вплоть до 25 см) с высоты 500 км. Именно это является одним из ключевых моментов, позволяющих разработчикам создавать легкие оптико-электронные микро- и миниспутники ДЗЗ. Кстати, для сравнения: масса инструмента SpaceViewTM110 составляет около 500 кг, SpaceViewTM70, ориентированного практически на такое же разрешение, 25–40 см, — всего 120–160 кг, т. е. в 3–4 раза меньше. При этом обеспечена работа как в видимом, так и в коротковолновом ИК-диапазоне.

	SPACEVIEW™24 SV-24	SPACEVIEW™35 SV-35	SPACEVIEW™42 SV-42	SPACEVIEW™50 SV-50	SPACEVIEW™65 SV-65	SPACEVIEW™70 SV-70
Класс КА	Наносат	Микросат	Микросат	Минисат	Минисат	Минисат
Апертура	0,24 м	0,35 м	0,42 м	0,5 м	0,65 м	0,7 м
Масса камеры	<10 кг	20–35 кг	25–40 кг	90–130 кг	110–150 кг	120–160 кг
Мощность	10 Вт	70–170 Вт	70–170 Вт	200–275 Вт	245–305 Вт	250–320 Вт
Разрешение с 500 км (GSD)	0,9–1,1 м	0,7–1,0 м	0,5–0,75 м	0,35–0,5 м	0,3–0,44 м	0,25–0,4 м
Режимы съемки	- Кадровая - Видео - Низкая освещенность	- Кадровая - Сканирование - Видео - Низкая освещенность	- Кадровая - Сканирование - Видео - Низкая освещенность	- Кадровая - Сканирование - Видео - Низкая освещенность	- Кадровая - Сканирование - Видео - Низкая освещенность	- Кадровая - Сканирование - Видео - Низкая освещенность
Диапазоны	ВД ПХ/RGB	- ВД ПХ/RGB - ПХ, 4 или 8 МС	- ВД ПХ/RGB - ПХ, 4 или 8 МС	- ВД ПХ/RGB - ПХ, 4 или 8 МС - КИК/СИК	- ВД ПХ/RGB - ПХ, 4 или 8 МС - КИК/СИК	- ВД ПХ/RGB - ПХ, 4 или 8 МС - КИК/СИК

Рис. 7. Оптико-электронные полезные нагрузки SpaceView™ компании Harris Corporation для микро- и мини-спутников ДЗЗ

В мае 2016 г. аргентинская компания Satelogic S.A. осуществила запуск прототипов спутников своей будущей группировки. Каждый из 2 спутников ÑuSat (Aleph) размером $43 \times 45 \times 75$ см и весом 37 кг (рис. 8) осуществляет в видимом и ближнем ИК-диапазонах как съемку отдельными кадрами, так и видеосъемку. Планируется, что спутники будущей группировки будут способны поставлять панхроматические и мультиспектральные данные с разрешением 1 м, гиперспектральные — 30 м, теплового ИК-канала — 90 м. При развертывании 25 спутников повторная съемка возможна через 1,2 ч, 100 спутников — 15 мин, а при 300 спутниках — 5 мин.

Уже упоминавшаяся ранее канадская компания UrtheCast, владеющая спутниками Deimos-1 и Deimos-2, в 2015 г. заявила о намерениях развернуть группировку спутников OptiSAR высокого разрешения, которая будет состоять из 8 пар оптических и радиолокационных миниспутников (всего 16). Спутники будут разработаны и поставлены компанией SSTL (Великобритания). Планируется, что каждая пара будет вести съемку



Рис. 8. Микроспутник ÑuSat

синхронно. Спутники будут находиться в двух орбитальных плоскостях: 8 спутников на полярной солнечно-синхронной орбите и 8 — на орбите со средним наклоном к экватору (между 20° и 45°). Оптико-электронные спутники OptiSAR Optical (рис. 9) массой около 670 кг будут иметь аппаратуру для цветной съемки с разрешением

