

Дистанционные методы исследования Земли **Remote methods in Earth research**

УДК: 528.8:581.5

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-2-31-5-20

Е. А. Балдина¹, П. Г. Илюшина², П. К. Васильев³

ОЦЕНКА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ РАЗНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

АННОТАЦИЯ

Увеличение в последнем десятилетии числа гиперспектральных съемочных систем обуславливает необходимость поиска методических подходов к их обработке как независимого источника информации о состоянии объектов земной поверхности, так и в комплексном анализе совместно с другими данными. Анализ выполнялся по двум парам изображений территории Ближнего Подмоскovie, полученным в одни и те же сроки: PRISMA 22.06.2021 и 25.08.2022, Sentinel-2 23.06.2021 и 24.08.2022 с близким пространственным разрешением: 20 м для снимков Sentinel-2 и 30 м для PRISMA, но различающихся по спектральному разрешению. Оба срока характеризовались в определенной степени аномальными погодными условиями в предшествующие съемке периоды: высокие температуры в оба срока, но различающееся количество осадков (в августе 2022 г. их было рекордно мало, отмечалась засуха). Такая близость дат съемки и сходное пространственное разрешение позволили провести сравнительный анализ двух типов данных для выявления стресса растительного покрова, наблюдаемого в условиях засухи. Состояние растительного покрова в каждый из сроков оценивалось по снимкам обеих систем путем вычисления различных индексов, характеризующих как общую биомассу (NDVI), так и содержание отдельных наиболее важных биохимических показателей (влагосодержания MSI, пигментов — антоцианов и каротиноидов), указывающих на проявление стресса растительности. Полученные значения индексов NDVI и MSI, рассчитанные по данным Sentinel-2, существенно ниже полученных на основе обработки данных PRISMA, что, возможно, связано с различиями в пространственном разрешении и ширине спектральных каналов. Сравнение индексов NDVI и MSI по каждой из съемочных систем между двумя сроками показывают сходную ситуацию снижения или увеличения значений как реакцию на разные погодные условия — например, на засуху в августе 2022 г. Наблюдается некоторое уменьшение зеленой массы и влагосодержания, особенно заметное для травянистой растительности и лиственных лесов; при этом для хвойных лесов этот эффект незаметен.

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail: baldina@geogr.msu.ru*

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail: ilyushinapg@my.msu.ru*

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail: a49t@yandex.ru*

Индексы содержания антоцианов и каротиноидов однозначных изменений между сроками съемок не показывают.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гиперспектральные снимки, индексы состояния растительности PRISMA, Sentinel-2, погодные условия

Elena A. Baldina¹, Polina G. Ilyushina², Petr K. Vasiliev³

EVALUATION OF SATELLITE IMAGES WITH DIFFERENT SPECTRAL RESOLUTION FOR ANALYZING THE VEGETATION COVER CONDITION

ABSTRACT

The increase in the number of hyperspectral imaging systems in the last decade necessitates the search for methodological approaches to their processing both as an independent source of information on the state of the Earth surface objects and in complex analysis together with other data. The analysis was performed on two pairs of images of the Near Moscow area, acquired in the same timeframe: PRISMA 22.06.2021 and 25.08.2022, Sentinel-2 23.06.2021 and 24.08.2022 with close spatial resolution: 20 m for Sentinel-2 images and 30 m for PRISMA, but differing in spectral resolution. Both terms were characterized to some extent by abnormal weather conditions in the periods preceding the survey: high temperatures in both dates, but different precipitation, with record low precipitation in August 2022 (drought was observed). This proximity of survey dates and similar spatial resolution allowed for a comparative analysis of the two types of data to identify vegetation stress observed under drought conditions. The state of vegetation cover at each of the dates was assessed using images from both systems by calculating various indices characterizing both the total biomass (NDVI) and the content of some of the most important biochemical indicators (MSI — Moisture Stress Index, pigments — anthocyanins and carotenoids) indicating the manifestation of vegetation stress. The obtained values of NDVI and MSI indices calculated from Sentinel-2 data are significantly lower than those obtained from PRISMA data processing, which may be due to differences in spatial resolution and width of spectral channels. Comparison of NDVI and MSI indices for each of the survey systems between the two dates show a similar situation of decreasing or increasing values as a response to different weather conditions — to the drought in August 2022. There is a slight decrease in green mass and moisture content, especially noticeable for herbaceous vegetation and deciduous forests, while this effect is not noticeable for coniferous forests. Indices of anthocyanins and carotenoids content do not show unambiguous changes between the survey dates.

KEYWORDS: hyperspectral images, PRISMA vegetation indices, Sentinel-2, weather conditions

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях обилия дистанционных данных и накопленных сведений о пространственном положении объектов особое значение приобретают данные и методы их анализа, позволяющие оценивать состояние объектов и их реакцию на меняющиеся условия среды. С этой точки зрения интерес представляют относительно малораспространенные

¹ Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia,
e-mail: baldina@geogr.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia,
e-mail: ilyushinapg@my.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia,
e-mail: a49t@yandex.ru

материалы гиперспектральной съемки из космоса. Гиперспектральная съемка предоставляет детальную спектральную информацию, позволяя анализировать состояние растительности с высокой точностью. В каждом пикселе гиперспектрального изображения сохраняется практически непрерывный спектр отражательной способности в сотнях узких диапазонов, что значительно повышает различимость объектов по сравнению с традиционной мультиспектральной съемкой. Благодаря этому гиперспектральные данные находят широкое применение в экологии, лесном и сельском хозяйстве для решения задач мониторинга здоровья растительности, определения видов деревьев и распознавания сельскохозяйственных культур.

До недавнего времени основными гиперспектральными системами были система аэросъемки AVIRIS (США), развивающаяся до сих пор, и ее европейский аналог CASI, а также работавшая в 2000–2017 гг. космическая система Hyperion EO-1, с которой началась эпоха гиперспектрометров космического базирования. Данные с этих съемочных систем чаще всего использовались вплоть до середины 2010-х гг. в исследованиях, посвященных гиперспектральной съемке. За последние 5 лет появилось несколько гиперспектральных систем космического базирования: ANSI/GaoFen-5 (Китай, 2018 г.); в 2019 г. в Италии был запущен аппарат PRISMA (ASI); в Японии — HISUI на ALOS-3; в 2021 г. — в Германии EnMAP; в 2023 г. — во Франции NuxIM. На МКС с 2019 г. работает система DESIS (Германия), имеющая ограниченный по широте пространственный охват; в России известен ГСА/Ресурс-П.

