

## ОБЗОР РОССИЙСКИХ И ИНОСТРАННЫХ ИСТОЧНИКОВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Материалы мультиспектрального дистанционного зондирования Земли космическими аппаратами стали основным регулярно обновляемым источником оперативной информации в таких областях как лесное и сельское хозяйство, почвоведение, исследования криосферы, мониторинг последствий глобального потепления и пр. В статье проведен обзор российских космических спутников, осуществляющих мониторинг земной поверхности в режиме мультиспектральной съемки, сравнение параметров спутниковых снимков с иностранными источниками данных дистанционного зондирования Земли и оценка основных характеристик спутниковых снимков, определяющих возможность их применения для создания систем агро- и экологического мониторинга. Рассмотрены параметры аппаратов Landsat 8 и 9, Sentinel-2, Аист-2Д, Канопус-В, Ресурс-П, Метеор-М. Во всех спутниках пространственное разрешение зависит от режима съемки и типа сенсора. Все российские аппараты обладают довольно высоким разрешением в мультиспектральном режиме. Из архивных данных наилучшее разрешение у спутника Ресурс-П – 3 м. Наличие красного и ближнего инфракрасного диапазона во всех спутниковых системах позволяет производить расчет наиболее распространенных спектральных индексов для характеристики общего состояния растительного покрова, таких как NDVI, RVI, SAVI, TVI. Наличие дополнительных слоев в диапазоне красного барьера фотосинтеза (RedEdge слои) и коротковолновом инфракрасном диапазоне предоставляет дополнительные возможности анализа параметров зеленой биомассы растений. На примере территории Республики Татарстан (РТ) рассмотрено временное разрешение и пространственное покрытие материалами съемки. Для любой точки территории РТ доступно 10-26 снимков Landsat с общей облачностью менее 30% за вегетационный период. Спутники Sentinel-2 обеспечивают порядка 10-45 снимков с общей облачностью менее 30% за вегетационный период. Пространственное и временное покрытие российских аппаратов имеет существенные ограничения. Наилучшее покрытие поверхности земли среди отечественных спутниковых систем обеспечивает группа аппаратов Канопус-В. При этом распределение снимков крайне неравномерно. На территории РТ есть как области с высокой плотностью снимков за вегетационный период (порядка 15-20 шт), так и области, не охваченные снимками вовсе.

*Ключевые слова:* Роскосмос; Landsat; Sentinel; дистанционное зондирование Земли.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.2.04.18>

### Введение

Современная хозяйственная деятельность все сильнее опирается на спутниковую информацию, а материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) становятся основным, регулярно обновляемым источником оперативной информации и основой природно-ресурсных кадастров (Кулик, 2012). Развитие спутниковых систем и инфраструктуры доступа к материалам съемки существенно расширило применяемость данных ДЗЗ для решения практических и научных задач.

Среди многообразия разновидностей спутниковых сенсоров особое место занимает мультиспектральная съемка. В отличие от панхроматических сенсоров, радаров и лазеров, производящих

измерение излучения одной отдельной длины волны, мультиспектральные сканеры производят одновременное измерение излучения сразу нескольких длин волн – каналов или спектральных слоев (Tempfi et al., 2009). Зондирование в нескольких спектральных каналах позволяет обнаружить и использовать зависимость специфических параметров земного покрова (минеральный состав почвы, влажность, содержание хлорофилла в листьях и пр.) с их отражательной способностью в определенном диапазоне электромагнитного спектра, что, в свою очередь, определило ключевую позицию спутниковых мультиспектральных данных в таких областях, как лесное хозяйство, сельское хозяйство, почвоведение, исследования

криосферы, мониторинг последствий глобального потепления, исследования и картирование поверхностных вод и пр. (Wulder et al., 2019; Mulder et al., 2011; Leslie et al., 2017).

Номенклатура российских спутников ДЗЗ довольно обширна и включает аппараты различного целевого назначения. Первый гражданский космический аппарат высокого разрешения «Ресурс-ДК1» был запущен в 2006 г. (Дворкин, 2015). При этом доля Российской Федерации на мировом рынке дистанционного зондирования остается довольно низкой – всего 0.2% (Бухарицин, 2021). Лидерами по доле спутников ДЗЗ, приходящимися на страну, являются США (358 спутников), КНР (143 спутника), Европа (63 спутника), Япония (34 спутника) и Индия (20 спутников) (Савельева и др., 2022). Это распределение также отражается и на общем научном вкладе в области применения данных дистанционного зондирования земли: по общему количеству публикаций в международных базах данных лидируют США, Китай, страны ЕС, Япония. Россия по этому показателю находится на 13 месте (Zhuang et al., 2013).

Обостряющаяся мировая обстановка, связанные с этим взаимные санкции существенно ограничивают выбор источников данных ДЗЗ при проектировании и создании долговременных проектов мониторинга природных ресурсов в научных и прикладных целях. Руководство страны стремится снизить зависимость от использования зарубежной космической информации, в том числе путем увеличения количества спутников ДЗЗ (Lysenko, Lozhkovoï, 2022).

Цель статьи – обзор российских космических спутников, осуществляющих мониторинг земной поверхности в режиме мультиспектральной съемки, сравнение параметров спутниковых снимков с иностранными источниками данных ДЗЗ и оценка основных характеристик спутниковых снимков, определяющих возможность их применения для создания систем агро- и экологического мониторинга. В данном обзоре не рассматриваются спутники, оборудованные съемочной аппаратурой сверхнизкого пространственного разрешения (серии гидрометеорологических спутников Электро-Л и Арктика-М с разрешением 1000 м в видимом диапазоне и 4000 м в ИК диапазоне), радиолокационные спутники (серия Обзор-Р, серия Кондор-ФКА), стереоскопические спутники (серия Аист-2Т). Гиперспектральные спутниковые системы (спутники EO-1, Terra, PROBA-1) также остались за рамками данного обзора.

## Иностранные спутники

Среди иностранных источников мультиспектральных данных основными конкурентами Роскосмоса являются NASA (США) и Европейское космическое агентство (ESA) (Савельева и др., 2022).

Космические снимки программы *Landsat* (NASA) использовались для глобального сельскохозяйственного мониторинга с запуска спутника *Landsat 1* в 1972 г. (Leslie et al., 2017). В настоящее время на орбите Земли функционируют три спутника программы: *Landsat 7*, *8* и *9*. Аппаратура *Landsat 7* испытала технический сбой в 2003 г., приведший к потере данных на снимках, а в 2022 г. научная миссия *Landsat 7* была официально закончена, спутник переведен на сниженную орбиту. Миссии *Landsat 8* и *9* запущены соответственно в 2013 и 2021 гг.

Съемочная аппаратура спутника *Landsat 8* включает: (1) *Operational Land Imager (OLI)* – производит съемку 9 коротковолновых спектров с разрешением 30 м (15 метров в случае панхроматического слоя) (табл. 1); (2) *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* – производит съемку в дальнем инфракрасном диапазоне в разрешении 100 м. Сенсоры *Landsat 8* обладают радиометрическим разрешением в 12 бит, что соответствует 4096 оттенкам серого (в сравнении с 256 оттенками 8 битовых сенсоров *Landsat 1–7*) (*Landsat 8...*, 2019). Сенсоры спутника *Landsat 9* – *OLI-2* и *TIRS-2* – слабо отличаются от предыдущего поколения, они обладают большим радиометрическим разрешением в 14 бит (16384 оттенка для отдельных слоев) (*Landsat 9...*, 2022).

Оба спутника расположены на одной орбите с 8-дневным смещением, таким образом, комбинированное применение данных *Landsat 8* и *9* обеспечивает 8 дневное временное разрешение. Загрузка снимков возможна уже в течение 72 часов после съемки. Длительность миссии *Landsat 8* уже превысила расчетные сроки, но спутник по-прежнему функционирует.

Программа *Copernicus* учреждена в 2014 г. как часть космической программы Европейского союза на основе предыдущей инициативы мониторинга Земли *Global Monitoring for Environment and Security (GMES)* (*Regulation...*, 2010; *Regulation...*, 2014). Ядром программы являются 7 групп спутников различного назначения под общим названием *Sentinel*: (1) *Sentinel-1* – два радиолокационных спутника (1A и 1B), производящие съемку в С-диапазоне (длина волны 6 см) (Мышляков, 2016); (2) *Sentinel-2* – два мультиспектральных спутника (2A и 2B), производят съемку в видимом, ближнем инфракрасном

Таблица 1. Основные характеристики снимков спутниковых систем  
Table 1. Main characteristics of satellite imagery

