УДК 528.831 DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-263-276

М.Г. Ерунова[1], А.А. Гостева[2]

ПРИМЕНЕНИЕ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ

АННОТАЦИЯ

На протяжении большого количества времени люди пытаются рационально использовать территорию, на которой проживают, работают и отдыхают. Существует множество методов автоматизации процессов для эффективного управления территорией любого масштаба. Оперативный мониторинг показывает текущее состояние территории и проводится с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Многие авторы предлагают методики по глобальному оперативному наблюдению за территориями по данным MODIS. Однако эти данные имеют недостаточное пространственное разрешение для решения задач локальных территорий, таких, как сельскохозяйственное поле, городской микрорайон, размеры которых сравнимы с разрешением 1 пикселя MODIS. Для таких территорий необходимо использовать данные с более высоким пространственным разрешением.

В статье описано применение спутниковых данных высокого разрешения PlanetScope для задач управления локальной территорией по 4 территориям. Рассмотрены 2 типа объектов: сельскохозяйственные земли представлены опытно-производственными хозяйствами «Минино», «Курагинское» и «Михайловское», городские земли представлены одним объектом – городом Красноярском. Получены статистические значения индексов NDVI, VARI, CIGreen для каждого поля в каждом хозяйстве в течение всего вегетационного периода. Проанализирована связь годового хода вегетационных индексов и сельскохозяйственных культур. Для территории города Красноярска рассчитаны тематические карты температуры поверхности по данным Landsat 8 с классификацией по PlanetScope по типу подстилающей поверхности, которые позволили выявить изменения городского ландшафта по температурным аномалиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: PlanetScope, спутниковые данные, вегетационные индексы, температура поверхности земли, локальные территории

---

[1] Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», ул. Академгородок, 50, 660036, г. Красноярск, Россия; *e-mail:* **marina@icm.krasn.ru**

[2] Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», ул. Академгородок, 50, 660036, г. Красноярск, Россия; *e-mail:* **agosteva@icm.krasn.ru**

Marina G. Erunova[1], Anna A. Gosteva[2]

USE OF HIGH-RESOLUTION IMAGES IN LOCAL AREA MANAGEMENT TASKS

ABSTRACT

For an enormous amount of time, people are trying to rationally use the territory where they live, work, and relax. There are a large number of methods to do this better and automate the process of effective territory management. One of the critical tasks of managing the territory is the operational monitoring of its current state. The best solution for this task is to use remote sensing data. According to MODIS data, currently, methods for active global monitoring of territories have been developed, and their archive began in 2000. However, this data has the insufficient spatial resolution to solve problems for local areas, such as an agricultural field, an urban neighborhood whose dimensions are comparable to the solution of 1-pixel MODIS. For such territories, it is necessary to use data with a higher spatial resolution.

The article describes the use of high-resolution satellite data from PlanetScope in the tasks of managing a local territory for four territories. 2 types of objects are considered: agricultural land is represented by experimental agricultural enterprise "Minino", "Kuraginskoe" and "Mikhailovskoe", urban land is represented by one object, the city of Krasnoyarsk. The statistical values of the NDVI, VARI, and CIGreen indices were obtained for each field in each farm during the entire growing season. The relationship between the annual course of vegetation indices and crops is analyzed. For the territory of the city of Krasnoyarsk, temperature maps were calculated according to Landsat 8 data with classification according to PlanetScope by the type of underlying surface, which allowed us to identify changes in the urban landscape by temperature anomalies.

KEYWORDS: PlanetScope, satellite data, vegetation indices, land surface temperature, local territories

[1] The Federal State Budget Scientific Institution, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the RAS” Akademgorodok str., 50, 660036, Krasnoyarsk, Russia; *e-mail:* **marina@icm.krasn.ru**

[2] The Federal State Budget Scientific Institution, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the RAS” Akademgorodok str., 50, 660036, Krasnoyarsk, Russia; *e-mail:* **agosteva@icm.krasn.ru**

ВВЕДЕНИЕ

Управление территорией – это процесс, который требует постоянного мониторинга и анализа данных о развитии объекта (территории) управления. Нужно понимать, что любой объект управления обладает своими определенными социально-экономическими, национально-культурными, природными и другими условиями развития [*Панасюк,* 2004]. Для обеспечения мониторинга территорией необходима организация соответствующей материальной базы и особой информационной системы, включая средства сбора и передачи информации, накопления данных и пр. [*Горюшин,* 1994]. То есть для эффективного управления территорией необходимо разработать такую информационную систему, которая позволит в оперативном режиме хранить объективную информацию о состоянии территории и в то же время объединит процессы сбора, обработки и последующей подготовки информационно-аналитических решений в единый процесс.

Активно создаются и внедряются специализированные информационные системы для работы с архивами спутниковых данных, которые обеспечивают решение широкого круга задач оценки и мониторинга территории. Ярким примером служит информационная система ВЕГА, которую разработал Институт космических исследований РАН. ВЕГА – это сервис для удобного удаленного доступа к постоянно пополняющимся архивам спутниковых данных и различным информационным продуктам, получаемым на их основе. При этом пользователям системы предоставляются не только возможности удобного поиска, выбора и получения архивной и оперативной информации, но и различные инструменты для ее анализа [*Лупян и др.*, 2014]. Другой альтернативой выступают информационные системы на основе геоинформационного Интернет-портала, так, например, на геопортале ИВМ СО РАН[1] предоставлен доступ не только к спутниковым данным, но и к геопространственным базам данных различных территорий, начиная с уровня России и заканчивая локальными территориями, такими, как город, заповедник, сельское хозяйство и т.д. Здесь так же предоставляются различные технологические решения работы с геоданными [*Якубайлик*, 2007]. Создаются коммерческие решения для управления городскими территориями, например, новосибирская ИТ-компания «Дата Ист» разработала облачные сервисы CityCloud[2] для муниципалитетов, которые позволяют отслеживать размещение рекламных конструкций, публиковать схемы размещения нестационарных торговых объектов, вести учет сведений о выданных органом местного самоуправления разрешениях на строительство и многое другое. Также в настоящее время существует большое количество ресурсов, которые показывают оперативную ситуацию по пожарам, так Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз)[3] на своем сайте предоставляет информацию по температурным аномалиям, действующим пожарам и прогноз погодных условий на территорию Российской Федерации.