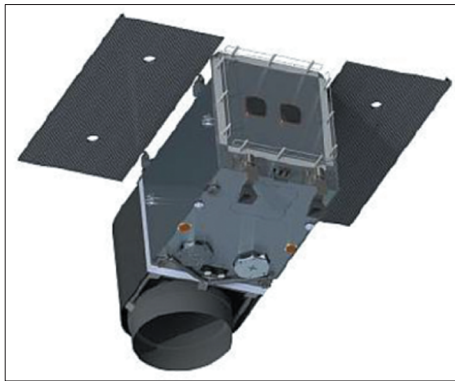


Рис. 9. Спутник OptiSAR Optical



Рис. 10. Микроспутник Zhuhai-1

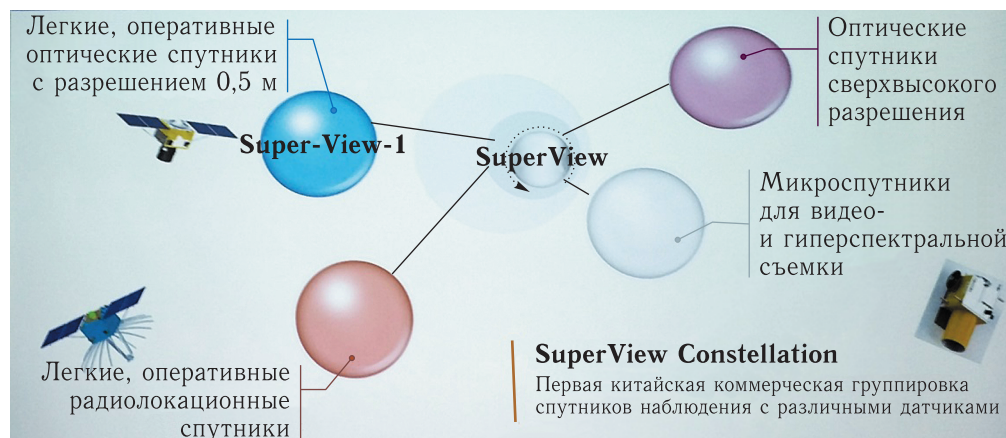


Рис. 11. Состав китайского «суперсозвездия» — SuperView Constellation из нескольких группировок спутников наблюдения Земли различного назначения

до 25 см, а в режиме видео — 40–50 см. Кроме того, ориентируясь на пожелания предполагаемых потребителей, в дополнение к OptiSAR компания планирует создать еще одну группировку UrtheDaily из 8 спутников с разрешением 5 м. Спутники будут находиться на полярных орбитах. Производительность съемки составит 145 млн км² в день, что позволит осуществлять постоянный глобальный мониторинг природных и техногенных изменений.

Два выведенных в 2017 г. на орбиту китайских спутника Zhuhai-1 (01 и 02) представляют собой часть более крупной группировки наблюдения Земли, создаваемой компанией Zhuhai Orbita Control Engineering Ltd. В целом группировка должна состоять из 10 спутников видеонаблюдения (OVS-2), гиперспектральных спутников (OHS-2) и маленьких «персональных» спутников (OPS-2). На обоих выведенных на орби-

ту спутниках видеонаблюдения (рис. 10) установлена аппаратура, позволяющая вести видеосъемку с разрешением 1,98 м и частотой 20 кадров в секунду.

Упомянутые выше китайские миниспутники SuperView (Gaojing) с разрешением 0,5 м, выведенные на орбиту в 2016 г., также являются только частью более глобального коммерческого проекта по наблюдению Земли из космоса под общим названием SuperView Constellation [15]. Это «суперсозвездие» спутников ДЗЗ (рис. 11) должно включать в себя, помимо группировки маневренных легких спутников SuperView-1 (0,5 м), еще и другие составляющие: группировку спутников с высоким и сверхвысоким разрешением (возможно высокоорбитальную), группировку легких маневренных радарных спутников, а также группировку спутников для видео- и гиперспектрального мониторинга.

Последнюю, по-видимому, можно соотнести с описанной выше Zhuhai.

В феврале 2017 г. компания DigitalGlobe (США), являющаяся признанным мировым лидером и поставщиком данных оптико-электронной съемки сверхвысокого разрешения, объявила о начале работ над своим следующим созвездием (группировкой) спутников дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения, которое получило название WorldView Legion (рис. 12) [16]. Начало развертывания планируется на 2020 г. Эта группировка позволит наблюдать представляющие интерес участки на поверхности Земли до 40 раз в день, а к 2030 г. обеспечит периодичность до 20–30 мин и практически непрерывную видеосъемку.