Спутник Satellite	Сенсор Sensor	Спектральное разрешение Spectral resolution	Временное разрешение Temporal resolution	Пространственное разрешение Spatial resolution
Landsat 8	OLI,  TIRS	UltraBlue (0.43 - 0.45 мкм) Blue (0.45 - 0.51 мкм) Green (0.53 - 0.59 мкм) Red (0.64 - 0.67 мкм) NIR (0.85 - 0.88 мкм) SWIR1 (1.57 - 1.65 мкм) SWIR2 (2.11 - 2.29 мкм) PAN (0.50 - 0.68 мкм) Cirrus (1.36 - 1.38 мкм) TIRS1 (10.6 - 11.19 мкм) TIRS2 (11.5 - 12.51 мкм)	16 дней	30 м 30 м 30 м 30 м 30 м 30 м 30 м 15 м 30 м 100 м 100 м
Landsat 9	OLI-2,  TIRS-2	UltraBlue (0.43 - 0.45 мкм) Blue (0.45 - 0.51 мкм) Green (0.53 - 0.59 мкм) Red (0.64 - 0.67 мкм) NIR (0.85 - 0.88 мкм) SWIR1 (1.57 - 1.65 мкм) SWIR2 (2.11 - 2.29 мкм) PAN (0.50 - 0.68 мкм) Cirrus (1.36 - 1.38 мкм) TIRS1 (10.6 - 11.19 мкм) TIRS2 (11.5 - 12.51 мкм)	16 дней	30 м 30 м 30 м 30 м 30 м 30 м 30 м 15 м 30 м 100 м 100 м
Sentinel-2	MSI	UltraBlue (0.43 мкм) Blue (0.49 мкм) Green (0.56 мкм) Red (0.66 мкм) RedEdge (0.71 мкм) RedEdge (0.74 мкм) RedEdge (0.78 мкм) NIR (0.84 мкм) RedEdge (0.86 мкм) Water vapour (0.94 мкм) Cirrus (1.37 мкм) SWIR1 (1.61 мкм) SWIR2 (2.19 мкм)	5 дней для пары спутников	60 м 10 м 10 м 10 м 20 м 20 м 20 м 10 м 20 м 60 м 60 м 20 м 20 м
Аист-2Д	ОЭА «Аврора»	Blue (0.45-0.52 мкм) Green (0.52-0.60 мкм) Red (0.60-0.7 мкм)	-	4.44 м 4.44 м 4.44 м
Канопус-В (1-6)	МСС  ПСС	Blue (0.46-0.52 мкм) Green (0.52-0.60 мкм) Red (0.63-0.69 мкм) NIR (0.75-0.86 мкм)  PAN (0.45-0.85 мкм)	5 дней	10.5 м 10.5 м 10.5 м 10.5 м  2.1 м
Канопус-В-ИК	МСС  ПСС  МСУ-ИК-СРМ	Blue (0.46-0.52 мкм) Green (0.52-0.60 мкм) Red (0.63-0.69 мкм) NIR (0.75-0.86 мкм)  PAN (0.45-0.85 мкм)  MWIR (3.5-4.1 мкм) LWIR (8.4-9.4 мкм)	5 дней	10.5 м 10.5 м 10.5 м 10.5 м  2.1 м  200 м 200 м

Окончание Таблицы 1  
The end of Table 1

Спутник Satellite	Сенсор Sensor	Спектральное разрешение Spectral resolution	Временное разрешение Temporal resolution	Пространственное разрешение Spatial resolution
Ресурс-П	Геотон-Л1	Blue (0.45-0.52 мкм) Green (0.52-0.60 мкм) Red (0.61-0.68 мкм) Red1 (0.67-0.70 мкм) Red2 (0.70-0.73 мкм) NIR+Red (0.70-0.80 мкм) PAN (0.58-0.80 мкм)	3 дня	3-4 м 3-4 м 3-4 м 3-4 м 3-4 м 3-4 м 1 м
	ШМСА-ВР	Blue (0.43-0.51 мкм) Green (0.52-0.60 мкм) Red (0.61-0.68 мкм) NIR1 (0.70-0.90 мкм) NIR2 (0.80-0.90 мкм) PAN (0.43-0.70 мкм)		24 м 24 м 24 м 24 м 24 м 12 м
	ШМСА-СР	Blue (0.43-0.51 мкм) Green (0.52-0.60 мкм) Red (0.61-0.68 мкм) NIR1 (0.70-0.90 мкм) NIR2 (0.80-0.90 мкм) PAN (0.43-0.70 мкм)		120 м 120 м 120 м 120 м 120 м 60 м
	ГСА	96-255 каналов в диапазоне 0.4-1.1 мкм		25-30 м
Метеор-М-2	КМСС	UltraBlue (0.37-0.45 мкм) Blue (0.45-0.51 мкм) Green (0.53-0.57 мкм) Red (0.58-0.69 мкм) NIR1 (0.63-0.68 мкм) NIR2 (0.76-0.90 мкм)	2 дня	50/100 м 50/100 м 50/100 м 50/100 м 50/100 м 50/100 м
	МСУ-МР	(0.5-0.7 мкм) (0.7-1.1 мкм) (1.6-1.8 мкм) (3.5-4.1 мкм) TIRS1 (10.5-11.5 мкм) TIRS2 (11.5-12.5 мкм)		1 км 1 км 1 км 1 км 1 км 1 км

Примечание: UltraBlue – диапазон дальнего синего и фиолетовых цветов; Blue – диапазон синего цвета; Green – диапазон зеленого цвета; Red – диапазон красного цвета; NIR – ближний инфракрасный диапазон; SWIR1 и SWIR2 – коротковолновой инфракрасный диапазон; PAN – панхроматическое изображение; Cirrus – диапазон детекции тонких облаков на большой высоте; TIRS1 и TIRS2 – термальный инфракрасный диапазон; RedEdge – диапазоны красного барьера фотосинтеза; Water vapour – диапазон детекции водяного пара; MWIR – средневолновый инфракрасный диапазон; LWIR – длинноволновый инфракрасный диапазон.

Note: UltraBlue – wavelength range of far blue and violet colors; Blue – blue color range; Green – green color range; Red – red color range; NIR – near infrared range; SWIR1 and SWIR2 – short-wave infrared range; PAN – panchromatic image; Cirrus – channel for detection of high-altitude cloud; TIRS1 and TIRS2 – thermal infrared range; RedEdge – ranges of the red barrier of photosynthesis; Water vapour – water vapour detection range; MWIR – mid-wave infrared range; LWIR – long wave infrared range.

и коротковолновом инфракрасном диапазоне (Sentinel-2..., 2015); (3) Sentinel-3 – два многофункциональных спутника, оборудованных радиометром температуры поверхности моря и суши (SLSTR), спектрометром для измерения цвета океана и земли (OLCI), двухчастотным (Ku- и C-диапазон) радиолокационным высотомером, микроволновым радиометром (MWR); (4) Sentinel-4 (в разработке) – геостационарный спутник мониторинга качества воздуха (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, HCHO, CHONO, аэрозоли, CO, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub> стратосферы) территории Европейского Союза. Будет оборудован спектрометром ультрафиолетового и видимого ближнего инфракрасного диапазона

(UVN) и инфракрасным эхолотом (IRS); (5) Sentinel-5 (в разработке) – спутник глобального мониторинга качества воздуха на полярной орбите, оборудованный спектрометром ультрафиолетового, видимого, ближнего коротковолнового инфракрасного диапазона (UVNS); (6) Sentinel-5P – спутник предшественник миссии Sentinel-5. Обеспечивает непрерывность наблюдения качества атмосферы в образовавшемся промежутке между основными миссиями. Оборудован инструментом мониторинга тропосферы (TROPOMI); (7) Sentinel 6 – два спутника (один в разработке) мониторинга высоты океана, оборудованные высотомером Poseidon-4 и микроволновым радиометром

(AMR-C).

Мультиспектральные спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B запущены в 2015 и 2017 гг., соответственно, и рассчитаны на 12-летний цикл работы (из которых проектный срок – 7 лет) (Sentinel-2 ..., 2015). Также в 2024 и 2028 гг. планируется запуск их замены – Sentinel-2C и Sentinel-2D. Спутники оборудованы сенсором MultiSpectral Imager (MSI), производящим съемку в видимом, ближнем и коротковолновом инфракрасном спектрах (табл. 1). Радиометрическое разрешение сенсоров составляет 12 бит.

#### Российские спутники

В настоящее время на сайте геопортал Роскосмоса (gptl.ru) возможен поиск и оформление заявок на получение снимков 4 групп спутников.

*Аист-2Д* – многоцелевой космический аппарат, запущен в 2016 г. Литера «Д» означает «демонстратор». Данный спутник нельзя рассматривать как инструмент постоянного мониторинга Земли, поскольку он предназначен для отработки методов съемки в видимом и ИК диапазоне, а также отработки методов приема и обработки информации ДЗЗ. Хотя первоначальная задача спутника – мониторинг земной поверхности, ориентация аппарата может изменяться для наблюдения за другими небесными телами (Kirilin et al., 2020). Оптико-электронная аппаратура (ОЭА) «Аврора» позволяет получать изображения поверхности Земли в панхроматическом и мультиспектральном диапазонах видимого спектра (табл. 1). Также спутник оборудован бистатическим радиолокатором с синтезированной апертурой и аппаратурой теплового ИК-диапазона. В 2024 г. спутник сойдет с орбиты и завершит миссию. Последняя доступная для загрузки дата съемки – 31.05.2022 г.

Серия космических аппаратов *Канопус-В*: Канопус-В1 (запущен в 2012 г., прекратил работу в 2020 г.), Канопус-В-ИК (2017 г.), Канопус-В3 (2018 г.), Канопус-В4 (2018 г.), Канопус-В5 (2018 г.), Канопус-В6 (2018 г.). Рассчитаны на 5-летний период работы с 7-летним запасом топлива для корректирующей двигательной установки (Горбунов, Слободский, 2010). Спутники серии В1-В6 оборудованы двумя типами оптической аппаратуры: панхроматической съемочной системой (ПСС) и многозональной съемочной системой (МСС) (Ширяев и Водолажская, 2016). Спутник Канопус-В-ИК также несет дополнительный оптический аппарат – многоканальный радиометр среднего и дальнего инфракрасных диапазонов (МСУ-ИК-СРМ). Радиометрическое разрешение всех сенсоров – 8бит (табл. 1).

