

Научная статья

Original article

УДК 004.932.2+632.08

DOI 10.55186/25876740_2022_6_6_3

**ИНФОРМАЦИОННОЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЙ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ВНЕСЕНИЯ
АГРОХИМИКАТОВ**

**INFORMATION AND INSTRUMENTAL SUPPORT OF SITE-SPECIFIC
MANAGEMENT FOR AGROCHEMICALS**



Митрофанов Евгений Павлович, младший научный сотрудник, Агрофизический научно-исследовательский институт, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный университет, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1967-5126>, mjeka89@gmail.com

Митрофанова Ольга Александровна, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Агрофизический научно-исследовательский институт, доцент кафедры технологии программирования, Санкт-Петербургский государственный университет, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7059-4727>, omitrofa@gmail.com

Evgeny P. Mitrofanov, junior researcher, Agrophysical Research Institute, senior lecture, St. Petersburg State University, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1967-5126>, mjeka89@gmail.com

Olga A. Mitrofanova, candidate of technical sciences, junior researcher, Agrophysical Research Institute, associate professor of department of programming technology, St.

Petersburg State University, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7059-4727>,
omitrofa@gmail.com

Аннотация. Технологии точного земледелия позволяют существенно повысить качество и объемы продукции, при этом снижая негативное воздействие на окружающую среду. Достигается это за счет внесения оптимальных доз агрохимикатов на каждом элементарном участке поля благодаря совместному использованию данных дистанционного зондирования, агрохимических, метеоданных и др., а также благодаря модернизации сельскохозяйственной техники (применение бортового компьютера, датчиков, системы параллельного вождения и т.п.). Целью исследования являлась разработка комплекса подходов для информационного и инструментального обеспечения технологий дифференцированного внесения агрохимикатов с использованием отечественных готовых решений, а также открытых библиотек и программ. Объектом исследования являются два опытных сельскохозяйственных поля, которые входят в состав биополигона Агрофизического института (произрастающие культуры – зерновые). Эксперименты проводятся с 2019 года с использованием отечественной беспилотной авиационной системы Геоскан-401. Результатом информационного обеспечения агротехнологии представляется специализированная карта-задание, которая загружается в бортовой компьютер сельскохозяйственной техники для последующего внесения определенной дозы азота на каждом элементарном участке. Карта строится на основе выделения однородных технологических зон методами контролируемой классификации. На заключительном этапе реализации предложенного подхода важной составляющей является система параллельного вождения, позволяющая наиболее эффективно охватывать территорию (без пропусков, без двукратного внесения в одну и ту же зону). В качестве базы для создания прототипа аналоговой системы параллельного вождения была выбрана открытая технология AgOpenGPS с бесплатным программным обеспечением. С 2019 года для представленных опытных сельскохозяйственных полей было

собрано и обработано более 20 000 исходных снимков. В результате для применения методов машинного обучения с целью выделения однородных технологических зон были сформированы более 20 многослойных ортофотопланов. Отработан предложенный подход по информационному обеспечению дифференцированных технологий, а также реализован и протестирован прототип отечественного аналога системы параллельного вождения.

Abstract. Precision farming technologies can significantly improve the production quality and volume, while reducing the negative impact on the environment. This is achieved through the application of optimal agrochemicals doses in each elementary field zone through the joint use of remote sensing data, agrochemical, weather data, etc., as well as through the modernization of agricultural machinery (the use of an on-board computer, sensors, parallel driving systems, etc.). The aim of the study was to develop a set of approaches for information and instrumental support of site-specific management using native ready-made solutions, as well as open libraries and programs. The object of the study are two experimental agricultural fields, which are part of the Agrophysical Institute biopolygon (growing crops - cereals). Experiments have been carried out since 2019 using the native unmanned aerial system Geoscan-401. The result of the information support of agricultural technology is a specialized task map, which is loaded into the on-board computer of agricultural machinery for the subsequent application of a certain nitrogen dose in each elementary zone. The map is built on the basis of the allocation of homogeneous technological zones by methods of controlled classification. At the final stage of the implementation of the proposed approach, an important component is the parallel driving system, which allows the most efficient coverage of the territory (without passes, without entering the same zone twice). AgOpenGPS open technology with free software was chosen as the basis for creating a prototype of an analog parallel driving system. Since 2019, more than 20,000 source images have been collected and processed for the presented experimental agricultural fields. As a result, more than 20 multilayer orthophotomaps were generated to apply machine learning methods to identify

homogeneous technological zones. The proposed approach for information support of differentiated technologies has been worked out, and a prototype of the native analogue of the parallel driving system has been implemented and tested.

Ключевые слова: точное земледелие, дифференцированные технологии, беспилотная авиационная система, система параллельного вождения, ортофотоплан, зерновые.

Keywords: precision farming, site-specific management, unmanned aerial system, parallel driving system, orthophotomap, cereals.

Введение

Обеспечение продовольственной безопасности является актуальной проблемой, тем более в условиях таких отягощающих факторов, как экономический кризис, пандемия, рост мирового населения, санкционное давление и т.п. Технологии точного земледелия (ТЗ) позволяют максимизировать урожайность и качество продукции, при этом минимизируя расход ресурсов и негативное воздействие на окружающую среду [1]. Развитие информационных технологий способствует появлению принципиально новых подходов решения задач ТЗ: геоинформационные системы [3], базы больших геопространственных данных [4], интернет вещей [2] и др.

