

УДК 528.88  
DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554

## Применение данных дистанционного зондирования Земли для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур

<sup>1,2</sup> Шмидт И.В., <sup>2</sup> Латыпова А.М., <sup>2</sup> Царенко А.А.

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО Вавиловский университет,  
Россия, 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1  
E-mail: iv-schmidt@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются климатогеографические показатели космических исследований и данных дистанционного зондирования Земли ДЗЗ, что в настоящее время наиболее важно и ценно для землепользователей в связи с развитием цифровых технологий. Авторами рассмотрена и проанализирована территория учебного научно-производственного объединения аграрного вуза (местоположение, почвенные ресурсы, рельеф, кадастровые данные территории, данные дистанционного зондирования, урожайность сельскохозяйственных культур), представленная сельскохозяйственными угодьями (пашня, сенокос). В процессе исследования была создана цифровая кадастровая модель, включающая карту земельного массива землепользования с нанесением кадастровых данных, которая впоследствии послужила основой для анализа климатогеографических данных дистанционного зондирования (температура, влажность почвы, осадки, нормализованный вегетационный индекс), необходимых для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. В результате исследований была создана цифровая кадастровая модель территории сельскохозяйственных угодий, на ее основе и с помощью ДЗЗ сделан прогноз урожайности сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, территория, нормализованный вегетационный индекс (NDVI), климат, урожайность

**Для цитирования:** Шмидт И.В., Латыпова А.М., Царенко А.А. 2022. Применение данных дистанционного зондирования Земли для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур. Региональные геосистемы, 46(4): 539–554. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554

## Application of Remote Sensing Data for Crop Yield Forecasting

<sup>1,2</sup> Irina V. Shmidt, <sup>2</sup> Anna M. Latypova, <sup>2</sup> Aksana A. Tsarenko

<sup>1</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,  
77 Polytechnic St, Saratov 410054, Russia

<sup>2</sup> Saratov State Vavilov Agrarian University,  
1 Theater Sq, Saratov 410012, Russia  
E-mail: iv-schmidt@yandex.ru

**Abstract.** The article examines climatogeographic indicators of space research and Earth remote sensing data, which is currently most important and valuable for land users in connection with the development of digital technologies. The authors considered and analyzed the territory of the educational scientific production association of the agricultural university (location, soil resources, relief, cadastral data of the territory, remote sensing data, yield), represented by agricultural land (arable land, hayfields). During the study, a digital cadastral model was created, including a map of the land area of land use with the application

of cadastral data, which subsequently served as the basis for the analysis of climatogeographic data of remote sensing (temperature, soil moisture, precipitation, normalized growing index), necessary for predicting crop yields. As a result of the research, a digital cadastral model of the territory of agricultural land was created, on its basis and with the help of the DDZ, a forecast of crop yields was made.

**Key words:** remote sensing, territory, normalized growing index (NDVI), climate, yield

**For citation:** Shmidt I.V., Latypova A.M., Tsarenko A.A. 2022. Application of Remote Sensing Data for Crop Yield Forecasting. Regional Geosystems, 46(4): 539–554 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554

## Введение

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко распространены в сельском хозяйстве и помогают решать многие задачи, например, мониторинг земель сельскохозяйственного назначения, создание наглядной карты земельных угодий, определение их фактического использования и выявление неиспользуемых участков или участков нецелевого использования сельскохозяйственных угодий, в том числе и прогнозирование урожайности. В связи с этим исследование данных дистанционного зондирования в сельском хозяйстве является актуальным.

Анализ данных дистанционного зондирования Земли (климатогеографических условий) позволяет решить основную проблему – прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур [Михайленко, 2017]. Технология дистанционного зондирования позволяет отслеживать динамику их развития, условий вегетации, определять сроки созревания и оптимальные сроки начала уборки, проводить экономический анализ при минимальном и максимальном уровнях урожайности стабильно возможных для конкретных условий<sup>2</sup>.

Правительством РФ реализуется целый комплекс мер, направленных на повышение устойчивости рынка зерна к агроклиматическим факторам. Создаются мероприятия по его регулированию с целью стабилизации обстановки внутри страны и повышения конкурентоспособности на мировом зерновом рынке. Системная поддержка отрасли включает в себя стимулирование к интенсивному внедрению цифровых технологий в производство и управление [Нейфельд и др., 2021].

Кроме того, Правительство РФ уделяет огромное внимание программе «Цифровая экономика», в рамках которой продлевается финансирование на проведение цифровой трансформации и внедрение искусственного интеллекта. Сфера агропромышленного комплекса также переходит на внедрение искусственного интеллекта. Особенно важно применять комплексное внедрение на разных уровнях. В связи с тем, что в Российской Федерации развита частная собственность на землю, применение цифровой экономики необходимо не только для государственных, но и для частных сельскохозяйственных территорий.

Применение данных дистанционного зондирования невозможно без понимания четких границ земельных участков. Первоначальной проблемой в использовании сельскохозяйственных земель стало создание цифровой кадастровой модели территории с учетом всех кадастровых характеристик.

Создание цифровой кадастровой модели всех сельскохозяйственных предприятий позволяет иметь цифровую картину всей территории муниципального образования, что положительно сказывается на эффективности управления. Для организации управления раз-

<sup>2</sup> О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы: Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203. Электронный ресурс. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_216363/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_216363/).

витием сельских территорий необходим сбор, анализ и формирование базы данных в специализированном программном обеспечении, то есть необходимо создание цифровой информационной модели [Царенко и др., 2019].

Однозначно следует согласиться с автором, что научно-технологический прорыв в сельскохозяйственном производстве невозможен без применения цифровых технологий точного земледелия (ТЗ), являющегося ключевым сегментом «умного сельского хозяйства». Развитие ТЗ, в свою очередь, требует более совершенной методологической и инструментальной базы информационного обеспечения новых технологий. Важнейшим ресурсом информационного обеспечения современных систем земледелия служат методы и средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [Якушев, 2019]. Именно поэтому в работе рассматриваются способы оперативного применения данных дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности.

Предлагаемая цифровая кадастровая модель может стать основой для внедрения Геоинформационной системы агропромышленного комплекса Саратовской области, так как первоначальный и трудоемкий этап работы по внедрению цифрового сельского хозяйства предполагает формирование баз данных необходимой информацией и, прежде всего, полной базы данных и карты пахотных угодий, включающей все обрабатываемые и необрабатываемые поля [Воротников, Нейфельд, 2018].

