

## Обеспечение оперативного мониторинга сельскохозяйственных посевов спутниковыми данными

А. С. Кузнецова<sup>✉</sup>, М. Г. Ерунова<sup>1</sup>, О. Э. Якубайлик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

✉E-mail: [anna.simakina.97@mail.ru](mailto:anna.simakina.97@mail.ru)

**Аннотация.** Цель. Исследование направлено на обеспечение оперативного мониторинга посевов сельскохозяйственных культур спутниковыми данными. На примере опытно-производственного хозяйства (ОПХ) «Курагинское» Красноярского края рассмотрены данные о спектрально-отражательных свойствах сельскохозяйственных посевов и климатических характеристиках, отражающие состояние сельскохозяйственных посевов. **Методы.** По спутниковым данным были получены значения средней суточной температуры поверхности Земли, количество ежедневных осадков, тематические карты и средние значения индексов вегетации NDVI, ClGreen и MSAVI2. В качестве источников данных дистанционного зондирования Земли в работе использовались космические снимки спутников Sentinel-2, данные Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG). Обработка исходной спутниковой информации проводилась в программном обеспечении QGIS. **Результаты.** Из открытых источников были подобраны спутниковые данные, составлены технологии их обработки и сформирован архив данных за вегетационные сезоны с 2015 по 2022 гг. Оперативный мониторинг по спутниковым данным позволяет выявлять неоднородность пространственного распределения растительного покрова, отслеживать динамику температур и количества выпавших осадков в течение вегетационного сезона, тем самым способствуя проведению комплексной оценки состояния всех сельскохозяйственных посевов в целом и индивидуально по каждому полю. **Научная новизна.** Разработана технология обработки данных Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11), GPM (IMERG) и получения их производных продуктов на базе геоинформационной системы QGIS в автоматизированном режиме для задач агромониторинга. **Практическая значимость.** Сформированы наборы данных по вегетационным индексам, температуре и осадкам, которые имеют большое значение для принятия эффективных управленческих решений на территории ОПХ «Курагинское».

**Ключевые слова:** агромониторинг, сельскохозяйственные посевы, спутниковые данные, вегетационные индексы, климатические характеристики.

**Для цитирования:** Кузнецова А. С., Ерунова М. Г., Якубайлик О. Э. Обеспечение оперативного мониторинга сельскохозяйственных посевов спутниковыми данными // Аграрный вестник Урала. 2023. Т. 23, № 09. С. 29–40. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-09-29-40.

**Дата поступления статьи:** 07.02.2023, **дата рецензирования:** 10.05.2023, **дата принятия:** 14.06.2023.

## Provision of operational monitoring of agricultural crops with satellite data

A. S. Kuznetsova<sup>✉</sup>, M. G. Erunova<sup>1</sup>, O. E. Yakubaylik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

✉E-mail: [anna.simakina.97@mail.ru](mailto:anna.simakina.97@mail.ru)

**Abstract. Purpose.** The study is aimed at providing operational monitoring of agricultural crops using satellite data. Data on the spectral-reflective properties of agricultural crops and climatic characteristics that reflect the state of agricultural crops are considered on the example of Kuraginskoye Agricultural Experiment Production Facility (AEPF), located in the south of the Krasnoyarsk krai. **Methodology and methods.** Based on satellite data, the values of the average daily temperature of the land surface, the sum of daily precipitation, thematic maps and the average values of the NDVI, ClGreen, and MSAVI2 vegetation indices were obtained. Satellite data from Sentinel-2, Terra MODIS and IMERG GPM Precipitation were used as sources of Earth remote sensing data. The initial satellite information was processed using the QGIS software. As a **result**, satellite data were selected from open sources, methods for their processing were compiled, and an archive of data for the growing seasons from 2015 to 2022 was formed. Operational monitoring using satellite data makes it possible to identify the heterogeneity of the spatial distribution of vegetation cover, track the dynamics of temperatures and the amount of precipitation during the growing season, thereby contributing to a comprehensive assessment of the state of all agricultural crops in general and individually for each field. **Scientific novelty.** The technology of processing Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11), GPM (IMERG) data and obtaining their derived products based on the QGIS geoinformation system in automated mode for agricultural monitoring tasks has been developed. **Practical significance.** Data sets on vegetation indices, temperature and precipitation have been formed, which are of great practical importance for making effective management decisions on the territory of the Kuraginskoye AEPF.

**Keywords:** agromonitoring, agricultural crops, satellite data, vegetation indices, climatic characteristics.

**For citation:** Kuznetsova A. S., Erunova M. G., Yakubaylik O. E. Obespechenie operativnogo monitoringa sel'skokhozyaystvennykh posevov sputnikovymi dannymi [Provision of operational monitoring of agricultural crops with satellite data] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2023. Vol. 23, No. 09. Pp. 29–40. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-09-29-40. (In Russian.)

**Date of paper submission:** 07.02.2023, **date of review:** 10.05.2023, **date of acceptance:** 14.06.2023.

### Постановка проблемы (Introduction)

Получение высокого уровня урожайности и качества растениеводческой продукции считаются одними из важнейших задач в сельском хозяйстве. На достижение значительных результатов в производстве большое влияние оказывает обеспеченность аграрных специалистов сведениями о землях сельскохозяйственного назначения. Информация о состоянии посевов сельскохозяйственных культур и климатических характеристиках исследуемой территории позволяет агрономам устанавливать сроки сева [1, с. 224] и отслеживать ход формирования сельскохозяйственных культур [2, с. 17], осуществлять технологические операции (подкормку, укосы и др.) [3, с. 128; 4, с. 21].

В последнее время для получения объективных сведений на территорию агропроизводства в целом или отдельно для конкретных сельскохозяйственных полей используют методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [3, с. 127; 5, с. 262; 6, с. 95]. Основными показателями, отражающими состояние сельскохозяйственных посевов в определенный период времени, являются значения вегетационных индексов [7, с. 11; 8 с. 54]. Исследования посевов сельскохозяйственных культур при помощи вегетационных индексов проводятся по группировкам спутников с различными временным и пространственным разрешениями, а также степенью доступности данных. Особый интерес среди таких спутниковых данных вызывают открытые данные высокого пространственного разрешения со спутников Landsat 8 и Sentinel-2 [9, с. 152;

10, с. 5; 11, с. 4]. Детальность снимков Sentinel-2 (10 метров) с периодичностью съемки 5 дней является наиболее подходящей для решения задачи по отслеживанию состояния сельскохозяйственных посевов в течение сезона вегетации. В сравнении с данными Landsat 8, имеющими пространственное разрешение 30 метров и частотой получения снимков 1 раз в 16 дней.