В агропромышленном комплексе активно применяются удобрения и пестициды, для зерновых культур существенную долю вносимых агрохимикатов составляют азотсодержащие удобрения [5]. При этом несмотря на высокий уровень научно-технического развития агротехнологий внесение удобрений и пестицидов часто представляется малоэффективным (нарушаются дозы внесения, некорректно используются методики внесения и т.п.). В связи с этим актуальным направлением исследований является развитие методов и инструментария информационного обеспечения технологий дифференцированного применения агрохимикатов, которые позволяют автоматизировать ряд важных процессов производства растениеводческой продукции.

Для реализации агроопераций ТЗ, в первую очередь, необходимо решать задачу оценки обеспеченности растений полезными веществами (например, азотом) [6]. В этом направлении хорошо себя зарекомендовало использование высококачественных данных аэрофотосъемки [7, 8]. Для построения карт-заданий с целью последующего дифференцированного внесения удобрений применяются различные методы искусственного интеллекта (регрессионный анализ, машинное обучение, нейросетевые технологии и т.п.) [9-11]. Соответственно, в связи с тем, что исходная информация представлена в качестве больших геопространственных данных, возникают дополнительные этапы реализации технологий ТЗ: создание специализированных баз, геоинформационных и интеллектуальных систем и т.п.

В результате полученная карта загружается в бортовой компьютер трактора для последующего дифференцированного внесения агрохимикатов. На этом этапе реализации подхода возникает дополнительная задача, связанная с эффективным управлением техникой. Известно, что качество планирования пути, выполнения разворотов и т.п. существенно влияет на потери урожайности [12]. Применение автоматизированных систем параллельного вождения позволяет избежать агротехнологических ошибок и оптимально использовать имеющиеся ресурсы [13-15]. Зарубежные коммерческие решения хорошо себя зарекомендовали (например, Topcon, Amazon), однако для их внедрения в России существуют серьезные препятствия: санкционное давление, работа на базе зарубежного программного обеспечения, отсутствие поддержки пользователей, геопространственное ориентирование по GPS и т.п. Даже несмотря на бурное развитие этого направления в зарубежных исследованиях разработки собственных систем остаются актуальной проблемой [16-18]. В отечественной индустрии также появляются предложения (например, Агронавигатор), однако и они имеют ряд недостатков: дороговизна, сложность настройки, низкий уровень сопровождения, отсутствие развитой сети сервисных центров и т.п. В Агрофизическом научно-исследовательском институте (АФИ) с 2019 года для проведения исследований, связанных с дифференцированными технологиями внесения агрохимикатов,

проводятся попытки использования отечественного аналога, однако выявленные негативные аспекты указывают на актуальность разработок в этом направлении.

Таким образом, внесение оптимальных доз удобрений на каждом элементарном участке поля достигается, прежде всего, благодаря совместному использованию данных дистанционного зондирования, агрохимических, метеоданных и др., а также благодаря модернизации сельскохозяйственной техники (применение бортового компьютера, датчиков, системы параллельного вождения и т.п.) [19].

Целью данного исследования являлась разработка комплекса подходов для информационного и инструментального обеспечения технологий дифференцированного внесения агрохимикатов с использованием отечественных готовых решений, а также открытых библиотек и программ.

Объекты и методы

Объектом исследования являются несколько опытных сельскохозяйственных полей, которые входят в состав многопрофильного комплекса, расположенного в Ленинградской области (д. Меньково, Гатчинский р-н), состоящего из 29 полей общей площадью 538 га. Большая часть территории биополигона занята экспериментальными исследованиями, согласно принятой в АФИ нумерации полей для решения задач, связанных с технологиями точного земледелия, задействованы 9 и 26 поля, 23,5 га и 39 га соответственно (рис. 1). Основные произрастающие культуры на этих полях – зерновые. Научно-исследовательские работы данного направления проводятся на этих участках с 2019 года, также отработывались технологии точного земледелия в период с 2006 до 2012 года.

Все исследования в области дифференцированного внесения агрохимикатов осуществлялись на примере азотных удобрений в связи с тем, что они являются основным видом управленческого воздействия на продукционный процесс зерновых посевов. Для построения необходимых карт-заданий был выбран метод

выделения однородных технологических зон по аэрофотоснимкам [20, 21], как наиболее изученный и оперативный.

Для применения методов машинного обучения и получения более точных результатов оценки обеспеченности посевов азотом необходимо также формирование тестовой (обучающей) выборки. С этой целью ежегодно в период проведения многолетних опытов на каждом поле дополнительно закладывались так называемые тестовые площадки, которые представляют из себя ровные небольшие участки посевов с известной контролируемой дозой азота (рис. 2). Оптические показатели таких растений используются в качестве эталонных.



Рисунок 1. Два опытных сельскохозяйственных поля, входящих в состав биополигона АФИ (Ленинградская обл., Гатчинский р-н, д. Меньково)

Figure 1. Two experimental agricultural fields that are part of the ARI biopolygon (Leningrad region, Gatchinsky district, Menkovo village)

Таким образом, крайне важным этапом реализации технологий дифференцированного внесения удобрений является сбор и подготовка данных аэрофотосъемки, во многом точность результатов построения карты-задания зависит от корректности и качества исходного датасета.

