

Этапы развития и возможности аэрокосмической техники в экомониторинговых исследованиях дорожно-транспортного комплекса и других наземных объектов

Stages of development and capabilities of aerospace technology in eco-monitoring studies of the road and transport complex and other ground objects

Тимофеев А.Н.

Канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры экологического образования Воронежского государственного педагогического университета, г. Воронеж
www72@bk.ru

Timofeev A.N.

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Environmental Education, Voronezh State Pedagogical University, Voronezh
www72@bk.ru

Аннотация

Рассматриваются основные значимые события в совершенствовании аэрокосмической техники, определяющие этапы развития данной отрасли. Приводится обзор отечественных и зарубежных космических аппаратов. Обсуждаются вопросы качественных показателей фото- и видеоаппаратуры, устанавливаемой на космические искусственные спутники, для решения вопросов, связанных с мониторинговыми исследованиями поверхности Земли из космоса. Рассматриваются основные параметры оптико-электронных и радиолокационных космических аппаратов. Показано большое значение аэрокосмической аппаратуры в проведении мониторинговых исследований дорожно-транспортного комплекса. Преимущества использования материалов космической фотосъемки при оценке состояния дорожно-транспортных систем определяются широкой обзорностью, достоверной разрешающей способностью, оптимальной генерализацией фотоизображений антропогенных разностей, а также возможностью оперативного получения разновременных фотоснимков, необходимых для выявления динамики антропогенных процессов, связанных с дорогами. Для дешифрирования геоморфологических, гидрологических, гидрогеологических и растительных ландшафтных разностей, связанных с дорожно-транспортным комплексом, используются не только чёрно-белые, но и цветные синтезированные и спектрональные космические снимки. Цветные фотоснимки сохраняют те же фотографические и топографические свойства, что и чёрно-белые, а также содержат дополнительную информацию 2-3 зон спектра. Цветное изображение их лишено фотометрических и геометрических искажений, которые бывают при синтезе многозональных изображений.

Ключевые слова: аэрокосмическая техника, искусственные спутники Земли, мониторинговые исследования Земли из космоса.

Abstract

The main significant events in the improvement of aerospace technology, which determine the stages of development of this industry, are considered. An overview of domestic and foreign spacecraft is given. The issues of quality indicators of photo and video equipment installed on

space artificial satellites are discussed for solving issues related to monitoring studies of the Earth's surface from space. The main parameters of optical-electronic and radar space vehicles are considered. The great importance of aerospace equipment in carrying out monitoring studies of the road transport complex is shown. The advantages of using space photography materials in assessing the state of road transport systems are determined by wide visibility, reliable resolution, optimal generalization of photographic images of anthropogenic differences, as well as the possibility of quickly obtaining multi-temporal photographs necessary to identify the dynamics of anthropogenic processes associated with roads. To interpret geomorphological, hydrological, hydrogeological and vegetative landscape differences associated with the road transport complex, not only black-and-white, but also color synthesized and spectral-zonal satellite images are used. Color photographs retain the same photographic and topographic properties as black and white photographs, and also contain additional information of 2-3 spectral zones. Their color image is devoid of photometric and geometric distortions that occur during the synthesis of multi-zone images.

Keywords: aerospace engineering, artificial Earth satellites, monitoring studies of the Earth from space.

Введение. Развитие и усложнение наземных дорожно-транспортных систем вызвало необходимость постоянного совершенствования методов их исследования и привело к поиску новых подходов к методологии. Начальный период мониторинговых исследований дорог связан с наземными методами исследования в разнообразных модификациях. Следующий этап связан с освоением воздушного пространства и внедрением методов аэрофотосъемки местности с малых высот с последующей дешифровкой полученных фотоматериалов. Все это сопровождалось совершенствованием оптической аппаратуры, главным требованием к которой было получение контрастных снимков при хорошей фокусировке с высокой разрешающей способностью объектива, обуславливающего съемку в движении. Третьим этапом дистанционного исследования дорог явилась разработка методов космической съемки, которая стала возможной с освоением космического пространства и выводом искусственных спутников на орбиту Земли. Новые технологии позволили создавать оптические системы, способные делать снимки земной поверхности из космоса.