В последние десятилетия спутниковые данные все активнее применяются для решения задач, связанных с получением объективной информации об использовании и состоянии любой территории. Они находят применение при мониторинге сельскохозяйственных культур [*Терехов и др.*, 2007; *Лупян и др.*, 2018; *Комаров,* 2018], лесных хозяйств [*Барталев и др.*, 2015; *Redowan et al.*, 2014], а также мониторинге городских хозяйств, поиске температурных аномалий [*Грищенко и др.*, 2019].

---

[1] Геопортал ИВМ СО РАН. Электронный ресурс: http://gis.krasn.ru/blog/ (дата обращения 28.04.2021)

[2] Отечественные облачные геоинформационные сервисы CityCloud для реализации сценариев «умных городов». Электронный ресурс: https://citycloud.dataeast.com/ru/cloud-solutions/ (дата обращения 28.04.2021)

[3] Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. Раздел Открытые данные. Электронный ресурс: https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml (дата обращения 28.04.2021)

В настоящее время отработаны методики по глобальному оперативному наблюдению за территориями по открытым данным MODIS [*Барталев и др.*, 2006; *Шевырногов и др.*, 2012], их архив начинается с 2000 г. Однако эти данные имеют недостаточное пространственное разрешение для решения задач, касающихся локальных территорий, таких, как сельскохозяйственное поле, городской микрорайон, размеры которых сравнимы с разрешением 1 пикселя MODIS (250 м на 250 м). Для таких территорий необходимо использовать данные с более высоким пространственным разрешением. Для увеличения пространственного разрешения применяются данные программы Landsat, их разрешение уже 30 м, но периодичность съемки на исследуемой территории 1 раз в 17 дней, такая периодичность может стать проблемой для решения задач. В 2017–2018 гг. впервые появилась возможность получения снимков высокого пространственного разрешения (10 м и детальнее) с частотой 2–7 раз в неделю, причем часть данных находится в открытом доступе. В качестве исходных, регулярно обновляемых и обрабатываемых данных, использовались данные телеметрии со спутников PlanetScope и Sentinel-2 (A/B).

Применение ГИС-технологий позволяет значительно ускорить и повысить эффективность управления территорией любого уровня. Геопространственная база данных конкретной локальной территории должна содержать разнообразные материалы и данные: цифровые топографические карты разных масштабов, почвенные и агрохимические карты, цифровые модели рельефа, материалы наземных наблюдений, статистические данные, исторические сведения, данные дистанционного зондирования (ДДЗ) и многое другое. Такое разнообразие разнородной информации должно формироваться в едином географическом пространстве и иметь единую базовую картографическую основу (базовые карты). Полученная базовая карта должна служить фоном для отображения, визуализации и использования оперативной информации и результатов.

В данной работе представлены результаты применения снимков высокого разрешения PlanetScope в задачах управления локальной территорией на примере города Красноярска и опытно-производственных хозяйств «Минино», «Курагинское» и «Михайловское», которые являются структурными подразделениями ФИЦ СО РАН. Для каждой территории была разработана соответствующая геопространственная база данных с базовыми картами, картами вегетационных индексов за 2020 г. для сельскохозяйственных полей и тематическими картами температуры поверхности, рассчитанными по спутниковым данным Landsat 8 и PlanetScope для городской территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования

Все объекты исследования расположены на территории Красноярского края, их взаимное местоположение приведено на рис. 1. Рассмотрены 2 типа объектов: сельскохозяйственные земли представлены опытно-производственными хозяйствами «Минино», «Курагинское» и «Михайловское», городские земли представлены одним объектом – административным центром края.

Крупный промышленный город Красноярск является экономическим, культурным, образовательным и транспортным центром Восточной Сибири. Город расположен в центре России на обоих берегах Енисея, имеет вытянутую вдоль реки форму, со сложным рельефом и плотной жилой застройкой, его площадь – 67735 га.

ОПХ «Минино» является базовым хозяйством Красноярского НИИСХ, находится в нескольких километрах от г. Красноярска, в Емельяновском районе Красноярского края, площадь – 3240 га.

ОПХ «Курагинское» расположено в юго-западной части Курагинского района Красноярского края, в 200 км от г. Красноярска. Общая площадь хозяйства – 14374 га.

ОПХ «Михайловское» расположено в северо-западной части Ужурского района, в 30 км от районного центра г. Ужур, 250 км от г. Красноярска. Общая площадь ОПХ –16418 га.