Гиперспектральные снимки PRISMA уже используются для различения и классификации типов лесов, оценки последствий лесных пожаров, определения типов и состояния сельскохозяйственных культур, многих геологических приложений, геохимических исследований почв и растительности, выявления точек выброса метана, исследований, картирования местных климатических зон и состояния атмосферы над городами и др. [Shaik et al., 2023]. Доступ к данным PRISMA осуществляется через отдельный ресурс по заявкам¹. Разработчики аппаратуры готовы предоставлять данные на бесплатной основе для выполнения научных исследований, однако российские исследователи ответа на заявки не получают (по состоянию на апрель 2025 г.). Согласно работе [Kim et al., 2022] научные организации составили 54 % потребителей снимков за первый год эксплуатации системы. Основные отрасли применения данных — сельское хозяйство (6,9 %), геология (3,9 %), исследования растительного покрова (3,9 %), землепользование (3,4 %), лесопользование (2,8 %), исследование прибрежных зон (2,8 %) и др.

Высокое спектральное разрешение позволяет анализировать спектральные особенности объектов земной поверхности в узких диапазонах. Однако большое число узких спектральных каналов обуславливает уменьшение светового потока, попадающего на каждый участок спектра, из-за чего энергия, принятая каждым отдельным каналом, получается значительно меньше, чем при мультиспектральной съемке, что, в частности, приводит к относительно невысокому пространственному разрешению данных этой системы (30 м) [Acito et al., 2022; De Luca et al., 2024]. Разложение отраженного светового потока на большое число узких диапазонов приводит также к наличию шумов на спектральных изображениях. Кроме того, высокое спектральное разрешение делает соседние каналы похожими друг на друга, что затрудняет их выбор для расчета индексных изображений и требует обязательного проведения серии экспериментов для выбора наиболее удачных каналов (например, с минимальным шумом).

Активное развитие гиперспектральных съемочных систем обуславливает необходимость поиска методических подходов к обработке получаемых данных как независимого

¹ Электронный ресурс: <https://prisma.asi.it/> (дата обращения 25.07.2025)

источника информации о состоянии объекта, так и в комплексном анализе совместно с другими данными, в первую очередь полученными со спутников Sentinel-2. Среди наиболее ранних исследований свойств гиперспектральных данных PRISMA, включавших тестирование данных, сравнение с данными Sentinel-2 на примере оценки качества воды в оз. Тразимено (Италия) (содержащим значительное количество взвесей и планктона [Niroumand-Jadidi et al., 2020]), где было показано, что полученные с помощью PRISMA результаты хорошо согласуются с данными Sentinel-2, несмотря на определенные проблемы качества данных PRISMA. Накопленный значительный опыт успешного применения мультиспектральных данных MSI/Sentinel-2 активно используется исследователями как для улучшения информационных свойств данных PRISMA (в т. ч. пространственного разрешения, например [De Luca et al., 2024]), так и в тематических областях, в первую очередь в сельскохозяйственных задачах [Marshall et al., 2022; Belgiu et al., 2023; Panwar et al., 2024] и для классификации видов и оценки лесной растительности [Vangi et al., 2021; Caputi et al., 2025], где данные PRISMA не столько имеют самостоятельное значение, сколько оцениваются при сравнении с данными Sentinel-2. Известны случаи совместного использования данных с этих спутников, например, при исследовании археологических объектов на суше и в воде [Alicandro et al., 2022].

Одним из хорошо известных и давно разрабатываемых направлений использования дистанционных гиперспектральных данных является оценка показателей состояния растительного покрова путем вычисления различных вегетационных индексов [Митрофанов, 2013; Саворский и др., 2016; Roberts et al., 2018]. Вегетационные индексы, описывающие свойства растительности, полученные с помощью дистанционного зондирования, такие как фотосинтетическая активность и структура полога, широко используются для изучения динамики растительности в разных масштабах. Однако результаты, полученные на основе индексов, могут различаться в зависимости от применяемой для расчета формулы, датчиков, поправок на влияние атмосферы и др. Эти различия затрудняют получение надежных выводов об изменении экосистемы и подчеркивают необходимость последовательного применения и проверки индексов.

Целью исследования является сопоставительная оценка некоторых вегетационных индексов, определяемых по снимкам Sentinel-2 и PRISMA, различающимся спектральным разрешением (в диапазоне 400–2 400 нм у PRISMA — 239 каналов, у Sentinel-2 — 9), для характеристики состояния растительного покрова при разных погодных условиях.

Характеристика района исследований

Исследуемая территория находится в центре Европейской части России на юго-западе Ближнего Подмосковья. Административно она относится преимущественно к Новомосковскому и Троицкому округам Москвы, а также частично — к Московской обл. (городские округа Наро-Фоминский, Подольск, Одинцово и ЗАТО Власиха (рис. 1).

Исторически эта территория была занята в основном лесной растительностью, однако со времен прихода славян и развития земледелия сначала в подсечно-огневой, а потом и в более современных формах, леса активно сводились. Население территории также активно росло, начиная с XIV в., благодаря близкому расположению растущего центра страны — Москвы. При этом на временно неиспользуемых территориях, которые образовывались регулярно в силу различных причин, активно проходила сукцессия.

Физико-географические особенности территории обусловлены ее местоположением на склоне Смоленско-Московской возвышенности (северо-запад), и более низменной Москворецко-Окской равнине (юго-восточная часть). Исторически почти весь юго-запад Ближнего Подмосковья был занят лесами. Большая часть Подмосковья относится к подтаежным лесам Валдайско-Онежской подпровинции Северо-Европейской таежной про-

винции — это зональный тип растительности [Растительность Европейской части СССР, 1980]. В ходе хозяйственного освоения леса сжигались или вырубались, в силу чего на территории Московской обл. практически нет коренных типов леса, и лишь около половины из них — условно-коренные. В большом количестве присутствуют искусственные насаждения (в особенности хвойных пород), а также леса, нарушенные хозяйственной деятельностью [Рысин, 2012]. Крупных луговых пространств не было из-за отсутствия рек с широкими поймами. На начало второго десятилетия XXI в. сельскохозяйственные земли занимают достаточно малую долю площади исследуемой местности. После присоединения большей части исследуемой территории к Москве в 2012 г. значительная часть сельскохозяйственных земель была переведена в категорию земель населенных пунктов и активно застраивается.