Цель работы заключается в разработке и использовании цифровой кадастровой модели и данных дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве на территории сельскохозяйственного предприятия учебно-научно-производственного объединения «Поволжье» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» (УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет) для внедрения цифровых технологий при прогнозировании урожайности.

При проведении научно-исследовательских работ были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ земель территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет;
- создание цифровой кадастровой модели УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет;
- разработка системы прогнозирования с учетом статистической обработки данных дистанционного зондирования Земли.

## Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступила часть земельно-имущественного комплекса аграрного вуза, а именно земельный фонд территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет, имеющий категорию «Земли сельскохозяйственного назначения» и представленный сельскохозяйственными угодьями – пашней и сенокосами.

Предметом исследования выступили климатогеографические показатели территории, полученные с помощью спутниковых систем зондирования Земли (нормализованный вегетационный индекс (NDVI), температура, влажность, осадки, урожайность), которые получены с помощью ВЕГА-Science (УНУ «BS ИКИ-Мониторинг»), предназначенного для решения научных задач изучения и мониторинга окружающей среды с использованием методов и технологий спутникового дистанционного зондирования [Данилушкина, 2020]. Суть метода дистанционного зондирования заключается в интерпретации результатов измерения электромагнитного излучения, которое отражается либо излучается объектом и регистрируется в некоторой удаленной от него точке пространства [Федулов и др., 2016; Медеников, Муратова, 2019].

Существуют различные технологии, когда используемые данные дистанционного зондирования применяются на основе различных методик, в том числе в ретроспективном

методе оценки качественного состояния сельскохозяйственных земель [Белорусцева, 2013; Данилушкина, 2020]. Методика оценки качественного состояния сельскохозяйственных земель с последующим пространственно-структурным моделированием прогнозного состояния исследуемой территории заключается в следующей последовательности выполняемых операций:

1. Исследование многолетней динамики состояния сельскохозяйственных угодий, подверженных процессам зарастания древесно-кустарниковой растительностью.
2. Параметризация качественных и количественных характеристик состояния исследуемой территории.
3. Классификация сельскохозяйственных земель по балльной шкале оценки качественных и количественных характеристик территории.
4. Оценка современной и потенциальной опасности зарастания сельскохозяйственных угодий [Белорусцева, 2013].

Авторы учли все эти параметры при анализе индекса NDVI.

ВЕГА-Science (УНУ «BS ИКИ-Мониторинг») предоставляет данные высокого и детального пространственного разрешения со следующих приборов и космических аппаратов: OLI/TIRS, OLI (Landsat-8); ETM+ (Landsat-7); TM (Landsat-4, Landsat-5); KMCC-101, KMCC-102 («Метеор-М» №1, «Метеор-М» №2); KMCC-50 («Метеор-М» №1, «Метеор-М» №2); Hyperion (EO-1); MSI (Sentinel-2A); MCC (Канопус-В, БКА); ПСС (Канопус-В, БКА); Геотон-П (Ресурс-П №1, 2); КШМСА-СР (Ресурс-П №1, 2); КШМСА-ВР (Ресурс-П №1, 2); ГСА-1, 2 (Ресурс-П №1, 2); ORBVIEW-3; PRISM (ALOS); AVNIR-2 (ALOS); ASTER. Композитные изображения позволяет отображать следующие продукты: композиты Landsat (весенние (за март – май); летние (за июнь – август); осенние (за сентябрь – ноябрь); панхроматические (по данным Landsat-8)); композиты MODIS за месяц; суточные композиты PROBA-V; суточные композиты LAI по MODIS; недельные композиты LAI по MODIS; недельные композиты NDVI по MODIS; маска снега по MODIS.

Обработка полученных числовых данных с платформы ВЕГА-Science и статистических данных за ряд лет сельскохозяйственного производства была выполнена в программном комплексе QGIS.

В качестве основных методов исследования применены методы взаимосвязей (индукция и дедукция, анализ и синтез), включающие в себя изучение научных и административных источников информации территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет. В качестве неформализованных методов исследования выступает преимущественно анализ полученных сведений, оценка информации из разных источников с применением приемов извлечения смысла. В работе применялись геоинформационные технологии обработки картографической и спутниковой информации.

В качестве количественных методов в работе применялся сбор числовых данных с территории хозяйства, на основании которых выполнялся анализ достоверных данных. При обработке статистическими методами выявили ряд закономерностей, которые помогли сделать выводы по исследованиям. Применение геоинформационной системы QGIS позволило методом моделирования создать цифровую кадастровую основу с совокупностью слоев по различным тематическим направлениям на исследуемую территорию.

Для расчета регрессионного анализа выбраны следующие показатели: в качестве зависимой переменной (Y) – урожайность озимой пшеницы, в качестве независимых переменных используются показатели спутниковых данных, такие как температура, влажность почвы в горизонте 40–100 см, осадки и NDVI. Материалами исследования выступают данные информационных источников.

## Результаты и их обсуждение

Территория УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет расположена в Энгельсском районе Саратовской области. Земельный массив территории представлен совокупностью участков, преимущественное число которых имеют формы прямоугольника, треугольника или трапеции, меньшее число составляют участки в форме неправильных многоугольников (как правило, они расположены вблизи оврагов или балок). Общая фактическая площадь хозяйства 5948,86 га, из которых пашня составляет – 5319,04 га.

Характер рельефа равнинный, на территории землепользования имеются овраги и балки. Крайняя северо-восточная и центральная части территории хозяйства отличаются умеренной расчлененностью, а рабочие участки на западе отличаются пологостью. Переход уклона уменьшается с востока на запад из-за расположения вблизи территории реки Волги – главного тальверга (рис. 1).