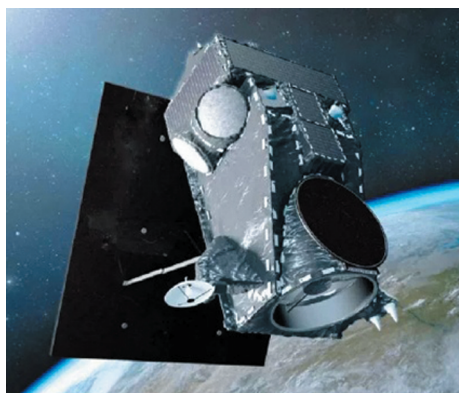


Рис. 12. Спутник WorldView Legion

Ранее компания уже объявляла, что в настоящее время работает над созданием оптико-электронных миниспутников и имеет контракт с компаниями Taqnia Space и The King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST) из Саудовской Аравии на разработку и запуск для этой страны шести спутников SCOUT с разрешением лучше 1 м (0,8 м в ПХ и 3,2 м в мультиспектральных диапазонах). Подчеркивался особый интерес компании к этому направлению деятельности с тем чтобы не уступить компании Planet свои лидирующие позиции, в том числе и по оперативности съемки, и периодичности наблюдений. Планируется, что группировка спутников SCOUT будет готова к запуску уже в 2019 г.

Для создания спутников для группировки следующего поколения WorldView Legion компания DigitalGlobe выбрала компанию Space Systems Loral (SSL) как системного интегратора. А полезную

нагрузку для спутников нового поколения разработает Raytheon Company. По контракту Raytheon разработает и поставит телескопы, детекторы и сложную электронику для SSL. Использование этих спутников удвоит возможности DigitalGlobe получать снимки с разрешением 30 см, а в случае чрезвычайных ситуаций эти возможности могут даже возрасти в 3–4 раза.

В соответствии с объявленными планами до 2025 г. группировка перспективных КА компании DigitalGlobe будет включать в себя три типа КА: 6 КА WorldView Legion с разрешением 0,35–0,5 м, 6 КА SCOUT с разрешением 0,8 м и 2 «больших» КА высокодетального наблюдения WorldView-150 с крупногабаритной оптикой (объектив диаметром 1500 мм) и разрешением 0,3 м. На диаграмме (рис. 13) показан план поддержания и дальнейшего развертывания группировки спутников компании DigitalGlobe до 2025 г.

Параллельно с развертыванием работ по созданию группировки WorldView Legion шла другая работа — по объединению компаний MDA и DigitalGlobe. В октябре 2017 г. канадская компания MDA объявила о завершении процесса присоединения одного из мировых лидеров в сфере ДЗЗ компании DigitalGlobe (США). После слияния компания получила новое название Maxar Technologies. Как было заявлено, объединенная компания предложит огромный набор решений, выиграет от увеличения масштабов и более диверсифицированной базы доходов и повысит свои доходы за счет использования каналов продаж обеих компаний. Maxar Technologies объединит четыре ведущих бренда коммерческих космических технологий: SSL, MDA, DigitalGlobe и Radiant. Возможно, что индивидуальные бренды будут использоваться и в дальнейшем.

В России продолжается развертывание группировки малых космических оптико-электронных спутников «Канопус-В» и «Канопус-ИК», предназначенных для оперативного мониторинга в интересах МЧС. В настоящее время на орбите уже работают 4 таких аппарата. Разрешение в панхроматическом канале составляет 2,1 м при полосе захвата 23 км. В четырех мультиспектральных каналах разрешение составляет 10,5 м. До конца 2018 г. на орбиту планируется вывести еще два таких аппарата и нарастить группировку до 6 КА.