Этапы развития космической съемки. Освоение космического пространства преследовало, кроме всего прочего, и военные цели. Стратегия обороны государства включала разведывательные операции с использованием дистанционного зондирования поверхности Земли с искусственных космических спутников. Поэтому, космическая съемка Земли на начальных этапах привлекала особое внимание исключительно военных, которые проявляли интерес в том числе и к съемкам наземных дорожно-транспортных коммуникаций. Летом 1957 г. в СССР были получены первые космические снимки фотоаппаратом АФА-39, изготовленном на Красногорском заводе, с высоты 219 км. Разовый подъем фотоаппаратуры на такую высоту был осуществлен с помощью ракеты, но военным нужен был орбитальный спутник-фоторазведчик, позволяющий производить регулярную фотосъемку. В 1959 г. главный конструктор космических аппаратов Сергей Павлович Королев на рассмотрение правительства вынес проект «Зенит-2» по созданию такого спутника. В проекте приняли участие 123 организации, Красногорский завод исполнял госзаказ по производству спутниковой кинофотоаппаратуры. В 1962 г. «Зенит-2» произвел с орбиты первую успешную съемку.

В начале 1960-х годов начались работы по созданию орбитального спутника «Зенит-4», предназначавшегося для детального наблюдения и фотографирования местности при помощи принципиально новой длиннофокусной аппаратуры. Достоинствами этого спутника также являлись более длительный срок активного существования, программный отворот по крену и повышенная точность стабилизации. Всего в рамках летных испытаний

и штатной эксплуатации было произведено 76 успешных запусков «Зенит-2» и 179 успешных запусков «Зенит-4».

В 1966 г. был создан Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», который произвел более 400 успешных запусков космических аппаратов, оснащенных аппаратурой Красногорского завода.

Аппаратура для фоторазведки должна была отвечать повышенным требованиям детальности и качества изображения [1; 4]. Кроме того, спутник движется на большой скорости, и для того, чтобы получить несмазанный кадр, нужны дополнительные устройства. В итоге космический фотоаппарат становился «космическим» по цене. Поэтому практиковалось повторное использование фототехники, которую для этого старались максимально бережно спустить на Землю.

Данные, получаемые со спутников с помощью фототехники КМЗ, используются для составления и уточнения карт. С их помощью контролируется состояние окружающей среды, проводится поиск природных ресурсов, осуществляется контроль за транспортными магистралями, включая дорожные пути и трубопроводы, и т.д.

Увеличивающиеся потребности разных организаций в высокоточном зондировании территории позволили сформироваться частным коммерческим компаниям по оказанию услуг в сфере создания, запуска и вывода на орбиту искусственных спутников Земли, способных вести качественную фото- и видеосъемку [2; 8].

Началом этого этапа можно считать дату 24 сентября 1999 г., когда с космодрома Ванденберг (США, штат Калифорния) стартовал первый коммерческий искусственный спутник Земли (ИСЗ) со сверхвысоким (лучше 1 м) разрешением – IKONOS. С 1999 г. в мировом масштабе разработано и запущено более 15 гражданских космических аппаратов с оптико-электронной аппаратурой, обеспечивающих получение снимков с разрешением 0,4–1,0 м, которые нашли широкое применение в землепользовании, мониторинге дорог, при проведении кадастровых работ, проектировании и строительстве инженерных сооружений, разведке месторождений углеводородного сырья, создании топографических карт и планов. Разработчиками первых космических аппаратов сверхвысокого разрешения были исключительно американские компании, но с 2006 г. запуски подобных аппаратов осуществили: Израиль (EROS-B), Россия (Ресурс-ДК), Корея (Kompsat-2) и Индия (Cartosat-2). Тем не менее США пока сохраняют технологическое лидерство, о чем свидетельствует вывод на орбиту таких аппаратов, как GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4 с разрешением 0,3–0,5 м.

Космический аппарат IKONOS представлял собой яркий пример конверсии военных технологий в гражданский сектор. Над созданием космических аппаратов трудились крупнейшие компании американского военно-промышленного комплекса, которые разрабатывают разведывательную космическую технику для Пентагона: Lockheed Martin (спутниковая платформа), Eastman (оптоэлектронная система) и Raytheon (системы передачи и обработки изображений).