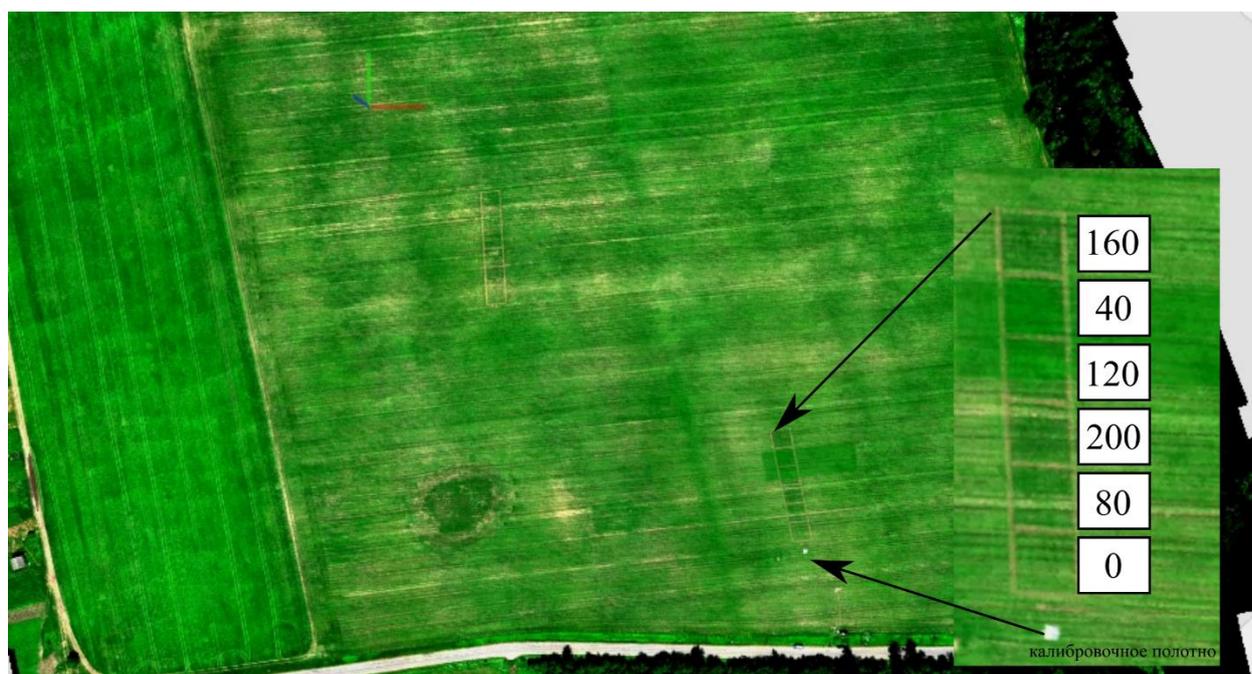


Рисунок 2. Тестовые площадки, размещенные на 26 опытном поле экспериментального комплекса АФИ (дата съемки: 23 июня 2022 г., культура: яровая пшеница), указанные числа – кг действующего вещества на 1 га

Figure 2. Test sites located on the 26th experimental field of the ARI experimental complex (shooting date: June 23, 2022, crop: spring wheat), indicated numbers are kg of active substance per 1 ha

Помимо информационного обеспечения таких технологий актуальной остается и инструментальная часть: беспилотный летательный аппарат (БЛА) для проведения аэрофотосъемки и система параллельного вождения для эффективной работы сельскохозяйственной техники. В опытах, связанных с дифференцированными технологиями, которые проводились в период с 2006 до 2012 года, в АФИ использовался радиоуправляемый самолет собственной сборки. Несмотря на то, что он позволял получать снимки высокого качества в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, имелись и существенные недостатки: необходимость дополнительной обработки изображений, геопространственная привязка осуществлялась только по наземным реперным точкам и т.п. В России в последние десятилетия производство БЛА наладилось и для гражданских сфер

применения, при этом представленные на рынке предложения обладают высокой конкурентоспособностью в мировом масштабе. На основе анализа отечественных разработок в 2015 году была приобретена беспилотная авиационная система (БАС) Геоскан-401 (рис. 3), благодаря которой значительно выросло качество подготовки датасетов.