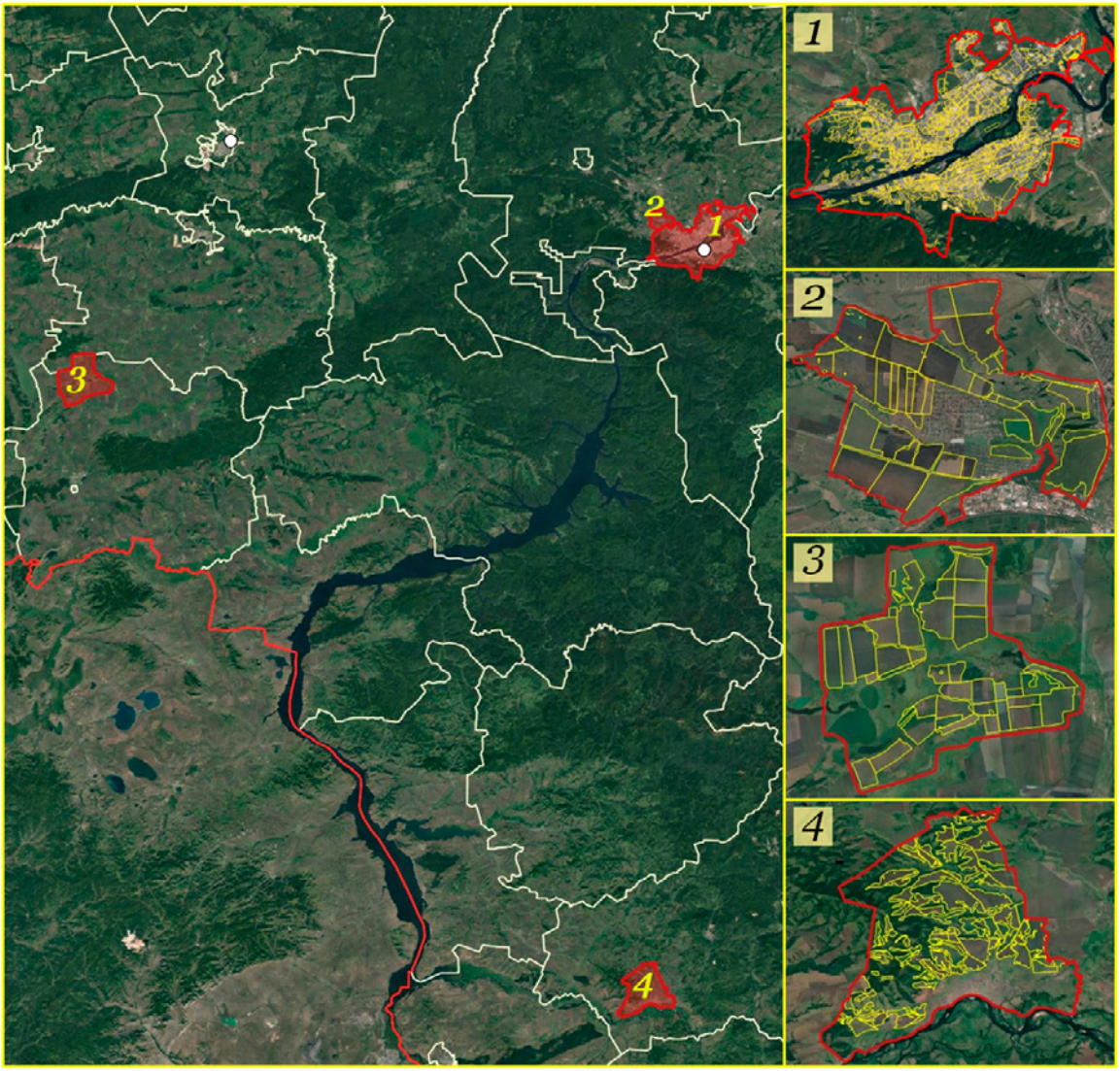

Рис. 1. Местоположение объектов исследования: 1 – город Красноярск, 2 – ОПХ «Минино» 3 – ОПХ, «Михайловское», 4 – ОПХ «Курагинское»
Fig. 1. Location of the research objects: 1 – the city of Krasnoyarsk; Experimental Agricultural Enterprise: 2 – Minino; 3 – Mikhailovskoe; 4 – Kuraginskoe

Исходные спутниковые данные

В нашем исследовании использованы спутниковые данные с различным пространственным разрешением. Основным источником стали данные дистанционного зондирования: PlanetScope с высоким пространственным разрешением 3 м, Landsat 8 с пространственным разрешением 100 м для теплового диапазона и Terra MODIS с пространственным разрешением 250 м.

Крупнейшая в мире спутниковая группировка PlanetScope компании Planet Labs позволяет получать снимки любой части территории земного шара с высоким пространственным разрешением (3 м). Большое количество спутников (больше 180, каждый весом 4,7 кг) равномерно распределены по орбите, а их простая конструкция и технологии производства с низким уровнем затрат позволяют существенно снизить стоимость снимков. Съемка ведется в 4 спектральных каналах: красный, зеленый, голубой, ближний инфракрасный (ИК). Повторяемость съемки – 1 день (возможно получение снимков несколько раз в день). Ширина полосы съемки – 25 км. Архив на исследуемые территории доступен с 2016 г. Данные PlanetScope распростра-

няются в формате GeoTIFF[1]. Эти спутниковые данные подходят для проведения ежедневного мониторинга сельскохозяйственных земель, а также мониторинга изменений городской среды, их пространственное разрешение достаточно для оценки изменений в застройке города.

Данные программы Landsat стали свободно доступными в декабре 2009 г. для широкого круга пользователей ГИС-сообщества[2]. Программа Landsat запустила первый спутник в 1972 г., в настоящее время ведется прием данных дистанционного зондирования со спутника Landsat 8 с двумя сенсорами Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). Используя эти спутниковые снимки, можно рассчитать данные о температуре поверхности земли. Сканер теплового диапазона TIRS ведет съемку в двух каналах – 10,6–11,2 мкм (10 канал) и 11,5–12,5 мкм (11 канал) с пространственным разрешением 100 м. Данные представлены на онлайн-сервисе (https://www.earthexplorer.usgs.gov). Архив снимков доступен с момента запуска спутника Landsat 8 в феврале 2013 г. С 2016 г. все данные программы Landsat, в том числе и Landsat 8, поставляются с геометрической и радиометрической коррекцией. Снимки с коррекцией хранятся в наборах Landsat Level-1 Data Processing Levels или Landsat Level-1 data product. С 2021 г. добавился новый набор Landsat Level-2, в котором вычислена температура поверхности земли в градусах Кельвина.

Так же в исследовании применялись спутниковые данные со спутника Terra MODIS. Ширина полосы съемки – 1200 км. Архив доступен с 2000 г. Продукт MOD11A1 версия 6 содержит информацию о ежесуточной дневной температуре поверхности Земли и его излучательную способность с пространственным разрешением около 1 км, полученные данные предоставляются с точностью 1°K[3]. Для расчета вегетационного индекса NDVI использовались снимки Terra MODIS MOD09Q1, каждый пиксель MOD09Q1 содержит наилучшее из возможных наблюдений L2G в течение 8-дневного периода с пространственным разрешением 250 м (два канала – красный и ближний инфракрасный), выбранного на основе высокого охвата наблюдений, низкого угла обзора, отсутствия облаков или тени от облаков и нагрузки аэрозолем[4]. Данные наблюдений MODIS находятся в свободном доступе и распространяются Геологической службой США[5].