Спутник был выведен на низкую солнечно-синхронную орбиту высотой 681 км, обеспечивающую его прохождение над любым районом Земли каждые 1-5 дней (в зависимости от широты). Спутник за один проход покрывал площадь до 5 000 м². За все время работы снимки, полученные с IKONOS, покрывают территорию площадью более 300 млн км². Выведен из эксплуатации в марте 2015 г., на данный момент с искусственного спутника Земли IKONOS доступны только архивные космические снимки. Ядром спутника является разработанная фирмой Kodak оптико-электронная камера, включающая зеркальный объектив, набор матриц фотоприемных элементов и аппаратуру сжатия потока видеоданных. Камера позволяет получать изображения местности в полосе шириной 11 км в панхроматическом режиме с разрешением от 0,8 м и в мультиспектральном (4 канала, синий, зелёный, красный и ближний ИК) с разрешением от 3,2 м. Потребители могут заказать изображения следующих уровней обработки: Geo, GeoProfessional и GeoStereo, а также продукцию обработки, включая цифровые модели рельефа (ЦМР), цифровые модели

местности (ЦММ), мозаики больших территорий и тематические карты. Владелец и инициатором использования высокодетальных снимков в гражданских целях выступила компания Space Imaging (с января 2006 GeoEye Inc).

Geo – продукция предназначена для визуального дешифрирования и анализа, когда требуются данные с небольшой точностью привязки (ректификации). Снимки проходят радиометрическую коррекцию и минимальную геометрическую коррекцию по калибровочным параметрам съемочной камеры и поставляются вместе с необходимой для фотограмметрической обработки информацией, включая строгую модель съемки или коэффициенты рациональных полиномов (КРП), аппроксимирующих модель съемки. Все виды ГЕО продукции поставляются в картографической проекции при номинальной геодезической высоте в заданной системе координат.

GeoProfessional – продукция предназначена для заказчиков, которым нужен готовый продукт с высокой геометрической точностью для использования в ГИС и других приложениях. Для продукции проводится радиометрическая и геометрическая коррекция, включая учет влияния рельефа земной поверхности по имеющейся цифровой модели рельефа. Продукция будет поставляться в проекции UTM, но, по желанию заказчика, может быть выполнена в других проекциях. Продукция GeoProfessional доступна в нескольких уровнях с различными точностными характеристиками: Precision и Precision Plus. Данная продукция создается на базе снимков, угол съёмки которых составляет 0 – 24 градуса от надира.

GeoStereo – продукция является результатом обработки изображений, полученных при конвергентной стереосъемке. При обработке стереопар проводится радиометрическая и геометрическая коррекция, эпиполярное ориентирование и стереофотограмметрическая обработка в заданной картографической проекции. Стереобразение поставляется вместе с файлом коэффициентов рациональных полиномов (RPC) модели камеры. Эти данные позволяют осуществлять обработку стереоизображения в любых программных продуктах для получения координат фотограмметрическим способом, создания ЦМР, ортотрансформирования изображения и других фотограмметрических операций. Каждая стереопара состоит из снимка, полученного при низком угле наклона съемки (более 30 градусов от надира), и снимка, полученного при высоком угле наклона съемки (более 18 градусов от надира) с 30° - 45° углами конвергенции (коэффициент В/Н от 0,54 до 0,83).

Одним из первых в 2001 г. на 98-градусную Солнечную синхронную орбиту был выведен спутник QuickBird и затем QuickBird-2. Владелец и головным разработчиком этой космической системы является компания DigitalGlobe (США), которая осуществляла разработку в кооперации с компаниями Ball Aerospace & Technologies Corp.(платформа), Eastman Kodak и Fokker Space.

Технические характеристики QuickBird были следующие: высота орбиты – 450 км., период обращения – 93,4 мин., частота повторного прохождения над целью – 1-4 дня, за один виток может быть получено до 57 кадров (около 128 Гб). Разрешение сенсора при панхроматическом режиме на местности составляло 2,44 м. Диапазон в этом варианте: синий – 450-520 нм., зеленый – 520-600 нм., красный – 630-690 нм., ближний инфракрасный – 760-900 нм.

Работа спутника обеспечивает высокую геодезическую точность привязки с большой площадью покрытия одним кадром – 272 км², при этом есть возможность исследовать линейные объекты с шириной коридора 5 км.

Данные со спутника QuickBird возможно использовать в различных направлениях исследования дорожно-транспортных систем. Приоритетными направлениями являются: минимизация наземных геодезических и инженерных работ перед началом строительства дорог, контроль над ходом работ; создание векторных карт с характеристиками, соответствующими масштабу 1:2000-1:5000; выбор оптимального местоположения для автомобильных и железнодорожных мостов и переездов; своевременное обнаружение и определение масштабов разрушения дорожного полотна и мостов вследствие стихийных

бедствий; проведение независимой классификации дорог; контроль состояния дорог, насыпей и выемок, определение тенденций эрозийных процессов; экологический мониторинг земель вдоль автомобильных и железнодорожных магистралей.