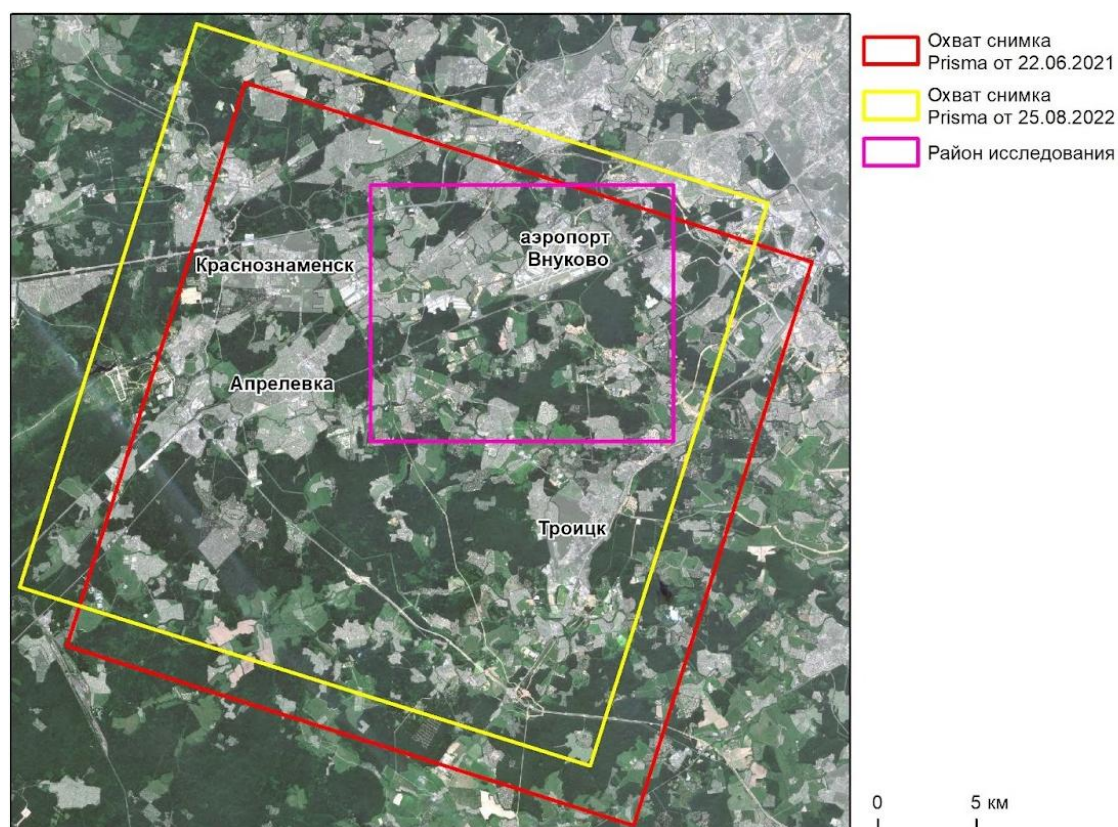


Рис. 1. Охват территории гиперспектральными снимками PRISMA. В качестве подложки использован снимок Sentinel-2 от 23.06.2021 в натуральной цветопередаче. Белыми полупрозрачными полигонами показаны границы населенных пунктов

Fig. 1. Coverage of the area by PRISMA hyperspectral images. A Sentinel-2 image from June 23, 2021, in natural color was used as the base layer. White semi-transparent polygons indicate the boundaries of populated areas

Лесная растительность местности разнообразна. Согласно геоботаническому районированию [Тимофеев, 1966], в Подмоскowie выделяются следующие подзоны: еловые леса с примесью элементов широколиственного типа; смешанные елово-широколиственные (дубовые) леса; широколиственные леса (дубравы) с елью; сосново-болотная подзона. Эти зоны приурочены к физико-географическим районам, в основном определяемым типами рельефа и почвами — Смоленско-Московской моренной возвышенности (еловые леса) и

Москворецко-Окской моренно-эрозионной равнине (широколиственные леса с елью) [Тимофеев, 1966].

Москва и Подмосковье относятся к умеренному климатическому поясу, атлантико-континентальной европейской области (по классификации Б. П. Алисова), коэффициент увлажнения немного выше единицы. Это обуславливает достаточно высокую среднюю относительную влажность в 79 %. Осадков на юго-западе Ближнего Подмосковья выпадает 592 мм в год, из них жидких 383 мм (64 %).

Для нашего исследования имеют значение погодные условия, предшествующие моментам получения анализируемых снимков (конец июня 2021 г. и конец августа 2022 г.), поскольку они до некоторой степени определяют состояние растительного покрова территории. Погодные условия за срок с начала месяца, предшествующего съемке, по данным метеостанции аэропорта Внуково приведены на рис. 2. В оба месяца отмечались высокие температуры воздуха, аномальные относительно среднегодовых для соответствующего периода: в июне 2021 г. на 3,2 °С выше нормы 1991–2020 гг., а в августе 2022 г. — выше на 4,3 °С. При этом, если в июне 2021 г. количество осадков было лишь немногим меньше нормы (61 мм при среднегодовой норме 80 мм), то в августе 2022 г. выпало всего 4 мм осадков (5 % от нормы в 70 мм), что соответствует засухе¹. По этой причине в задачи исследования входило установление характеристик, определяемых по снимкам со спутников PRISMA и Sentinel-2, которые позволяют оценить состояние растительного покрова в пределах исследуемой территории и его реакцию на эти погодные условия.

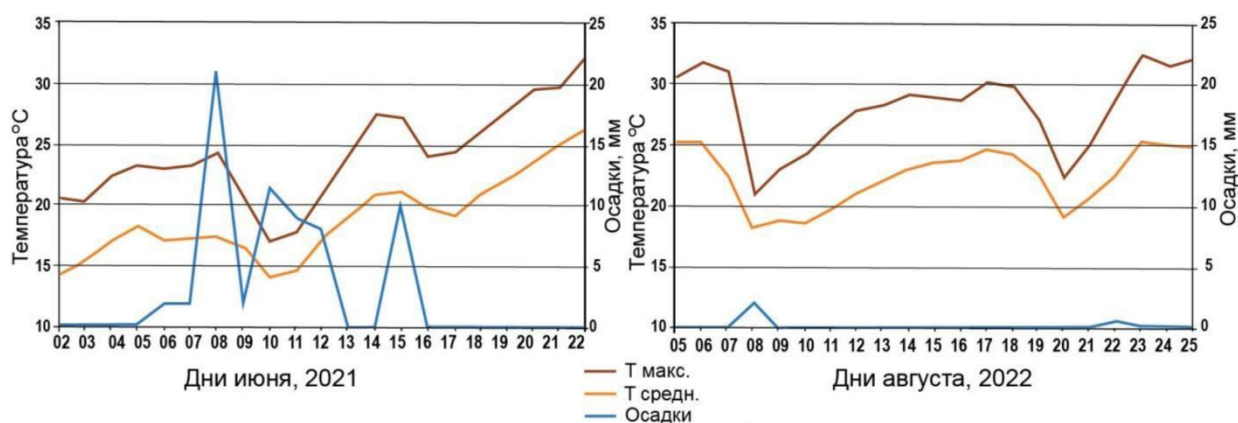


Рис. 2. Метеорологическая характеристика условий, предшествующих съемкам со спутников PRISMA и Sentinel-2

Fig. 2. Meteorological conditions preceding imaging by the PRISMA and Sentinel-2 satellites

Такие контрастные погодные условия позволяют использовать рассматриваемые пары космических снимков (PRISMA и Sentinel-2) для оценки чувствительности различных индексов к проявлениям водного стресса растительности. Подход основан на сравнительном анализе индексов, рассчитываемых по данным съемочных систем с близким пространственным, но с различным спектральным разрешением. Расчет проводился как для индексов общей продуктивности (например NDVI), так и для более специализированных показателей, чувствительных к содержанию влаги, каротиноидов, антоцианов. Это позволило оценить информативность гиперспектральных данных в выявлении стресса растительности относительно мультиспектральных снимков Sentinel-2.