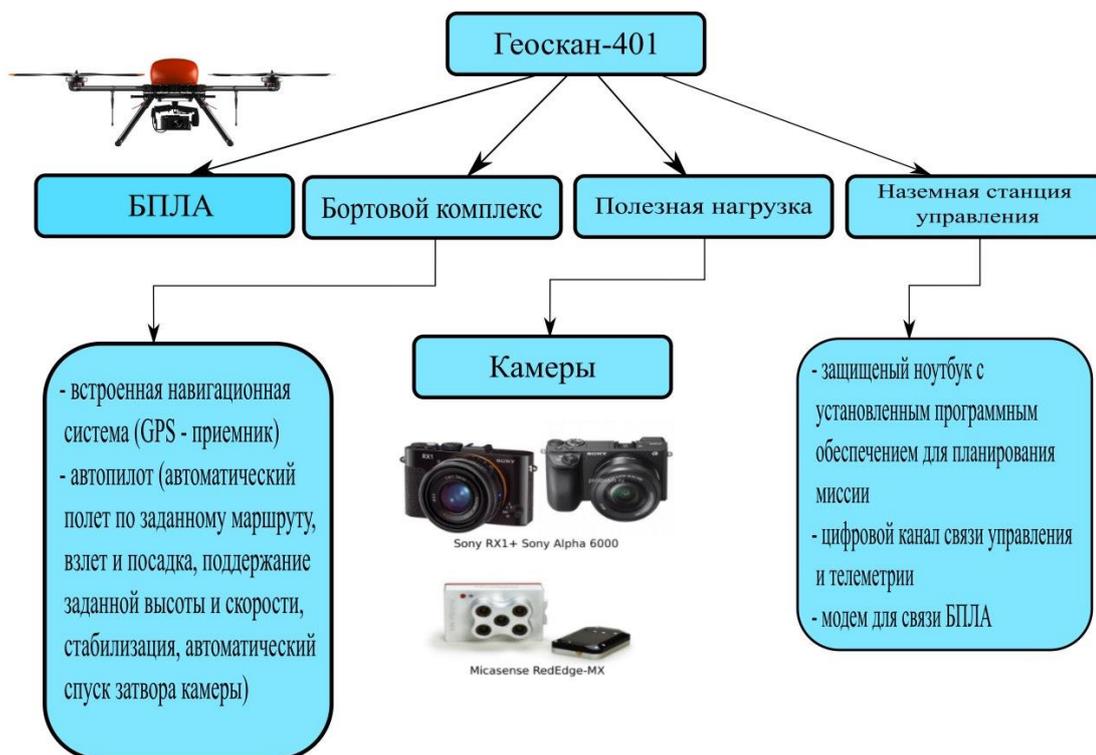


Рисунок 3. Беспилотная авиационная система Геоскан-401 (г. Санкт-Петербург)

Figure 3. Unmanned aerial system Geoscan-401 (St. Petersburg)

Сбор данных аэрофотосъемки осуществляется в соответствии с выработанным алгоритмом: выбор даты полета в зависимости от погодных условий, подготовка оборудования, построение плана полета, сопровождение полета и т.п. Предварительная обработка полученных мозаик снимков выполняется в программе Metashape (поставляется в комплекте с БАС), в результате которой формируются высококачественные геопривязанные ортофотопланы.

В отличие от БЛА отечественное производство систем параллельного вождения имеет ряд недостатков: дороговизна, ограниченный выбор производителей, техническое обслуживание на низком уровне и т.п. При этом в связи с возникшим санкционным давлением и экономическим кризисом у многих потенциальных покупателей возникли непреодолимые сложности с покупкой зарубежных решений, а обладатели таких систем столкнулись с проблемой дальнейшего обслуживания. В связи с этим актуальной остается задача разработки своего аналога, адаптированного для использования на отечественной сельскохозяйственной технике. На основе анализа существующих подходов для подобных разработок в качестве базы для создания прототипа аналоговой системы параллельного вождения была выбрана открытая технология AgOpenGPS с бесплатным программным обеспечением [22].

Результаты и обсуждение

С 2019 года для представленных опытных сельскохозяйственных полей было собрано и обработано более 20 000 исходных снимков. В результате для применения методов машинного обучения с целью выделения однородных технологических зон были сформированы более 20 многослойных ортофотопланов, в том числе более 10 размеченных. Каждый элемент датасета с обучающей выборкой состоит из семи слоев: красный, зеленый, синий, ближний инфракрасный, красный край, карта распределения индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), а также shape-слой с тестовыми площадками, где каждой площадке назначен соответствующий атрибут (известная доза азота).

Предобработанный ортофотоплан на следующем этапе используется для выделения однородных технологических зон, при этом ввиду универсальности датасета могут применяться различные методы, в том числе и искусственного интеллекта. На рисунке 4 представлен пример контролируемой классификации (с обучением) на основе машинного обучения (метод минимальных расстояний) для 9го поля, дата съемки: 02.07.2021, произрастающая культура – яровая пшеница.

На следующем этапе на основе полученного результата создается специализированная карта-задание, которая загружается в бортовой компьютер сельскохозяйственной техники и вносятся соответствующие дозы удобрения на каждый элементарный участок поля (размеры сетки задаются в зависимости от ширины захвата разбрасывателя).

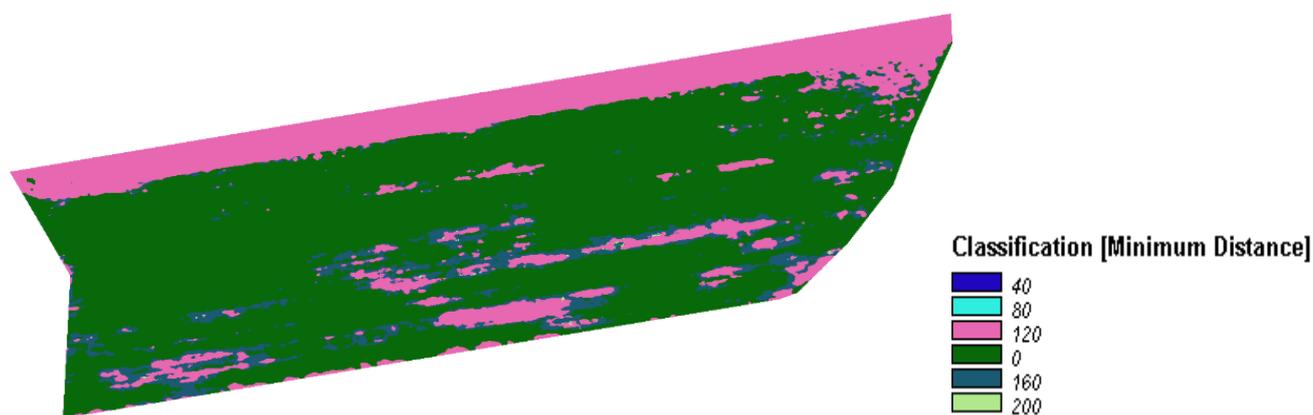


Рисунок 4. Пример выделения однородных технологических зон методом минимальных расстояний (поле 9, дата съемки: 02.07.2021, культура – яровая пшеница)