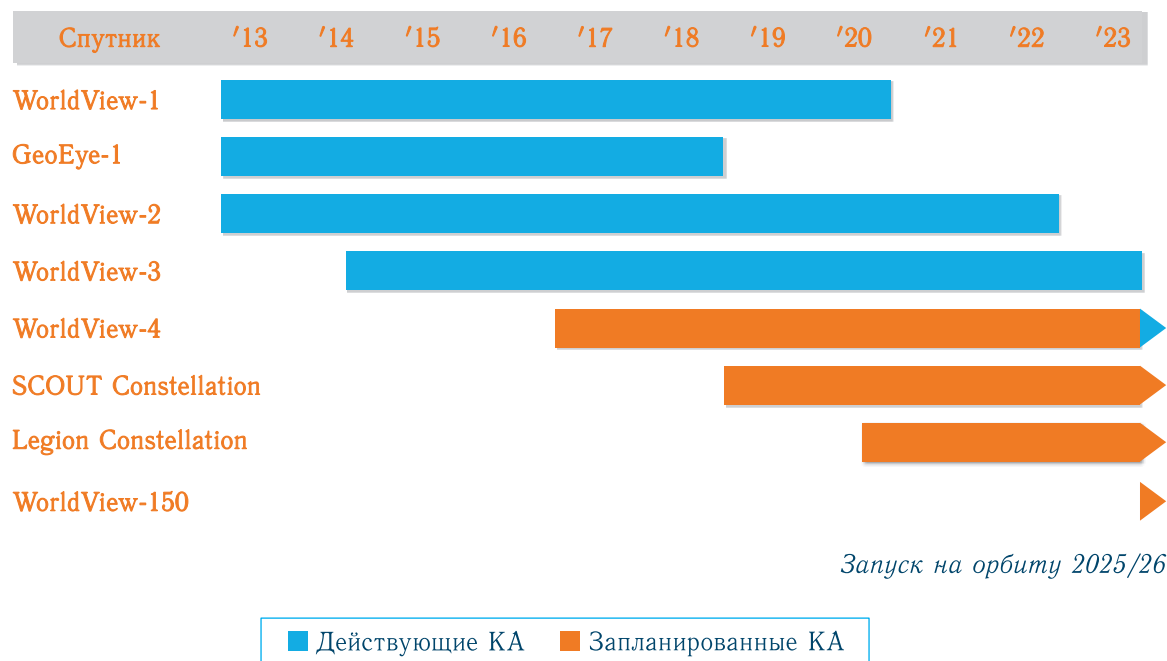


Рис. 13. План поддержания и дальнейшего развертывания группировки спутников компании DigitalGlobe до 2025 г.

Будущее «больших» спутников высокого и сверхвысокого разрешения

Из года в год роль дистанционного зондирования Земли постоянно возрастает. Эксперты предполагают, что к 2026 г. на орбитах появится более 1100 новых спутников ДЗЗ. Только четыре компании (Planet, Maxar, Spire и BlackSky) планируют за этот период запустить более 970 спутников. Очевидно, что с появлением на рынке ДЗЗ таких игроков, как Planet (спутники Flock и SkySat), BlackSky Global, компании SuperView Constellation, а также группировки спутников WorldView Legion, значительно изменится цена на космические снимки и производные от них продукты в сторону удешевления. Может даже показаться, что эпоха больших, тяжелых и сложных оптико-электронных спутников заканчивается или уже закончилась. Это неверно. И подтверждение этому — планы компании DigitalGlobe по созданию к 2025 г. КА сверхвысокого разрешения с оптической системой диаметром 150 см (рис. 13).

В табл. 2 приведены данные о некоторых проектах спутниковых группировок различных стран

на основе «больших аппаратов». В связи с очень высокими характеристиками и, как правило, двойным назначением, данные об этих аппаратах достаточно ограничены.

В России в рамках Федеральной космической программы до 2025 г. создается космический аппарат «Ресурс-ПМ». Этот КА позволит с высоты 700 км иметь панхроматические снимки с разрешением (проекцией пикселей) 40 см в полосе захвата 19 км. Потенциально может быть реализовано и более высокое разрешение до 26–30 см, что будет соответствовать лучшим современным системам. Разрешение в 8 мультиспектральных зонах составит 2 м. Оптико-электронная аппаратура и детекторы имеют большой динамический диапазон, что создает предпосылки для получения качественных изображений в очень широком диапазоне условий наблюдения. Кроме основной аппаратуры сверхвысокого разрешения, в составе КА «Ресурс-ПМ» планируется использовать аппаратуру с разрешением 5 м в панхроматическом, 10 м в мультиспектральных каналах и 20 м в КИК-диапазоне.