¹ Архив погоды во Внуково. Электронный ресурс: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=27524> (дата обращения 25.07.2025)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были использованы материалы космической съемки гиперспектрометром PRISMA и космические снимки MSI/Sentinel-2, полученные в близкие даты. Анализ выполнялся по двум парам изображений: 22.06.2021 (PRISMA) и 23.06.2021 (Sentinel-2), 25.08.2022 (PRISMA) и 24.08.2022 (Sentinel-2) со схожим пространственным разрешением (20 м для снимков Sentinel-2 и 30 м для PRISMA). Такая близость дат съемки и близкое пространственное разрешение позволили провести сравнительный анализ двух типов данных для выявления стресса растительного покрова, наблюдаемого в условиях засухи. Оба набора данных были с радиометрической и геометрической коррекцией, а также проведенной коррекцией влияния атмосферы, геокодированные.

PRISMA (PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa) — спутник, разработанный Итальянским космическим агентством (ASI) и запущенный в 2019 г. Он был введен в эксплуатацию в январе 2020 г. Космический аппарат оснащен двумя оптико-электронными сканерами — для гиперспектральной съемки с разрешением 30 м и для панхроматической съемки с разрешением 5 м. Охват снимка — 30 км. Гиперспектральная съемка ведется в 239 диапазонах с 400 по 1 010 нм (VNIR) и с 950 по 2 505 нм (SWIR), ширина спектрального канала около 12 нм. Радиометрическое разрешение снимков — 12 бит. Заявленная абсолютная радиометрическая точность — более 5 %. Панхроматическая съемка ведется в диапазоне 400–700 нм [Shaik et al., 2023]. Изображения PRISMA поставляются в формате HDF5, который можно открыть с помощью модуля EnMap Toolbox¹, установленного в программное обеспечение QGIS. При импорте данных «на лету» выполняется радиометрическая калибровка. Особенность формата данных и специфика работы модуля EnMap, такие как долгая загрузка снимка в проект (не менее 10–15 мин в зависимости от мощности компьютера) и необходимость каждый раз при работе с данными PRISMA импортировать их в проект (нет функции «Сохранить проект»), затрудняют проведение методических экспериментов по обработке данных PRISMA. Другой особенностью этого источника информации является не очень точная пространственная привязка данных. Например, по данным [De Luca et al., 2024], геометрическое смещение в данных PRISMA уровня L2 может составлять от 80 до 250 м, неравномерно распределенное по одной сцене и между сценами. В нашей работе для точного пространственного сопоставления используемых в исследовании снимков от 22.06.2021 и 25.08.2022 была дополнительно выполнена процедура уточнения пространственной привязки относительно картографической основы OSM.

Sentinel-2 — группа европейских спутников с аппаратурой для многозональной съемки с широкой полосой охвата (290 км). Частота повторной съемки двумя спутниками составляет 5 дней на экваторе. Каждый из спутников Sentinel-2 несет оптический прибор (MSI) с 13 спектральными каналами, из которых четыре — с пространственным разрешением 10 м, шесть — с пространственным разрешением 20 м и три — с пространственным разрешением 60 м. За 10 лет активной работы съемочные системы спутников Sentinel-2 получили огромные объемы данных, успешно применяемых в управлении земельными ресурсами, сельском и лесном хозяйстве, борьбе со стихийными бедствиями, операциями по оказанию гуманитарной помощи, картировании рисков и обеспечении безопасности, а также для поддержки различных услуг и приложений, предлагаемых компанией Copernicus. Космические снимки Sentinel-2 используются широко в отличие от снимков PRISMA, которые в силу своего сравнительно недавнего появления и нерегулярной съемки применяются для решения по сути разовых задач (идентификация минералов в горных породах, определение стресса растительности).

¹ EnMAP-Box. Электронный ресурс: https://www.enmap.org/data_tools/enmapbox/ (дата обращения 25.07.2025)

В нашем исследовании для сравнения с данными PRISMA использовались данные Sentinel-2B, уровня обработки L2A, каналы 2–7, 8A, 11 и 12 с пространственным разрешением, пересчитанным на 20 м. Наличие каналов в крайней красной зоне позволяет использовать снимки Sentinel-2 для анализа состояния растительности. Уточнение взаимной пространственной привязки снимков двух сроков не потребовалось.

Соотношение каналов и соответствующих им длин волн спектра приведены в табл. 1 [Xi et al., 2023].

Табл. 1. Основные каналы изображений PRISMA и Sentinel-2 и их спектральные диапазоны [Xi et al., 2023]
Table 1. Main imaging channels and spectral ranges of PRISMA and Sentinel-2 [Xi et al., 2023]

Каналы PRISMA	Длина волны, нм	Каналы Sentinel-2	Длина волны, нм
63–66	400–432	–	–
60–62	432–452	1	433–453
51–59	452–521	2	458–523
48–50	521–542	–	–
44–47	542–575	3	543–578
36–43	575–647	–	–
32–35	647–685	4	650–680
31	685–696	–	–
29–30	696–716	5	698–713
27–28	716–736	–	–
26	736–745	6	733–748
23–25	745–778	–	–
21–22	778–799	7	773–793
11–22	778–905	8	785–900
8–10	905–935	–	–
6–7	935–958	9	935–955
4–5	958–979	–	–
129–131 (SWIR)	1 355–1 387	10	1 360–1 390
104–112 (SWIR)	1 558–1 654	11	1 565–1 655
32–54 (SWIR)	2 098–2 279	12	2 100–2 280

Вегетационные индексы (ВИ) разрабатывались для оценки свойств растительности одним числовым значением или индексом, получаемым на основе спектра отражения растительности, изменяющегося в зависимости от содержания пигментов, варьирования биохимических свойств и др. [Черепанов, Дружинина, 2009]. Различные пигменты поглощают свет определенной длины волны, а другие световые волны отражают. В зависимости от спектрального состава отраженного света пигменты приобретают окраску — зеленую, желтую, красную и др. Например, хлорофиллы активно поглощают свет в синей (430–460 нм) и красной (650–700 нм) областях электромагнитного спектра, а зеленую и ближнюю инфракрасную область спектра хлорофиллы эффективно отражают. Они отвечают за зеленый цвет здоровых растений.

Известны простые соотношения, нормализованные соотношения, комбинации трех и более спектральных каналов. Для многих индексов существуют широкополосные и узкополосные эквиваленты, хотя биохимические и физиологические ВИ в основном

разрабатываются с использованием узких полос [Roberts et al., 2018; Zeng et al., 2023]. Узкополосные вегетационные индексы позволяют выявлять различные типы биохимических изменений, происходящих с растительным покровом. Полученные индексные изображения помогают в оценке состояния здоровья растений, включая выявление стрессов, таких как засуха или болезни, что в первую очередь имеет значение для сельского и лесного хозяйства. Общее число разработанных индексов, характеризующих состояние растительного покрова, по разным источникам достигает первых сотен¹.