Figure 4. An example of the allocation of homogeneous technological zones by the method of minimum distances (field 9, shooting date: 07/02/2021, crop - spring wheat)

Как уже упоминалось выше, на заключительном этапе реализации дифференцированной технологии внесения удобрений важной составляющей является система параллельного вождения, позволяющая наиболее эффективно охватывать территорию (без пропусков, без двукратного внесения в одну и ту же зону). В ходе представленного исследования одной из целей ставилась сборка прототипа зарубежного аналога. Для решения этой задачи были выполнены следующие этапы:

1. Сборка блока управления. Была выбрана схема платы, позволяющая взаимодействовать с мотором, сеялкой, разбрасывателем и датчиками ориентации

в пространстве – минимальный необходимый набор для реализации технологий точного земледелия. Базовая плата была изготовлена по индивидуальному заказу в компании Resonon. После этого были подобраны компоненты, удовлетворяющие требуемым характеристикам, осуществлена сборка всех элементов в один блок.

2. Выбор датчиков. Для реализации функционала системы были выбраны три основных датчика: угла поворота, а также два датчика ориентации в пространстве (девятиосевой IMU, RTK Rover).

3. Сборка механизма передачи на руль. Основные элементы, которые были подготовлены на данном этапе: мотор 12 В с редуктором, шестерни передачи на руль (были распечатаны из пластика на 3D-принтере Flying Bear Ghost 5), а также сам руль.

4. Настройка бортового компьютера. Для прототипного образца был приобретен планшет Dell Latitude 7285, на котором была установлена и настроена бесплатная программа с открытым исходным кодом AgOpenGPS.

5. Тестирование прототипа. На завершающем этапе был осуществлен сбор всей системы (на рисунке 5 представлены элементы системы по отдельности), а также настройка комплекса. Предварительное тестирование было проведено в лабораторных условиях, протестированы отклики датчиков, пыле- и влагозащитные свойства блока управления, прочность шестерен, а также отработка всей системы на имитационных маршрутах. Все задачи были выполнены комплексом корректно.

После полевых тестирований, а также модернизации системы для корректной работы на отечественной сельскохозяйственной технике, получим полноценную практическую реализацию предлагаемого комплекса информационного и инструментального обеспечения (рис. 6).