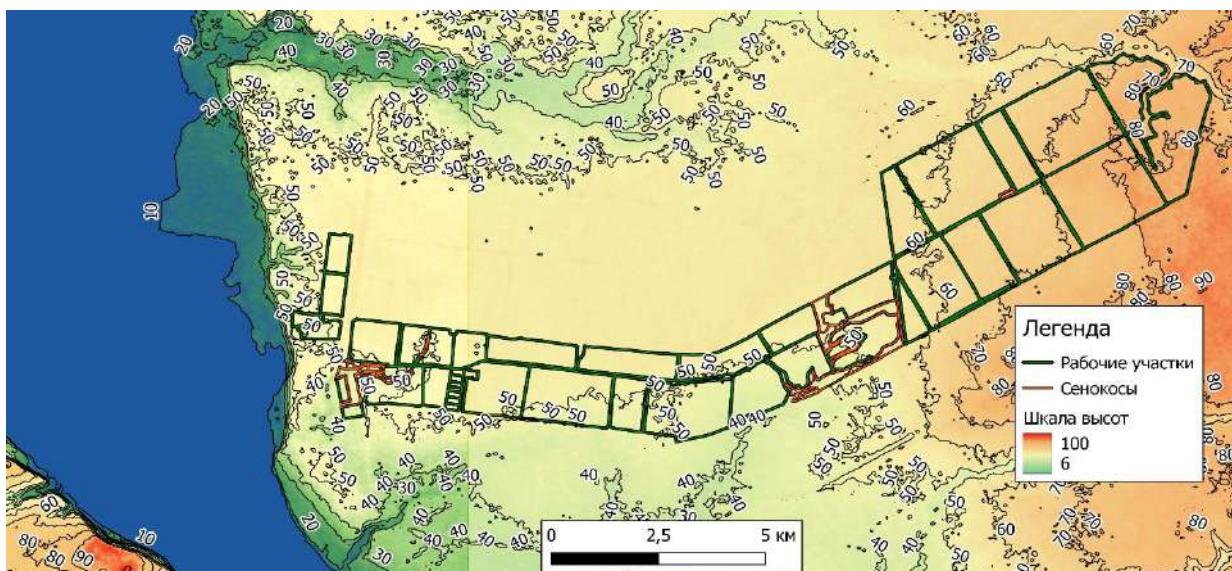


Рис. 1. Шкала высот рельефа территории  
Fig. 1. Elevation scale of the relief of the territory

Согласно анализу территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет землепользование представлено совокупностью рабочих участков, которые имеют темно-каштановые и каштановые почвы.

Характер почвенного разнообразия, рельефа и климата позволяет определить растениеводство как основную отрасль сельского хозяйства на данной территории. Кроме того, погодные условия способствуют наиболее удачному ведению растениеводства, а также на территории отсутствуют существенные ограничения в области сельского хозяйства, связанные в том числе с зонами с особыми условиями использования территории.

Использование данных дистанционного зондирования Земли для прогнозирования урожайности сельскохозяйственной культуры напрямую связано с размещением рабочих участков и их местоположением в пространстве и на территории хозяйства. В связи с этим появилась необходимость создания цифровой кадастровой модели и внедрения ее в программный комплекс.

Согласно Федеральному закону №218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости» границы земельных участков на местности должны совпадать с кадастровыми данными, находящимися в Едином государственном реестре недвижимости (ЕГРН) [Царенко, Шмидт, 2014]. В настоящем законе также говорится о том, что сведения, содержа-

щиеся в ЕГРН, являются общедоступными. В рамках законодательства для анализа территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет были заказаны кадастровые данные (КПТ №50-26715299 дата 14.10.2019 г. и КПТ №50-26715318 дата 14.10.2019 г.) кадастровых кварталов 64:38:010505 и 64:38:010504 соответственно.

Сведения о координатах земельных участках содержатся в ЕГРН в местной системе координат МСК-64. С помощью конвертера был произведен пересчет координат в систему координат WGS 84, которая используется при создании границ рабочих участков территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет. После чего координаты были обработаны в QGIS для исследования территории в соответствии с официальными достоверными кадастровыми данными (рис. 2).

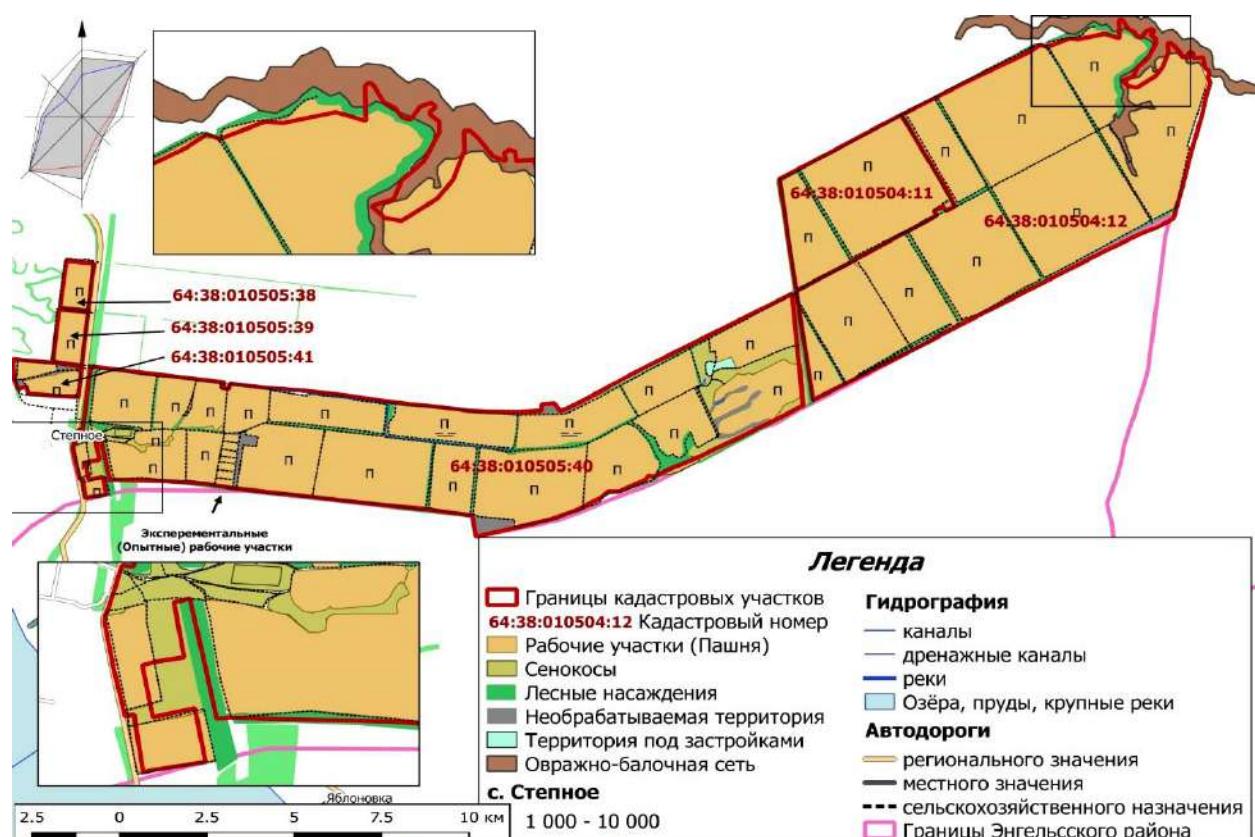


Рис. 2. Границы кадастровых участков территории  
 Fig. 2. The boundaries of the cadastral plots of the territory