Наряду с вегетационными индексами, отражающими состояние сельскохозяйственных посевов, важны данные о температуре и осадках. Традиционным подходом к получению информации о климатических характеристиках территории считается использование данных с наземных метеостанций. Однако не для всех субъектов Российской Федерации достаточно существующей сети метеостанций. В некоторых случаях она слишком разрежена или вовсе отсутствует. В качестве примера можно привести территорию Красноярского края, где сеть метеостанций до такой степени неравномерна, что в некоторых муниципальных образованиях метеостанции отсутствуют в радиусе 100 км и более [12, с. 2]. Наилучшей альтернативой для получения климатических показателей с более высоким пространственным разрешением являются данные ДЗЗ. Например, наборы данных Terra MODIS и Global Precipitation Measurement (GPM) с детальностью 1 км и  $0,1 \times 0,1^\circ$  соответственно способствуют получению ежедневной информации о температуре и осадках. Такие данные подходят для определения влияния на развитие биомассы сельскохозяйственных культур и их урожайность [13, с. 33; 14, с. 3].

Эффективность применения методов ДДЗ в сельском хозяйстве по большей части зависит от оперативности предоставления аграрным специалистам информации о состоянии посевов сельскохозяйственных культур. Получению актуальных сведений о вегетационных индексах и климатических показателях сельскохозяйственных территорий в кратчайшие сроки способствует оперативный мониторинг сельскохозяйственных посевов по спутниковым данным. Подбор спутниковых данных и составление технологий их обработки становятся первостепенными задачами на подготовительных этапах проведения оперативного мониторинга сельскохозяйственных посевов. Целью данной работы является обеспечение оперативного мониторинга сельскохозяйственных посевов спутниковыми данными и их производными продуктами на примере ОПХ «Курагинское».

#### **Методология и методы исследования (Methods)**

В качестве объекта исследования выбрано ОПХ «Курагинское» – филиал ФГБНУ ФИЦ КНЦ СО РАН. Территория хозяйства расположена в юго-западной части Курагинского района Красноярского края. Общая площадь составляет 14 374 га, в том числе 11 972 га сельскохозяйственных угодий, из них 6 342 га пашни (84 поля) [2, с. 15]. Климат ОПХ «Курагинское» резко континентальный, с продолжительной холодной зимой и коротким жарким летом.

В работе использовались некоммерческие данные ДЗЗ миссии Copernicus Sentinel-2, состоящей из группировки двух полярно-орбитальных спутников (A/B). Каждый спутник оснащен мультиспектральным прибором (MSI), позволяющим вести съемку в 13 спектральных каналах, охватывающим спектральную область (VNIR/SWIR) от видимого и ближнего инфракрасного до коротковолнового инфракрасного диапазонов [15, с. 35]. Спектральные каналы космических снимков, получаемых со спутников Sentinel-2, позволяют вычислять обширное количество вегетационных индексов. Архив спутниковых данных Sentinel-2 доступен с 2015 г.

Для отслеживания состояния сельскохозяйственных посевов в настоящей работе были выбраны вегетационные индексы NDVI, CI<sub>Green</sub> и MSAVI2. Выбор обусловлен их назначением и высоким пространственным разрешением (10 м) спектральных каналов (красный, зеленый, голубой, ближний инфракрасный) Sentinel-2 для вычисления индексов.

Вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является простым показателем фотосинтетически активной биомассы [7, с. 12]. Данный индекс характеризует состояние растительности на протяжении всего вегетационного сезона. Его значения различаются во время роста, цветения и созревания.

Вегетационный индекс CI<sub>Green</sub> (Green chlorophyll index) используется для оценки общего содержания хлорофилла в листьях. Наибольшие значения индекса коррелируют с наибольшим содержанием хлорофилла в листьях растений. Пространственное распределение посевов, полученное по вегетационному индексу CI<sub>Green</sub>, позволяют рассчитывать необходимое количество удобрений [2, с. 17].

Вегетационный индекс MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) разработан для районов с низкой растительностью, чтобы уменьшить влияние обнаженной почвы [16, с. 186]. Он выделяет растительность на фоне «почвенного шума», тем самым наиболее четко отображает неоднородность пространственного распределения посевов на ранних этапах развития культуры.

Для получения значений температуры поверхности Земли на территории проведения исследования были использованы данные ДЗЗ Terra MODIS. Широкая полоса обзора (ширина – 2330 км) MODIS обеспечивает ежедневное глобальное покрытие. Получаемые данные бесплатны и публично доступны на сайте The U. S. Geological Survey (USGS). Из каталогов данных MODIS выбран продукт MOD11 с пространственным разрешением 1 км [17, с. 3]. Набор ежедневных данных включает информацию о дневной и ночной температурах. Архив данных доступен с 2000 г.

Наблюдения за снежными и дождевыми осадками на Земле проводится в рамках международного проекта по глобальному спутниковому мониторингу снежных и дождевых осадков Global Precipitation Measurement (GPM) американского исследовательского управления NASA и японского аэрокосмического агентства JAXA, а также других международных космических агентств. Проект предоставляет централизованный доступ к глобальным картам осадков. В работе использовались ежедневные данные IMERG, имеющие пространственное разрешение 0,1 × 0,1° [18, с. 493], архив данных доступен с 2000 г.

В первую очередь для ОПХ «Курагинское» была сформирована цифровая карта сельскохозяйственных полей [2, с. 15]. В геоинформационной системе QGIS была проведена оцифровка границ полей по высококачественному космическому снимку. Итоговая система координат – WGS 84 / UTM zone 46N. Полученный векторный слой с границами полей включает в себя 84 полигональных объекта, которые соответствуют существующим полям на местности. К векторным границам привязаны сведения о номере поля и севообороте (в состав которого входит данное поле), уточненной площади (га). Благодаря этому на территории ОПХ «Курагинское» организована базовая картографическая основа в цифровом формате, необходимая для проведения дальнейших исследований.

Исходная информация на территорию ОПХ «Курагинское» преобразована в геоинформационной системе (ГИС) QGIS. Основные действия по обработке данных приведены в виде схемы (рис. 1).

Процедура обработки данных в ГИС QGIS состоит из следующих этапов:

1. Приведение исходных данных Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG) к единым параметрам (система координат – WGS 84 / UTM zone 46N, формат – GeoTIFF).

2. Обрезка продуктов Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG) в соответствии с координатами исследуемой территории (по границе ОПХ «Курагинское»).

3. Применение модуля «Калькулятор растров». На основе обрезанных снимков Sentinel-2 в данном модуле построены тематические карты вегетационных индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2 по формулам [16, с. 185]. По дневным и ночным сценам температуры поверхности Земли Terra MODIS (MOD11) при помощи модуля «Калькулятор растров» были рассчитаны тематические карты среднесуточной температуры.

4. Подготовка подходящих легенд для визуализации тематических карт вегетационных индексов, среднесуточной температуры и количества ежедневных осадков.

5. Применение модуля «Зональная статистика». Данный модуль предполагает наличие векторного слоя для выполнения расчетов. В качестве такого слоя взята актуальная карта полей ОПХ «Курагинское». На основе тематических карт Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG) с использованием модуля «Зональная статистика» получены средние значения суточной температуры (°C), количества ежедневных осадков (мм) и вегетационных индексов в границах сельскохозяйственных полей.