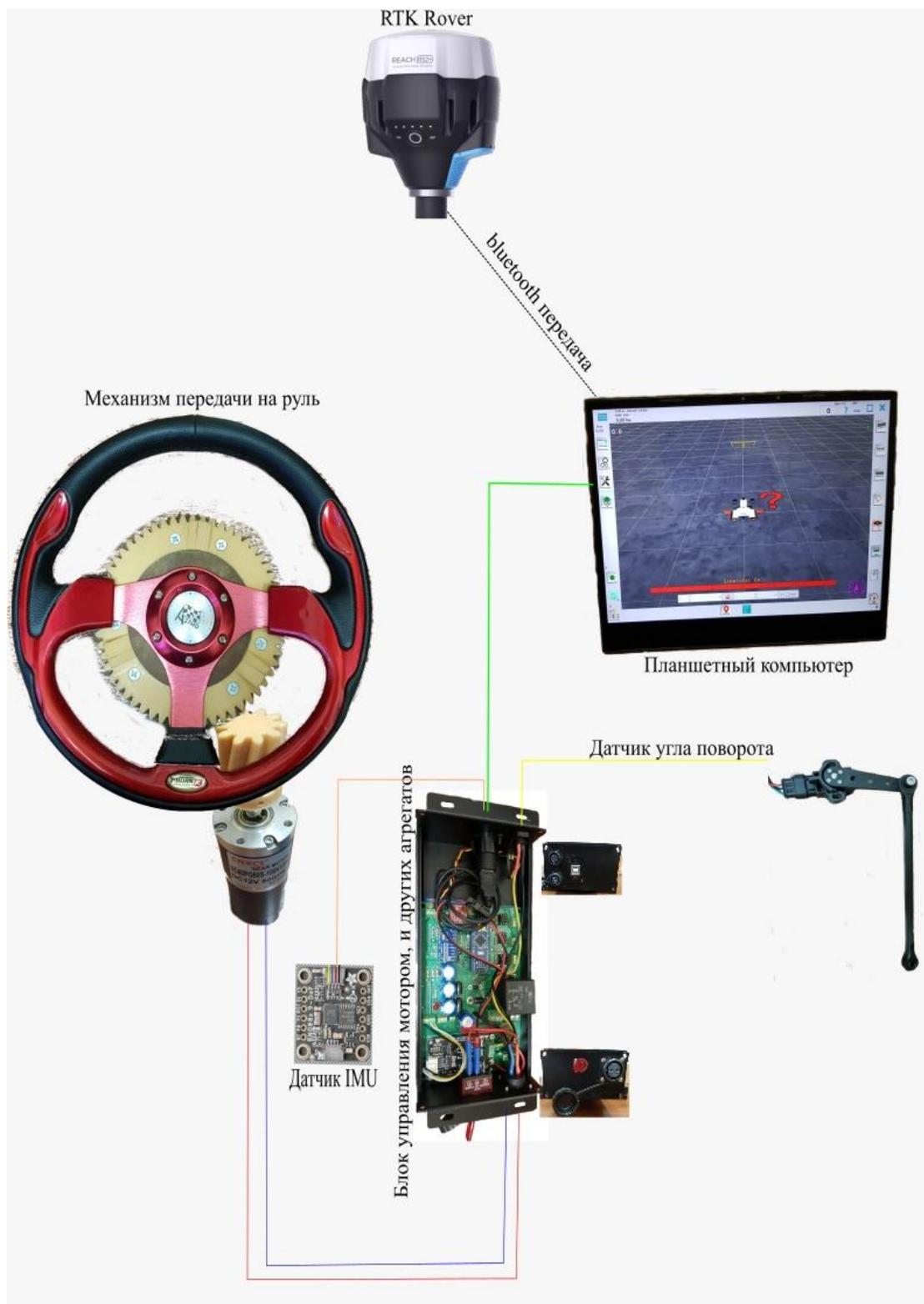


Рисунок 5. Элементы прототипа системы параллельного вождения на основе открытых технологий

Figure 5. Elements of a prototype parallel driving system based on open technologies

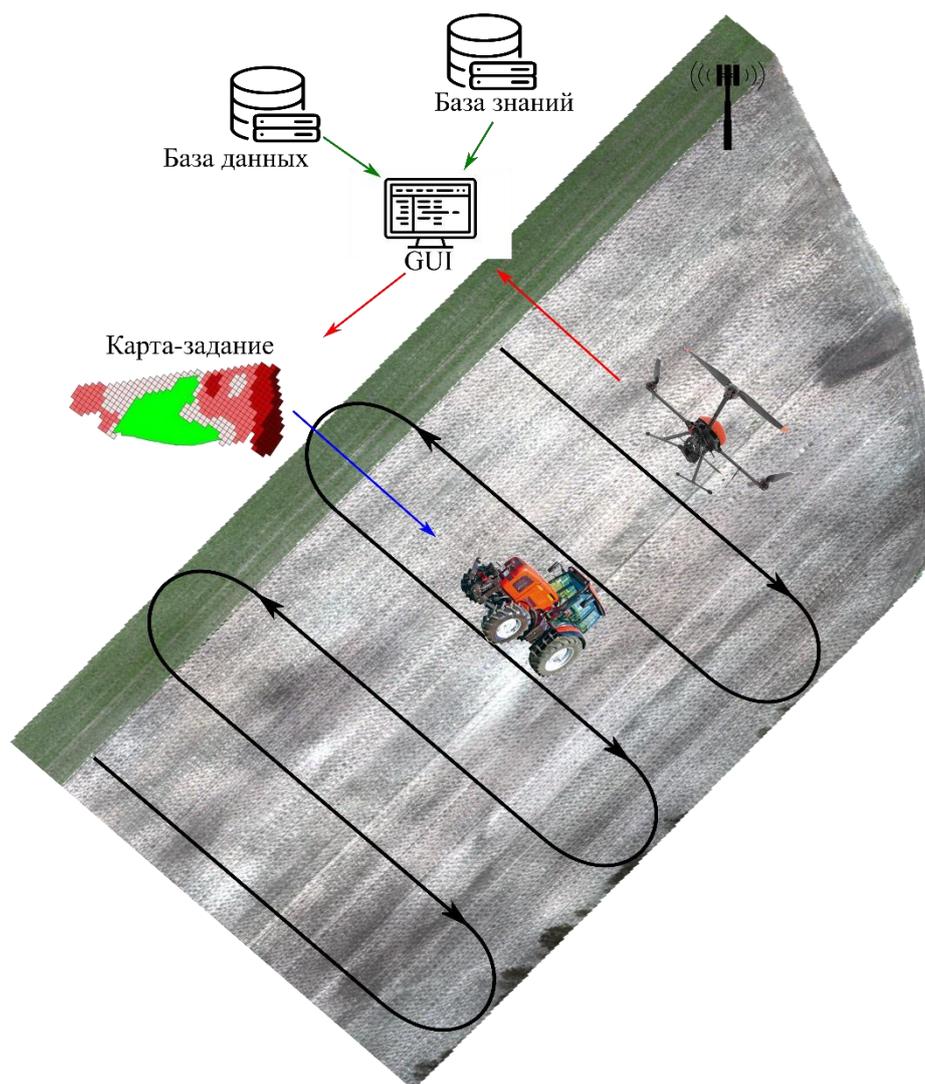


Рисунок 6. Реализация дифференцированной технологии внесения удобрений
 Figure 6. Implementation of differentiated fertilizer application technology

Заклучение

Таким образом, предложенный комплекс подходов к сопровождению технологий точного земледелия состоит из двух аспектов: информационный и инструментальный. В качестве исходных данных используются предобработанные ортофотопланы сельскохозяйственных территорий. Методы выделения однородных зон на снимках позволяют в дальнейшем построить карты-задания, на основе которых дифференцированно вносится удобрение.

К основной инструментальной составляющей относятся: БЛА, позволяющий оперативно собрать высококачественные исходные данные; система параллельного вождения, обеспечивающая эффективный охват территории.

Кроме того, в комплексе предусматриваются такие элементы, как интеллектуальная система для обработки аэрофотоснимков и построения карт-заданий, база данных, база знаний и т.п.