Наложение границ цифровых кадастровых данных на фактически существующие границы территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет выявило несоответствия. В восточной части вблизи овражно-балочной сети используется территория за пределами границ земельного участка, стоящего на кадастровом учете. Площадь обрабатываемых земель, не относящихся к территории землепользования, согласно рассчитанному значению в программном обеспечении QGIS, равна 24,93 га. Земли в западной части земельного участка с кадастровым номером 64:38:010505:40 площадью 12,15 га также обрабатываются за его границами, что является нарушением. В совокупности территория хозяйства обрабатывает за пределами границ 37,08 га. Подробнее несоответствия использования территории видны на рис. 2 и в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1Экспликация земель УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет  
Explication of lands UNPO "Povolzhye" FGBOU VO Vavilov University

№ п\п	Вид угодий	Площадь фактического использования, га	Площадь территории в соответствии с кадастровыми данными, га
1	Пашня	5319,04	5294,11
2	Сенокосы	228,69	216,54
2	Дороги	86,26	86,26
3	Лесные насаждения	268,91	268,91
4	Под прудами	0,86	0,86
5	Под застройками	15,30	15,30
6	Под оврагами	29,8	29,8
7	Неиспользуемые (прочие) земли	228,69	216,54
ИТОГО		5948,86	5911,78

Площадь территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет по достоверным кадастровым данным равна 5911,78 га, однако фактическая площадь хозяйства равна 5948,86 га. Суммарная разница площадей равна 37,08 га, что соответствует площади, занятой за границей земельного участка, принадлежащего УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет.

Данный правовой аспект может быть устранен путем проведения кадастровых работ в рамках уточнения местоположения границ земельных участков. На нашем примере видно несоответствие сведений ЕГРН о местоположении границ земельного участка и фактическом расположении объекта недвижимости.

В настоящее время при уточнении границ земельного участка их местоположение определяется исходя из сведений, содержащихся в документе, подтверждающем право на земельный участок, или при отсутствии такого документа, исходя из сведений, содержащихся в документах, определявших местоположение границ земельного участка при его образовании. В случае отсутствия в документах сведений о местоположении границ земельного участка его границами считаются границы, существующие на местности пятнадцать лет и более и закрепленные с использованием природных объектов или объектов искусственного происхождения, позволяющих определить местоположение границ земельного участка. Такое условие прописано в статье 22 218-ФЗ «О государственной регистрации недвижимости».

Имеющиеся картографические материалы землепользования определяют границы территории исследуемого объекта. В состав земель на период проведения землеустройства 1985–1986 гг. входили только земельные участки с кадастровыми номерами 64:38:010505:40 и 64:38:010504:12. Информации о других земельных участках в данное время не было, поэтому уточнение границ выбранного земельного участка будет производится на основании отсутствия сведений о границах земельного участка в ЕГРН по естественным границам. Именно основываясь на этих данных можно судить о законном использовании земель при организации сельскохозяйственной деятельности.

Учет кадастровых сведений при ведении цифрового хозяйства позволяет не только правильно перераспределить рабочие участки с учетом точного местоположения, но и учесть специфику расположения земель с особыми условиями использования территории, которые в отдельных случаях могут накладывать ограничения в их использовании. [Царенко, Шмидт, 2014].

Также цифровая кадастровая модель позволяет вести точное координирование на основе достоверных кадастровых данных с целью ограничения использования земель, не входящих в состав территории. Это позволяет исключить наличие спорных моментов с соседними землепользователями и уменьшить погрешность при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур [Сальников, Тухина, 2018].

Для территории изучаемого землепользования были проанализированы климатические показатели и NDVI на земельных участках, где возделывали озимую пшеницу в период с 2015 по 2020 г. Озимая пшеница была выбрана для исследования, потому что является преобладающей в севообороте УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет. Для сбора озимой пшеницы наиболее важными месяцами является период апрель – июнь. Чтобы определить оптимальные сроки сбора урожая необходимо контролировать посев с начала периода молочно-восковой зрелости, поэтому весенние месяцы являются наиболее примечательными для данного анализа.

Температура способна напрямую воздействовать на урожайность за счет увеличения испарения влаги с поверхности и промерзания корневой системы культуры. Влажность почвы контролирует количество воды, которое просачивается в почву и пополняет грунтовые воды, а также воздействует на поверхностное водоотведение влаги в атмосферу. В работе было принято решение использовать влажность почвы в горизонте 40–100 см, это связано с тем, что нижние слои представляют собой запас влаги на перспективу, если возникнет потребность в ней для растения. Еще один показатель, который был исследован с помощью данных дистанционного зондирования Земли, – количество осадков. Для обобщения показателей и проведения анализа спутниковых данных был составлен сводный график показателей, влияющих на урожайность (рис. 3). Для составления графика климатических показателей территории УНПО «Поволжье» был использован ресурс Геопортала ИВМ СО РАН<sup>3</sup>.

Таким образом, при анализе графика было выявлено следующее: значения температуры и влажности почв имеют незначительные отклонения от среднего значения по всем годам. График осадков коррелирует с урожайностью, его изменения повторяют изменения урожайности в эти годы. Отклонение имеется в 2019 году. Связано это с большим количеством твердых осадков, выпадающих в первый месяц года.

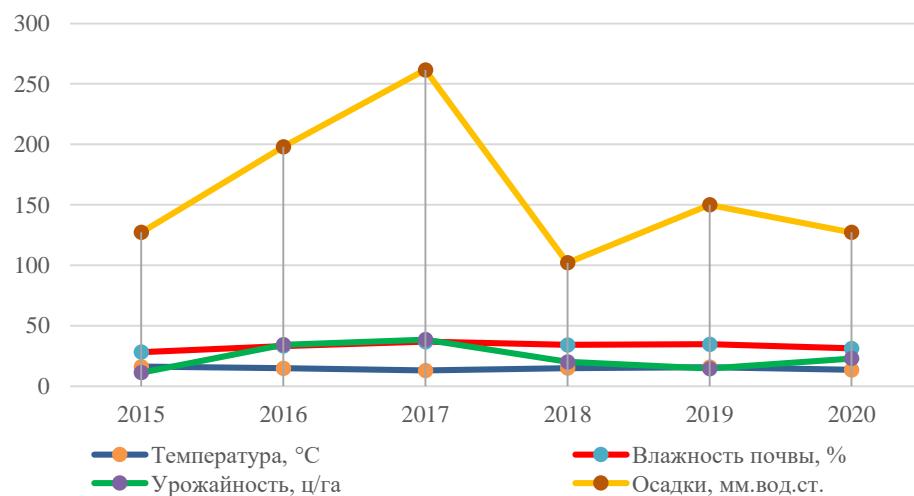


Рис. 3. Климатические показатели и урожайность на территории землепользования за 2015–2020 гг.  
 Fig. 3. Climatic indicators and yields in land use, 20015–2020