Высокий спрос на космическую информацию обусловлен бурным развитием вычислительной техники, а также совершенствованием геоинформационных систем, основным источником данных для которых служат результаты дистанционного зондирования [2; 3]. Насущная потребность в материалах космической съемки стала причиной появления целой плеяды съемочных аппаратов со сверхвысоким пространственным разрешением. Точность географической привязки и детальность получаемых изображений позволили формировать на их основе карты и планы крупного масштаба, что ранее было возможно только с использованием аэросъемки. Высокая востребованность продуктов космической съемки привела к тому, что соответствующий сегмент рынка все активнее осваивается компаниями с частным капиталом [5; 10]. Это характерно не только для США, где поддержка частного бизнеса и передача ему ряда функций по получению данных в интересах государственных органов стала государственной политикой, но и для таких стран, как Израиль, Франция, Индия.

Стоит отметить эффективную схему взаимодействия государства и частного сектора, отработанную в США. Коммерческие спутники обеспечивают информацией государственные структуры на основе гарантированных контрактов. При этом часть ресурса (около 50%) компании-операторы используют для формирования космических изображений сверхвысокого разрешения, предназначенных для продажи на мировом рынке.

К сожалению, в России политика использования космических систем не сформирована, а «большой бизнес» не считает эту отрасль областью своих интересов, хотя от нее зависит информационная безопасность страны. Ниже будут рассмотрены действующие оптико-электронные и радиолокационные космические системы сверхвысокого разрешения. При этом акцент будет сделан не на использовании получаемых ими снимков (подобных публикаций более чем достаточно), а на технических особенностях и характеристиках аппаратуры, сведения о которой чрезвычайно скудны и разрозненны.

Основные параметры оптико-электронных космических аппаратов. Космический аппарат Ресурс-ДК1 был запущен 15 июня 2006 г. с помощью ракеты-носителя «Союз-У» с космодрома Байконур. Космический комплекс Ресурс-ДК разработан и изготовлен в соответствии с Федеральной космической программой России с участием широкой кооперации научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и предприятий промышленности Российской Федерации: ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», ФГУП НПП «ОПТЭКС», ОАО «Красногорский завод», НИИ ТП, НЦ ОМЗ и др. Выведен из эксплуатации 18 апреля 2016 г., доступны только архивные данные. Спутник позволяет получать цифровые изображения земной поверхности с пространственным разрешением не хуже 1 м в панхроматическом режиме (один канал) и до 3 м в мультиспектральном режиме (три канала). Расчетный срок пребывания на орбите составил около 3 лет.

Помимо аппаратуры ДЗЗ, на борту космического аппарата Ресурс-ДК1 установлено итальянское научное оборудование «Памела», предназначенное для космических исследований, и российская научная аппаратура «Ариана», обеспечивающая регистрацию высокоэнергичных электронов и протонов, их идентификацию, выделение всплесков высокоэнергичных частиц-предвестников землетрясений.

«Ресурс-П» (от «перспективный») – российский космический аппарат дистанционного зондирования Земли, созданный ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» для замены КА «Ресурс-ДК1». «Ресурс-П» №1 выведен на орбиту 25 июня 2013 г. в 21:28:48; «Ресурс-П» №2 выведен на орбиту 26 декабря 2014 г.; «Ресурс-П» №3 выведен на орбиту 13 марта 2016 г.

Космический аппарат «Ресурс-П» предназначен для получения высокдетальных данных ДЗЗ в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра в режиме почти

реального времени для обеспечения хозяйственной деятельности МПР России, МЧС России, Россельхоза, Росрыболовства, Росгидромета, МПС и других потребителей, а также получения информации для контроля окружающей среды, поиска полезных ископаемых, крупномасштабного картографирования. Имеет возможности объектовой и маршрутной съемок. Возможна стереосъемка маршрутов шириной 115 км; съемка площадок до 100x300 км. Целевая аппаратура на борту спутника Ресурс-П: Оптико-электронный комплекс «ГЕОТОН-Л1» с СППИ «САНГУР-1У»; Гиперспектральная аппаратура (ГСА); Комплекс широкозахватной мультиспектральной съёмочной аппаратуры: ШМСА-ВР, ШМСА-СР. Спутник обеспечивает с помощью прибора «ГЕОТОН-Л1» высокодетальную съёмку земной поверхности с разрешением 70 сантиметров в монохроматическом режиме и не хуже 3-4 метров в 5-х спектральных полосах. Ширина полосы земной поверхности, снимаемой за один пролёт – 38 км. Также имеется комплекс гиперспектральных наблюдений (ГСА) в 96-255 интервалах (длина волны 0,4-1,1 мкм) с разрешением 25-30 м в полосе 25 км.