Серия космических аппаратов природно-ре-

сурсного назначения *Ресурс-П*: Ресурс-П1 (запущен в 2013 г., прекратил работу в 2021 г.), Ресурс-П2 (2014–2017 гг.), Ресурс-П3 (2016–2017 гг.), Ресурс-П4 (2024 г.), Ресурс-ПМ1 (план 2025 г.), Ресурс-ПМ2 (план 2025 г.). Рассчитаны на 5-летний период работы. Спутники серии П1–П3 были оборудованы: (1) оптико-электронным комплексом «Геотон-Л1», (2) гиперспектральной аппаратурой (ГСА), (3) комплексом широкозахватной мультиспектральной аппаратуры высокого (ШМСА-ВР) и среднего (ШМСА-СР) разрешения (Дворкин, 2015). Спутники ПМ планируется оборудовать сенсорами, осуществляющими съемку в видимом и коротковолновом ИК-диапазоне: (1) оптико-электронным комплексом высокого разрешения (ОЭК-ВР); (2) широкозахватным обзорным комплексом (ШОК-ПМ) (Заичко, 2017). Радиометрическое разрешение всех сенсоров – 8 бит (табл. 1).

Серия космических аппаратов *Метеор-М*: Метеор-М1 (запущен в 2009 г., прекратил работу в 2014 г.), Метеор-М2 (2014–2021 гг.), Метеор-М2-2 (2019–? гг., текущий статус спутника публично не сообщался), Метеор-М2-3 (2023 г., в настоящее время проходит летные испытания), Метеор-М2-4 (2024 г.), Метеор-М2-5 (план 2025 г.), Метеор-М2-6 (план 2026 г.). Спутники рассчитаны на 5–7-летний период работы. Съемочная аппаратура спутника включает: (1) комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС), (2) многоканальное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР), (3) СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ, (4) ИК Фурье спектрометр (ИКФС-2), (5) гелиогеофизический аппаратный комплекс (ГГAK-М), (6) радиолокационный комплекс (БРЛК) (Горбунов и др., 2008). Радиометрическое разрешение всех сенсоров – 8 бит (табл. 1). В настоящее время недоступен поиск и загрузка как новых, так и архивных снимков данной серии спутников ни на одном из сервисов доступа. Причина закрытия доступа публично не сообщалась.

Помимо рассмотренных российских спутниковых систем, доступных для загрузки, корпорация Роскосмос в 2024–2030 гг. планирует закупку данных ДЗЗ с российских негосударственных космических аппаратов в интересах государственных потребителей. Из заявленных на сегодняшний день: данные спутников Зоркий-2М компании «Ситроникс», а также высокодетальные данные спутников компании «Барл» (Роскосмос ..., 2023).

Спутники серии *Зоркий-2М* предназначены для проведения съемки земной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. В

настоящее время на орбите находится один аппарат серии, в 2024 г. планируется наращивание орбитальной группировки до 19 аппаратов, а в 2025 г. – до 33 аппаратов. Спутники Зоркий–2М проводят съемку в разрешении 2.74 м и шириной полосы захвата в 13 км. Далее параметры данных спутников не рассматриваются.

### Пространственное разрешение

Пространственное разрешение представляет собой минимальную линейную величину изображенного объекта местности, зафиксированного пикселем растрового изображения. Данный параметр характеризует разрешающую способность инструмента, необходимую для распознавания признаков и основанную на размере детектора, фокусном расстоянии и высоте сенсора. Пространственное разрешение классифицируется на: низкое ( $>500$  м), среднее (20–500 м), высокое (2–20 м) и сверхвысокое ( $<2$  м) (рис. 1).

Приемлемое пространственное разрешение зависит от типа практической задачи. Значение каждого пикселя растрового спутникового снимка представляет собой смесь спектральных отражений всех объектов, попадающих в него (Rodríguez-Carrión et al., 2014). В 1981 г. Маркхэм и Таунсенд показали, что точность задач классификации изображений зависит от двух факторов: (1) количества смешанных пикселей, расположенных на границе разных классов и (2) спектральной вариабельности в пределах выделяемых классов (Woodcock, Strahler, 1987). Изображения с большим пространственным разрешением содержат меньше смешанных пикселей, но при этом возрастает спектральная вариабельность в пределах классов. Таким образом, более высокое пространственное разрешение не всегда приводит к росту точности классификации (Löw, Duveiller, 2013). Высокое пространственное разрешение увеличивает требования к вычислительной мощности при машинной обработке спутниковых данных, что в свою очередь увеличивает время и стоимость вычислений.

Ф. Лёв и Ж. Дювилль (Löw, Duveiller, 2013) на примере четырех сельскохозяйственных ландшафтов Средней Азии показали, что в задачах определения видов культур требуемый размер пикселя варьирует в зависимости от участка и вида культур и некоторые культуры не могут быть определены при размере пикселя  $>200$  м. Для высоко детальных снимков ( $\leq 30$  м) попиксельной классификации стоит предпочесть объектную классификацию – предварительную сегментацию исходного изображения и последующую классификацию выделенных объектов с усредненными

значениями отражательной способности (Löw, Duveiller, 2014).

Во всех рассмотренных спутниках пространственное разрешение зависит от режима съемки и типа сенсора. Панхроматический режим, как правило, обеспечивает в несколько раз большее разрешение, чем мультиспектральная съемка (табл. 1). Все российские аппараты обладают довольно высоким разрешением в мультиспектральном режиме (рис. 1). Канопус–В имеет разрешение в 10.5 м на пиксель, что превосходит разрешение Landsat и сравнимо с данными Sentinel. Из архивных данных наилучшее разрешение у данных спутника Ресурс–П – 3 м.

### Спектральное разрешение

Спектральное разрешение определяет количество диапазонов электромагнитного спектра и размер зон съемки, регистрируемые съемочной аппаратурой. По спектральному разрешению снимки классифицируют на панхроматические или монохроматические (один, как правило, довольно широкий спектральный диапазон), мультиспектральные (2–10 спектральных диапазонов), гиперспектральные ( $>100$  диапазонов). Большее количество спектральных диапазонов позволяет решать более сложные задачи классификации. С другой стороны, существуют существенные недостатки применения гиперспектральных данных. Одна из проблем – феномен Хьюза, выраженный в уменьшении точности классификации при малом соотношении количества входных переменных (параметров классификации) к размеру обучающей выборки (Dalponte et al., 2009). Другая – повышенная сложность алгоритмов классификации, способных обработать гиперразмерные данные.

Низкое спектральное разрешение, наоборот, существенно ограничивает возможности анализа земного покрова и снижает интерпретируемость данных. Наличие спектральных слоев в заданных диапазонах определяет возможность расчета спектральных индексов.

Наличие красного и ближнего инфракрасного диапазона во всех рассмотренных спутниковых системах позволяет производить расчет наиболее распространенных спектральных индексов для характеристики общего состояния растительного покрова, такие как NDVI, RVI, SAVI, TVI. (Ayanlade, 2017; Bannari et al., 1995; Xue, Su, 2017). Наличие дополнительных слоев в диапазоне красного барьера фотосинтеза (RedEdge слой, таблица 1) спутника Sentinel–2 позволяет оценивать содержание хлорофилла и азота в листе (Clevers, Gitelson, 2013). Коротковолновый

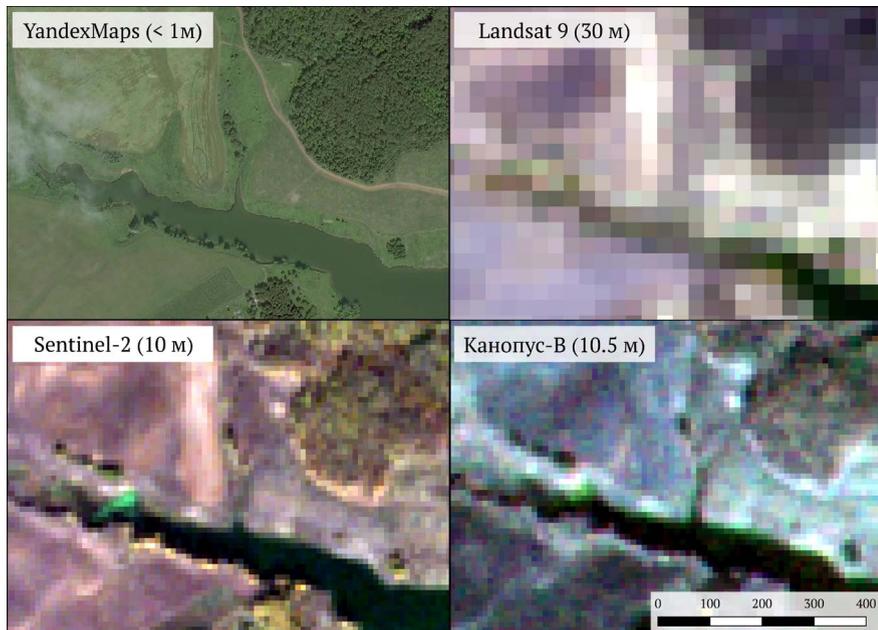


Рис. 1. Сравнение снимков с различным пространственным разрешением. Сервис YandexMaps использует снимки спутников от компаний Airbus и Digital Globe

Fig. 1. Comparison of imagery with different spatial resolution. The YandexMaps service utilizes imagery of Airbus and Digital Globe companies

инфракрасный диапазон (слой SWIR) позволяет оценить содержание воды в листьях растений и влажность почвенного покрова (Khellouk et al., 2018).