Наибольшее распространение получили индексы, использующие комбинации отражения в красном и ближнем инфракрасном участках спектра, среди которых наиболее известен нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). За счет поглощения света хлорофиллом отражение в красной области спектра всегда существенно меньше, чем в ближней инфракрасной для зеленой растительности, поэтому NDVI (1) служит показателем количества фотосинтетически активной биомассы и в целом для оценки общего состояния растительности. Значения индекса лежат в диапазоне от -1 до $+1$.

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1).$$

Для снимков Sentinel-2B при расчете NDVI использовались каналы: NIR — B08A (центральная длина волны 864 нм), Red — B04 (центральная длина волны 665 нм); для снимков PRISMA: NIR (20) — 796 нм, Red (33) — 674 нм.

Для оценки содержания влаги в растительном покрове используется MSI (Moisture Stress Index), характеризующий физиологическое состояние растений. Он позволяет выявить водный стресс растений, поскольку высокое содержание влаги характерно для здоровой растительности. Известно, что высокие значения MSI (>1) указывают на снижение содержания влаги в растительности, а низкие значения (<1) соответствуют здоровым, хорошо увлажненным растениям. MSI рассчитывается как отношение спектральной отражательной способности в коротковолновом инфракрасном (SWIR) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах (2):

$$MSI = SWIR / NIR \quad (2).$$

Для спутниковых данных Sentinel-2B использовались каналы B11 (1 610 нм) и B08A (864 нм), для PRISMA соответственно каналы с длиной волны 1 596 нм и 796 нм.

Состояние растительного покрова характеризуется также наличием разных пигментов [Gitelson et al., 2006]. Вегетационные индексы содержания пигментов в растениях разработаны для того, чтобы обеспечить измерения тех из них, которые связаны со стрессом. Пигменты, связанные со стрессом, включают каротиноиды (желтые пигменты) и антоцианы (розовые, фиолетовые и красные пигменты), которые, как правило, присутствуют в более высоких концентрациях, когда растительность находится в ослабленном состоянии. Каротиноиды участвуют в процессах поглощения света растениями, а также в защите растений от вредного воздействия условий высокой освещенности².

Антоцианы — это водорастворимые пигменты, которые придают листьям, плодам и цветам красный, фиолетовый или синий цвет. Эти пигменты накапливаются в растениях как ответ на различные абиотические и биотические стрессы и защищают их от этих стрессовых факторов, что позволяет проводить мониторинг физиологического состояния растений и оценивать изменения в листовом покрове.

¹ Index DataBase. Электронный ресурс: <https://www.indexdatabase.de/> (дата обращения 25.07.2025)

² Использование вегетационных индексов для анализа растительности. Электронный ресурс: https://gisproxima.ru/ispolzovanie_vegetatsionnyh_indeksov (дата обращения 25.07.2025)

Следующий индекс, mARI (3), относится к узкополосным (для вычисления которого целесообразно использовать каналы гиперспектральных данных), однако его часто рассчитывают и по доступным более широким каналам. Для данных PRISMA использовались каналы с длиной волны 550 нм (Green), 694 нм (RedEdge) и 796 нм (NIR). Для Sentinel-2: Green — B03 550 нм, RedEdge — B05 (706 нм), и NIR — 864 нм:

$$mARI = (1 / \text{Green} - 1 / \text{RedEdge}) / \text{NIR} \quad (3).$$

Каротиноиды в отличие от антоцианов всегда присутствуют в клетках растений, но в зеленых частях растений хлорофилл маскирует каротиноиды, делая их незаметными до наступления холодов. Осенью зеленые пигменты разрушаются, и каротиноиды становятся хорошо заметными, определяя окраску осенних листьев. Для оценки содержания каротиноидов также чаще используют узкополосные индексы (4a, 4b), причем при расчетах используется и коротковолновой зелено-голубой канал, в котором иногда и после коррекции атмосферы снижена доля отраженного излучения:

$$CRI1 = 1 / R510 - 1 / R550 \quad (4a)$$

или

$$CRI2 = 1 / R510 - 1 / R700 \quad (4b).$$

При расчете этого индекса по данным Sentinel-2 использовались 2 и 3 или 2 и 5 каналы, для данных PRISMA — 512 нм и 550 нм или 512 нм и 694 нм (RedEdge).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате работы посчитаны значения индексов NDVI (1), MSI (2), mARI (3), CRI (4) по данным Sentinel-2 и PRISMA. Для наглядного сравнения вычислялись и разности индексов, полученных для каждой съемочной системы, между двумя сроками съемок. На рис. 3–4 представлены индексные изображения NDVI и MSI для фрагмента снимков и соответствующие разницы. Анализ индексов NDVI и MSI в целом показывает, что значения, рассчитанные по данным Sentinel-2, существенно ниже полученных на основе обработки данных PRISMA. Вероятно, это связано с различиями в пространственном разрешении, ширине спектральных каналов. Однако при этом общая динамика индексов (снижение или увеличение значений между двумя сроками) совпадает.

Сравнительный анализ индекса NDVI за июнь 2021 г. и август 2022 г. показывает существенное снижение значений индекса в августе относительно июня для участков, занятых травянистой растительностью, что особенно хорошо заметно на примере газонов между взлетно-посадочными полосами аэропорта Внуково. Некоторое снижение заметно и для смешанного леса с существенным преобладанием лиственных пород деревьев. При этом для хвойных лесов изменение значений индекса NDVI находится в пределах 0,05 по модулю, что в исследовании принимается как пиксели, для которых значение индекса практически не поменялось — на изображении разностей такие участки отмечены белым цветом.

Похожая закономерность наблюдается и для распределения значений индекса MSI: между июнем 2021 г. и августом 2022 г. он существенно меняется для травянистой растительности и лиственных лесов, при этом для хвойной растительности либо не меняется, либо показывает некоторое снижение показателя водного стресса.