На аппарате установлено два комплекса широкозахватной мультиспектральной съёмочной аппаратуры: высокого разрешения (ШМСА-ВР) и среднего разрешения (ШМСА-СР). При их использовании обеспечиваются характеристики (ШМСА-ВР и ШМСА-СР соответственно): разрешение в монохроматическом режиме: 12 м, 60 м; разрешение в 5 спектральных диапазонах: 23,8 м, 120 м; ширина полосы захвата 97 км, 441 км. Производительность оценивается в 1 млн км² в сутки. Области применения космического аппарата Ресурс-П: создание и обновление тематических и топографических карт; контроль загрязнения окружающей среды, экологический контроль в районах геологоразведочных работ и добычи полезных ископаемых, мониторинг водоохранных и заповедных районов, дорожно-транспортного комплекса; информационное обеспечение поиска нефти, природного газа, рудных и других месторождений полезных ископаемых; контроль застройки территорий, получение данных для инженерной оценки местности в интересах хозяйственной деятельности; информационное обеспечение для прокладки магистралей и крупных сооружений, автомобильных, железных дорог, нефте- и газопроводов; выявление, контроль и мониторинг незаконных рубок леса; инвентаризация сельскохозяйственных земель, контроль рационального использования сельскохозяйственных угодий, выявление неиспользуемых земель; оценка ледовой обстановки в высоких широтах; мониторинг стихийных бедствий, аварий, катастроф; оценка последствий ЧС и планирования восстановительных мероприятий.

Оптико-электронная аппаратура «Геотон», устанавливаемая на спутниках семейства «Ресурс», выполняет множество задач, в том числе и для Воздушно-космических сил РФ. В июне 2013 г. был осуществлен успешный запуск космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П» с модернизированной аппаратурой «Геотон-Л1». Впервые стала возможной съемка с высоким разрешением в режиме реального времени. Аппарат до сих пор выполняет свою миссию, несмотря на то, что срок его службы уже закончился. Данными, полученными с помощью «Геотона-Л1», пользуются многие российские регионы и зарубежные заказчики.

Также в состав оборудования спутника «Ресурс-П» входит гиперспектральная аппаратура, разработанная в стенах КМЗ. Она предназначена для съемки и спектрального анализа местности – дорог, лесов, посевов, почвы, геологических образований. С помощью гиперспектральной съемки можно определить состояние наблюдаемых объектов – влажность и состав почвы, заболевания сельскохозяйственных культур, загрязнение водоемов и мн. др.

Космический аппарат GeoEye-1 позволяет одновременно вести съемку в панхроматическом и многоспектральном режимах с пространственным разрешением 0,4 и 1,6 м соответственно. Важной особенностью этого космического аппарата является высокая точность координатной привязки изображений, которая обеспечивается благодаря

применению космической платформы с высокой стабильностью и повышенной точностью определения пространственного положения и ориентации спутника.

В соответствии с данными изготовителя, средняя квадратическая погрешность определения координат точек местности по снимкам GeoEye-1 составляет 1,5 м в плане без использования наземных опорных точек. При повышении пространственного разрешения и точности географической привязки космических снимков можно на их основе формировать карты и планы вплоть до масштаба 1:2000 (т.е. использовать на уровне материалов аэрофотосъемки). Представляется, что такие точность позиционирования и масштаб конечных продуктов еще долго будут разграничивать области применения космических и авиационных съемочных средств.

Еще одним технологическим преимуществом КА GeoEye-1 является способность аппарата с большой скоростью ($4^\circ/\text{с}$) поворачиваться в любом направлении для перенацеливания телескопа на заданный участок Земли, что позволяет получать большое количество кадров на каждом витке и осуществлять различные режимы съемки: кадровый, маршрутный, площадной, а также вести стереосъемку. При ширине захвата в надире 15,2 км и углах отклонения оси камеры от него до 40° производительность системы выше, чем у любой другой из существующих коммерческих платформ. Характеристики охвата территории при различных режимах съемки GeoEye-1: номинальная ширина захвата в надире – 15,2 км; площадь одного кадра – 225 км^2 ($15 \times 15 \text{ км}$); максимальная площадь – $15\,000 \text{ км}^2$ ($300 \times 50 \text{ км}$); площадь квадрата $1^\circ \times 1^\circ$ – $10\,000 \text{ км}^2$ ($100 \times 100 \text{ км}$); площадь стереосъемки – $6\,270 \text{ км}^2$ ($224 \times 28 \text{ км}$); максимальная суточная производительность – число кадров в панхроматическом режиме – 2400, площадь в панхроматическом режиме – $700\,000 \text{ км}^2$, площадь в многоспектральном режиме – $350\,000 \text{ км}^2$.