Геопространственная база данных на территорию города Красноярска

В качестве данных, отражающих инфраструктуру города Красноярска, был взят набор векторных слоев из проекта Open Street Map[6]. Картографическая основа содержит векторные слои: границы города Красноярска, речную сеть, дорожную сеть, дома, местоположение крупных промышленных предприятий, рельеф, растительность, границы ООПТ, местоположение пунктов оперативного мониторинга, все данные получены из открытых источников. Рельеф на территорию города построен по данным SRTM, точечный слой местоположения пунктов оперативного мониторинга за состоянием воздуха, включая данные о температуре, получен по данным системы мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН[7]. Все данные

---

[1] Сайт проекта PlanetScope. Электронный ресурс: https://www.planet.com/products/planet-imagery (дата обращения 30.04.2021)

[2] История создания программы Landsat. Электронный ресурс: https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/history (дата обращения 30.04.2021)

[3] MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD). Version 3.3. Электронный ресурс: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf (дата обращения 30.04.2021)

[4] MODIS BRDF/Albedo roduct: Algorithm Theoretical Basis Document Version5.0. Электронный ресурс: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod09.pdf (дата обращения 30.04.2021)

[5] Сайт Геологической службы США. Электронный ресурс: http://lpdaac.usgs.gov/main.asp (дата обращения 30.04.2021)

[6] Проект OpenStreetMap®. Электронный ресурс: https://www.openstreetmap.org (дата обращения 30.04.2021)

[7] Система мониторинга воздуха Красноярского научного центра СО РАН. Электронный ресурс: http://air.krasn.ru/map.html (дата обращения 30.04.2021)

собраны в единый проект в программном обеспечении QGIS. Для поиска тепловых аномалий в городской застройке используются данные Landsat 8, но разрешение в тепловом канале составляет 100 м в пикселе. Пространственное разрешение тематической карты температуры поверхности, полученной по данным мультиспектральных каналов Landsat 8, после проведения процедуры паншарпинга составляет 30 м. Для повышения детальности изображения используются снимки высокого разрешения PlanetScope. Синтез этих изображений позволяет увеличить детальность готового изображения до 4 м и вычислить температуру поверхности земли по данным 10-го теплового канала Landsat 8 и классификации поверхности земли PlanetScope. Все вычисления проводились в программном обеспечении QGIS. Обязательным этапом является предварительная обработка спутниковых данных, которая включает проведение атмосферной коррекции, классификацию изображения PlanetScope по типу подстилающей поверхности, проведение оверлея по границам города [*Гостева,* 2019].

Геопрастранственная база данных территории хозяйства

Для каждой территории ОПХ была сформирована геопространственная база данных, которая включала формирование цифровых базовых карт для каждого ОПХ (карта полей, почвенная карта, тематические карты агрохимических характеристик почвы, географическая база (рельеф местности и гидрография), административно-пространственная структура, инфраструктура (дороги)). Формирование геопространственной базы данных ОПХ проводилось в открытой геоинформационной системе QGIS [*Erunova*, *Yakubailik,* 2019]. В качестве исходных данных использовались актуальные спутниковые данные высокого разрешения, отчетные материалы результатов исследования «Система земледелия Красноярского края», выполненные в 1982–1986 гг. Красноярским НИИ сельского хозяйства и Институтом «Востсибгипрозем».

По спутниковым данным PlanetScope проведено формирование набора ортотрансформированных снимков в онлайн-сервисе Planet Explorer за вегетационный период 2020 г. Сформированы и проанализированы архивы данных спутниковой группировки PlanetScope – для ОПХ «Минино» получено 33 безоблачные сцены, ОПХ «Курагинское» – 118, ОПХ «Михайловское» – 82. В каждом полученном снимке все спектральные каналы имеют свои (индивидуальные) калибровочные коэффициенты. В программе ГИС QGIS через модуль «Калькулятор растров» для каждого снимка рассчитывался спектральный индекс NDVI, VARI, CIGreen [*Воронина*, 2014] с учетом индивидуальных коэффициентов. Если территория состояла из нескольких снимков, то снимки сшивались в «единый» растр. Цифровая карта сельскохозяйственных полей и набор снимков рассчитанных вегетационных индексов за 2020 г. позволили получить статистические значения NDVI, VARI, CIGreen для каждого поля в каждом хозяйстве в течение всего вегетационного периода. В ГИС QGIS использовался инструмент «Расчет зональной статистики». Результаты зональной статистики по среднему значению сохранялись в отдельном векторном слое. Окончательный геоинформационный анализ проводился в ГИС QGIS и MS Office Open XML для более удобной и наглядной работы с данными.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения территории города можно отслеживать с помощью данных дистанционного зондирования Земли. Сравнение разновременных снимков с высоким разрешением и вычисление температуры поверхности земли используется для локального поиска изменения объектов городского ландшафта и выявления тепловых аномалий. Рассчитаны карты температуры поверхности земли с применением снимков высокого разрешения PlanetScope и по данным Landsat 8. На рис. 2 показаны примеры повышения детальности изображения за счет использования снимка высокого разрешения PlanetScope на 20 сентября 2018 г., приведены фрагменты с тепловыми аномалиями в окрестности железнодорожного вокзала и на территории завода по производству ракетно-космической техники.