6. Загрузка полученных значений в электронные таблицы Microsoft Excel. В этой же программе строились графики динамики изменений различных показателей в течение вегетационных сезонов.

Перечисленные процедуры преобразования, обработки данных Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG) выполнялись с помощью программ библиотеки GDAL, запуск которых для автоматизации осуществлялся из командных файлов (bat-файлов) в пакетном режиме.

### Результаты (Results)

В ходе проведения оперативного мониторинга сельскохозяйственных посевов ОПХ «Курагинское» начиная с 2015 года формируется архив спутниковых данных и полученных по ним сведений. Во время формирования архива была разработана технология обработки данных ДЗЗ в ГИС QGIS. На ее основе были написаны пакетные файлы, позволяющие обрабатывать данные Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG) в автоматизированном режиме и получать их производные продукты в кратчайшие сроки. Собранный архив данных является информационной основой для оценки состояния сельскохозяйственных посевов ОПХ «Курагинское». Для демонстрации полученных сведений выбрано поле № 5 ОПХ «Курагинское», но такие данные хранятся в архиве для всех 84 сельскохозяйственных угодий.

Оперативный мониторинг сельскохозяйственных посевов для проведения оценки их состояния предполагает отслеживание ситуации на сельскохозяйственных полях. Используя накопленные данные из архива по тематическим картам вегетационных индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2, можно не только проследить за изменениями, происходящими в пределах одного поля за один вегетационный сезон, но и проводить сравнение полученных



Рис. 1. Обработка данных Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG) в ГИС QGIS

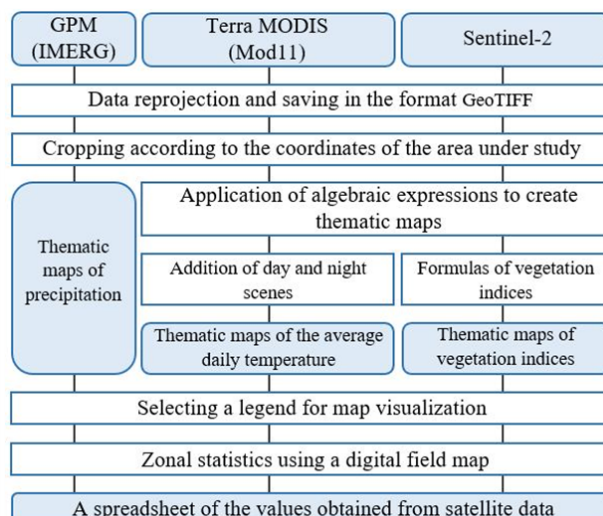


Fig. 1. Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11) and GPM (IMERG) data processing in QGIS GIS

значений за несколько лет. В качестве примера приведены тематические карты вегетационных индексов NDVI, CI<sub>Green</sub> и MSAVI2 поля № 5 ОПХ «Курагинское» за 2020 и 2021 гг. (рис. 2). В 2020 г. на поле № 5 выращивали рапс, в 2021 г. – пшени-

цу. На рис. 2 цифрами обозначены минимальные и максимальные значения вегетационных индексов, усредненные в границах поля. Указаны даты и приведены градиентные шкалы отображения соответствующих индексов.

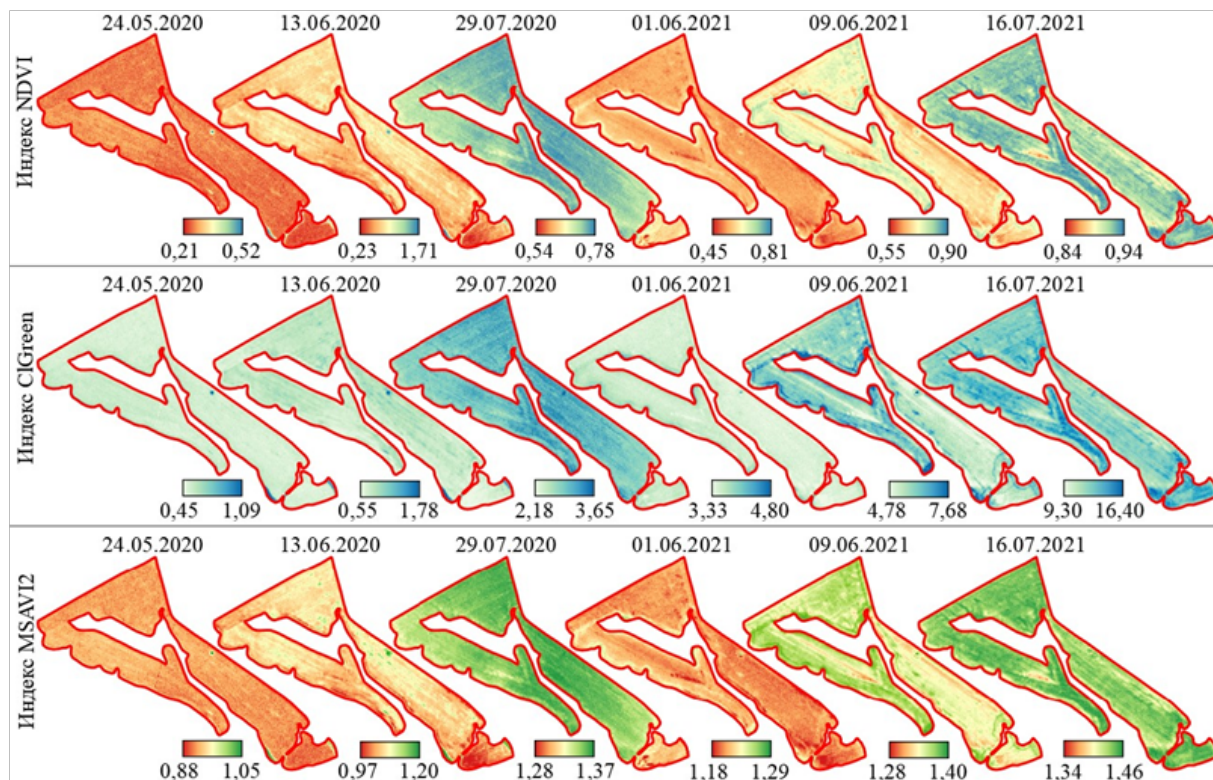


Рис. 2. Тематические карты индексов NDVI, CI<sub>Green</sub> и MSAVI2 поля № 5 вегетационных сезонов 2020–2021 гг.