Кооперация компаний во главе с DigitalGlobe (США) изготовила и запустила два космических аппарата – WorldView-1 и WorldView-2. В проекте участвовали Bell Aerospace (США; платформа), Kodak (США; оптическая камера), BAE Systems (Великобритания; система обработки).

WorldView-1 массой 2500 кг оснащен телескопом с зеркалом диаметром 60 см для съемки с разрешением 0,45 м только в панхроматическом режиме при ширине полосы захвата 16,4 км. WorldView-2 массой 2800 кг оборудован крупногабаритным телескопом с диаметром зеркала 110 см для съемки с разрешением 0,45 м в панхроматическом режиме и 1,8 м в мультиспектральном (восемь спектральных каналов). Ширина полосы захвата на местности при съемке в надир составит 16,4 км при высоте орбиты 770 км.

Для достижения высокого качества изображения применяются оптическая система с высоким контрастом и оптимизированным отношением сигнал/шум, а также технология временной задержки и накопления сигнала (TDI) на многолинейных ПЗС-структурах (6 режимов накопления от 8 до 64 крат). Оба космических аппарата оснащены бортовыми регистраторами емкостью 2,2 Тбит и сверхскоростной (800 Мбит/с) радиолинией передачи данных. Срок активного существования – 7 лет и более. Для увеличения производительности в системе ориентации используются гироскопы управления моментом, которые позволяют довести скорость перенацеливания телескопа на объекты съемки до $4,5^\circ/\text{с}$. Аппаратура может выполнять съемку в кадровом, маршрутном (в том числе сложной конфигурации, например, вдоль береговой линии, дороги, нефтепровода или государственной границы), площадном (участки $60 \times 60 \text{ км}$) режимах, а также в режиме формирования стереопар. Предусмотрена также возможность программирования съемки и приема информации на станцию клиента (виртуальный оператор) в течение одного сеанса радиосвязи. Коммерческая эксплуатация спутника WorldView-2 в полном объеме началась в январе 2010 г.

Важной особенностью рассмотренных перспективных космических аппаратов является высокая точность координатной привязки изображений, которая достигается благодаря применению космической платформы с высокой стабильностью и улучшенной точностью определения ориентации спутника. Так, координатная точность изображений

КА WorldView-1 без использования наземных контрольных точек оценивается в 5,8-7,6 м (СЕ90), с наземными контрольными точками в пределах снимка – в 2 м, с контрольными точками на соседних снимках – в 3-3,5 м (технология Accuracy Transfer Service – ATS). Планируемая координатная точность изображений позволит создавать карты масштаба 1:10 000 без использования наземных контрольных точек.

Космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения найдут применение при разработке крупномасштабных карт и планов местности, в различных тематических ГИС, при планировании городской застройки, строительстве дорог, линий связи, трубопроводов и других объектов инфраструктуры. В случае устойчивого развития рынка потребителями пространственных данных на основе космических изображений сверхвысокого разрешения могут стать миллионы людей: водители автомобилей, оснащенных навигационными компьютерами, пользователи ГИС, проектировщики, строители, страховщики и др.

Основные параметры радиолокационных космических аппаратов. Радиолокационные изображения могут быть получены независимо от метеоусловий и освещенности в районе цели и позволяют выполнять заявки на съемку в течение нескольких суток. Кроме того, космические радиолокационные изображения дают возможность создавать цифровые модели рельефа, а специальные технологии интерферометрической съемки – определять незначительные подвижки грунта. Учитывая, что существующие радиолокационные космические системы RADARSAT-1 (Канада), ERS-2, ENVISAT-1 (оба – США) и ALOS (Япония) обеспечивают разрешение на местности не лучше 8 м, что не отвечает современным требованиям.

15 июня 2007 г. был запущен гражданский спутник TerraSAR-X, который обеспечил радарную съемку с разрешением 1 м. По силе воздействия на рынок геоинформатики это событие можно сравнить с появлением в свое время на орбите космического аппарата IKONOS-2 с оптической аппаратурой метрового разрешения. Радиолокационные изображения с разрешением до 1 м близки по качеству к высокодетальным оптическим снимкам, но при этом могут быть получены при любых метеоусловиях и освещенности в районе цели.