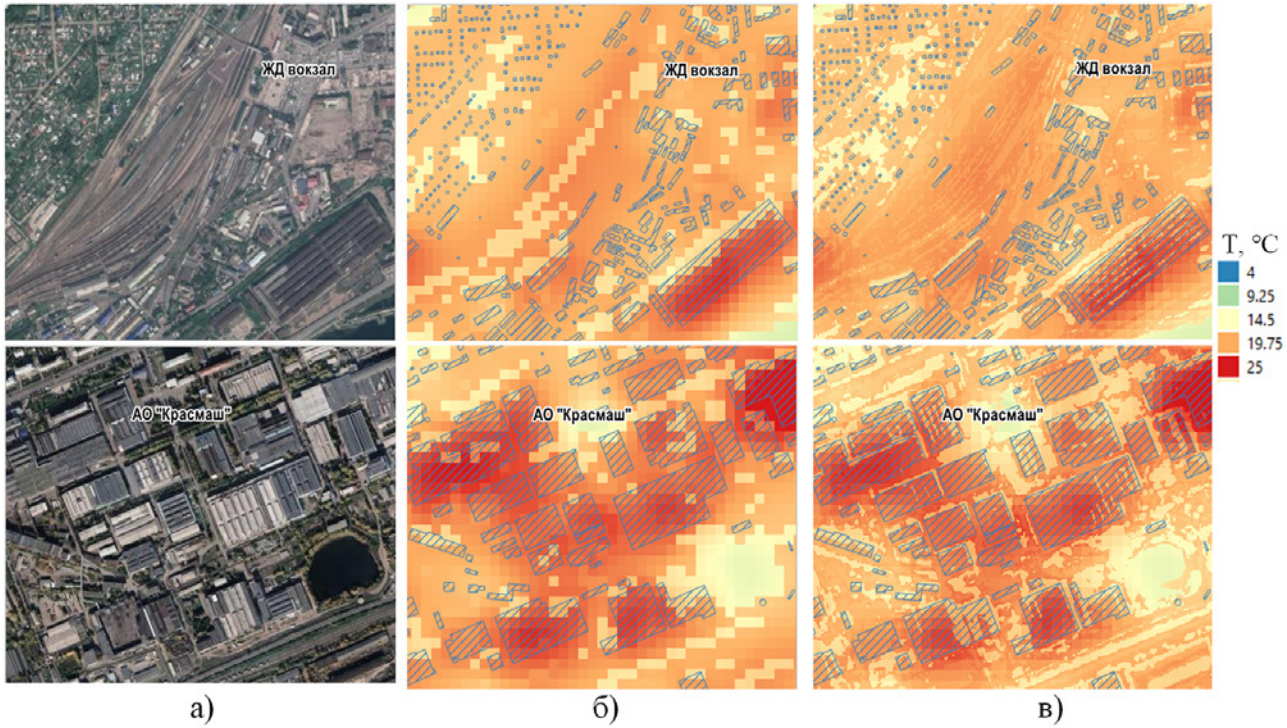

Рис. 2. Фрагменты карты температуры поверхности г. Красноярска на 20.09.2018: а) фрагмент подложки с сайта Google Maps б) по данным Landsat 8 в) с применение данных Planet Scope
Fig. 2. Fragment of the map of the earth's surface temperature 20.09.2018: a) fragment of the image from the Google Maps b) using the Landsat data c) using the PlanetScope data

Вычисление температуры по спутниковым данным проводилось на основе классификации объектов на изображении, где каждому классу присваивается конкретное значение коэффициента излучения. Первым шагом является определение типа поверхности, вся территория разделяется на четыре класса: вода (e = 0.98), открытая почва (e = 0.928), растительность (e = 0.982) и строения (e = 0.942). После классификации изображения каждому классу соответствует значение коэффициента эмиссии (используемые значения являются ориентировочными). Температура поверхности земли рассчитывается таким образом на каждый день. Методика вычисления температуры поверхности земли подробно описана в статье [*Гостева,* 2018]. Проведено сравнение снимков на 22 сентября 2018 г. и 5 сентября 2016 г. с похожими погодными условиями для выявления изменений городского ландшафта, в связи с проведением Универсиады в городе было построено много спортивных объектов. Снимки нормированы по среднестатистическому значению температуры снимка, далее приводится операция вычитания одной карты из другой, в результате получается изображение с разницей между температурными значениями в каждом пикселе. Такой метод позволяет выявить участки с увеличением температуры при строительстве новых спортивных объектов и уменьшением температуры в местах вырубки леса под горнолыжные трасы.

На сегодняшний момент геопространственная база данных ОПХ «Минино» представлена базовыми картами и картами вегетационных индексов за 2020 PlanetScope. Цифровая карта полей включает 37 земельных участков. ОПХ «Курагинское» включает в себя 84 сельскохозяйственных полей. ОПХ «Михайловское» состоит из 45 земельных участков. Каждый полигон содержит атрибутивную информацию в виде номера поля и его площади. Для каждого поля внесена информация о произрастающих в 2020 г. сельскохозяйственных культурах.

На основе исходных снимков MOD09Q1 были рассчитаны карты распределения вегетационного индекса Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) – это специфический индекс растительности, который в определенной мере отображает количественный показатель фотосинтетически активной биомассы. По данным многочисленных научных публикаций [*Воронина*, 2014; *Ozdogan*, 2010], по индексу NDVI с высокой точностью можно прогнозировать урожайность посевов. Вегетационный индекс NDVI изменяется весь сезон, и его значения различны во время роста, цветения и созревания растений. В начале вегетационного сезона индекс нарастает, в момент цветения его рост останавливается, затем, по мере созревания, NDVI снижается. В зависимости от почвенного плодородия, метеоусловий и технологии возделывания посевов скорость развития биомассы будет разной.

По долговременным рядам данных наблюдений, начиная с 2001 г., построены средние значения NDVI для каждого сельскохозяйственного поля, на рис. 3 показаны примеры карт NDVI, полученные по спутниковым данным MODIS и PlanetScope [*Erunova, Yakubailik,* 2020]. На рис. 3а представлен NDVI по данным среднего разрешения (MODIS), где видно, что в одно сельскохозяйственное поле может попадать всего несколько пикселей со значениями NDVI, что не позволяет делать детальный анализ состояния культур, а только давать интегральную оценку общего состояния посевов данной территории. Отдельные поля хозяйств имеют небольшую площадь (от 4 га до 160 га), поэтому NDVI (и другие индексы) определялись по спутниковым данным PlanetScope. На рис. 3б представлено распределение NDVI за ту же дату (19 июля), полученное по данным PlanetScope.