<sup>3</sup> Геопортал ИВМ СО РАН. Влажность почвы. Электронный ресурс. URL: <http://ksc.krasn.ru> (дата обращения 9 октября 2021)

Появление новых методов дистанционного зондирования поверхности земли с возможностью измерять и обрабатывать различные участки спектра привело к новым показателям вегетационного периода роста растений. К ним относится нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), показатель количества активной биомассы и самый распространенный среди подобных ему индексов. Он используется в различных работах, связанных с дистанционным зондированием поверхности земли и растительного покрова. Накопленная в Институте космических исследований РАН и архивированная с 2000 года (с регулярностью 3–4 раза в неделю и разрешением 250 м) информация со всей территории России по этому индексу дала начало новому направлению исследований [Лупян, 2015; Кононенко и др., 2019].

Далее рассматривался индекс NDVI, представляющий собой отношение разности потоков отраженной от земной поверхности солнечной радиации в видимом и близком инфракрасном (БИКР) диапазоне к их сумме [Аввакумова, 2018] в зависимости от показателя урожайности (рис. 4).

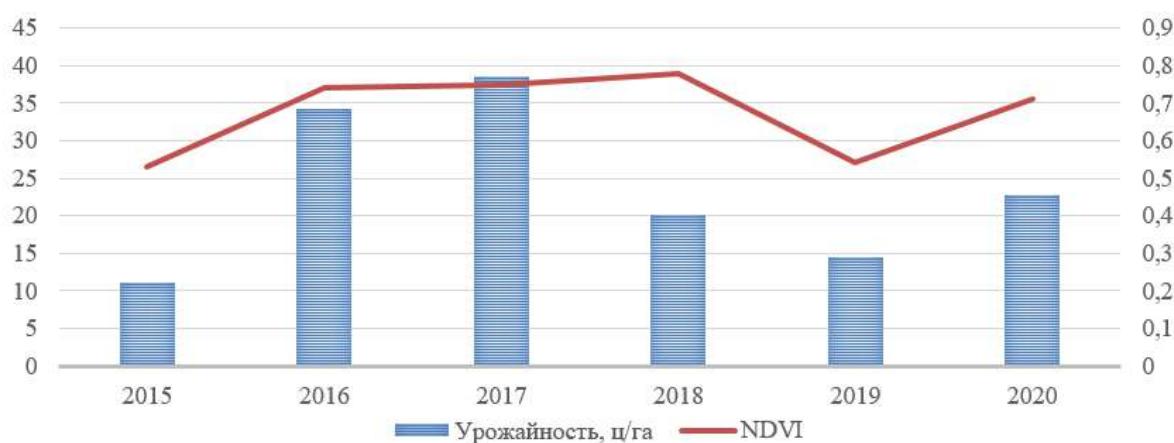


Рис. 4. Показатель NDVI и урожайность на территории землепользования за 2015–2020 гг.  
Fig. 4. Geographical NDVI and yields in land use on 2015–2020

Таким образом, при исследовании зависимости NDVI территории и урожайности землепользования была выявлена прямая связь [Богомазов, Разина, 2019]. Изменения показателя NDVI повторили изменения урожайности в эти годы. Данные исследования подтверждаются работами других авторов: значения NDVI, измеренные с помощью ручного сенсора GreenSeeker, высоко коррелируют с урожайностью озимой пшеницы [Федулов и др., 2016].

Информацию по показателям NDVI нанесли на цифровую кадастровую основу территории хозяйства на весенний и летний периоды созревания (рис. 5, 6), что позволяет спрогнозировать развитие произрастания озимой пшеницы в текущем году и сделать выводы на последующие годы.

Для выявления корреляционно-регрессионной взаимосвязи урожайности от климатогеографических факторов и влияния NDVI на урожайность озимой пшеницы был произведен регрессионный анализ. Данная взаимосвязь объясняется уравнением регрессии.

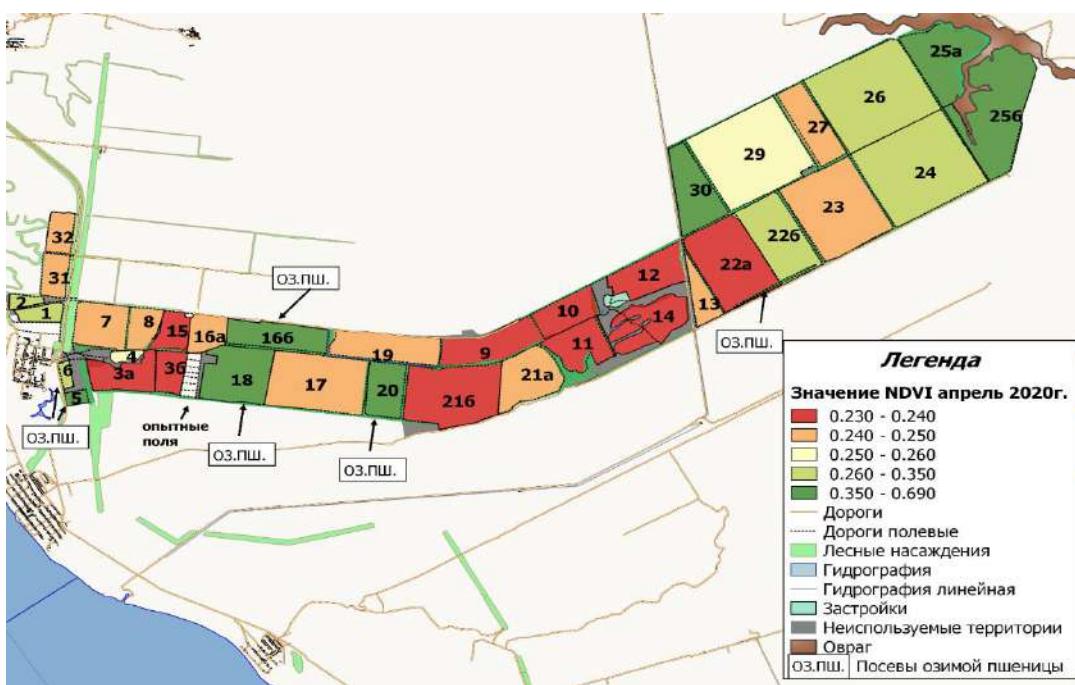


Рис. 5. Картограмма показателя NDVI в апреле 2020 года на территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет

Fig. 5. Map of the indicator NDVI in the territory of UNPO «Volga region» FSBOU VO Vavilov University, April 2020

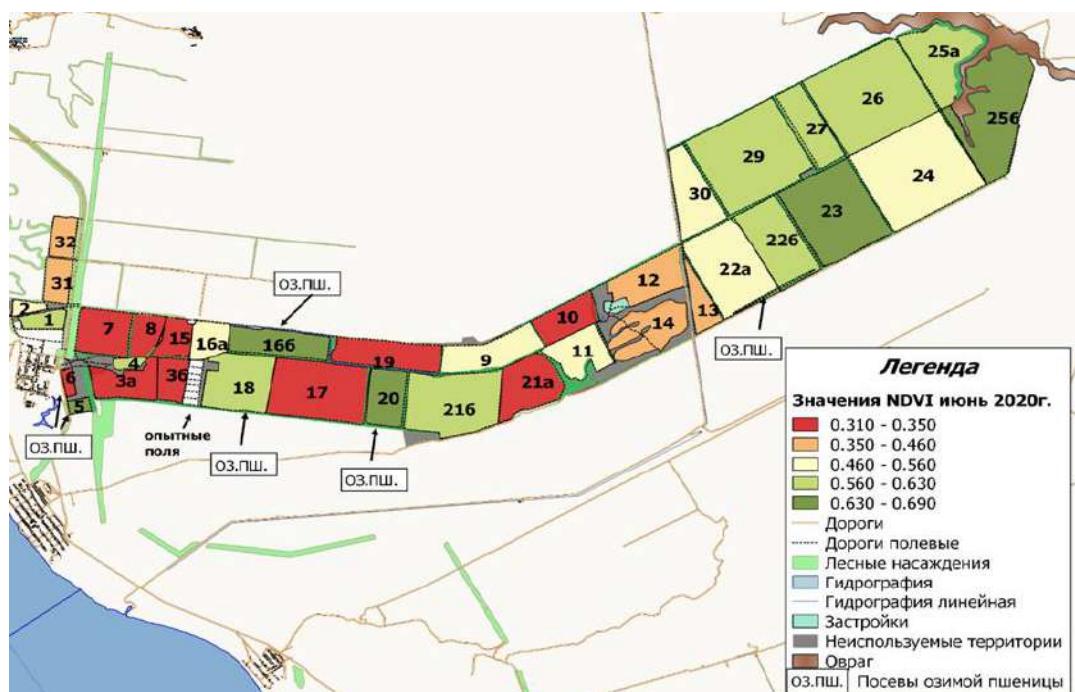


Рис. 6. Картограмма показателя NDVI в июне 2020 года на территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет

Fig. 6. Map of the indicator NDVI in the territory of UNPO «Volga region» FSBOU VO Vavilov University, June 2020

Уравнение регрессии – это математическая формула, применяемая к независимым переменным, чтобы лучше спрогнозировать зависимую переменную, которую необходимо смоделировать [Абдурагимов, 2019; Аввакумова, 2020].

Регрессионный анализ для показателей данных дистанционного зондирования на территорию УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет представлен в табл. 2.

Анализ результатов выглядит следующим образом:  $R^2$  – коэффициент детерминации, показывающий, что на 98,03 % расчетные параметры многофакторного анализа объясняют зависимость и изменения урожайности озимой пшеницы –  $Y$  от исследуемых климатогеографических факторов –  $X$ .

В данной модели использованы четыре показателя модели, соответственно, 4 коэффициента, которые характеризуют степень влияния. Температура в пределах данной модели влияет на число урожайности с весом 0,048 (это небольшая степень влияния), влажность почвы в слое 40–100 см в пределах данной модели влияет на число урожайности с весом – 0,395 (это небольшая степень влияния), знак «–» указывает на отрицательное влияние: чем больше влажность почв, тем меньше урожайность. Осадки в пределах данной модели влияют на урожайность с весом 0,135 (это небольшая степень влияния). Уровень NDVI в пределах данной модели влияет на число урожайности с весом 58,434, что соответствует высокому влиянию.

В результате получается следующее уравнение:

$$Y = -25,231 + 0,048 x_1 + (-0,395 x_2) + 0,135 x_3 + 58,434 x_4,$$

где  $Y$  – прогнозируемая урожайность озимой пшеницы;

$x_1$  – количество температуры за весенне-летний период созревания, °C;

$x_2$  – влажность почв в горизонте (40–100 см) за весенне-летний период созревания, %;

$x_3$  – осадки за весенне-летний период созревания озимой пшеницы, мм;

$x_4$  – показатель NDVI за весенне-летний период созревания.

В результате анализа многофакторной модели расчетные данные показали наибольшую важность применения индекс NDVI при прогнозировании урожайности [Pisman et al., 2015]. Связано это с высокой степенью влияния, рассчитанной в корреляционно-регрессионном анализе. Также из уравнения регрессии видно, что наибольшую точность по прогнозу урожайности возможно получить при учете совокупности зависимых показателей.

Важно то, что получить значение вегетационного индекса возможно по данным спутниковых систем оперативно, что позволяет проанализировать их и принять соответствующие меры. В случае получения значений NDVI меньше нормативной границы в определенный месяц необходимы различные мероприятия по повышению урожайности (орошение, дифференцированное внесение удобрений и т.д.).

В ходе разработки проекта было выявлено, что при организации производства озимой пшеницы становится важным оценить показатель NDVI в период апрель – июнь и другие климатические показатели для получения общей картины. Это позволит правильно спрогнозировать не только будущую урожайность, но и мероприятия для ее улучшения. Сам этап прогнозирования должен включать в себя все структурные элементы, такие как: сбор данных ДЗЗ, их обработка и анализ, а также анализ территории при создании цифровой кадастровой модели.