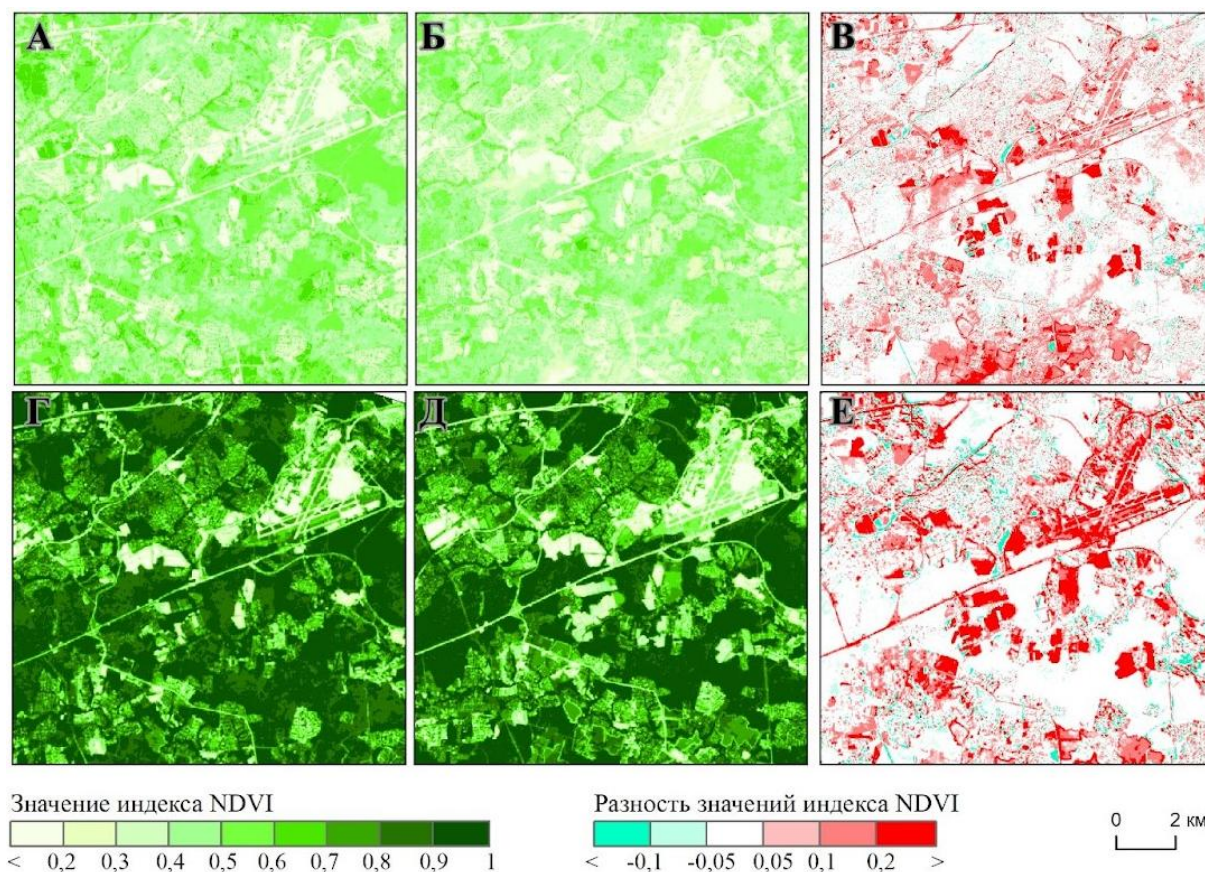


Рис. 3. Значения индекса NDVI: А — по данным Sentinel-2 от 23.06.2021; Б — по данным Sentinel-2 от 24.08.2022; В — их разность; Г — по данным PRISMA от 22.06.2021; Д — по данным PRISMA от 25.08.2022; Е — их разность

Fig. 3. NDVI index values: A — by the Sentinel-2 data, 23.06.2021; B — by the Sentinel-2 data, 24.08.2022; C — their difference; D — by the PRISMA data, 22.06.2021; E — by the PRISMA data, 25.08.2022; F — their difference

Изображения индекса содержания антоцианов, а также их разности не дают такой же наглядной картины, как предыдущие 2 индекса. Например, для участков хвойного леса значение индекса и соответственно количество пигмента в августе ниже, чем в июне, а для травянистых и лиственных лесов отмечается некоторое увеличение количества пигментов. На содержание антоцианов в растительности влияет множество факторов (в т. ч. УФ излучение, которого в июне больше, чем в августе). Для каких-то участков индекс содержания антоцианов увеличивается (травянистая), а где-то уменьшается в августе, поэтому интерпретация содержания антоцианов требует детального понимания текущих условий и анализ с другими данными.

Индекс содержания каротиноидов не показал различий в состоянии растительности в июне 2021 г. и августе 2022 г., т. к. оба снимка относились к летнему периоду — обилие хлорофилла перекрывает содержание каротиноидов во всех видах растительности на исследуемой территории.

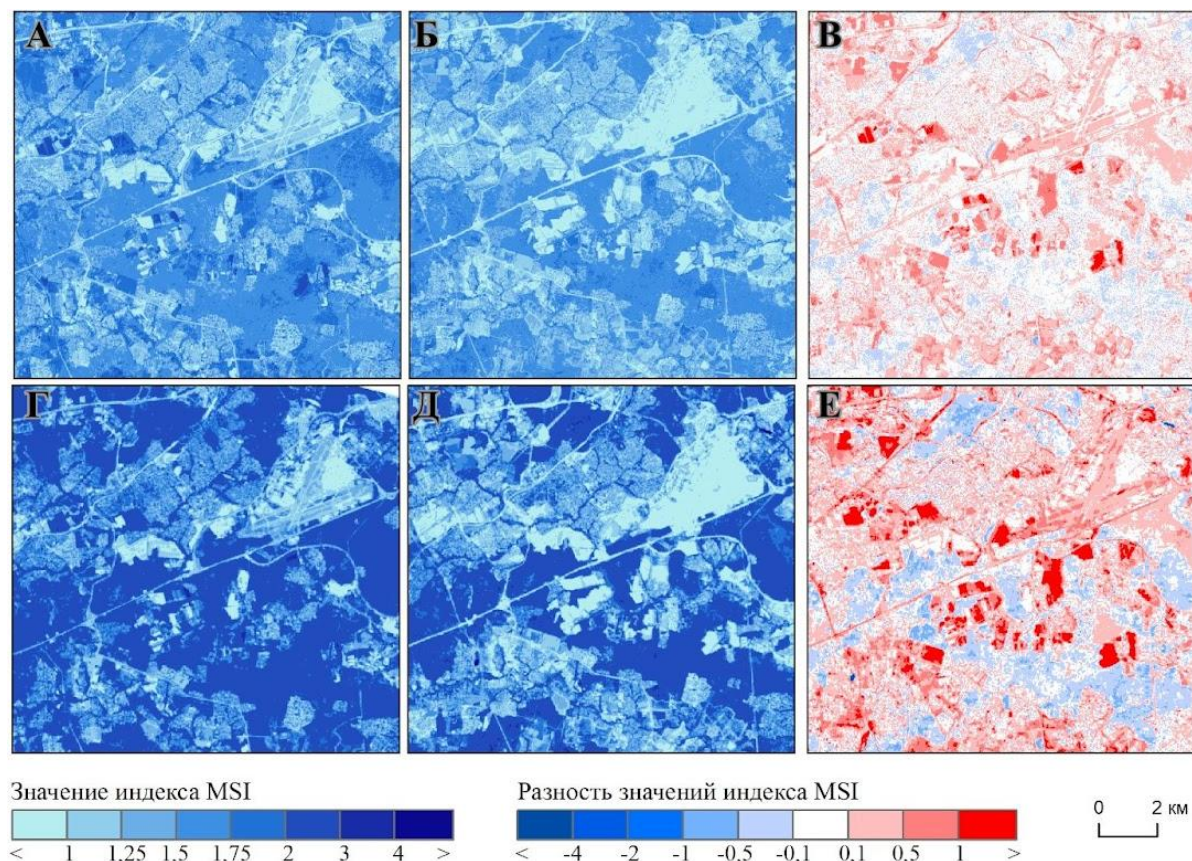


Рис. 4. Значения индекса MSI: А — по данным Sentinel-2 от 23.06.2021; Б — по данным Sentinel-2 от 24.08.2022; В — их разность; Г — по данным PRISMA от 22.06.2021; Д — по данным PRISMA от 25.08.2022; Е — их разность