В сентябре 2016 г. Airbus Defense & Space анонсировала, что создаст и запустит две пары оптико-электронных спутников Pleiades Neo [17]

Таблица 2. Разрабатываемые «большие» спутники сверхвысокого разрешения

Спутник	Страна	Год	Разрешение, м		Полоса захвата, км	Высота орбиты, км	Масса, кг
			ПХ	МС			
Pleiades Neo	Франция	2020	0,30	1,2	14	620	<1000
Ресурс-ПМ	Россия	2022	0,40 (до 26)	1,6	19	700	Около 6000
KompSat-7	Корея	2021	0,30	1,2	Нет данных	650–700	Около 2000
CSO	Франция	2018	0,20–0,30	0,8–1,2	Нет данных	800	3500
WorldView-150	США	2025	0,3	Нет данных	Нет данных	700	Около 2000
SuperView-VHR	Китай	Нет данных					

сверхвысокого разрешения. Космические аппараты должны быть запущены на орбиту в 2020 и 2021 гг. Эти 4 спутника придут на смену двум спутникам Pleiades, используемым с 2011 и 2012 гг. В результате будет образована группировка на круговых орбитах по два спутника в двух плоскостях. Это обеспечит высокочастотное постоянное наблюдение в интересах Франции и других участников проекта. Разрешение каждого аппарата должно составить 30 см при полосе захвата 14 км, а суточная производительность — около полумиллиона квадратных километров. Таким образом, вся группировка Pleiades Neo будет снимать за день около 2 млн км². Аппарат получит высокооперативное управление через геостационарные спутники с помощью терминалов Ка-диапазона. Это позволит практически мгновенно передавать и уточнять команды управления, даже когда спутник находится вне зоны видимости наземной станцией. Высокоскоростная лазерная линия связи обеспечит передачу на Землю со скоростью 1,8 Гбит/с до 40 Тб информации, в том числе и в «квазиреальном» режиме.

15 октября 2017 г. аэрокосмический журнал Air & Cosmos опубликовал дополнительную информацию о проекте. Высота орбиты спутников составит 620 км, а диаметр зеркала, который определяет пространственное разрешение, — около 1,35 м. Масса спутника будет меньше 1 т, и они будут выводиться по одному на ракетносителях Vega C+. Специально для Pleiades Neo разработаны солнечные батареи новой конструкции. Мощность системы электропитания составит 1 кВт. Внешний вид аппарата Pleiades Neo показан на рис. 14. Кроме того, стало известно, что у детекторов, установ-



Рис. 14. Спутник Pleiades Neo

ленных на спутнике, увеличится количество спектральных каналов (по сравнению с Pleiades). Появятся два дополнительных спектральных канала: «deep blue» («глубокий голубой») для наблюдения на большой глубине и «red edge» («красная кромка») — диапазон мониторинга вегетации.

Из публикаций в Интернете известно, что во Франции, кроме спутников Pleiades Neo, создается еще более мощный аппарат двойного назначения CSO (Composante Spatiale Optique) по программе MUSIS (рис. 15). Эти спутники создаются на замену КА Helios-2. Масса каждого 3–3,5 т. Спутники базируются на оптике большого диаметра (вероятно, около 2 м). Первый спутник с высоты 800 км будет позволять получать снимки с разрешением 35 см. Планируется изготовить не менее двух таких аппаратов, первый из которых CSO-1 уже выведен на орбиту 19 декабря 2018 г. с космодрома Куру ракетносителем «Союз СТ-А». Спутники производятся с использованием решений, отработанных на Pleiades. Однако, помимо каналов видимого диапазона, они будут способны производить съемку

в КИК-диапазоне, а также тепловом ИК-диапазоне, что обеспечит возможность круглосуточного наблюдения. При этом за счет большой высоты орбиты и разнесения самих орбит достигается очень высокая оперативность.

В дальнейшем для повышения детальности наблюдения должен быть запущен еще один аппарат на орбиту 480 км, что позволит достичь 20-сантиметрового разрешения.