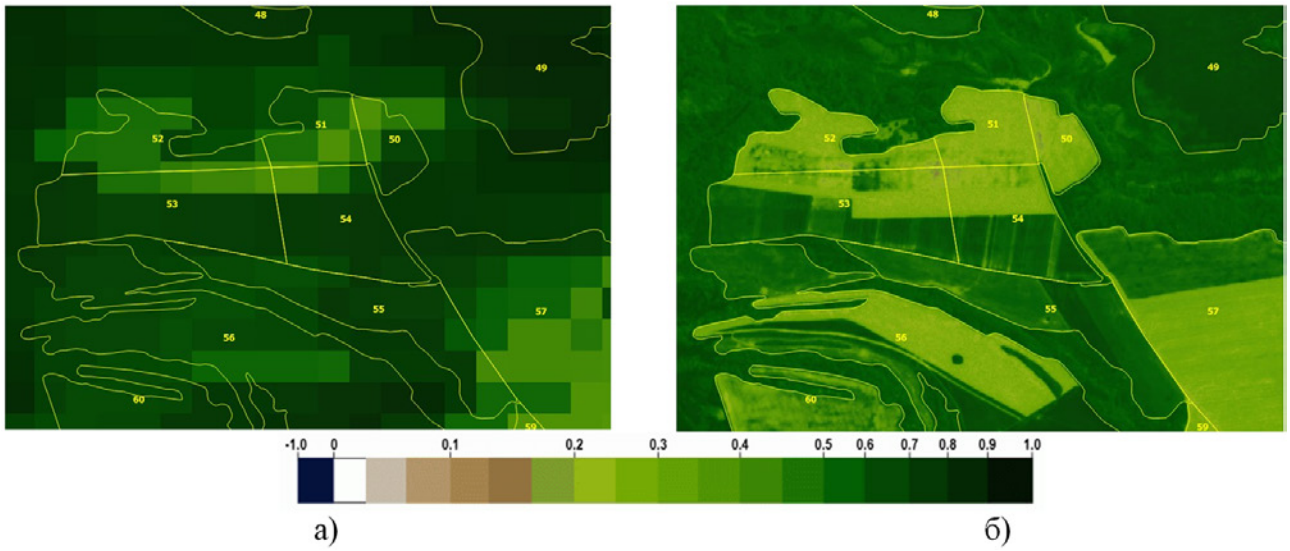

Рис. 3. Фрагмент карт NDVI за 19 июля 2020 г. для ОПХ «Курагинское»:
а) по данным MODIS; б) по данным PlanetScope
Fig. 3. Fragment of NDVI maps for 19.07.2020 for "Kuraginskoe":
a) MODIS data; b) PlanetScope data

Для всех ОПХ сформирован и проанализирован архив данных спутниковой группировки PlanetScope – 256 безоблачных сцен за вегетационный сезон 2020 г., с апреля по сентябрь. Для каждого поля получены средние значения NDVI, VARI, CIGreen.

Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) – это индекс растительности для количественной оценки фракции растительности только в видимом диапазоне спектра [*Воронина*, 2014]. Для каждого поля получены средние значения VARI для всех 33 дней. При помощи индекса VARI можно выявить неоднородности на поле, но сравнивать динамику поля нельзя, поскольку данный индекс очень чувствителен к условиям освещения.

Chlorophyll Index-Green (CIGreen) – это индекс вегетации, который используется для оценки содержания хлорофилла в листьях, при этом измеряется степень отраженного излучения в ближнем инфракрасном и зеленом каналах спектра [*Воронина*, 2014]. Чем больше содержание хлорофилла в листьях растений, тем выше значения индекса. Полученные распределения помогут рассчитывать необходимое количество удобрений для каждого конкретного поля.