Таблица 2  
 Table 2

Регрессионный анализ урожайности озимой пшеницы  
 на территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет  
 Regression analysis of winter wheat yield in the territory  
 of UNPO «Volga Region» FSBOU VO Vavilov University

ВЫВОД ИТОГОВ						
Регрессионная статистика						
Множественный R		0,990				
$R^2$		0,980				
Нормированный $R^2$		0,902				
Стандартная ошибка		3,388				
Наблюдения		6				
Дисперсионный анализ						
Показатели	Степени свободы	Сумма квадратов отклонений	Дисперсия	F-статистика	Значимость F	
Регрессия	4	573,099	143,275	12,482	0,209	
Остаток	1	11,478	11,478	—	—	
Итого	5	584,578	—	—	—	
Статистические показатели						
Переменные	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Нижние 95%	Верхние 95%
Y-пересечение	-25,231	44,680	-0,565	0,673	-592,939	542,476
Количество температуры за весенне-летний период созревания	0,048	2,049	0,023	0,985	-25,986	26,082
Влажность почв в горизонте (40–100 см) за весенне-летний период созревания	-0,395	0,693	-0,570	0,670	-9,197	8,407
Осадки за весенне-летний период созревания озимой пшеницы	0,135	0,037	3,640	0,171	-0,335	0,605
Показатель NDVI за весенне-летний период созревания	58,434	21,474	2,721	0,224	-214,421	331,288
					-214,421	331,288

## Заключение

Таким образом, данные дистанционного зондирования Земли являются основой для прогнозирования урожайности на перспективу. Спрогнозировать наиболее вероятное значение урожайности возможно только при учете совокупности данных дистанционного зондирования Земли, от которых находится в прямой зависимости урожайность (NDVI, осадки, влажность почв, температура воздуха). В ходе работы были исследованы данные дистанционного зондирования Земли территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет с помощью статистических методов. В процессе исследования были выполнены все задачи. Произведен анализ территории УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет с учетом рельефа местности, территориального расположения, типов почв и климатических данных. При анализе территории были созданы соответствующие картографические материалы. Была создана цифровая кадастровая модель с использованием достоверных кадастровых данных, что позволило выявить и перераспределить неиспользуемые, но пригодные земли для сельскохозяйственной обработки в качестве рабочих участков.

Рекомендации: при ведении сельскохозяйственной деятельности и возделывании культур на территории землепользования рекомендуется обратить внимание на показатель NDVI в период апрель – июнь, потому что его влияние на урожайность наиболее весомое и с помощью мониторинга данного показателя можно спрогнозировать не только будущую урожайность, но и мероприятия для ее увеличения.

## Список литературы

- Абдурагимов Г.Э. 2019. Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур с помощью методов регрессионного анализа. В кн.: Проблемы экологического образования в XXI веке. Труды III Международной научной конференции (очно-заочной), посвященной 100-летию Педагогического института, Владимир, 06 декабря 2019. Владимир, Владимирский государственный университет: 293–294.
- Аввакумова А.О. 2020. Математическое моделирование факторов эрозии почв на пахотных землях (на примере территории Республики Татарстан). Региональные геосистемы, 44(1): 5–15. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-1-5-15.
- Аввакумова А.О. 2018. Анализ динамики структуры землепользования на основании данных дистанционного зондирования Земли. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 42(2): 214–222. DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-2-214-222.
- Богомазов С.В., Разина А.Ю. 2019. Применение вегетационного индекса NDVI в мониторинге земель сельскохозяйственного назначения. В кн.: Организационно-методические аспекты повышения качества образовательной деятельности и подготовки обучающихся по программам высшего и среднего профессионального образования. Сборник статей Всероссийской (национальной) научно-методической конференции, Пенза, 04–05 декабря 2019. Пенза, РИО ПГАУ: 12–15.
- Белорусцева Е.В. 2013. Мониторинг земель сельскохозяйственного назначения Нечерноземья с применением ГИС-технологий. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Москва, 151 с.
- Воротников И.Л., Нейфельд В.В. 2018. Эффективность применения цифровых технологий в управлении земельными ресурсами муниципальных образований Саратовской области. Аграрный научный журнал, 6: 76–81. DOI: 10.28983/asj.v0i6.510.
- Данилушкина Э.И. 2020. Цифровые решения для сельского хозяйства. Современные инструменты, методы и технологии управления знаниями, 3: 61–65.
- Кононенко С.М., Старостина Т.В., Топоров В.М. 2019. Спутниковые данные в прогнозе урожайности пшеницы для районов Кемеровской области. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, 4(1): 11–18. DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-11-18.
- Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. 2015. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 12(5): 263–284.

- Меденников В.И., Муратова Л.Г. 2019. Цифровая платформа дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве России. В кн.: Научно-техническое обеспечение агропромышленного комплекса в реализации государственной программы развития сельского хозяйства до 2020 года. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Курган, 18–19 апреля 2019. Курган, Курганская ГСХА: 848–853.
- Михайленко И.М. 2017. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. СПб., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 252 с.
- Нейфельд В.В., Кадомцева М.Е., Осовин М.Н. 2021. Мониторинг климатических изменений и их влияние на зерновое производство Саратовской области с использованием данных дистанционного зондирования. Аграрный научный журнал, 10: 35–41.  
DOI: 10.28983/asj.y2021i10pp35-41.
- Сальников С.Г., Тухина Н.Ю. 2018. Геоинформационные системы как базовая система информационного обеспечения сельского хозяйства. Вестник московского гуманитарно-экономического института, 4: 100–103.
- Федулов Ю.П., Подушин Ю.В., Мязина А.Н., Чухиль А.А., Сафонова Т.Г. 2016. Связь нормализованного индекса вегетации (NDVI) с урожайностью посевов озимой пшеницы. В кн.: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам 71-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2015 год, Краснодар, 09 февраля 2016. Краснодар, КубГАУ: 106–107.
- Царенко А.А., Шмидт И.В. 2014. Спектр задач, решаемых в сфере управления сельскими территориями на основе фактических данных кадастра недвижимости. Естественные и технические науки, 2(70): 139–142.
- Царенко А.А., Шмидт И.В., Латыпова А.М. 2019. Управление развитием сельских территорий на основе цифровой информационной модели. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 43(3): 263–275.  
DOI: 10.18413/2075-4671-2019-43-3-263-275.
- Якушев В.П. 2019. Цифровые технологии точного земледелия в реализации приоритета «умное сельское хозяйство» России. Вестник российской сельскохозяйственной науки, 2: 11–15.  
DOI: 10.30850/vrsn/2019/2/11-15.
- Pisman T.I., Botvich I.Y., Sidko A.F. 2015. Assessment of Agroecosystem Productivity Based on Satellite Data and a Mathematical Model. Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies, 1(8): 133–140.