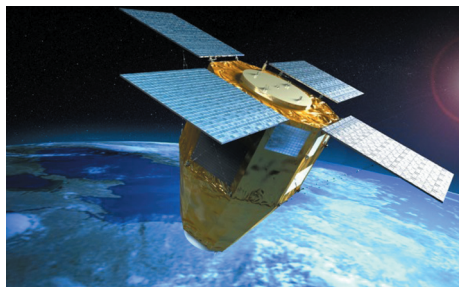


Рис. 15. Спутник CSO

Аналогично развивается космическая программа и в Республике Корея. Уже объявлено, что будет создаваться спутник KompSat-7 — сверхвысокого разрешения 30–35 см. Спутник должен работать на орбите высотой 650–700 км, а значит, этот спутник должен будет иметь крупногабаритную оптическую систему. Соответственно и масса самого спутника будет больше, чем у предыдущих корейских аппаратов KompSat-3, -3A, в которых использовалась оптическая система с диаметром 80 см. Спутник KompSat-7 планируется вывести на орбиту в 2021 г. Кстати, параллельно с этим в Корее ведутся работы по созданию оптико-электронных миниспутников CAS-1/2 на платформе CAS500. Масса такого аппарата около 500 кг при полосе захвата 12 км. Запланирован запуск двух таких оптико-электронных спутников в 2019–2020 гг. Они будут вести съемку, в том числе и видеосъемку, с разрешением 50 см с высоты 500 км. Известно, что в Корее ведутся работы над оптико-электронными спутниками в меньшем формате (порядка 50 кг).

Хотя в открытых источниках нет данных о работах в Китае по созданию спутников сверхвысокого разрешения до 30 см и лучше на основе крупногабаритной оптики, можно предполагать, что такой проект (и может быть, даже не один) осуществляется.

Два тренда развития оптико-электронных систем ДЗЗ высокого разрешения

Как итог обсуждения, проведенного выше, на диаграмме (рис. 16) условно показаны два тренда развития оптико-электронных систем ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения на основе «больших» спутников и микро- и миниспутниковых группировок.

По горизонтали отложена оперативность наблюдения, а по вертикали — пространственное разрешение. Видно, что при повышении разрешения новые поколения спутников и группировок на их основе стремятся достичь все более частотного обновления информации, вплоть до непрерывного видеонаблюдения. Технические предпосылки, а также уже опробованные для этого решения, как было показано выше, уже имеются. Как видно, тренд «больших» спутников нацелился на предельные для космической съемки значения разрешения около 10 см, а тренд миниспутников в основном пока стремится к разрешению 0,3–0,5 м. Можно предположить, что такие различия, проистекающие в первую очередь из габаритов оптических систем, сохранятся и в дальнейшем. Более того, разработка легких (в том числе и составных) крупногабаритных конструкций космических телескопов (подобных JWST) может открыть второе дыхание в ДЗЗ, перенести спутники наблюдения на очень высокие и даже на геостационарные орбиты, чтобы обеспечить постоянство мониторинга на всей планете.

В заключение следует сделать вывод, что пока еще рано говорить о закате эпохи «больших» спутников. Еще как минимум лет 5–8 будут продолжаться создаваться и разворачиваться группировки таких спутников. Еще больше 10–15 лет будет длиться их эксплуатация. Ну а дальше время само расставит приоритеты. Скорее всего, в «большие» спутники придут те же прорывные решения, что позволили создавать оптические микро- и миниспутники с очень высокими характеристиками. Это также облегчит и удешевит их, сохранив (или даже преумножив) их основные преимущества — предельные по всем направлениям характеристики. Можно предположить, что на новом витке спирали будет произведено еще много космических систем