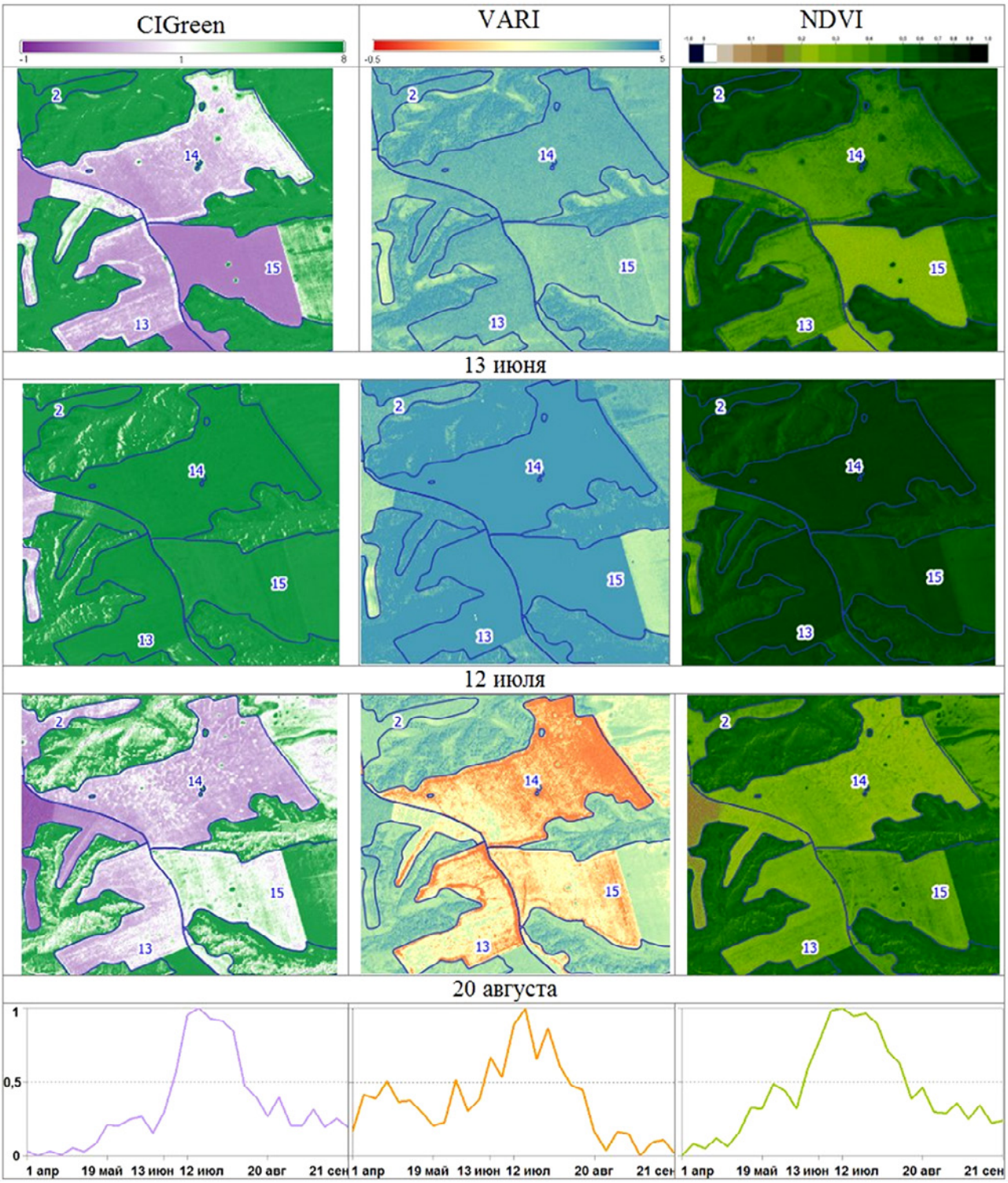

Рис. 4. Динамика вегетационных индексов за 2020 г. пшеничного поля № 14 ОПХ «Курагинское»

Fig. 4. Dynamics of vegetation indices for 2020 of wheat field No. 14 «Kuraginskoe»

Вегетационные индексы, полученные для каждого поля, позволили изучить сезонное изменение значений NDVI, VARI, CIGreen сельскохозяйственных культур, выращиваемых на территории хозяйств. Анализ графиков динамики значений индексов позволил получить наглядное представление об особенностях развития каждой культуры. Приведем пример анализа распределения вегетационных индексов для поля № 14 ОПХ «Курагинское», на котором в 2020 г. произрастала пшеница (сорт Новосибирская 31). На рис. 4 показаны примеры изменения данного индекса за различные даты, на графиках (под каждым индексом) показана динамика годового хода распределения среднего значения этого индекса для поля, на котором произрастала пшеница. Для удобства сравнения индексов за вегетационный период, на графиках представлен годовой ход каждого индекса в относительных единицах, где 0 – минимум; 1 – максимум в сезоне.

Полученная геопранстранственная база данных территорий хозяйств позволяет проводить сравнительный анализ интенсивности вегетации культур для каждого поля в течение всего вегетационного периода 2020 г.

Результаты проведенной классификации позволяют получить различные тренды значений вегетационных индексов (NDVI, VARI, CIGreen). Данные MODIS позволили провести анализ многолетних трендов NDVI, а данные PlanetScope обеспечили возможность исследования на уровне отдельных полей и сельскохозяйственных культур.

Получена статистика развития сельскохозяйственных культур на реальных полях. Если принять полученные временные ряды за «шаблон» для каждой культуры, то в последующие годы можно их использовать в качестве обучающей выборки в методе идентификации сельскохозяйственных культур. Так же следить за состоянием полей – для оценки текущего состояния участка – распашка, пар, наличие всходов, наличие сельхозкультур, уборка и т.п. Это позволит оперативно выявлять неблагоприятные природные воздействия на конкретное поле (культуру) и предсказывать урожайность.

ВЫВОДЫ

Приведенные выше примеры наглядно показывают возможности использования спутниковых данных для управления локальными территориями. По мере накопления (пополнения) достаточно длинных рядов спутниковых данных высокого пространственного разрешения, таких, как PlanetScope, становится возможным проводить анализ информации текущего состояния территорий, в частности культур на конкретных полях, изменений городского ландшафта.

Данные группировки PlanetScope позволяют выполнять зонирование локальных территорий по степени неоднородности состояния, что важно при оперативном мониторинге сельскохозяйственных и городских земель. Ограниченная доступность данных с высоким пространственным разрешением компенсируется и дополняется регулярными данными Terra MODIS, по которым можно регистрировать основные тренды, интегральные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А.* Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.

2. *Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS. Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.

3. *Воронина П.В., Мамаш Е.А.* Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS. Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 3. С. 76–102.