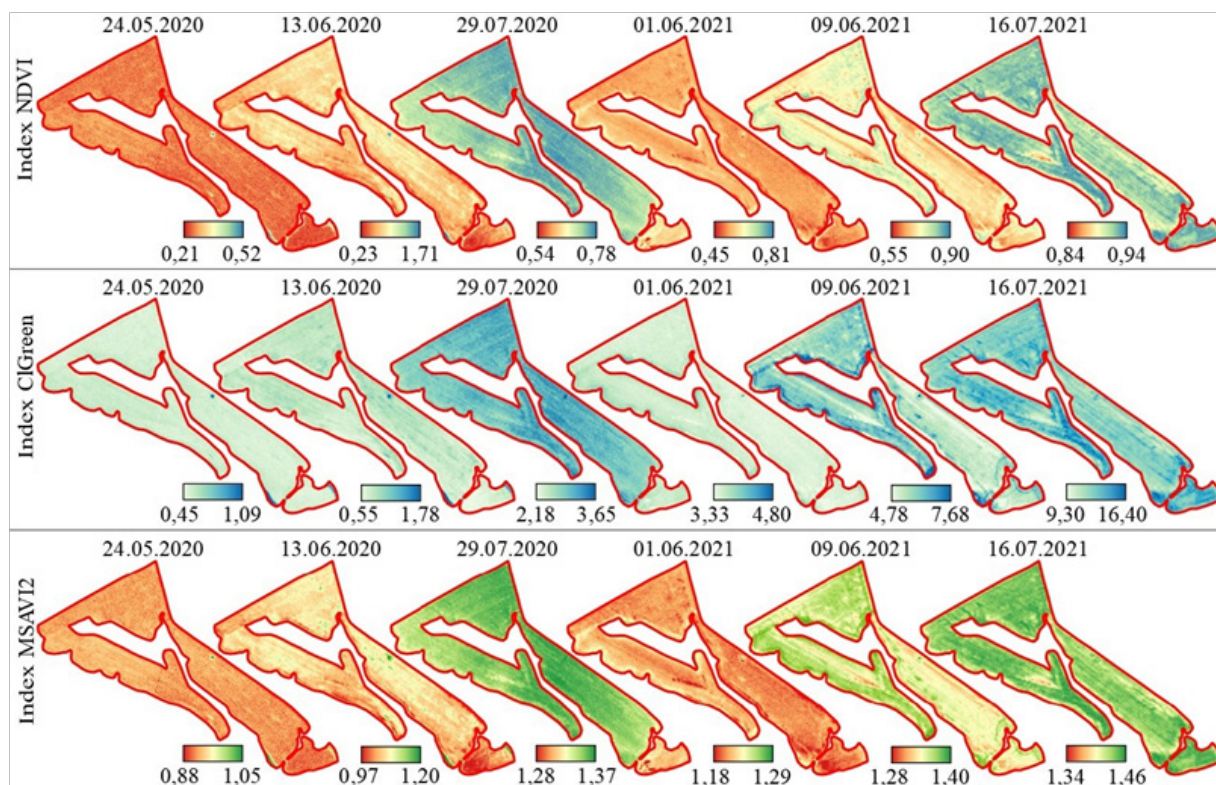


Fig. 2. Thematic maps of NDVI, CI<sub>Green</sub> and MSAVI2 indexes of field No. 5 of the growing seasons of 2020–2021

Тематические карты индекса CIGreen наглядно демонстрируют пространственное распределение посевов сельскохозяйственных культур и постепенное увеличение содержания хлорофилла со временем. В 2020 г. развитие посевов рапса проходило равномерно. Максимальное содержание хлорофилла по индексу CIGreen достигается 29.07.2020 г., среднее значение индекса по полю равняется 3,13, в то время как развитие посевов пшеницы в 2021 г. протекало с видимыми проблемами. На тематической карте от 16.07.2021 г. отмечается пространственная неоднородность посевов пшеницы по содержанию хлорофилла.

Отображение фотосинтетически активной биомассы индекса NDVI и устойчивость к влиянию почвы вегетационного индекса MSAVI2 позволяют отчетливо определять посевы сельскохозяйственных культур на полях, вследствие чего тематические карты вегетационных индексов NDVI и MSAVI2 (13.06.2020 г. и 09.06.2021 г.) демонстрируют пространственную неоднородность распределения культуры наиболее ярко по сравнению с тематическими картами индекса CIGreen за соответствующие даты.

Выявленная неоднородность пространственного распределения сельскохозяйственных посевов по тематическим картам вегетационных индексов NDVI, CIGreen и MSAVI2 способствует своевременному определению «проблемных» участков внутри каждого поля. Как видно на рис. 3, начи-

ная с 2020 г. на поле № 5 образуются участки, на которых посевы сельскохозяйственных культур не развивались (рис. 3, а). За вегетационный период 2021 г. наблюдается их значительное разрастание (рис. 3, б). Благодаря координатной привязке тематических карт в ГИС QGIS было определено месторасположение самых крупных участков и вычислена их примерная площадь. Такого рода информация важна для представителей агропроизводства при планировании различных мероприятий в системе ведения сельскохозяйственного производства.

На основе данных Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG) для всех сельскохозяйственных полей на территории ОПХ «Курагинское» были сформированы наборы данных о количестве ежедневных осадков (мм) и среднесуточной температуре (°C). Они представляют собой сводные таблицы с ежедневными значениями климатических показателей. Информация, содержащаяся в полученных таблицах, позволила вычислить интегральные характеристики климата, такие как сумма осадков, сумма активных температур (выше +10 °C), гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) Г. Т. Селянинова по декадам и другие, а также их средние многолетние значения, показывающие меньшее или большее отклонение текущего года. В качестве примера приведен график (рис. 4), на котором представлены накопленные осадки поля № 5 ОПХ «Курагинское» с наименьшим (2021 г.) и наибольшим (2015 и 2020 гг.) отклонениями от среднего значения.

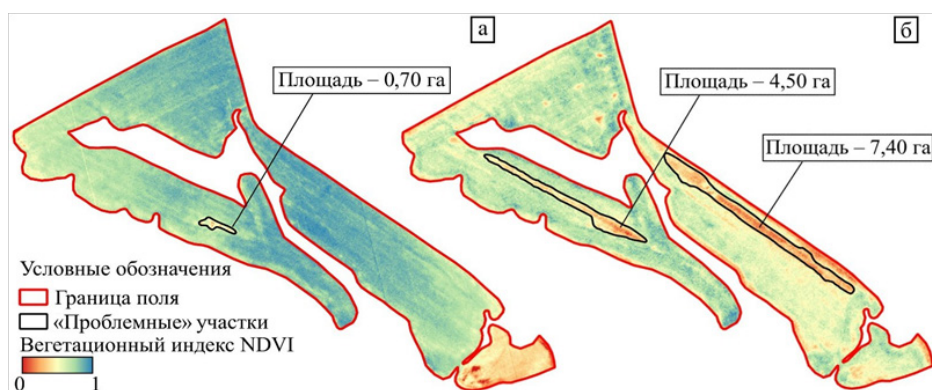


Рис. 3. «Проблемные» участки внутри сельскохозяйственного поля № 5: а) 29.07.2020 г., б) 19.06.2021 г.