Fig. 4. MSI index values: А — by the Sentinel-2 data, 23.06.2021; Б — by the Sentinel-2 data, 24.08.2022; В — their difference; Д — by the PRISMA data, 22.06.2021; Е — by the PRISMA data, 25.08.2022; F — their difference

ВЫВОДЫ

Значения вегетационных индексов, полученные по гиперспектральным данным PRISMA, выше, чем по мультиспектральным снимкам Sentinel-2 (для всех), но в целом относительное распределение значений по видам растительного покрова и разности между их значениями в разные сроки совпадают. Вегетационные индексы позволили определить, насколько физиологически активна растительность на определенных участках, сравнить между собой эти участки (или виды растительного покрова) на момент съемки, установив различия, обусловленные предшествующими погодными условиями. Заметные различия в условиях увлажнения за период перед съемками проявились в снижении значений индексов объема биомассы (NDVI) и влагосодержания (MSI) для травянистой растительности и лиственных (преимущественно) лесов, в то время как для хвойных лесов эти различия оказались незаметными. Несмотря на различия в численных значениях индексов, полученных по данным PRISMA и по снимкам Sentinel-2A, на основе полученных индексов возможна интерпретация экосистемных условий, таких как уровень стресса растений, здоровье экосистемы и влияние на них погодных условий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121051400061-9. Авторы выражают благодарность О. В. Тутубалиной за помощь в получении снимков PRISMA.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was conducted within the framework of the state-funded research project No. 121051400061-9. The authors express gratitude to O. V. Tutubalina for her assistance in acquiring PRISMA imagery.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Митрофанов Е. М. Разработка методики геопространственного анализа деградации лесной растительности по гиперспектральным данным дистанционного зондирования. Автореферат диссертации кандидата технических наук. Москва, 2013. 24 с.

Растительность Европейской части СССР. Академия наук СССР, Ботанический институт им. В.Л. Комарова. Л.: Наука, 1980. 429 с.

Растительность Московской области. Масштаб 1:200 000. Пояснительный текст и легенда к карте. М.: ЭКОР, 1996.

Рысин Л. П. Леса Подмосковья. Отделение биологических наук РАН, Институт лесоведения. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 255 с.

Саворский В. П., Кашицкий А. В., Константинова А. М., Балашов И. В., Крашенинникова Ю. С., Толпин В. А., Маклаков С. М., Савченко Е. В. Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега». Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. Т. 13. № 3. С. 28–45. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-28-45.

Тимофеев В. П. Леса Московской области. Леса СССР. В 5 томах. Т. 2. Подзона южной тайги и смешанных лесов. М.: Наука, 1966. С. 277–314.

Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. Геоматика, 2009. № 3. С. 28–32.

Acito N., Diani M., Corsini G. PRISMA Spatial Resolution Enhancement by Fusion with Sentinel-2 Data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022. V. 15. P. 62–79. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3132135.

Alicandro M., Candigliota E., Dominici D., Immordino F., Masin F., Pascucci N., Quaresima R., Zollini S. Hyperspectral PRISMA and Sentinel-2 Preliminary Assessment Comparison in Alba Fucens and Sinuessa Archaeological Sites (Italy) Land (Basel) 11. 2022. DOI: 10.3390/land11112070.

Belgiu M., Marshall M., Boschetti M., Pepe M., Stein A., Nelson A. PRISMA and Sentinel-2 Spectral Response to the Nutrient Composition of Grains. Remote Sensing of Environment, 2023. V. 292. P. 113567. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113567.

Caputi E., Delogu G., Patriarca A., Perretta M., Mancini G., Boccia L., Recanatesi F., Ripa M. N. Comparison of Tree Typologies Mapping Using Random Forest Classifier Algorithm of PRISMA and Sentinel-2 Products in Different Areas of Central Italy. Remote Sensing, 2025. V. 17. P. 356. DOI: 10.3390/rs17030356.

- De Luca G., Carotenuto F., Genesio L., Pepe M., Toscano P., Boschetti M., Miglietta F., Gioli B.* Improving PRISMA Hyperspectral Spatial Resolution and Geolocation by Using Sentinel-2: Development and Test of an Operational Procedure in Urban and Rural Areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024. V. 215. P. 112–135. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.07.003.
- Gitelson A. A., Keydan G. P., Merzlyak M. N.* Three-Band Model for Noninvasive Estimation of Chlorophyll, Carotenoids, and Anthocyanin Contents in Higher Plant Leaves. *Geophysical Research Letters*, 2006. V. 33. P. LL11402. DOI: 10.1029/2006GL026457.
- Kim M., Park S., Anderson C., Stensaas G. L.* System Characterization Report on PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa (PRISMA). Chapter K of: Ramaseri Chandra S. N., comp., System Characterization of Earth Observation Sensors. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2021. 28 p. DOI: 10.3133/ofr20211030K.
- Marshall M., Nelson A., Belgiu M., Boschetti M., Pepe M., Stein A.* Field-Level Crop Yield Estimation with PRISMA and Sentinel-2. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022. V. 187. P. 191–210. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.03.008.
- Niroumand-Jadidi M., Bovolo F., Bruzzone L.* Water Quality Retrieval from PRISMA Hyperspectral Images: First Experience in a Turbid Lake and Comparison with Sentinel-2. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. P. 3984. DOI: 10.3390/rs12233984.
- Panwar E., Singh D., Kumar Sharma A., Kumar H. A.* Monitoring Wheat Crop Biochemical Responses to Random Rainfall Stress Using Remote Sensing: A Multi-Data Approach. *IEEE Access*, 2024. V. 12. P. 174144–174157. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3494867.
- Roberts D., Roth Keely L., Wetherley E., Susan K., Meerdink S., Ryan L., Perroy R.* Hyperspectral Vegetation Indices Book Chapter “Hyperspectral Indices and Image Classifications for Agriculture and Vegetation”, 2nd Edition. CRC Press, 2018.
- Shaik R. U., Periasamy S., Zeng W.* Potential Assessment of PRISMA Hyperspectral Imagery for Remote Sensing Applications. *Remote Sensing*, 2023. V. 15. P. 1378. DOI: 10.3390/rs15051378.
- Vangi E., D’Amico G., Francini S., Giannetti F., Lasserre B., Marchetti M., Chirici G.* The New Hyperspectral Satellite PRISMA: Imagery for Forest Types Discrimination. *Sensors*, 2021. V. 21. P. 1182. DOI: 10.3390/s21041182.
- Xi X., Chen M., Wang Y., Yang H.* Band-Optimized Bidirectional LSTM Deep Learning Model for Bathymetry Inversion. *Remote Sensing*, 2023. V. 15. P. 3472. DOI: 10.3390/rs15143472.
- Zeng Y., Hao D., Huete A., Dechant B., Berry J., Chen M. J., Joiner J., Frankenberg Ch., Bond-Lamberty B., Ryu Y., Xiao J., Asrar R. G., Chen M.* Optical Vegetation Indices for Monitoring Terrestrial Ecosystems Globally. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022. V. 3. P. 477–493. DOI: 10.1038/s43017-022-00298-5.