Несомненным преимуществом сенсоров Landsat и Sentinel-2 является наличие спектральных диапазонов, нацеленных на оценку прозрачности атмосферы (слой Cirrus), что позволяет вычленять облачный покров в автоматическом режиме (рис. 2). В случае отечественных систем, для вычленения облаков приходится применять более сложные и менее надежные алгоритмы.

Можно заключить, что съемочная аппаратура спутников Sentinel-2 и Landsat обладает наиболее широкими возможностями для анализа земного покрова. Данные спутника Канопус-В обладают скромным спектральным разрешением – 3 канала в видимом диапазоне и один в инфракрасном.

### Временное разрешение и пространственное покрытие

Пространственное покрытие определяет доступность снимков и равномерность охвата территории спутниковыми данными. Пространственное покрытие напрямую зависит от временного разрешения – периода времени между съемками одного и того же участка, которое, в свою очередь, зависит от высоты орбиты, ширины полосы обзора и количества действующих спутников одного типа. Параметры ширины захвата спутни-

ковых систем представлены в таблице 2.

Снимки систем Landsat приводятся к стандартизированному размеру 190×180 км в случае сенсоров OLI и TIRS и 185×180 км в случае сенсоров OLI-2 и TIRS-2, которые привязываются к координационной сетке World Reference System-2 (WRS-2) с 5% перекрытием с соседними снимками. Таким образом, каждый снимок обладает уникальным идентификатором пути и ряда в системе WRS-2, которые имеют строго определенную координатную привязку на местности. Совместное применение данных спутников Landsat 8 и Landsat 9, каждый из которых обладает 8-дневным временным разрешением, обеспечивает полное и равномерное покрытие поверхности суши (рис. 3).

Например, для любой точки территории Республики Татарстан (РТ) доступно 10–26 снимков с общей облачностью менее 30% за вегетационный период.

Ширина полосы захвата спутников Sentinel-2 составляет 290 км. Затем в процессе предварительной обработки снимки формируются в тайловую сеть, где каждый тайл обладает размером 100×100 км, и на местности имеет уникальную привязку в соответствии с системой географической привязки Military Grid Reference System (MGRS). Два спутника, Sentinel-2A и Sentinel-2B также обеспечивают полное и равномерное покрытие поверхности Земли. Для любой точки территории РТ доступно 10–45 снимков с общей облачностью менее 30% за вегетационный период (рис. 4).

Пространственное и временное покрытие российских аппаратов имеет существенные ограничения. Так, за вегетационный период последнего полного года работы спутник Аист-2Д показывает крайне неравномерное покрытие. На территорию РТ для загрузки доступно лишь 10–11 снимков без учета чистоты от облачного покрова (рис. 5).

Покрытие архивными снимками основной аппаратуры спутников Ресурс-П также сильно неравномерно. На примере РТ видно полное отсутствие доступных снимков для 2/3 территории (рис. 6).

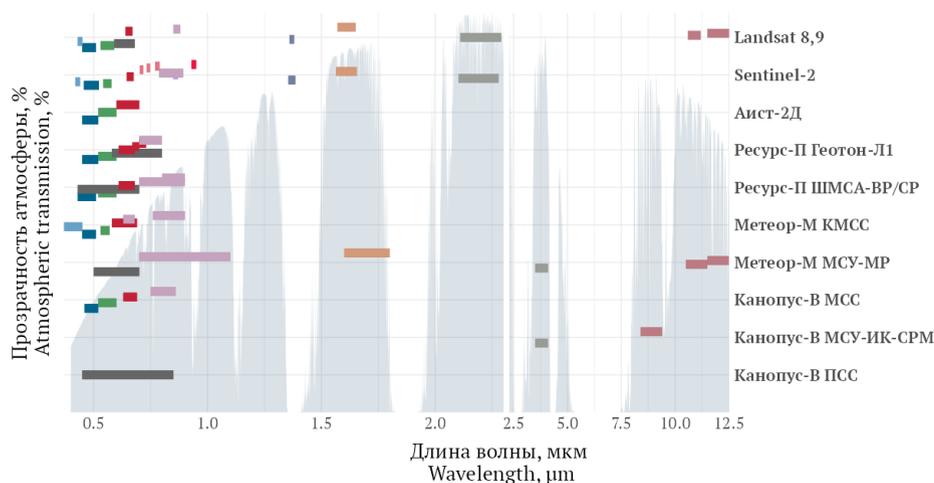


Рис. 2. Расположение и охват спектральных диапазонов различных спутниковых систем. Серым цветом обозначен график прозрачности атмосферы

Fig. 2. Position and range of spectral diapasons of different satellite systems. The grey color indicates the graph of atmospheric transparency

Таблица. 2. Ширина полосы захвата различных спутниковых систем

Table 2. Swath width of different satellites

Спутник Satellite	Сенсор Sensor	Ширина полосы снимка, км Swath width, km
Landsat 8	OLI, TIRS	190
Landsat 9	OLI-2, TIRS-2	185
Sentinel-2	MSI	290
Аист-2Д	ОЭА «Аврора»	39.6
Канопус-В (1-6)	МСС ПСС	20 23
Канопус-В-ИК	МСС ПСС МСУ-ИК-СРМ	20 23 2000
Ресурс-П	Геотон-Л1	38
	ШМСА-ВР	96
	ШМСА-СР	480
	ГСА	25
Метеор-М-2	КМСС	945
	МСУ-МР	2900

Спутниковые системы Метеор-М обладают наибольшей шириной полосы захвата среди всех рассматриваемых систем – 945 км для основной аппаратуры и 2900 км для обзорного устройства малого разрешения, что с учетом высокого временного разрешения в 2 дня должно обеспечи-

вать полное покрытие территории Земли с высокой плотностью безоблачных снимков (табл. 2). На данный момент материалы съемки систем Метеор-М недоступны для обзора и загрузки.

Наилучшее покрытие поверхности земли среди отечественных спутниковых мультиспектральных систем обеспечивает группа аппаратов Канопус-В. Данные спутники обладают высоким временным разрешением, но узкой шириной захвата (табл. 1, 2). По данным АО «Российские космические системы», покрытие территории России данными спутника Канопус-В облачностью менее 40% за 2022 г. составляет 92.33% (Емельянов, 2023). При этом распределение снимков крайне неравномерно (рис. 7). На территории РТ есть как области с высокой плотностью снимков за вегетационный период (порядка 15–20 шт.), так и области, не охваченные снимками вовсе.

#### Политика доступа и сервисы поиска и загрузки

Этапы развития инфраструктуры обработки спутниковых снимков Landsat отражены в организации так называемых многоуровневых коллекций. В 2016 г. USGS организовало весь архив спутниковых данных в Collection 1, куда вошли все данные первого уровня обработки, начиная с 1972 по 2022 гг. Данную коллекцию в 2022 г. полностью заменил следующий этап качественного развития сервиса – Collection 2 (Walder et al., 2019). Collection 2 создана с применением обновленных источников цифровых моделей высот, новых алгоритмов калибровки и валидации и включает снимки Landsat 1-9 первого уровня обработки и Landsat 4-9 второго и третьего уровней обработки.

Уровни обработки снимков Landsat:

- Level 1 – откалиброванные мультиспектральные снимки. Уровень обработки включает несколько подуровней: (1) Real-Time – свежие снимки с минимальной обработкой, доступные



Рис. 3. Покрытие территории РТ снимками Landsat 8 и 9 с облачностью <30% за период 1 апреля – 30 октября 2023 г.

Fig. 3. Coverage of the Republic of Tatarstan territory by Landsat 8 and 9 imagery with overall cloudiness <30% for the period April 1 – October 30, 2023



Рис. 4. Покрытие территории РТ снимками Sentinel-2 с облачностью <30% за период 1 марта – 30 октября 2023 г.

Fig. 4. Coverage of the Republic of Tatarstan territory by Sentinel 2 imagery with overall cloudiness <30% for the period March 1 – October 30, 2023

для скачивания через 4-6 часов после съемки спутником; (2) Tier 1 – прошедшие топографическую коррекцию, радиометрическую калибровку и валидацию качества Real-Time сцены наилучшего качества; (3) Tier 2 – сцены, прошедшие топографическую коррекцию и радиометрическую калибровку, но не соответствующие критериям качества для попадания в Tier 1 (неточная орбитальная информация, существенная облачность, пониженная точность географической привязки и пр.);

- Level 2 – готовые к практическому применению снимки. Данные сенсоров OLI переведены в значения спектральной отражательной способ-

ности поверхности, данные сенсоров TIRS – в значения температуры поверхности в Кельвинах, добавлены слои оценки качества сцены;

- Level 3 – готовые научные производные снимки. На настоящий момент доступны только для территории США. Включают продукты для мониторинга динамики поверхностных вод, заснеженных территорий и пожаров;

- Analysis Ready Data (ARD) – доступный только для территории США уровень обработки данных, призванный существенно снизить требования вычислительной мощности для конечных пользователей.