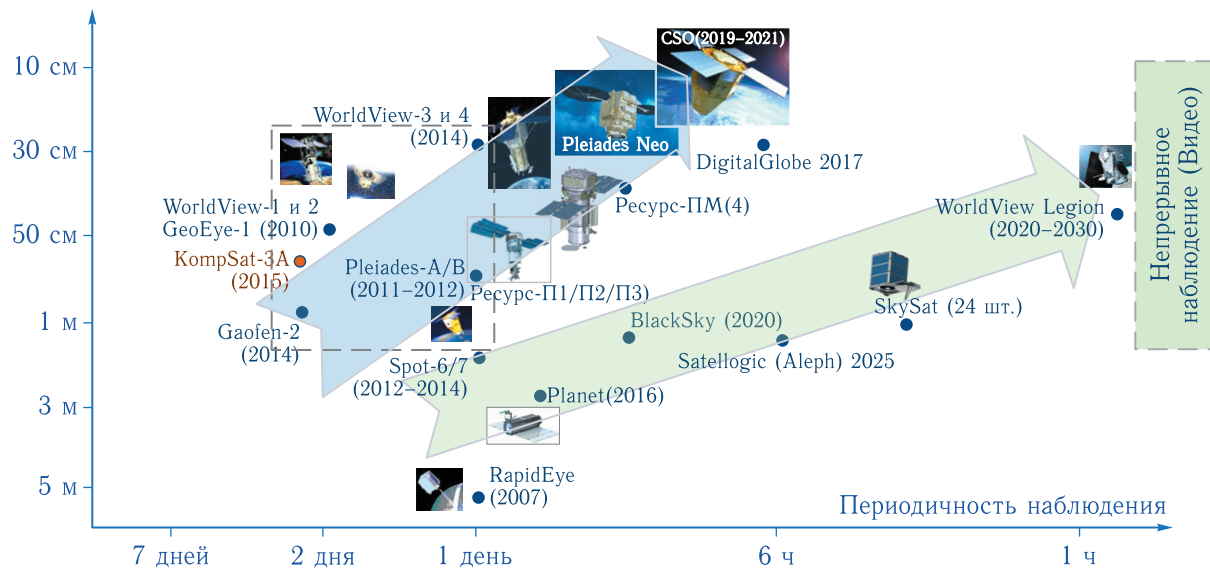


Рис. 16. Два тренда развития оптико-электронных систем ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения

для создания все новых и новых продуктов и услуг, которые должны стать на службу всему населению планеты под названием Земля!

Список литературы

1. Бакланов А.И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы (часть I), 2018, т. 5, вып. 3. С. 17–28.
2. Дворкин Б.А. Импортзамещение в сфере геоинформационных технологий и ДЗЗ // Геоматика, 2015, № 1. С. 17–28.
3. Горбунов А.В., Слободский И.Н. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» // Геоматика, 2010, № 1. С. 30–33.
4. Arnaud M., Boissin B., Perret L., Boussarie E., Gleyzes A. The Pleiades Optical High Resolution Program // Proceedings of the 57th IAC/IAF/IAA (International Astronautical Congress), Valencia, Spain, Oct. 2–6, 2006, IAC-06-B1.1.04.
5. Gleyzes A., Perret L. Pleiades High resolution optical Earth Observation system status and future missions preparation in the frame of CXCI (Technology demonstration of very high resolution imaging) CNES program // Proceedings of the 64th International Astronautical Congress (IAC 2013), Beijing, China, Sept. 23–27, 2013, paper: IAC-13-B1.2.2.
6. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/zy-3a> (дата обращения 09.11.2018).
7. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaofen-2> (дата обращения 09.11.2018).
8. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaojing> (дата обращения 09.11.2018).
9. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dove> (дата обращения 09.11.2018).
10. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/flock-1> (дата обращения 09.11.2018).
11. <http://geomatika.ru/clauses/230/> (дата обращения 09.11.2018).
12. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/skysat> (дата обращения 09.11.2018).
13. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/b/blacksky-constellation> (дата обращения 09.11.2018).
14. https://www.harris.com/sites/default/files/downloads/solutions/55523_spaceview_brochure_4_v9_el_final_web.pdf (дата обращения 19.12.2018).
15. Ming Li. Remote sensing satellite planning in Chinese National Space infrastructure for next eight years // Proceedings of the 68th International Astronautical Congress (IAC 2017), Adelaide, Australia, Sept. 2013, paper: IAC-13-B1.2.1.
16. <http://spacenews.com/in-buying-digitalglobe-md-aensures-ssl-will-build-just-disclosed-worldview-legion-constellation/> (дата обращения 09.11.2018).
17. <http://www.intelligence-airbusds.com/en/7947-pleiades-neo-constellation> (дата обращения 09.11.2018).