4. *Горюшин О.А.* Инструментальные средства и модели социально-экономического мониторинга региона (опыт внедрения). Экономические проблемы стран и регионов: РАН. Центр. экон.-мат. ин-т. М., 1994. С. 121–139.
5. *Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э.* Дистанционные методы в изучении температуры поверхности земли в городах (на примере г. Красноярска, Россия). Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2018. № 24 (2). С. 195–205. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-195-205.
6. *Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э.* Поиск изменений температуры городской среды по спутниковым данным на примере города Красноярска. Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019). Сборник трудов всероссийской конференции с международным участием (26–30 августа 2019 г., г. Бердск). Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. С. 401–405.
7. *Грищенко М.Ю., Калитка Л.С.* Изучение сезонной изменчивости теплового поля Краснодара по космическим снимкам со спутника Landsat 8. Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС», 2019. № 25 (2). С. 101–111. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-101-111.
8. *Комаров А.А.* Оценка состояния травостоя с помощью вегетационного индекса NDVI. Известия СПбГАУ, 2018. № 2 (51). С. 124–129.
9. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С., Плотников Д.Е., Толпин В.А., Уваров И.А.* Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 272–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.
10. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю.* Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 215–232.
11. *Панасюк М.В.* Регион как территориальная формация: новый подход к изучению. Наукоемкие технологии. 2004. Т. 5. № 4. С. 6–12.
12. *Терехов А.Г., Кауазов А.М.* Подспутниковый MODIS-ориентированный анализ информативности вегетационных индексов в задаче описания состояния яровой пшеницы Северного Казахстана. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 2. С. 352–357.
13. *Шевырногов А.П., Чернецкий М.Ю., Высоцкая Г.С.* Многолетние тренды NDVI и температуры на юге Красноярского края. Исследование земли из космоса. 2012. № 6. С. 77–87.
14. *Якубайлик О.Э.* Геоинформационный интернет-портал. Вычислительные технологии, 2007. Т. 12. № S3. С. 116–126.
15. *Erunova M., Yakubailik O.* GIS technologies for agricultural monitoring in the regional agriculture system of the Krasnoyarsk territory. Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. Ed. 2.2. Sofia, 2019. V. 19. P. 863–870. DOI: 10.5593/sgem2019/2.2/S11.106.
16. *Erunova M., Yakubailik O.* Monitoring of agricultural vegetation development based on time series analysis of satellite data, Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 1156054 (12 November 2020). DOI: 10.1117/12.2575663.
17. *Ozdogan M.* The spatial distribution of crop types from MODIS data: Temporal unmixing using Independent Component Analysis. Remote Sensing of Environment. 2010. No. 114 (6). P. 1190–1204. DOI:10.1016/j.rse.2010.01.006.
18. *Redowan M., Akter S. & Islam N.* Analysis of forest cover change at Khadimnagar National Park, Sylhet, Bangladesh, using Landsat TM and GIS data. Journal of Forestry Research. 2014. No. 25 (2). P. 393–400. DOI: 10.1007/s11676-014-0467-9.

REFERENCES

1. *Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A.* Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. No. 5. P. 203–221. (in Russian).

2. *Bartalev S.A., Loupian E.A., Neishtadt I.A., Savin I.Yu.* Classification of some types of agricultural crops in the southern regions of Russia according to MODIS satellite data. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2006. No. 3. P. 68–75. (in Russian).

3. *Erunova M., Yakubailik O.* GIS technologies for agricultural monitoring in the regional agriculture system of the Krasnoyarsk territory. 19 Int. Multidiscip. Sci. GeoConf. 2019. (SGEM2019 Conf. Proc., Issue 2.2) P. 863–870. DOI: 10.5593/sgem2019/2.2/S11.106.

4. *Erunova M., Yakubailik O.* Monitoring of agricultural vegetation development based on time series analysis of satellite data, Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 1156054 (12 November 2020). DOI: 10.1117/12.2575663. (in Russian).

5. *Goryushin O.A.* Instrumental means and models of socio-economic monitoring of the region (experience of implementation). Economic problems of countries and regions: RAS. Center. ekon.-mat. in-t. Moscow, 1994. P. 121–139. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-101-111. (in Russian).

6. *Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E.* Search for changes in the temperature of the urban environment based on satellite data on the example of the city of Krasnoyarsk. Processing of spatial data in the tasks of monitoring natural and anthropogenic processes (SDM-2019). Proceedings of the All-Russian conference with international participation (August 26–30, 2019, Berdsk). Novosibirsk: IVT SB RAS, 2019. P. 401–405. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-195-205. (in Russian).

7. *Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubailik O.E.* Remote methods in studying the temperature of the Earth's surface in cities (on the example of the city of Krasnoyarsk, Russia). Proceedings of the International conference "InterCarto. InterGIS". 2018. No. 24 (2). P. 195–205. (in Russian).

8. *Grishchenko Mikhail Yu., Kalitka Lev S.* Studying the seasonal variability of thermal field of Krasnodar using Landsat 8 satellite imagery. InterCarto, InterGIS. 2019. V. 25 (2). P. 101–111. (in Russian).

9. *Komarov A.A*. Assessment of the state of the grass stand with the help of the vegetation index NDVI. Izvestiya SPbGAU. 2018. No. 2 (51). (in Russian).

10. *Loupian E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Zharko V.O., Krasheninnikova Yu.S., Oksyukevich O.Yu.* VEGA satellite service applications in regional remote monitoring systems. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11, No. 3. P. 215–232. (in Russian).

11. *Loupian E.A., Bartalev S.A., Krasheninnikova Yu.S., Plotnikov D.E., Tolpin V.A., Uvarov I.A.* Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in spring of 2018 with use of remote monitoring. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. No. 2. P. 272–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276. (in Russian).

12. *Ozdogan M.* The spatial distribution of crop types from MODIS data: Temporal unmixing using Independent Component Analysis. Remote Sensing of Environment, 2010. No. 114 (6). P. 1190–1204. DOI:10.1016/j.rse.2010.01.006.

13. *Panasyuk M.V.* Region as a territorial formation: a new approach to the study. High-tech technologies. 2004. V. 5. No. 4. P. 6–12. (in Russian).

14. *Redowan M., Akter S. & Islam N.* Analysis of forest cover change at Khadimnagar National Park, Sylhet, Bangladesh, using Landsat TM and GIS data. Journal of Forestry Research. 2014. No. 25 (2). P. 393–400. DOI: 10.1007/s11676-014-0467-9.

15. *Shevyrnogov A.P., Chernetskiy M.Yu., Vysotskaya G.S.* Interannual Trend of NDVI and Temperature in the South of Krasnoyrsky. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2012. No. 6. P. 77–87. (in Russian).
16. *Terekhov A.G., Kauazov A.M.* Subsatellite MODIS-oriented analysis of the informativeness of vegetation indices in the problem of describing the state of spring wheat in Northern Kazakhstan. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2007. Iss. 4. V. 2. P. 52–357. (in Russian).
17. *Voronina P.V., Mamash E.A.* Classification of thematic monitoring for agriculture problems using remote sensing MODIS data. Computational technologies. 2014. V. 19. No. 3. P. 76–102. (in Russian).
18. *Yakubaylik O.E.* Geoinformatsionny internet-portal. Computational technologies. 2007. V. 12. No. S3. P. 116–126. (in Russian).