## References

- Abduragimov G.E. 2019. Prediction of Yield Grain and Leguminous Crops in Regression Analysis. In: Problemy jekologicheskogo obrazovanija v XXI veke [Problems of Environmental Education in the XXI Century]. Proceedings of the III International Scientific Conference (part-time) dedicated to the 100th anniversary of the Pedagogical Institute, Vladimir, 06 December 2019. Vladimir, Pabl. Vladimirskij gosudarstvennyj universitet: 293–294 (in Russian).
- Avvakumova A.O. 2020. Mathematical Modeling of Soil Erosion Factors on Agricultural Lands (on the Territory of the Republic of Tatarstan). Regional Geosystems, 44(1): 5–15 (in Russian).  
DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-1-5-15.
- Avvakumova A.O. 2018. Land-Use Structure Dynamics Analysis Using the Earth Remote Sensing Data. Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences series, 42(2): 214–222 (in Russian).  
DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-2-214-222.
- Bogomazov S.V., Razina A.Y. 2019. Application of Vegetation Index NDVI in the Monitoring of Agricultural Land Appointments. In: Organizacionno-metodicheskie aspekty povyshenija kachestva obrazovatel'noj dejatel'nosti i podgotovki obuchajushhihsja po programmam vysshego i srednego professional'nogo obrazovanija [Organizational and methodological aspects of improving the quality of educational activities and preparing students for programs of higher and secondary vocational education]. Collection of articles of the All-Russian (national) scientific and methodological conference, Penza, 04–05 December 2019. Penza, Pabl. RIO PGAU: 12–15 (in Russian).

- Belorusceva E.V. 2013. Monitoring zemel' sel'skohozjajstvennogo naznachenija Nechernozem'ja s primeneniem GIS-tehnologij [Monitoring of Agricultural Lands of the Non-Chernozem Region Using GIS Technologies]. Abstract. dis. ... cand. geogr. sciences. Moscow, 151 p.
- Vorotnikov I.L., Neyfeld V.V. 2018. The Efficacy of Digital Technology in Land Administration of Municipalities of the Saratov Region. The Agrarian Scientific Journal, 6: 76–81 (in Russian). DOI: 10.28983/asj.v0i6.510.
- Danilushkina E. I. 2020. Digital Solutions for Agriculture. Modern Tools, Methods and Technologies of Knowledge Management, 3: 61–65 (in Russian).
- Kononenko S.M., Starostina T.V., Toporov V.M. 2019. Satellite Data in Forecast for Wheat Yield for Areas of the Kemerovo Region Interexpo GEO-Siberia, 4(1): 11–18 (in Russian). DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-1-11-18.
- Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sydneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A. 2015. IKI Center for Collective Use of Satellite Data Archiving, Processing and Analysis Systems Aimed at Solving the Problems of Environmental Study and Monitoring. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 12(5): 263–284 (in Russian).
- Medennikov V.I., Muratova L.G. 2019. The Digital Platform of Remote Sensing of the Earth in Agriculture of Russia. In: Nauchno-tehnicheskoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa v realizacii gosudarstvennoj programmy razvitiya sel'skogo hozjajstva do 2020 goda [Scientific and technical support of the agro-industrial complex in the implementation of the state program for the development of agriculture until 2020]. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference, Kurgan, 18–19 April 2019. Kurgan, Pabl. Kurganskaja GSHA: 848–853 (in Russian).
- Mihailenko I.M. 2017. Teoreticheskie osnovy i tehnicheskaja realizacija upravlenija agrotehnologijami [Theoretical Foundations and Technical Implementation of Agricultural Technology Management]. St. Petersburg, Pabl. Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy universitet Petra Velikogo", 252 p. (in Russian).
- Neufeld V.V., Kadomtseva M.E., Osovina M.N. 2021. Monitoring of Climatic Changes and Their Impact on Grain Production in the Saratov Region Using Remote Sensing Data. The Agrarian Scientific Journal, 10: 35–41 (in Russian). DOI: 10.28983/asj.y2021i10pp35-41.
- Salnikov S.G., Tukhina N.Y. 2018. Geo-Information Systems as a Base of Information Management Systems in Agriculture. Vestnik Moscow Humanities and Economics Institute, 4: 100–103. (in Russian).
- Fedulov Y.P., Podushin Y.V., Miazina A.N., Chuhil A.A., Safonova T.G. 2016. Correlations Between Normalized Vegetation Index (NDVI) and Winter Wheat Yields. In: Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa [Scientific support of the agro-industrial complex]. Collection of articles based on the materials of the 71st scientific and practical conference of teachers following the results of research for 2015, Krasnodar, 09 February 2016. Krasnodar, Pabl. KubGAU: 106–107 (in Russian).
- Tsarenko A.A., Shmidt I.V. 2014. Spektr zadach, reshaemyh v sfere upravlenija sel'skimi territorijami na osnove fakticheskikh dannyh kadastra nedvizhimosti [The Range of Tasks Solved in the Field of Rural Area Management Based on the Actual Data of the Real Estate Cadastre]. Estestvennye i tehnicheskie nauki, 2(70): 139–142 (in Russian).
- Tsarenko A.A., Shmidt I.V., Latypova A.M. 2019. Management of Development of Rural Territories on the Basis of Digital Information Model. Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series, 43(3): 275–263 (in Russian). DOI: 10.18413/2075-4671-2019-43-3-263-275.
- Yakushev V.P. 2019. Digital Technologies of Precision Farming in Implementation of Smart Farming Priority of Russian. Vestnik of the Russian agricultural sciences, 2: 11–15 (in Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/2/11-15.
- Pisman T.I., Botvich I.Y., Sidko A.F. 2015. Assessment of Agroecosystem Productivity Based on Satellite Data and a Mathematical Model. Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies, 1(8): 133–140.

Поступила в редакцию 05.09.2022;  
поступила после рецензирования 05.10.2022;  
принята к публикации 15.11.2022

Received September 05, 2022;  
Revised October 05, 2022;  
Accepted November 15, 2022



**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Шмидт Ирина Владимировна**, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

**Латыпова Анна Мустафаевна**, магистрант, ФГБОУ ВО Вавиловский университет, Саратов, Россия

**Царенко Аксана Анатольевна**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры «Землеустройство и кадастры», ФГБОУ ВО Вавиловский университет, Саратов, Россия

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Irina V. Shmidt**, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

**Anna M. Latypova**, graduate student of the Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov, Russia

**Aksana A. Tsarenko**, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Land Management and Cadastres of the Saratov State Vavilov Agrarian University, Saratov, Russia