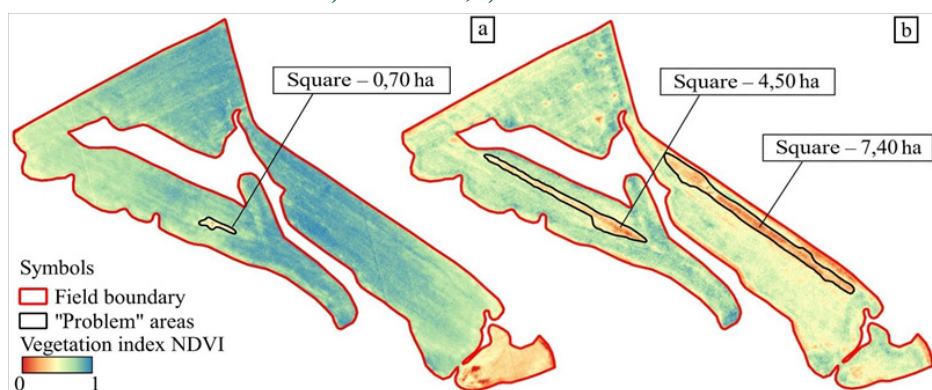


Fig. 3. "Problem" areas inside the agricultural field No. 5: a) 29.07.2020, b) 19.06.2021

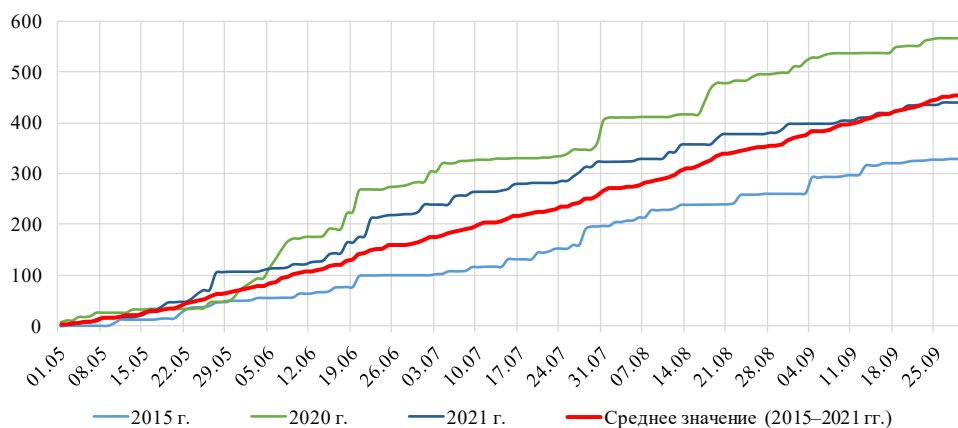


Рис. 4. Накопленные осадки поля № 5 по данным GPM (IMERG)

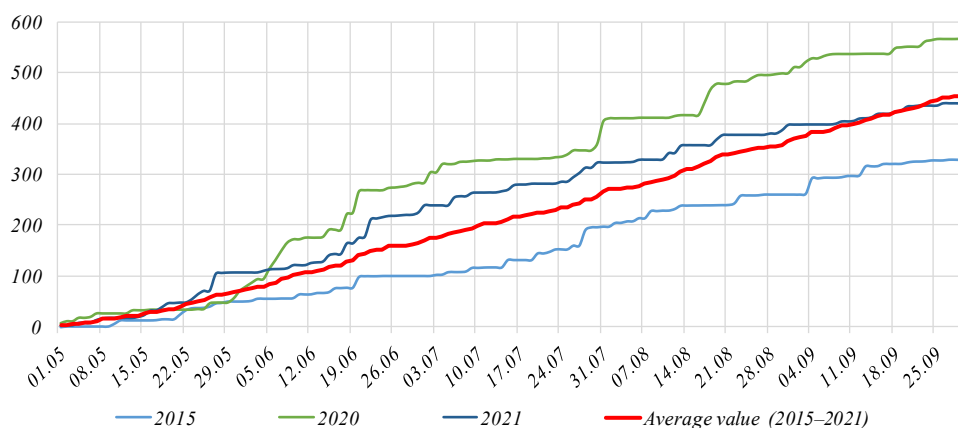


Fig. 4. Accumulated precipitation of field No. 5 according to GPM (IMERG) data

Тематические карты среднесуточной температуры и количества осадков, полученные на основе продуктов Terra MODIS (MOD11) и GPM (IMERG), подготавливаются в формате GeoTIFF. По сути, данные представлены в виде изображения с географической привязкой, содержащие числовые данные. Это позволяет отслеживать распределение значений среднесуточной температуры и количества выпавших осадков. На рис. 5 приведены тематические карты среднесуточной температуры поверхности Земли за 1 июня и 4 июля 2021 года, построенные на основе продуктов Terra MODIS (MOD11). Перепады значений среднесуточной температуры в пределах хозяйства можно охарактеризовать неравномерным развитием растительности и наличием обнаженной почвы, объектов недвижимости, рек и др. В пределах сельскохозяйственных полей перепады температуры в основном связаны только с развитием посевов и наличием обнаженной почвы. Разность в значениях среднесуточной температуры на тематической карте от 01.06.2021 г. (рис. 5, а) объясняется тем, что в это время посевы сельскохозяйственных культур только начали прорастать и в границах полей определялось большое количество обнаженной почвы. На тематической карте от 04.07.2021 г. (рис. 5, б) более высокие зна-

чения среднесуточной температуры в границах полей были выявлены на полях пара.

Оперативный мониторинг по спутниковым данным способствовал получению обширных сведений о сельскохозяйственных посевах ОПХ «Курагинское». Комплексная оценка сельскохозяйственных посевов проводится по полученным значениям вегетационных индексов и основным агроклиматическим показателям. В программе Microsoft Excel строились графики динамики изменений различных показателей в течение вегетационных сезонов. Графики демонстрируют детальную информацию о развитии сельскохозяйственных посевов на основе вегетационных индексов с учетом климатических показателей. В качестве примера приведен график для поля № 5 ОПХ «Курагинское», построенный за вегетационный сезон 2021 г. (рис. 6). На рис. 6 отображено количество ежедневных осадков (мм), динамики вегетационного индекса NDVI и средней суточной температуры (°C). Из графика видно, что максимальное значение средней суточной температуры (23 °C) приходится на 04.07.2021 г., а минимальное (3 °C) – на 30.09.2021 г. За исследуемый период с 5 мая по 30 сентября 2021 г. максимальное количество осадков достигалось 27.05.2021 г. (29,91 мм). Минимальное количество (0,03 мм)