Литература

1. Sott M. K., Furstenau L. B., Kipper L. M., Giraldo F. D., Lopez-Robles J. R., Cobo M. J., Zahid A., Abbasi Q. H., Imran M. A. Precision techniques and agriculture 4.0 technologies to promote sustainability in the coffee sector: State of the art, challenges and future trends // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 149854-149867.

2. Friha O., Ferrag M. A., Shu L., Maglaras L. A., Wang X. Internet of things for the future of smart agriculture: A comprehensive survey of emerging technologies // IEEE CAA Journal of Automatica Sinica. 2021. Vol. 8, iss. 4. P. 718-752.

3. Chen N., Zhang X., Wang C. Integrated open geospatial web service enabled cyber-physical information infrastructure for precision agriculture monitoring // Computers and Electronics in Agriculture. 2015. Vol. 111. P. 78-91.

4. Chiu M. T., Xu X., Wei Y., Huang Z., Schwing A., Brunner R., Khachatrian H., Karapetyan H., Dozier I., Rose G., Wilson D., Tudor A., Hovakimyan N., Huang T. S., Shi H. Agriculture-Vision: A large aerial image database for agricultural pattern analysis // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2020-Virtual, Online, United States. 2020. P. 2825-2835.

5. Segarra J., Rezzouk F. Z., Aparicio N., Gonzalez-Torralba J., Aranjuelo I., Gracia-Romero A., Araus J. L., Kefauver S. C. Multiscale assessment of ground, aerial and satellite spectral data for monitoring wheat grain nitrogen content // Information Processing in Agriculture. 2022. In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.05.004>

6. Drechsel P., Heffer P., Magen H., Mikkelsen R., Wichelns D. (Eds.). Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification. – Paris, France: IFA, IWMI, IPNI and IPI. 2015. 270 p.
7. Zhu W., Rezaei E. E., Nouri H., Sun Z., Li J., Yu D., Siebert S. UAV-based indicators of crop growth are robust for distinct water and nutrient management but vary between crop development phases // *Field Crops Research*. 2022. Vol. 284. 108582.
8. Tsouros D. C., Bibi S., Sarigiannidis P. G. A review on UAV-based applications for precision agriculture // *Information*. 2019. Vol. 10, iss. 11. P. 349.
9. Belcore E., Angeli S., Colucci E., Musci M. A., Aicardi I. Precision agriculture workflow, from data collection to data management using FOSS tools: An application in Northern Italy vineyard // *International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, no. 4. P. 236.
10. Lu J., Tan L., Jiang H. Review on convolutional neural network (CNN) applied to plant leaf disease classification // *Agriculture*. 2021. Vol. 11. P. 707.
11. Jung J., Maeda M., Chang A., Bhandari M., Ashapure A., Landivar-Bowles J. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems // *Current Opinion in Biotechnology*. 2021. Vol. 70. P. 15-22.
12. Yang Y., Zhang G., Chen Z., Wen X., Cheng S., Ma Q., Qi J., Zhou Y., Chen L. An independent steering driving system to realize headland turning of unmanned tractors // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 201. 107278.
13. Amiama-Ares C., Bueno-Lema J., Alvarez-Lopez C. J., Riveiro-Valino J. A. Manual GPS guidance system for agricultural vehicles // *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2011. Vol. 9, no. 3. P. 702-712.
14. Polishchuk Yu. V., Astafiev V. L., Derepaskin A. I., Kostyuchenkov N. V., Laptev N. V., Komarov A. P. Influence of automatic and parallel driving systems on the efficiency of using machine-tractor units in the Northern region of the Republic of Kazakhstan // *Natural Volatiles and Essential Oils*. 2021. Vol. 8, no. 4. P. 2083-2096.

15. Zhunisbekov P. J., Matkerimov T. Y., Solntsev A. A., Temirbekov Zh. T. Comparative levels of autopilotation of transportation and technological machines // Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex. 2021. P. 1-4.

16. Lee D.-H., Kim Y.-J., Choi C.-H., Chung S.-O., Inoue E., Okayasu T. Development of a parallel hybrid system for agricultural tractors // Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University. 2017. Vol. 62, no. 1. P. 137-144.

17. Mocera F. A model-based design approach for a parallel hybrid electric tractor energy management strategy using hardware in the loop technique // Vehicles. 2021. Vol. 3. P. 1-19.

18. Backman J., Oksanen T., Visala A. Parallel guidance system for tractor-trailer system with active joint // Precision Agriculture, Wageningen, the Netherlands. 2009. P. 615-622.

19. Ju C., Kim J., Seol J., Son H. I. A review on multirobot systems in agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 202. 107336.

20. Mitrofanova O., Yakushev V., Zakharova E., Terleev V. An alternative approach to managing the nitrogen content of cereal crops // Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Proceedings of XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021", "Smart Innovation, Systems and Technologies", Singapore. 2022. P. 481-491.

21. Буре В. М., Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А., Петрушин А. Ф. Выделение однородных зон сельскохозяйственного поля для закладки опытов с помощью беспилотного летательного аппарата // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2018. Т. 14, № 2. С. 145-150.

22. Tischler B. AgOpenGPS. <https://github.com/farmerbriantee/AgOpenGPS>

Literatura

1. Sott M. K., Furstenau L. B., Kipper L. M., Giraldo F. D., Lopez-Robles J. R., Cobo M. J., Zahid A., Abbasi Q. H., Imran M. A. Precision techniques and agriculture

4.0 technologies to promote sustainability in the coffee sector: State of the art, challenges and future trends // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 149854-149867.