По данным российских компаний-операторов, результаты оптической съемки объектов в средней полосе России заказчикам приходится ждать от недели до месяца, в то время как радиолокационная аппаратура позволит выполнить заявки в течение нескольких суток после заказа [6; 7]. Кроме того, космические радиолокационные изображения дают возможность формировать цифровые модели рельефа для создания топографических карт обширных территорий, что с устаревшим фондом карт. Радиолокационные изображения дополняют снимки, полученные в видимом и инфракрасном диапазонах, повышая объем доступной информации и ее достоверность. С появлением радарных космических систем, с сопоставимым системам видимого диапазона разрешением, возможности дистанционного зондирования Земли из космоса многократно возрастают [6; 8; 9].

Вывод в космос орбитальных группировок из нескольких спутников, таких как SAR-Lupe и COSMO-Skymed, значительно повышает оперативность съемки. Правда, космические аппараты SARLupe и COSMO-Skymed не относятся к коммерческим проектам.

Специальные технологии интерферометрической съемки позволяют определять незначительные подвижки грунта – эти данные могут быть использованы для контроля состояния дорог, трубопроводов, обнаружения нелегальных врезок в нефтегазопроводы и оценки сейсмоопасности. Интерферометрия комбинирует комплексные изображения, зафиксированные антеннами под различными углами наблюдения или в разное время. По результатам сравнения двух снимков одного и того же участка местности получают интерферограмму, представляющую собой сеть цветных полос, ширина которых соответствует разности фаз по обеим экспозициям. Благодаря высокой частоте излучения подвижки регистрируются с сантиметровой точностью.

Все данные предоставляются в цифровом виде, что обеспечивает объективность и однозначность интерпретации. Интерферометрия может рассматриваться в качестве альтернативы традиционной стереофотографической технологии для создания топографических карт. Наиболее простой способ оценки смещений состоит в сравнении пары разновременных спутниковых изображений. Две интерферограммы позволяют выявить любые изменения, произошедшие на поверхности Земли (оползни, предвестники землетрясений), а также по колебаниям характеристик радиосигналов отследить смену влажности почвы (проблемы подтопления). Для получения достоверных результатов необходимо соблюдение ряда условий, например, выведение спутника для повторной экспозиции в область космического пространства, близкую к первой экспозиции; один сезон съемки (хоть и в разные годы) для сходного состояния отражающей поверхности (растительный покров, гидрогеологические условия).

Эти проблемы в большей мере решаются с помощью тандема спутников, которые перемещаются по одним и тем же орбитам с интервалом пролета 24 ч. Космическая информация со спутника TerraSAR-X может найти применение при картографировании, планировании городской застройки, ликвидации последствий стихийных бедствий, в транспортном строительстве, сельском и лесном хозяйстве. Маркетинг космической информации TerraSAR-X осуществляет компания Infoterra GmbH (Германия), которая предлагает зарубежным клиентам принимать радиолокационные изображения на собственные приемные станции.

Космическое агентство Германии DLR разработало дополнительный спутник Tandem-X, который был запущен 21 июня 2010 г. для группового полета с TerraSAR-X в целях оперативной интерферометрической съемки с высокой точностью. Резюмируя, можно отметить, что данные дистанционного зондирования, полученные с этих спутников, обеспечивают: наивысшее пространственное разрешение для радарных систем (до 1 м); возможность круглосуточного всепогодного наблюдения за любыми объектами на земной поверхности; получение высокоточных ЦМР с помощью интерферометрических методов; мониторинг даже незначительных (до 1 мм) подвижек поверхности; высокую оперативность выполнения заказов.

Оснащение спутника TerraSAR-X новейшим радаром с синтезированной апертурой, позволяющим выполнять съемку земной поверхности с беспрецедентным пространственным разрешением, делает названную систему одним из наиболее совершенных инструментов дистанционного зондирования Земли (наряду с COSMO-SkyMed). Спутник находится на солнечно-синхронной полярной орбите высотой 514 км, имеющей наклон 97,44°. Расчетный срок пребывания на орбите TerraSAR-X составляет около пяти лет. Радар выполняет съемку земной поверхности в X-диапазоне длин волн (3,1 см) с изменяемой поляризацией излучения (HH, VH, HV, VV), варьировать съемочными углами можно от 20 до 55°.