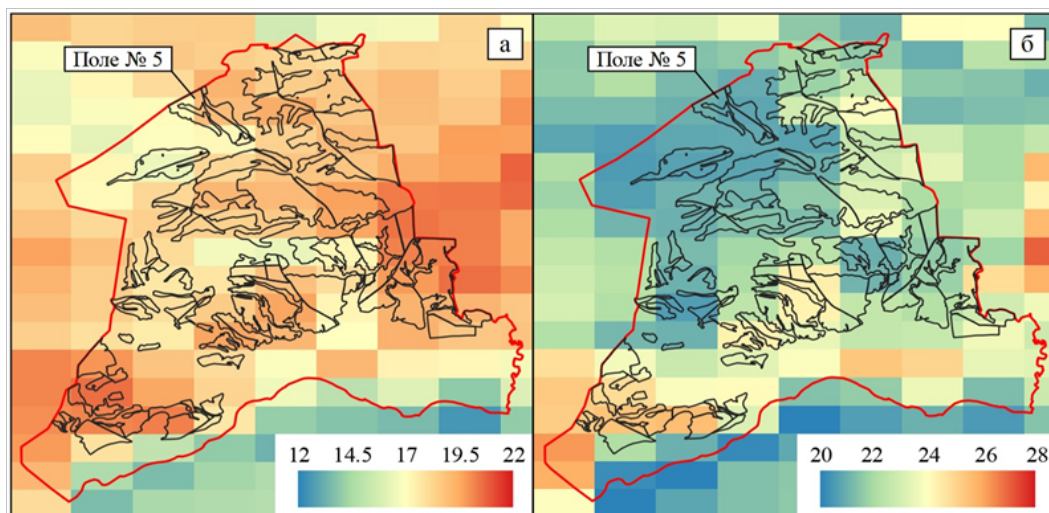


Рис. 5. Распределение значений среднесуточных температур (°C) на территории ОПХ «Курагинское»: а) 01.06.2021 г.; б) 04.07.2021 г.

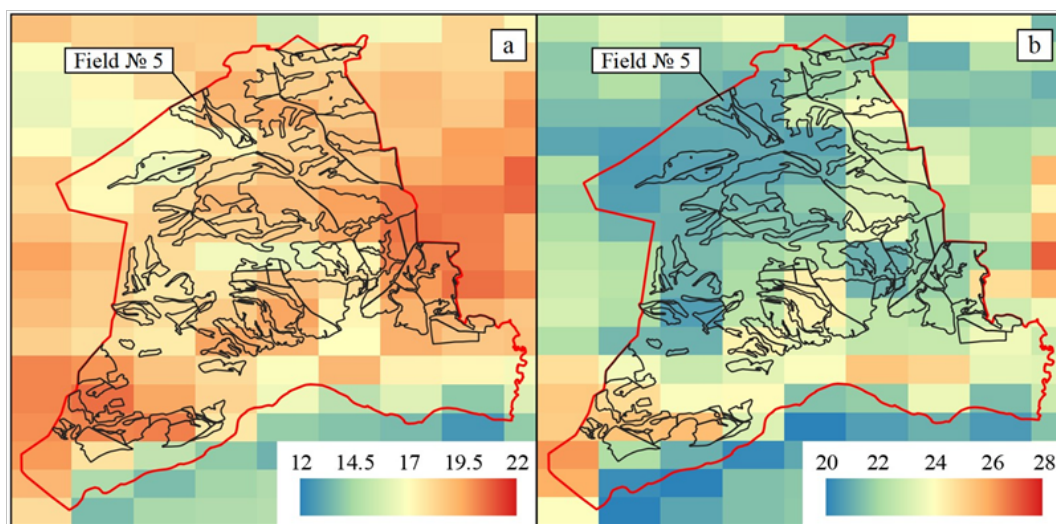


Fig. 5. Distribution of values of average daily temperatures (°C) on the territory of AEPF "Kuraginskoe": a) 01.06.2021; b) 04.07.2021

фиксировалось 26 мая, 12 и 13 июля 2021 г. Количество дней без осадков равняется 48. Ход индекса NDVI в период с 05.06.2021 г. по 03.07.2021 г. отражает наращивание биомассы, после 02.08.2021 г. отмечается значительный спад значений, характеризующий созревание посевов пшеницы и уборку урожая.

#### Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Мониторинг по спутниковым данным позволяет в оперативном режиме отслеживать состояние сельскохозяйственных посевов и оказывать информационную поддержку для решения сельскохозяйственных задач. В результате оперативного мониторинга территории ОПХ «Курагинское» были отработаны технологии обработки данных Sentinel-2, Terra MODIS (MOD11) и GPM IMERG. Собранная статистика о вегетационных индексах NDVI, CI<sub>Green</sub> и MSAVI<sub>2</sub>, агроклиматических показателях формирует объективную информацию

о хозяйстве в целом и индивидуально по каждому полю. При необходимости список вычисляемых показателей может быть расширен.

По вегетационным индексам для каждого поля можно выявить неоднородность пространственного распределения посевов, которая показывает неравномерность развития сельскохозяйственной культуры и «проблемные» участки внутри полей. На основе информации о температуре и количестве осадков можно делать выводы о том, что климатические условия являются благоприятными (оптимальные значения температур и количество осадков) или неблагоприятными (дефицит и избыток осадков, аномально высокие и низкие температуры) для развития посевов. Вместе с тем по исходным спутниковым снимкам Sentinel-2 можно осуществлять удаленный контроль проводимых технических операций (укос сенокосов, сбор урожая) на территории хозяйства.



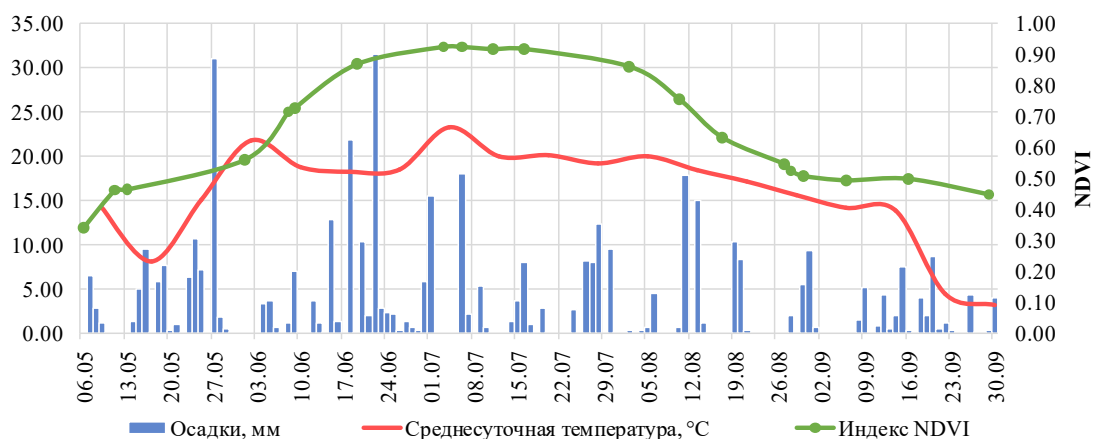


Рис. 6. Ход индекса NDVI и климатических показателей для поля № 5 за вегетационный сезон 2021 года