REFERENCES

- Acito N., Diani M., Corsini G.* PRISMA Spatial Resolution Enhancement by Fusion with Sentinel-2 Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022. V. 15. P. 62–79. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3132135.
- Alicandro M., Candigliota E., Dominici D., Immordino F., Masin F., Pascucci N., Quaresima R., Zollini S.* Hyperspectral PRISMA and Sentinel-2 Preliminary Assessment Comparison in Alba Fucens and Sinuessa Archaeological Sites (Italy) Land (Basel) 11. 2022. DOI: 10.3390/land1112070.

- Belgiu M., Marshall M., Boschetti M., Pepe M., Stein A., Nelson A.* PRISMA and Sentinel-2 Spectral Response to the Nutrient Composition of Grains. *Remote Sensing of Environment*, 2023. V. 292. P. 113567. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113567.
- Caputi E., Delogu G., Patriarca A., Perretta M., Mancini G., Boccia L., Recanatesi F., Ripa M. N.* Comparison of Tree Typologies Mapping Using Random Forest Classifier Algorithm of PRISMA and Sentinel-2 Products in Different Areas of Central Italy. *Remote Sensing*, 2025. V. 17. P. 356. DOI: 10.3390/rs17030356.
- Cherepanov A. S., Druzhinina E. G.* Spectral Properties of Vegetation and Vegetation Indices. *Geomatics*, 2009. No. 3. P. 28–32 (in Russian).
- De Luca G., Carotenuto F., Genesio L., Pepe M., Toscano P., Boschetti M., Miglietta F., Gioli B.* Improving PRISMA Hyperspectral Spatial Resolution and Geolocation by Using Sentinel-2: Development and Test of an Operational Procedure in Urban and Rural Areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024. V. 215. P. 112–135. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2024.07.003.
- Gitelson A. A., Keydan G. P., Merzlyak M. N.* Three-Band Model for Noninvasive Estimation of Chlorophyll, Carotenoids, and Anthocyanin Contents in Higher Plant Leaves. *Geophysical Research Letters*, 2006. V. 33. P. LL11402. DOI: 10.1029/2006GL026457.
- Kim M., Park S., Anderson C., Stensaas G. L.* System Characterization Report on PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa (PRISMA). Chapter K of: Ramaseri Chandra S. N., comp., *System Characterization of Earth Observation Sensors*. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2021. 28 p. DOI: 10.3133/ofr20211030K.
- Marshall M., Nelson A., Belgiu M., Boschetti M., Pepe M., Stein A.* Field-Level Crop Yield Estimation with PRISMA and Sentinel-2. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022. V. 187. P. 191–210. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.03.008.
- Mitrofanov E. M.* Development of Methodology of Geospatial Analysis of Forest Vegetation Degradation by Hyperspectral Remote Sensing Data. Author's abstract of dissertation for PhD of Technical Sciences. Moscow, 2013. 24 p. (in Russian).
- Niroumand-Jadidi M., Bovolo F., Bruzzone L.* Water Quality Retrieval from PRISMA Hyperspectral Images: First Experience in a Turbid Lake and Comparison with Sentinel-2. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. P. 3984. DOI: 10.3390/rs12233984.
- Panwar E., Singh D., Kumar Sharma A., Kumar H. A.* Monitoring Wheat Crop Biochemical Responses to Random Rainfall Stress Using Remote Sensing: A Multi-Data Approach. *IEEE Access*, 2024. V. 12. P. 174144–174157. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3494867.
- Roberts D., Roth Keely L., Wetherley E., Susan K., Meerdink S., Ryan L., Perroy R.* Hyperspectral Vegetation Indices Book Chapter “Hyperspectral Indices and Image Classifications for Agriculture and Vegetation”, 2nd Edition. CRC Press, 2018.
- Rysin L. P.* Forests of the Moscow Region. Department of Biological Sciences of the Russian Academy of Sciences, Institute of Forestry. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2012. 255 p. (in Russian).
- Savorskiy V. P., Kashnitskiy A. V., Konstantinova A. M., Balashov I. V., Krasheninnikova Yu. S., Tolpin V. A., Maklakov S. M., Savchenko E. V.* Capabilities of Hyperspectral Indices Analysis of the “Vega Constellation” Remote Monitoring Information Systems. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2016. V. 13. No. 3. P. 28–45 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-28-45.

Shaik R. U., Periasamy S., Zeng W. Potential Assessment of PRISMA Hyperspectral Imagery for Remote Sensing Applications. *Remote Sensing*, 2023. V. 15. P. 1378. DOI: 10.3390/rs15051378.

Timofeev V. P. Forests of the Moscow Region. Forests of the USSR. In 5 volumes. V. 2. Subzone of Southern Taiga and Mixed Forests. Moscow: Nauka, 1966. P. 277–314 (in Russian).

Vangi E., D'Amico G., Francini S., Giannetti F., Lasserre B., Marchetti M., Chirici G. The New Hyperspectral Satellite PRISMA: Imagery for Forest Types Discrimination. *Sensors*, 2021. V. 21. P. 1182. DOI: 10.3390/s21041182.

Vegetation of the European Part of the USSR. Academy of Sciences of the USSR, V.L. Komarov Botanical Institute. Leningrad: Nauka, 1980. 429 p. (in Russian).

Vegetation of the Moscow Region. Scale 1:200 000. Explanatory Text and Legend to the Map. Moscow: ECOR, 1996. (in Russian).

Xi X., Chen M., Wang Y., Yang H. Band-Optimized Bidirectional LSTM Deep Learning Model for Bathymetry Inversion. *Remote Sensing*, 2023. V. 15. P. 3472. DOI: 10.3390/rs15143472.

Zeng Y., Hao D., Huete A., Dechant B., Berry J., Chen M. J., Joiner J., Frankenberg Ch., Bond-Lamberty B., Ryu Y., Xiao J., Asrar R. G., Chen M. Optical Vegetation Indices for Monitoring Terrestrial Ecosystems Globally. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022. V. 3. P. 477–493. DOI: 10.1038/s43017-022-00298-5.