Ручной поиск и загрузка мультиспектраль-

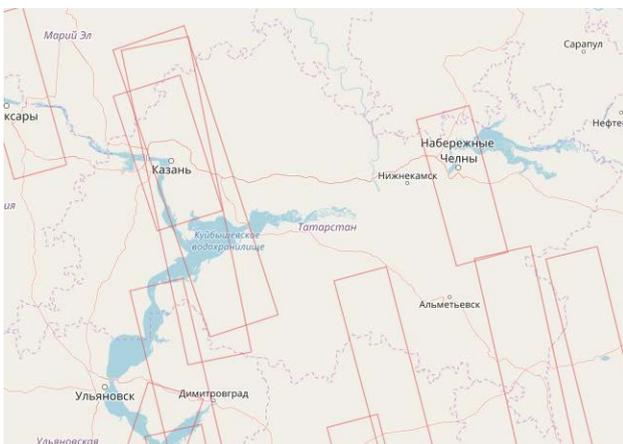


Рис. 5. Покрытие территории РТ снимками Aist-2D за период 1 мая – 30 октября 2021 г.

Fig. 5. Coverage of the Republic of Tatarstan territory by Aist-2D imagery for the period May 1 – October 30, 2021

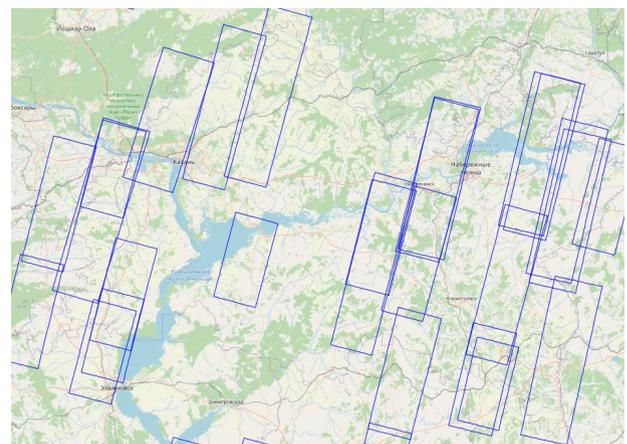


Рис. 6. Покрытие территории РТ снимками Ресурс-П (Геотон-Л1) за период 1 мая – 30 октября 2020 г., облачность <30%

Fig. 6. Coverage of the Republic of Tatarstan territory by Resurs-P (Geoton-L1) imagery with overall cloudiness <30% for the period May 1 – October 30, 2020

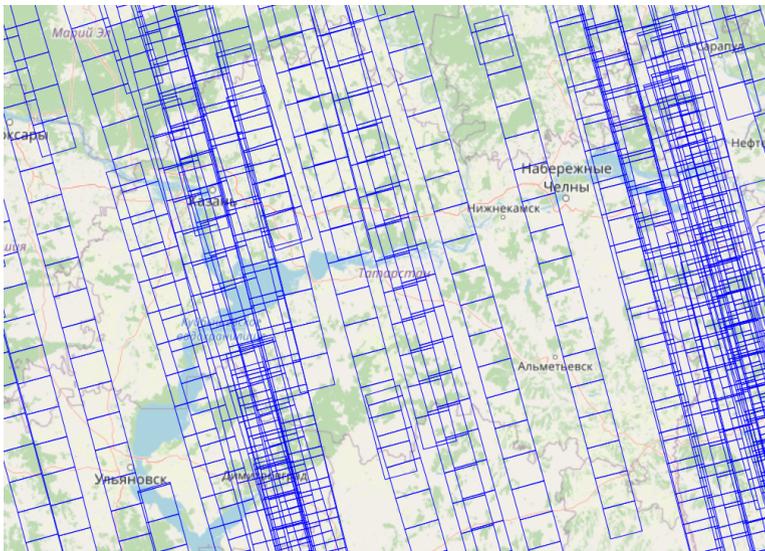


Рис. 7. Покрывание территории РТ снимками Канопус–В (MSS) облачностью <30% за период 1 мая – 30 октября 2023 г.

Fig. 7. Coverage of the Republic of Tatarstan territory by Canopus–V (MSS) imagery with overall cloudiness <30% for the period May 1 – October 30, 2023

ных данных Landsat осуществляется на трех геопорталах: EarthExplorer ([earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov)), Global Visualization Viewer: ([glovis.usgs.gov](http://glovis.usgs.gov)), LandsatLook Viewer ([landsatlook.usgs.gov](http://landsatlook.usgs.gov)). Также существует интерфейс программирования приложений, API, ([m2m.cr.usgs.gov](http://m2m.cr.usgs.gov)) для автоматизированного подбора снимков в рамках разрабатываемых пользовательских сервисов. Данные сервисы обладают схожим функционалом и позволяют получать доступ к уровням обработки Level 1, Level 2, Level 3 и ARD. В настоящее время доступ к данным дистанционного зондирования Земли бесплатен для всех пользователей.

Принятие в 2008 г. Геологической службой США (U.S. Geological Survey) политики бесплатности и открытости данных быстро расширило применимость снимков в научных и прикладных задачах (Zhu et al., 2019). Позже, к схожему выводу об эффективности полной бесплатной и открытой политики доступа к данным пришло и ESA при анализе программы Copernicus (Yague, 2019).

Результаты спутниковой съемки аппаратов Sentinel-2 также имеют многоуровневую и последовательную структуру обработки:

- Level 0 – сырые изображения со спутников с охватом 25×23 км. Недоступны для загрузки;
- Level-1A – снимки с географической привязкой. Недоступны для загрузки;
- Level-1B – снимки, прошедшие радиометрическую коррекцию и значения переведены в значения отражения на верхней границе атмосферы;
- Level-1C – снимки объединены в тайлы раз-

мером 100×100 км, прошли топографическую коррекцию;

- Level-2A – снимки прошли атмосферную коррекцию, значения снимков переведены в значения отражательной способности поверхности Земли. В сцену также добавлены слои оценки качества снимка и слой классификации снимка.

Ручной поиск и загрузка мультиспектральных данных Sentinel осуществляется на геопортале Copernicus Browser ([browser.dataspace.copernicus.eu](http://browser.dataspace.copernicus.eu)). Описание и спецификации API представлены на портале [dataspace.copernicus.eu/analyse/apis](http://dataspace.copernicus.eu/analyse/apis).

Необходимо отметить, что, несмотря на декларируемую политику доступа к данным – «подавляющее большинство данных/информации, предоставляемых Copernicus, доступно любому гражданину и любой организации во всем мире на бесплатной, полной и открытой основе», – ESA выполняет санкции, введенные против Российской Федерации, и ограничивает доступ к продуктам ДЗЗ для российских пользователей (Copernicus ..., 2022; ESA statement..., 2022).

На текущий момент существует три портала для подбора и заказа российских данных дистанционного зондирования: (1) Геопортал Роскосмоса ([gptl.ru](http://gptl.ru)) – данный сайт предназначен для поиска снимков по заданным параметрам, их предварительного просмотра и оформления заявок на получения снимков бюджетными организациями; (2) новый сайт Геопортал Роскосмоса ([next.gptl.ru](http://next.gptl.ru)) – позволяет осуществлять поиск и покупку снимков по заданным параметрам; (3) Банк базовых продуктов ([bbp.ntsomz.ru](http://bbp.ntsomz.ru)) – подбор, заказ и получение продуктов тематической обработки спутниковых снимков (спектральные индексы, композиты, продукты классификации). Для бюджетных организаций бесплатный доступ осуществляется при условии оформления заявки через систему электронного документооборота, а также при заполнении и подписи «Акта передачи информации в том, что НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы» передали данные ДЗЗ» при каждой загрузке запрошенных сцен (Порядок предоставления данных ..., 2019).

Бесплатный доступ бюджетным организациям сохраняется до вступления в силу федерального закона от 22.04.2024 №89-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». С 1 января 2025 г. в закон «О космической деятельности» вносятся исправле-

ния в пункт 2 статьи 32. Формулировка «Предоставление данных и копий данных, содержащихся в федеральном фонде данных, осуществляется за плату. Данные и копии данных, содержащиеся в федеральном фонде данных, предоставляются бесплатно: федеральным органам государственной власти, органам государственной власти субъектов Российской Федерации и органам местного самоуправления в целях использования данных и копий данных при осуществлении ими своих функций или реализации ими своих полномочий...» заменяется на «Данные, копии данных и продукты, содержащиеся в федеральном фонде данных, предоставляются за плату, за исключением данных, копий данных и продуктов, созданных на их основе, которые предоставляются отдельным потребителям (пользователям) данных безвозмездно в случаях, установленных Правительством Российской Федерации». Для рассмотренных космических аппаратов установлена следующая стоимость за базовую расчетную единицу 1 кв. км площади Земли вне зависимости от типа предоставляемых данных: Ресурс–П (Ресурс–ДК) – 23.8 руб.; Каноус–В – 21.5 руб.; Метеор–М – 0.0014 руб. при минимальном объеме заказа данных 10000 кв. км. (Стоимость базовых ..., 2023).

Обе версии Геопортала предоставляют продукты уровня обработки L0 – необработанные данные с сенсоров спутника с присоединением доступной дополнительной информации (ГОСТ Р 59480-2021). Банк базовых продуктов позволяет производить заказ продуктов съемки более высоких уровней обработки: (1) L1 – продукты, прошедшие геометрическую и радиометрическую коррекцию (опционально атмосферную коррекцию), а также орторектификацию (учет рельефа); (2) L2 – продукты специальной обработки, характеризующие состояние природных объектов подстилающей поверхности и представленные в производных физических или псевдофизических величинах, индексные базовые продукты; (3) L3 – реорганизованные по пространству и/или по времени производные из продуктов уровня L1 или L2, продукты бесшовного сплошного покрытия (Емельянов, 2023).

### Заключение

Основной недостаток российской отрасли дистанционного мониторинга земной поверхности – отсутствие единой программы мониторинга Земли, подобной Landsat или Copernicus. В основе декларируемых задач программ США и Евросоюза – Landsat и Copernicus – лежат глобальность мониторинга, пространственная и временная

согласованность данных, в том числе и с предыдущими миссиями и обеспечение доступа к материалам съемки максимально широкому кругу заинтересованных лиц. Для выполнения данных задач был выбран подход создания небольшого количества узкоспециализированных спутниковых аппаратов с четко прослеживаемой структурой обработки и распространения итоговых материалов съемки.

На орбите Земли функционируют два спутника Landsat, обеспечивающих полное покрытие территории планеты между 82 градусами северной и 82 градусами южной широт с 8-дневным периодом обновления. Два спутника Sentinel-2 покрывают территории между 82.8 градусами северной и 56 градусами южной широт с 5-дневным обновлением.

Российская группировка спутниковых систем состоит из множества многофункциональных спутников со схожими возможностями, при этом четкая организация мониторинга с трудом прослеживается даже в рамках работы одной серии спутников. Материалы съемки российских аппаратов имеют существенные пробелы в покрытии территории, даже несмотря на высокое временное разрешение, что существенно ограничивает их применимость как при анализе земной поверхности на региональном уровне, так и при анализе временной динамики параметров отражения локальных участков.

С одной стороны, российские системы обеспечивают взаимозаменяемость материалов съемки и их взаимодополняемость. Так, материалы съемки сенсора КМСС метеорологических спутников Метеор–М2 могут быть использованы для заполнения пробелов мониторинга спутников Каноус–В. Но при этом возникает вопрос согласования этих данных – приведение к единому разрешению, учет различий спектрального и радиометрического разрешения и т.п.

Доступ к материалам съемки российских спутников существенно ограничен для конечных пользователей, будь то практическое или научное применение. Загрузка снимков остается платной для негосударственных организаций. Бюджетным организациям доступ осложнен дополнительными бюрократическими процедурами. Низкий уровень развития инфраструктуры доступа к данным, а также необходимость пересмотра базовых принципов и механизмов регулирования российского рынка продуктов и сервисов дистанционного зондирования Земли также отмечают другие авторы (Бухарицин, 2021).

## Список литературы

1. Бухарицин А.П. Состояние и перспективы развития рынка услуг по сбору и обработке спутниковых данных дистанционного зондирования Земли // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021. Т. 3. С. 85–91.
2. Горбунов А.В., Слободский И.Н. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» // *Геоматика*. 2010. Т. 1. С. 30–32.
3. Горбунов А.В., Чуркин А.Л., Павлов Д.А. космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» // *Вопросы электромеханики*. 2008. Т. 105. С. 17–28.
4. ГОСТ Р 59480–2021. Данные дистанционного зондирования Земли из Космоса. Уровни обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса.
5. Дворкин Б.А. Импортозамещение в сфере геoinформационных технологий и ДЗЗ // *Геоматика*. 2015. Т. 1. С. 17–28.
6. Емельянов А.А. Возможности Банка базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования в контексте внедрения результатов космической деятельности // VI заседание Межведомственной комиссии по использованию результатов космической деятельности в интересах социально-экономического развития Российской Федерации и ее регионов. Тула, 2023. 18 с.
7. Заичко В. Состав действующей и перспективной Российской орбитальной группировки КА ДЗЗ. Российские космические системы, 2017. 26 с.
8. Кулик Е.Н. Оперативный космический мониторинг: вчера, сегодня, завтра // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2012. Т. 3. С. 136–141.
9. Мышляков С.Г. Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства // *Геоматика*. 2016. Т. 2. С. 16–24.
10. Порядок предоставления данных дистанционного зондирования Земли из космоса и копий данных дистанционного зондирования Земли из космоса, содержащихся в федеральном фонде данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Утв. приказом Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» от 16.07.2019 г. №215.
11. «Роскосмос» раскрыл планы по выкупу спутниковых ресурсов у частного бизнеса // *РИА Новости*. 2023 // URL: <https://ria.ru/20231113/sputniki-1909179859.html> (дата обращения: 02.05.2024).
12. Савельева И.П., Кандауров Д.В., Правдина Н.В., Дзензелюк Н.С. Мировой коммерческий космический рынок: позиционирование стран и сегментов спутниковой индустрии // *ЕМ*. 2022. Т. 16, №1. С. 149–164. doi: 10.14529/em220115.
13. Спутники ДЗЗ. 2024 // URL: <https://innoter.com/sputniki/> (дата обращения: 02.05.2024).
14. Стоимость базовых расчетных единиц для космических аппаратов российской государственной космической системы. Выписка из решения Госкорпорации «Роскосмос» «О размерах лицензионного вознаграждения за использование данных дистанционного зондирования Земли с российских космических аппаратов и ценах для конечных потребителей за данные дистанционного зондирования Земли в 2024–2025 годах» от 24.11.2023 г. №ЮБ-1185-р.
15. Ширияев Н.А., Водолажская Ю.В. Космический комплекс «Канопус-В» // *Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2016. Т. 1–2. №5. С. 109–111.
16. Ayanlade A. Remote sensing vegetation dynamics analytical methods: a review of vegetation indices techniques // *GP*. 2017. Vol. 16. P. 7–17. doi: 10.4467/21995923GP.17.001.7188.
17. Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. A review of vegetation indices // *Remote sensing reviews*. 1995. Vol. 13, №1–2. P. 95–120. doi: 10.1080/02757259509532298.
18. Clevers J.G.P.W., Gitelson A.A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3 // *International Journal of applied earth observation and geoinformation*. 2013. Vol. 23. P. 344–351. doi: 10.1016/j.jag.2012.10.008.
19. Copernicus. Access to data. 2022. URL: <https://www.copernicus.eu/en/access-data> (дата обращения: 02.05.2024).
20. Dalponte M., Bruzzone L., Vescovo L., Gianelle D. The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas // *Remote sensing of environment*. 2009. Vol. 113, №11. P. 2345–2355. doi: 10.1016/j.rse.2009.06.013.
21. ESA statement regarding cooperation with Russia following a meeting with Member States on 28 February 2022. 2022. URL: [https://www.esa.int/Newsroom/Press\\_Releases/ESA\\_statement\\_regarding\\_cooperation\\_with\\_Russia\\_following\\_a\\_meeting\\_with\\_Member\\_States\\_on\\_28\\_February\\_2022](https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ESA_statement_regarding_cooperation_with_Russia_following_a_meeting_with_Member_States_on_28_February_2022) (дата обращения: 02.05.2024).
22. Khellouk R., Barakat A., Boudhar A., Hadria R., Lionbou H., El Jazouli A., Rais J., El Baghdadi M., Benabdelouahab T. Spatiotemporal monitoring of surface soil moisture using optical remote sensing data: a case study in a semi-arid area // *Journal of spatial science*. 2020. Vol. 65, №3. P. 481–499. doi: 10.1080/14498596.2018.1499559.
23. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Baklanov A.I., Stratilatov N.R., Abrashkin V.I., Kosmodemyansky E.V., Salmin V.V., Tkachenko I.S., Safronov S.L. Main design characteristics of small scientific and applied-purpose spacecraft based on the Aist-2 unified platform // *Space engineering and technology*. 2020. P. 5–20. doi: 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-4-5-20.
24. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. South Dakota: U.S. Geological Survey, 2019. 106 p.
25. Landsat 9 Data Users Handbook. South Dakota: U.S. Geological Survey, 2022. 107 p.
26. Landsat 9 Fact Sheet. U.S. Geological Survey, 2019. 2 p.
27. Leslie C.R., Serbina L.O., Miller H.M. Landsat and agriculture – case studies on the uses and benefits of landsat imagery in agricultural monitoring and production // *Open-File report 2017-1034*. P. 27. doi: 10.3133/ofr20171034.
28. Löw F., Duveiller G. Defining the Spatial Resolution Requirements for Crop Identification Using Optical Remote Sensing // *Remote sensing*. 2014. Vol. 6, №9. P. 9034–9063. doi: 10.3390/rs6099034.
29. Löw F., Duveiller G. Determining suitable image resolutions for accurate supervised crop classification using remote sensing data // *Earth resources and environmental remote sensing / GIS applications IV / Proceedings of SPIE*. Dresden, 2013. P. 88930I. doi: 10.1117/12.2028634.
30. Lysenko M.N., Lozhkovi P.N. Usage of satellites for the Earth remote sensing: legal problems and prospects // *Law enforcement review*. 2022. Vol. 6, №3. P. 147–160. doi: 10.52468/2542-1514.2022.6(3).147-160.
31. Mulder V.L., Bruin S. de, Schaeppman M.E., Mayr T.R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — a review // *Geoderma*. 2011. Vol. 162, №1–2. P. 1–19. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.12.018.
32. Regulation (EU) No 377/2014 of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 establishing the Copernicus programme and repealing regulation (EU) No 911/2010 text with EEA relevance // *Official journal of the European Union*.

2014. Vol. 122. P. 44–66.

33. Regulation (EU) No 911/2010 of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the European Earth monitoring programme (GMES) and its initial operations (2011 to 2013) Text with EEA relevance // Official journal of the European Union. 2010. Vol. 276. P. 1–10.

34. Rodríguez-Carrión N.M., Hunt S.D., Goenaga-Jimenez M.A., Vélez-Reyez M. Determining optimum pixel size for classification // Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery XX / Proceedings of SPIE - The international society for optical engineering. Baltimore, Maryland, USA, 2014. P. 90880X. doi: 10.1117/12.2051089.

35. Sentinel-2 User Handbook // European Space Agency (ESA). 2015. URL: [https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset\\_publisher/xlslt-4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xlslt-4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook) (дата обращения: 02.05.2024).

36. Tempfli K., Huurneman G.C., Bakker W.H., Janssen L.L.F., Feringa W.F., Gieske A.S.M., Grabmaier K.A., Hecker C.A., Horn J.A. van der. Principles of remote sensing: an introductory textbook. Enschede: ITC, 2009. 591 p.

37. Woodcock C.E., Strahler A.H. The factor of scale in remote sensing // Remote sensing of environment. 1987. Vol. 21, iss. 1. P. 311–332.

38. Wulder M.A., Loveland T.R., Roy D.P., Crawford C.J., Masek J.G., Woodcock C.E., Allen R.G., Anderson M.C., Belward A.S., Cohen W.B., Dwyer J., Erb A., Gao F., Griffiths P., Helder D., Hermosilla T., Hipple J.D., Hostert P., Hughes M.J., Huntington J., Johnson D.M., Kennedy R., Kilic A., Li Z., Lymburner L., McCorkel J., Pahlevan N., Scambos T.A., Schaaf C., Schott J.R., Sheng Y., Storey J., Vermote E., Vogelmann J., White J.C., Randolph H.W., Zhu Z. Current status of Landsat program, science, and applications // Remote sensing of environment. 2019. Vol. 225. P. 12–147. doi: 10.1016/j.rse.2019.02.015.

39. Xue J., Su B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications // Journal of sensors. 2017. Vol. 2017. P. 1–17. doi: 10.1155/2017/1353691.

40. Yague J. Study on the copernicus data policy post-2020 implementing framework contract No 386/PP/2014/FC (30-CE-0672813/00-46). Final report. Nextspace, 2019. 93 p.

41. Zarco-Tejada P.J., Hornero A., Hernández-Clemente R., Beck P.S.A. Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery // ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2018. Vol. 137. P. 134–148. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.01.017.

42. Zhu Z., Wulder M.A., Roy D.P., Woodcock C.E., Hansen M.C., Radeloff V.C., Healey S.P., Schaaf C., Hostert P., Strobl P., Pekel J.-F., Lymburner L., Pahlevan N., Scambos T.A. Benefits of the free and open Landsat data policy // Remote sensing of environment. 2019. Vol. 224. P. 382–385. doi: 10.1016/j.rse.2019.02.016.

43. Zhuang Y., Liu X., Nguyen T., He Q., Hong S. Global remote sensing research trends during 1991–2010: a bibliometric analysis // Scientometrics. 2013. Vol. 96, №1. P. 203–219. doi: 10.1007/s11192-012-0918-z.

## References

1. Bukharitsin A.P. Sostoyanie i perspektivy razvitiya rynka uslug po sboru i obrabotke sputnikovykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli [The state and prospects of development of the market of services for the collection and processing of satellite data of remote sensing of the Earth] // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy [International journal of applied and fundamental research]. 2021. Vol. 3. P. 85–91.

2. Gorbunov A.V., Slobodskiy I.N. Kosmicheskiy kompleks operativnogo monitoringa tekhnogennykh i prirodnykh chrezvychnykh situatsiya «Kanopus-V» [Space complex for operational monitoring of man-made and natural emergencies «Canopus-V»] // Geomatika. 2010. Vol. 1. P. 30–32.

3. Gorbunov A.V., Churkin A.L., Pavlov D.A. Kosmicheskiy kompleks gidrometeorologicheskogo i okeanograficheskogo obespecheniya «Meteor-3M» s kosmicheskim apparatom «Meteor-M» [Meteor-3M Hydrometeorological and Oceanographic Support Space Complex with Meteor-M spacecraft] // Voprosy elektromekhaniki [Questions of electromechanics]. 2008. Vol. 105. P. 17–28.

4. GOST R 59480–2021. Dannye distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. Urovni obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Earth remote sensing data from Space. Levels of processing of Earth remote sensing data from space].

5. Dvorkin B.A. Importozameshchenie v sfere geoinformatsionnykh tekhnologiy i DZZ [Import substitution in the field of geoinformation technologies and remote sensing] // Geomatika. 2015. Vol. 1. P. 17–28.

6. Emel'yanov A.A. Vozmozhnosti Banka bazovykh produktov DZZ mezhdovedstvennogo ispol'zovaniya v kontekste vnedreniya rezul'tatov kosmicheskoy deyatel'nosti [Possibilities of the Bank of basic remote sensing products for interdepartmental use in the context of the implementation of space activity results] / VI zasedanie Mezhdovedstvennoy komissii po ispol'zovaniyu rezul'tatov kosmicheskoy deyatel'nosti v interesakh sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii i ee regionov [VI meeting of the interdepartmental commission on the use of space activity results in the interests of socio-economic development of the Russian Federation and its regions]. Tula, 2023. 18 p.

7. Zaichko V. Sostav deystvuyushchey i perspektivnoy Rossiyskoy orbital'noy gruppировки KA DZZ [The composition of the current and promising Russian orbital group of remote sensing spacecraft]. Rossiyskie kosmicheskie sistemy [Russian space systems], 2017. 26 p.

8. Kulik E.N. Operativnyy kosmicheskiy monitoring: vchera, segodnya, zavtra [Operational space monitoring: yesterday, today, tomorrow] // Interekspo Geo-Sibir'. 2012. Vol. 3. P. 136–141.

9. Myshlyakov S.G. Vozmozhnosti radarnykh snimkov Sentinel-1 dlya resheniya zadach sel'skogo khozyaystva [Sentinel-1 radar imaging capabilities for solving agricultural problems] // Geomatika. 2016. Vol. 2. P. 16–24.

10. Poryadok predostavleniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa i kopiy dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, sodержashchikhsya v federal'nom fonde dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [The procedure for providing remote sensing data of the Earth from space and copies of remote sensing data of the Earth from space contained in the federal fund of remote sensing data of the Earth from space]. Approved by order of the State Corporation for Space Activities «Roscosmos» dated July 16, 2019 No 215.

11. «Roscosmos» raskryl plany po vykupu sputnikovykh resursov u chastnogo biznesa [Roscosmos has revealed plans to buy satellite resources from private businesses] // RIA Novosti. 2023 // URL: <https://ria.ru/20231113/sputniki-1909179859.html> (accessed: 02.05.2024).

12. Savel'eva I.P., Kandaurov D.V., Pravdina N.V., Dzenzelyuk N.S. Mirovoy kommercheskiy kosmicheskiy rynek: pozitsionirovanie stran i segmentov sputnikovoy industrii [Global commercial space market: positioning of countries and segments of the satellite industry] // EM. 2022. Vol. 16, No 1. P. 149–164. doi: 10.14529/em220115.

13. Sputniki DZZ [Remote sensing satellites]. 2024 // URL: <https://innoter.com/sputniki/> (accessed: 02.05.2024).
14. Stoimost' bazovykh raschetnykh edinit dlya kosmicheskikh apparatov rossiyskoy gosudarstvennoy kosmicheskoy sistemy. Vypiska iz resheniya Goskorporatsii «Roskosmos» «O razmerakh litsenzionnogo voznagrazhdeniya za ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli s rossiyskikh kosmicheskikh apparatov i tsenakh dlya konechnykh potrebiteley za dannye distantsionnogo zondirovaniya Zemli v 2024-2025 godakh» ot 24 noyabrya 2023 g. № YuB-1185-r [Cost of basic units of account for spacecraft of the Russian state space system. Extract from the decision of the Roscosmos State Corporation «On the amount of license fees for the use of Earth remote sensing data from Russian spacecraft and prices for end consumers for Earth remote sensing data in 2024-2025» dated November 24, 2023 No. YuB-1185-r].
15. Shiryaev N.A., Vodolazhskaya Yu.V. Kosmicheskii kompleks «Kanopus-V» [Space complex «Canopus-V»] // Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy [Problems of ensuring safety in the aftermath of emergencies]. 2016. Vol. 1–2. No 5. P. 109–111.
16. Ayanlade A. Remote sensing vegetation dynamics analytical methods: a review of vegetation indices techniques // GP. 2017. Vol. 16. P. 7–17. doi: 10.4467/21995923GP.17.001.7188.
17. Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A.R. A review of vegetation indices // Remote sensing reviews. 1995. Vol. 13, №1-2. P. 95–120. doi: 10.1080/02757259509532298.
18. Clevers J.G.P.W., Gitelson A.A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3 // International Journal of applied earth observation and geoinformation. 2013. Vol. 23. P. 344–351. doi: 10.1016/j.jag.2012.10.008.
19. Copernicus. Access to data. 2022. URL: <https://www.copernicus.eu/en/access-data> (accessed: 02.05.2024).
20. Dalponte M., Bruzzone L., Vescovo L., Gianelle D. The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas // Remote sensing of environment. 2009. Vol. 113, №11. P. 2345–2355. doi: 10.1016/j.rse.2009.06.013.
21. ESA statement regarding cooperation with Russia following a meeting with Member States on 28 February 2022. 2022. URL: [https://www.esa.int/Newsroom/Press\\_Releases/ESA\\_statement\\_regarding\\_cooperation\\_with\\_Russia\\_following\\_a\\_meeting\\_with\\_Member\\_States\\_on\\_28\\_February\\_2022](https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ESA_statement_regarding_cooperation_with_Russia_following_a_meeting_with_Member_States_on_28_February_2022) (accessed: 02.05.2024).
22. Khellouk R., Barakat A., Boudhar A., Hadria R., Lionbou H., El Jazouli A., Rais J., El Baghdadi M., Benabdelouahab T. Spatiotemporal monitoring of surface soil moisture using optical remote sensing data: a case study in a semi-arid area // Journal of spatial science. 2020. Vol. 65, №3. P. 481–499. doi: 10.1080/14498596.2018.1499559.
23. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Baklanov A.I., Stratilatov N.R., Abrashkin V.I., Kosmodemyansky E.V., Salmin V.V., Tkachenko I.S., Safronov S.L. Main design characteristics of small scientific and applied-purpose spacecraft based on the Aist-2 unified platform // Space engineering and technology. 2020. P. 5–20. doi: 10.33950/spacetech-2308-7625-2020-4-5-20.
24. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. South Dakota: U.S. Geological Survey, 2019. 106 p.
25. Landsat 9 Data Users Handbook. South Dakota: U.S. Geological Survey, 2022. 107 p.
26. Landsat 9 Fact Sheet. U.S. Geological Survey, 2019. 2 p.
27. Leslie C.R., Serbina L.O., Miller H.M. Landsat and agriculture – case studies on the uses and benefits of landsat imagery in agricultural monitoring and production // Open-File report 2017-1034. P. 27. doi: 10.3133/ofr20171034.
28. Löw F., Duveiller G. Defining the Spatial Resolution Requirements for Crop Identification Using Optical Remote Sensing // Remote sensing. 2014. Vol. 6, №9. P. 9034–9063. doi: 10.3390/rs6099034.
29. Löw F., Duveiller G. Determining suitable image resolutions for accurate supervised crop classification using remote sensing data // Earth resources and environmental remote sensing / GIS applications IV / Proceedings of SPIE. Dresden, 2013. P. 88930I. doi: 10.1117/12.2028634.
30. Lysenko M.N., Lozhkovi P.N. Usage of satellites for the Earth remote sensing: legal problems and prospects // Law enforcement review. 2022. Vol. 6, №3. P. 147–160. doi: 10.52468/2542-1514.2022.6(3).147-160.
31. Mulder V.L., Bruin S. de, Schaepman M.E., Mayr T.R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — a review // Geoderma. 2011. Vol. 162, №1–2. P. 1–19. doi: 10.1016/j.geoderma.2010.12.018.
32. Regulation (EU) No 377/2014 of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 establishing the Copernicus programme and repealing regulation (EU) No 911/2010 text with EEA relevance // Official journal of the European Union. 2014. Vol. 122. P. 44–66.
33. Regulation (EU) No 911/2010 of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the European Earth monitoring programme (GMES) and its initial operations (2011 to 2013) Text with EEA relevance // Official journal of the European Union. 2010. Vol. 276. P. 1–10.
34. Rodríguez-Carrion N.M., Hunt S.D., Goenaga-Jimenez M.A., Vélez-Reyez M. Determining optimum pixel size for classification // Algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery XX / Proceedings of SPIE – The international society for optical engineering. Baltimore, Maryland, USA, 2014. P. 90880X. doi: 10.1117/12.2051089.
35. Sentinel-2 User Handbook // European Space Agency (ESA). 2015. URL: [https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset\\_publisher/xslst4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook](https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xslst4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook) (accessed: 02.05.2024).
36. Tempfli K., Huurneman G.C., Bakker W.H., Janssen L.L.F., Feringa W.F., Gieske A.S.M., Grabmaier K.A., Hecker C.A., Horn J.A. van der. Principles of remote sensing: an introductory textbook. Enschede: ITC, 2009. 591 p.
37. Woodcock C.E., Strahler A.H. The factor of scale in remote sensing // Remote sensing of environment. 1987. Vol. 21, iss. 1. P. 311–332.
38. Wulder M.A., Loveland T.R., Roy D.P., Crawford C.J., Masek J.G., Woodcock C.E., Allen R.G., Anderson M.C., Belward A.S., Cohen W.B., Dwyer J., Erb A., Gao F., Griffiths P., Helder D., Hermosilla T., Hipple J.D., Hostert P., Hughes M.J., Huntington J., Johnson D.M., Kennedy R., Kilic A., Li Z., Lymburner L., McCorkel J., Pahlevan N., Scambos T.A., Schaaf C., Schott J.R., Sheng Y., Storey J., Vermote E., Vogelmann J., White J.C., Randolph H.W., Zhu Z. Current status of Landsat program, science, and applications // Remote sensing of environment. 2019. Vol. 225. P. 12–147. doi: 10.1016/j.rse.2019.02.015.
39. Xue J., Su B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications // Journal of sensors. 2017. Vol. 2017. P. 1–17. doi: 10.1155/2017/1353691.
40. Yague J. Study on the copernicus data policy post-2020 implementing framework contract No 386/PP/2014/FC (30-CE-0672813/00-46). Final report. Nextspace, 2019. 93 p.
41. Zarco-Tejada P.J., Hornero A., Hernández-Clemente R., Beck P.S.A. Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery // ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2018. Vol. 137.

P. 134–148. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.01.017.

42. Zhu Z., Wulder M.A., Roy D.P., Woodcock C.E., Hansen M.C., Radeloff V.C., Healey S.P., Schaaf C., Hostert P., Strobl P., Pekel J.-F., Lyburner L., Pahlevan N., Scambos T.A. Benefits of the free and open Landsat data policy // *Remote sensing of environment*. 2019. Vol. 224. P. 382–385. doi: 10.1016/j.rse.2019.02.016.

43. Zhuang Y., Liu X., Nguyen T., He Q., Hong S. Global remote sensing research trends during 1991–2010: a bibliometric analysis // *Scientometrics*. 2013. Vol. 96, No 1. P. 203–219. doi: 10.1007/s11192-012-0918-z.

---

---

**Ryazanov S.S., Kulagina V.I. A review of Russian and foreign sources of multispectral imagery for agroecological monitoring systems development.**

Materials from multispectral remote sensing of the Earth by spacecrafts have become the main regularly updated source of operational information in such areas as forestry, agriculture, soil science, cryosphere research and monitoring the effects of global warming, etc. The article provides the review of Russian space satellites. That monitor the Earth's surface in multispectral imaging mode, comparing the parameters of satellite images with foreign sources of remote sensing data and assessing the main characteristics of satellite images. The latter determine the possibility of their use for creating agro- and environmental monitoring systems. The parameters of Landsat 8 and 9, Sentinel-2, Aist-2D, Kanopus-V, Resurs-P, Meteor-M devices were examined. In all satellites considered, the spatial resolution depended on the shooting

mode and the type of sensor. All Russian devices had fairly high resolution in multispectral mode. From archival data, the best resolution had the Resurs-P satellite – 3 m. The presence of the red and near-infrared range in all satellite systems made it possible to calculate the most common spectral indices to characterize the general state of vegetation cover, such as NDVI, RVI, SAVI, TVI and etc. The presence of additional layers in the range of the red barrier of photosynthesis (RedEdge layers) and the short-wave infrared range provided additional opportunities for analyzing the parameters of green plant biomass. Using the example of the territory of the Republic of Tatarstan, the time resolution and spatial coverage of survey materials were considered. For any location on the territory of the Republic of Tatarstan, 10–26 Landsat images were available with total cloud cover of less than 30% during the growing season. Sentinel-2 satellites provided about 10–45 images with total cloud cover less than 30% during the growing season. The spatial and temporal coverage of Russian satellites had significant limitations. The best coverage of the Earth's surface among domestic satellite systems was provided by the Canopus-V group of satellites. At the same time, the distribution of images was extremely uneven. On the territory of the Republic of Tatarstan there were both areas with a high density of images during the growing season (about 15–20 pieces), and areas not covered by images at all.

*Keywords:* Roskosmos; Landsat; Sentinel; remote sensing.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

**Информация о статье / Information about the article**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 30.01.2024

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 15.02.2024

Принята к публикации / Accepted for publication: 20.02.2024

**Сведения об авторах**

Рязанов Станислав Сергеевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: RStanislav.soil@yandex.ru.

Кулагина Валентина Ивановна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: viksoil@mail.ru.

**Information about the authors**

Stanislav S. Ryazanov, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: RStanislav.soil@gmail.com

Valentina I. Kulagina, Ph.D. in Biology, Leading Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: viksoil@mail.ru