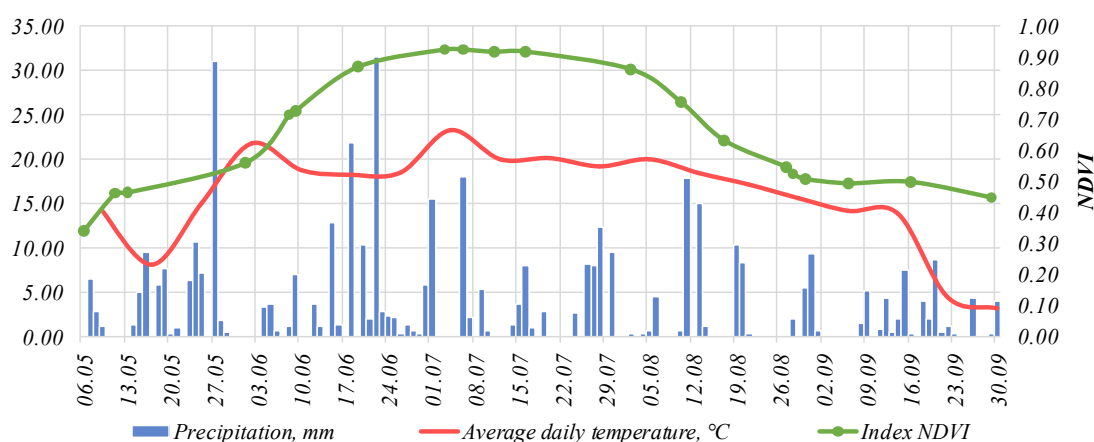


Fig. 6. The progress of the NDVI index and climatic indicators for field No. 5 for the 2021 growing season

В рамках рассмотренного подхода можно в кратчайшие сроки подготавливать данные по спутниковой информации для информационно-аналитической системы. В перспективе такая система сможет отслеживать показатели всей территории хозяйства в режиме реального времени. Доступ к данным через интернет обеспечит специалистов сельскохозяйственной отрасли актуальной информацией и предоставит возможность своевременного принятия взвешенных решений при проведе-

нии технологических операций. Наличие в такой информационной системе данных за несколько лет позволит проводить сравнительный анализ данных на актуальную дату текущего года в сравнении со средними многолетними значениями вегетационных индексов и климатических показателей. Выявление схожих тенденций предоставит возможность для прогнозирования развития сельскохозяйственных посевов.

#### Библиографический список

1. Страшная А. И., Береза О. В., Тарасова Л. Л., Максименкова Т. А., Шульгин И. А., Пурина И. Э., Чекулаева Т. С. Современное состояние и проблемы агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 219–240.
2. Ерунова М. Г., Симакина А. С., Якубайлик О. Э. Создание базы данных для точного земледелия ОПХ «Журагинское» // Вестник КрасГАУ. 2022. № 1 (178). С. 13–20. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-13-20.
3. Комаров А. А., Комаров А. А. Оценка состояния травостоя с помощью вегетационного индекса NDVI // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2018. № 51. С. 124–129.
4. Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Чернова И. В. Оценка состояния растений методами экспресс-диагностики // Аграрный вестник Урала. 2019. № 7 (186). С. 19–25. DOI: 10.32417/article\_5d52af440f71b8.16701399.
5. Трошко К. А., Денисов П. В., Дунаева Е. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Особенности развития озимых сельскохозяйственных культур на юге европейской части России весной 2022 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 261–267. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-261-267.

6. Линков С. А., Акинчин А. В., Донченко И. С., Попов А. А. Использование методов дистанционного зондирования для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2018. № 3 (19). С. 92–98.
7. Степанов А. С., Асеева Т. А., Дубровин К. Н. Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) // Аграрный вестник Урала. 2020. № 1 (192). С. 10–19. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19.
8. Ерошенко Ф. В., Барталев С. А., Лапенко Н. Г., Самофал Е. Б., Сторчак И. Г. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66.
9. Белоусова А. П., Брыжко И. В. Анализ зарастания сельскохозяйственных угодий на территории Пермского края по спутниковым снимкам Landsat // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 4. С. 150–161. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-150-161.
10. Segarra J., Araus J. L., Kefauver S. C. Farming and Earth Observation: Sentinel-2 data to estimate within-field wheat grain yield // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 107. Article number 102697. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102697.
11. Blickensdörfer L., Schwieder M., Pflugmacher D., Nendel C., Erasmi S., Hostert P. Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 269. Article number 112831. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112831.
12. Yakubailik O. E., Yakubailik T. V. Analysis of accumulated precipitation based on satellite data in Central Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 548. Article number 32025. DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032025.
13. Воронина П. В. Динамика температуры поверхности Новосибирской области по данным дистанционного зондирования в XXI веке // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 31–39. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-31-39.
14. Eck M. A., Murray A. R., Ward A. R., Konrad C. E. Influence of growing season temperature and precipitation anomalies on crop yield in the southeastern United States // Agricultural and Forest Meteorology. 2020. Vol. 291. Article number 108053. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108053.
15. Головинов Е. Э., Васильева Н. А. Сравнение многолетних метеорологических характеристик по данным реанализа и наземных наблюдений на территории Московской области // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12. № 3. С. 92–105. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105.
16. Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В., Ларько А. А., Мальчиков Н. О., Ивченко В. К., Демьяненко Т. Н., Шевырнов А. П. Оценка пространственного распределения урожайности ярового ячменя (Красноярский край) по наземным и спутниковым спектрофотометрическим данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 183–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-183-193.
17. Erunova M. G., Yakubailik O. E., Yakubaylik T. V. Analysis of the temperature regime of basin geosystems of the Krasnoyarsk Territory using MODIS satellite images and ground-based data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Article number 52026. DOI: 10.1088/1757-899X/862/5/052026.
18. Анисимов А. Е., Ефимов В. В., Львова М. В. Верификация данных дистанционного зондирования GPM IMERG и количественные оценки атмосферных осадков в Крымском регионе в теплое время года // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37. № 4 (220). С. 490–504. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-4-490-504.

#### Об авторах:

Анна Сергеевна Кузнецова<sup>1</sup>, младший научный сотрудник, ORCID 0000-0002-8351-7536, AuthorID 1123552; +7 983 363-40-35, [anna.simakina.97@mail.ru](mailto:anna.simakina.97@mail.ru)

Марина Геннадьевна Ерунова<sup>1</sup>, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ORCID 0000-0002-1922-1036, AuthorID 116643; +7 903 987-52-78, [marina.erunova@gmail.com](mailto:marina.erunova@gmail.com)

Олег Эдуардович Якубайлик<sup>2</sup>, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе, ORCID 0000-0002-2668-4776, AuthorID 99904; +7 902 990-64-32, [oleg@icm.krasn.ru](mailto:oleg@icm.krasn.ru)

<sup>1</sup> Федеральное исследовательское учреждение «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия» <sup>2</sup> Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