Высокая востребованность космической информации и эффективная политика взаимодействия государства и частного бизнеса позволили ряду стран создать коммерческие космические системы сверхвысокого разрешения (до 0,4 м), которые обеспечивают информацией государственные структуры на основе гарантированных контрактов, параллельно формируя продукцию для продажи на мировом рынке. Высокая конкуренция разработчиков космических систем привела к существенному улучшению технических характеристик аппаратуры, сокращению сроков разработки систем и уменьшению габаритных параметров космических аппаратов. Среди достижений следует отметить изготовление зеркал телескопов из легковесных материалов, новейшую технологию их шлифовки и использование более совершенных матриц с размером пикселей 6-8 мкм, работающих по технологии временной задержки и накопления сигналов. В состав бортовой аппаратуры всех рассмотренных КА входят звездные и высокоточные гироскопические датчики, приемники сигналов GPS, которые используются для определения углового и пространственного положения аппаратов на орбите.

Характеристики съемочной и измерительной аппаратуры позволяют создавать с использованием космических снимков топографические карты масштаба 1:10000 и мельче без наземных контрольных точек и топографические планы масштаба до 1:2000 при их наличии.

Заключение. При мониторинговых исследованиях дорожно-транспортного комплекса следует учитывать и динамику экологического состояния прилегающих к нему экосистем, которые находятся в зоне влияния дорог. При организации дистанционного зондирования местности в бассейнах рек важное значение имеет контроль за экологическими трендами в развитии растительного покрова. Бассейны рек являются нижней ландшафтной единицей экологической организации территории водосбора и долины. Как парагенетический комплекс, эта территория нуждается в единой комплексной оценке всех параметров экологического мониторинга. Объединяющим началом является поверхностный и подземный сток, который может распространять дорожные поллютанты на значительные от дороги расстояния. Негативные изменения растительного покрова скажутся на распределении животного населения и на снижении видового разнообразия в целом. Поэтому, аэрокосмический мониторинг позволит своевременно выявить деструктивные тенденции в развитии экосистем, примыкающих к дорожно-транспортному комплексу. По материалам дистанционного зондирования возможно установить начальные этапы негативных трендов в экосистемах и сделать прогноз на их дальнейшее развитие. По спектрально-зональным снимкам контролируют санитарное состояние лесов, физиологическое состояние растений и животных, распространение организмов и т.д.

Преимущества использования материалов космической фотосъемки при оценке состояния дорожно-транспортных систем определяются широкой обзорностью, достоверной разрешающей способностью, оптимальной генерализацией фотоизображений антропогенных разностей, а также возможностью оперативного получения одновременных фотоснимков, необходимых для выявления динамики антропогенных процессов, связанных с дорогами. Для дешифрирования геоморфологических, гидрологических, гидрогеологических и растительных ландшафтных разностей, связанных с дорожно-транспортным комплексом, используются не только чёрно-белые, но и цветные синтезированные и спектрально-зональные космические снимки. Цветные фотоснимки сохраняют те же фотографические и топографические свойства, что и чёрно-белые, а также содержат дополнительную информацию 2-3 зон спектра. Цветное изображение их лишено фотометрических и геометрических искажений, которые бывают при синтезе многозональных изображений.

Дешифрованные возможности цветных спектрально-зональных космических фотоснимков значительно выше чёрно-белых, в силу большого количества цветовых различий. У чёрно-белых их 7-8, а у спектрально-зональных от 30 до 35. При дешифрировании площадей с различными показателями, цвет изображения обычно оценивается визуально по специально составленным цветовым разрядным шкалам. Выделение контуров наиболее эффективно по космическим фотоснимкам крупных масштабов с разрешением на местности не менее 10-15 м. Необходимо учитывать, что фотографическое увеличение не даёт преимуществ по сравнению с контурами космических фотоснимков в отношении повышения разрешающей способности. При этом становится лишь удобным выделять контурное нагромождение.

Использование чёрно-белых космических фотоснимков часто приводит к значительной потере качества информации. Фотоизображение снимка представляет собой определённую совокупность различных тонов или цветов, расположенных в соответствии с геометрической структурой объекта съёмки. В свою очередь, тон или цвет изображения любых природных объектов, являются функцией отражательной способности объектов съёмки и светочувствительности фотоматериалов. Объекты исследования с различными ландшафтами характеристиками дешифруются по комплексу признаков: цвету (тону), форме, размерам, размещению, тени, рисунку изображения. Цвет или тон изображения

являются одним из наиболее важных признаков дешифрирования космических фотоснимков.

Таким образом, совершенствование космических летательных аппаратов и их технического оснащения позволяет прогрессивно использовать их современные возможности в разнообразных исследованиях, в том числе в мониторинге дорожно-транспортных систем.

Литература

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