2. Friha O., Ferrag M. A., Shu L., Maglaras L. A., Wang X. Internet of things for the future of smart agriculture: A comprehensive survey of emerging technologies // IEEE CAA Journal of Automatica Sinica. 2021. Vol. 8, iss. 4. P. 718-752.

3. Chen N., Zhang X., Wang C. Integrated open geospatial web service enabled cyber-physical information infrastructure for precision agriculture monitoring // Computers and Electronics in Agriculture. 2015. Vol. 111. P. 78-91.

4. Chiu M. T., Xu X., Wei Y., Huang Z., Schwing A., Brunner R., Khachatrian H., Karapetyan H., Dozier I., Rose G., Wilson D., Tudor A., Hovakimyan N., Huang T. S., Shi H. Agriculture-Vision: A large aerial image database for agricultural pattern analysis // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2020-Virtual, Online, United States. 2020. P. 2825-2835.

5. Segarra J., Rezzouk F. Z., Aparicio N., Gonzalez-Torralba J., Aranjuelo I., Gracia-Romero A., Araus J. L., Kefauver S. C. Multiscale assessment of ground, aerial and satellite spectral data for monitoring wheat grain nitrogen content // Information Processing in Agriculture. 2022. In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.05.004>

6. Drechsel P., Heffer P., Magen H., Mikkelsen R., Wichelns D. (Eds.). Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification. – Paris, France: IFA, IWMI, IPNI and IPI. 2015. 270 p.

7. Zhu W., Rezaei E. E., Nouri H., Sun Z., Li J., Yu D., Siebert S. UAV-based indicators of crop growth are robust for distinct water and nutrient management but vary between crop development phases // Field Crops Research. 2022. Vol. 284. 108582.

8. Tsouros D. C., Bibi S., Sarigiannidis P. G. A review on UAV-based applications for precision agriculture // Information. 2019. Vol. 10, iss. 11. P. 349.

9. Belcore E., Angeli S., Colucci E., Musci M. A., Aicardi I. Precision agriculture workflow, from data collection to data management using FOSS tools: An

application in Northern Italy vineyard // International Journal of Geo-Information. 2021. Vol. 10, no. 4. P. 236.

10. Lu J., Tan L., Jiang H. Review on convolutional neural network (CNN) applied to plant leaf disease classification // Agriculture. 2021. Vol. 11. P. 707.

11. Jung J., Maeda M., Chang A., Bhandari M., Ashapure A., Landivar-Bowles J. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems // Current Opinion in Biotechnology. 2021. Vol. 70. P. 15-22.

12. Yang Y., Zhang G., Chen Z., Wen X., Cheng S., Ma Q., Qi J., Zhou Y., Chen L. An independent steering driving system to realize headland turning of unmanned tractors // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 201. 107278.

13. Amiama-Ares C., Bueno-Lema J., Alvarez-Lopez C. J., Riveiro-Valino J. A. Manual GPS guidance system for agricultural vehicles // Spanish Journal of Agricultural Research. 2011. Vol. 9, no. 3. P. 702-712.

14. Polishchuk Yu. V., Astafiev V. L., Derepaskin A. I., Kostyuchenkov N. V., Laptev N. V., Komarov A. P. Influence of automatic and parallel driving systems on the efficiency of using machine-tractor units in the Northern region of the Republic of Kazakhstan // Natural Volatiles and Essential Oils. 2021. Vol. 8, no. 4. P. 2083-2096.

15. Zhunisbekov P. J., Matkerimov T. Y., Solntsev A. A., Temirbekov Zh. T. Comparative levels of autopilotation of transportation and technological machines // Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex. 2021. P. 1-4.

16. Lee D.-H., Kim Y.-J., Choi C.-H., Chung S.-O., Inoue E., Okayasu T. Development of a parallel hybrid system for agricultural tractors // Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University. 2017. Vol. 62, no. 1. P. 137-144.

17. Mocera F. A model-based design approach for a parallel hybrid electric tractor energy management strategy using hardware in the loop technique // Vehicles. 2021. Vol. 3. P. 1-19.

18. Backman J., Oksanen T., Visala A. Parallel guidance system for tractor-trailer system with active joint // Precision Agriculture, Wageningen, the Netherlands. 2009. P. 615-622.
19. Ju C., Kim J., Seol J., Son H. I. A review on multirobot systems in agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 202. 107336.
20. Mitrofanova O., Yakushev V., Zakharova E., Terleev V. An alternative approach to managing the nitrogen content of cereal crops // Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. Proceedings of XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021", "Smart Innovation, Systems and Technologies", Singapore. 2022. P. 481-491.
21. Bure V. M., Mitrofanov E. P., Mitrofanova O. A., Petrushin A. F. Vydelenie odnorodnykh zon sel'skokhozyaistvennogo polya dlya zakladki opytov s pomoshch'yu bespilotnogo letatel'nogo apparata // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya. 2018. T. 14, № 2. S. 145-150.
22. Tischler B. AgOpenGPS. <https://github.com/farmerbriantee/AgOpenGPS>

© Митрофанов Е.П., Митрофанова О.А., 2022. *International agricultural journal*, 2022, №5, 837-856.

Для цитирования: Митрофанов Е.П., Митрофанова О.А. ИНФОРМАЦИОННОЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ВНЕСЕНИЯ АГРОХИМИКАТОВ// *International agricultural journal*. 2022. №5, 837-856.