## References

1. Strashnaya A. I., Bereza O. V., Tarasova L. L., Maksimenkova T. A., Shul'gin I. A., Purina I. E., Chekulaeva T. S. Sovremennoe sostoyanie i problemy agrometeorologicheskogo obespecheniya sel'skogo khozyaystva Rossii [Current state and problems of agrometeorological support of agriculture in Russia] // Hydrometeorological Research and Forecasting. 2019. No. 4 (374). Pp. 219–240. (In Russian.)
2. Erunova M. G., Simakina A. S., Yakubaylik O. E. Sozдание bazy dannykh dlya tochnogo zemledeliya OPKh "Kuraginskoe" [Database for precision farming at the Kuraginskoye agricultural experimental production facility] // Vestnik KrasGAU. 2022. No. 1 (178). Pp. 13–20. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-1-13-20. (In Russian.)
3. Komarov A. A., Komarov A. A. Otsenka sostoyaniya travostoya s pomoshch'yu vegetatsionnogo indeksa NDVI [Assessment of the state of the herbage using the vegetation index NDVI] // Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2018. No. 51. Pp. 124–129. (In Russian.)
4. Eroshenko F. V., Storchak I. G., Chernova I. V. Otsenka sostoyaniya rasteniy metodami ekspress-diagnostiki [Assessment of plant condition by express-diagnostic methods] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2019. No. 7 (186). Pp. 19–25. DOI: 10.32417/article\_5d52af440f71b8.16701399. (In Russian.)
5. Troshko K. A., Denisov P. V., Dunaeva E. A., Lupyan E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A. Osobennosti razvitiya ozimnykh sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na yuge evropeyskoy chasti Rossii vesnoy 2022 g. po dannym distantsionnogo monitoringa [Development of winter crops in the south of European part of Russia in spring 2022 based on remote sensing data] // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2022. Vol. 19. No. 2. Pp. 261–267. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-261-267. (In Russian.)
6. Linkov S. A., Akinchin A. V., Donchenko I. S., Popov A. A. Ispol'zovanie metodov distantsionnogo zondirovaniya dlya otsenki sostoyaniya posevov sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [The use of remote sensing techniques to assess the condition of agricultural crops] // Innovatsii v APK: problemy i perspektivy. 2018. No. 3 (19). Pp. 92–98. (In Russian.)
7. Stepanov A. S., Aseeva T. A., Dubrovin K. N. Vliyaniye klimaticheskikh kharakteristik i znacheniy vegetatsionnogo indeksa NDVI na urozhaynost' soi (na primere rayonov Primorskogo kraya) [The influence of climatic characteristics and values of NDVI at soybean yield (on the example of the districts of the Primorskiy region)] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2020. No. 1 (192). Pp. 10–19. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19. (In Russian.)
8. Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Lapenko N. G., Samofal E. B., Storchak I. G. Vozmozhnosti distantsionnoy otsenki sostoyaniya i stepeni degradatsii prirodnykh kormovykh ugodiy [Capabilities for rangelands state and degradation assessment using remote sensing data] // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2018. Vol. 15. No. 7. Pp. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66. (In Russian.)
9. Belousova A. P., Bryzhko I. V. Analiz zarastaniya sel'skokhozyaystvennykh ugodiy na territorii Permskogo kraya po sputnikovym snimkam Landsat [Analysis of overgrowing of agricultural lands on the Perm region based on Landsat satellite images] // InterCarto. InterGIS. 2021. Vol. 27. No. 4. Pp. 150–161. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-4-27-150-161. (In Russian.)
10. Segarra J., Araus J. L., Kefauver S. C. Farming and Earth Observation: Sentinel-2 data to estimate within-field wheat grain yield // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 107. Article number 102697. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102697.
11. Blickensdörfer L., Schwieder M., Pflugmacher D., Nendel C., Erasmi S., Hostert P. Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 269. Article number 112831. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112831.
12. Yakubailik O. E., Yakubailik T. V. Analysis of accumulated precipitation based on satellite data in Central Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 548. Article number 32025. DOI: 10.1088/1755-1315/548/3/032025. (In Russian.)
13. Voronina P. V. Dinamika temperatury poverkhnosti Novosibirskoy oblasti po dannym distantsionnogo zondirovaniya v XXI veke [The Land Surface Temperature Dynamics of the Novosibirsk Region from Remote Sensing Data in XXI Century] // InterCarto. InterGIS. 2022. Vol. 4. Pp. 31–39. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-31-39. (In Russian.)
14. Eck M. A., Murray A. R., Ward A. R., Konrad C. E. Influence of growing season temperature and precipitation anomalies on crop yield in the southeastern United States // Agricultural and Forest Meteorology. 2020. Vol. 291. Article number 108053. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108053.
15. Golovinov E. E., Vasil'eva N. A. Sravnenie mnogoletnikh meteorologicheskikh kharakteristik po dannym reanaliza i nazemnykh nablyudeniy na territorii Moskovskoy oblasti [Comparison of long-term meteorological characteristics based on reanalysis and ground observations data in Moscow region] // Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2022. Vol. 12. No. 3. Pp. 92–105. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105. (In Russian.)

16. Botvich I. Yu., Emel'yanov D. V., Lar'ko A. A., Mal'chikov N. O., Ivchenko V. K., Dem'yanenko T. N., Shevyrnogov A. P. Otsenka prostranstvennogo raspredeleniya urozhaynosti yarovogo yachmenya (Krasnoyarskiy kray) po nazemnym i sputnikovym spektrofotometricheskim dannym [Estimation of the spatial distribution of spring barley yield (Krasnoyarsk Territory) from ground and satellite spectrophotometric data] // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2019. Vol. 16. No. 5. Pp. 183–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-183-193. (In Russian.)
17. Erunova M. G., Yakubailik O. E., Yakubaylik T. V. Analysis of the temperature regime of basin geosystems of the Krasnoyarsk Territory using MODIS satellite images and ground-based data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Article number 52026. DOI: 10.1088/1757-899X/862/5/052026. (In Russian.)
18. Anisimov A. E., Efimov V. V., L'vova M. V. Verifikatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya GPM IMERG i kolichestvennye otsenki atmosferykh osadkov v Krymskom regione v teploe vremya goda [Evaluation of GPM IMERG Products and Estimation of Warm-Season Precipitation in Crimea] // Physical Oceanography. 2021. Vol. 37. No. 4 (220). Pp. 490–504. DOI: 10.22449/0233-7584-2021-4-490-504. (In Russian.)

**Authors' information:**

Anna S. Kuznetsova<sup>1</sup>, junior researcher, ORCID 0000-0002-8351-7536, AuthorID 1123552; +7 983 363-40-35, [anna.simakina.97@mail.ru](mailto:anna.simakina.97@mail.ru)

Marina G. Erunova<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, senior researcher, ORCID 0000-0002-1922-1036, AuthorID 116643; +7 903 987-52-78, [marina.erunova@gmail.com](mailto:marina.erunova@gmail.com)

Oleg E. Yakubailik<sup>2</sup>, candidate of physico-mathematical sciences, deputy director for scientific work, ORCID 0000-0002-2668-4776, AuthorID 99904; +7 902 990-64-32, [oleg@icm.krasn.ru](mailto:oleg@icm.krasn.ru)

<sup>1</sup>Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia