

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.155>

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ОБЪЕКТАМИ ИОТ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Научная статья

Сафонова Т.В.¹, Яготинцева Н.В.², Колбина О.Н.³, Мокряк А.В.^{4*}, Истомин Е.П.⁵

¹ORCID : 0000-0003-0969-3387;

⁴ORCID : 0000-0002-6630-4045;

⁵ORCID : 0000-0002-2203-4063;

^{1, 2, 3, 5} Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mokryakanna[at]mail.ru)

Аннотация

Цель исследования – анализ современных технологий цифровой трансформации в сельскохозяйственном производстве. На основе рассмотренных данных были выделены технологии, используемые в агропромышленном комплексе, применение которых позволит в разы увеличить объем урожая, что отвечает текущему уровню спроса со стороны населения.

Акцентировано внимание на такой проблеме как отсутствие связи в полях, что препятствует получению данных от объектов IoT, а также предложено решение, которое заключается в использовании глобальной многофункциональной инфокоммуникационной спутниковой системы связи. Были отмечены достоинства использования цифровых двойников, заключающиеся в оптимизации земельных и водных ресурсов, а также формирование адекватной модели прогноза урожайности культуры.

Ключевые слова: сельскохозяйственное производство, цифровые двойники, IoT, модель прогноза урожайности.

INTERACTION OF GLOBAL MULTIFUNCTIONAL INFO-COMMUNICATION SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM WITH IOT OBJECTS IN AGRICULTURAL PRODUCTION

Research article

Safonova T.V.¹, Yagotintseva N.V.², Kolbina O.N.³, Mokryak A.V.^{4*}, Istomin Y.P.⁵

¹ORCID : 0000-0003-0969-3387;

⁴ORCID : 0000-0002-6630-4045;

⁵ORCID : 0000-0002-2203-4063;

^{1, 2, 3, 5} Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russian Federation

⁴ Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (mokryakanna[at]mail.ru)

Abstract

The aim of the study is to analyse modern technologies of digital transformation in agricultural production. On the basis of the reviewed data, the technologies used in the agro-industrial complex were identified, the application of which will allow to multiply the volume of yield, which meets the current level of demand from the population.

Attention was emphasized on such a problem as lack of connection in the fields, which hinders the acquisition of data from IoT objects, and a solution was proposed, which is the use of global multifunctional info-communication satellite communication system. The advantages of using digital doubles were noted, which consist in optimization of land and water resources, as well as formation of an adequate model of crop yield forecasting.

Keywords: agricultural production, digital doubles, IoT, yield prediction model.

Введение

Отрасль сельского хозяйства имеет колоссальное значение для населения всего мира ввиду того, что спрос на объект производства этой сферы существенно велик, и более того, растет ежегодно, поэтому первостепенной задачей является минимизация рисков потери урожая. Эффективное развитие сельскохозяйственного производства позволяет бороться с такими кризисными ситуациями как голод и бедность, что весьма весомо.

Бесспорно, с развитием технологий цифровой трансформации, различных способов автоматизации производства нельзя ограничивать сферу их применяемости, более того, необходимо внедрять инновационные разработки во все отрасли промышленности. Стоит отметить факторы, которые препятствуют интенсивному развитию цифровых технологий в сельскохозяйственной промышленности, к примеру отсутствие возможности подключения техники в полях к сети Интернет, а также невозможность полноценной интеграции автоматизированных систем [1]. Несомненно, такая ситуация связана со скудным финансовым положением агрохозяйств. Оптимальным решением станет использование целевых кредитов, государственного субсидирования, лизинговых услуг и других подобных способов.

Существенным шагом станет формирование единой платформы, которая организует упорядоченную систему всех бизнес-процессов, что позволит координировать деятельность агрохозяйств.

Важной задачей является повышение квалификации работников и привлечение выпускников профильных учебных заведений к работе в аграрном секторе. Формирование соответствующей деятельности даст возможность эффективно подготовить рабочие кадры к перестроению производственных процессов, основанных на цифровых технологиях.

Представленные недостатки определяют первостепенные задачи, заключающиеся в минимизации уровня отставания от развитых стран, а точнее к ликвидации цифрового неравенства.

Современные технологии цифровой трансформации, их возможности, а также препятствия по внедрению в отрасль сельского хозяйства представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Возможности применения и препятствия реализации технологий цифровой трансформации сельского хозяйства

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.155.1>

Технологии	Возможности	Препятствия
Блокчейн (Blockchain)	Применяется для внедрения распределенных баз данных по сделкам купли-продажи, аренды земельных участков и т.д.	Отсутствие законодательного поля регулирования, кибербезопасность
Умная ферма (Smart Farming)	Применяется для контроля точности внесения удобрений, прогнозирования неблагоприятных природных явлений, роста качества выращивания зерновых и прочих культур, а также для открытой коммуникации агрохозяйств и потребителей	Высокая стоимость внедрения технологий, отсутствие требуемой квалификации у персонала
Квантовые технологии (Quantum technologies)	Можно использовать: - для обработки данных из разных источников (спутниковые снимки, прогноз погоды) Можно использовать: - для обработки данных из разных источников (спутниковые снимки, прогноз погоды и пр.); - для определения участков земли, пригодных для земледелия; - для мониторинга посевов и обнаружения изменений в окружающей среде	Отсутствие квалифицированного персонала
Интернет вещей (IoT)	Используются для контроля за состоянием полей, растений, климатическими показателями, а также для планирования ирригационных работ и прогнозирования урожайности	Кибербезопасность, отсутствие правового поля, стандартов
Робототехника	Машинные системы и роботы скоро заменят работников большинства специальностей	Трудности технического обслуживания и ремонта роботов, нехватка квалифицированного персонала
Беспроводные коммуникации	Эти технологии наиболее востребованы для агрохозяйств, ввиду того, что инфраструктура и производственные мощности территориально удалены	Неравномерное беспроводное покрытие в сельском хозяйстве
Виртуальная и дополненная реальность	Представленная технология может быть использована для обучения персонала	Высокая стоимость аппаратного обеспечения, отсутствие механизма защиты

		информации и программного обеспечения
--	--	---------------------------------------

За счет использования современных цифровых технологий сельскохозяйственная отрасль может существенно повысить объем урожая, оптимизировать применение земельных и водных ресурсов, проводить, посредством применения цифровых двойников (ЦД), адекватный прогноз, а также выявлять период возникновения чрезвычайных ситуаций.

ЦД сельскохозяйственной отрасли воплощают в жизнь многие идеи, которые реализуются за счет функционирования искусственного интеллекта и различных портативных устройств. Стоит отметить, что ЦД позволяет визуализировать в цифровом трехмерном формате копию окружения, в нашем случае сельскохозяйственных территорий, в которой доступные геопространственные данные зафиксированы с геопривязкой в объектно-ориентированном формате [2], [3]. Геоинформационная система (ГИС) дает возможность корректно оптимизировать сбор и передачу данных, позволяет выполнять адекватную оценку и автоматизировать прогнозы, включая функцию предоставления инструментов для совместной работы с информацией (рис.1).

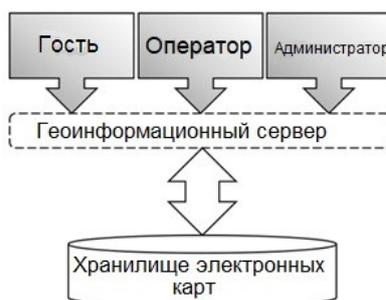


Рисунок 1 - Архитектура предоставления геопространственной информации

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.155.2>

Примером подобной разработки является ЦД для дистанционного контроля за состоянием здоровья крупного рогатого скота, изготовленный компанией Connecterra (Нидерланды) [4]. Модель данного ЦД работает посредством взаимодействия геопространственных данных, поступающих от IoT-датчиков, и искусственного интеллекта, который их обрабатывает, а ГИС отображает полученный результат и рекомендует фермеру методы оптимизации по уходу за скотом на всех этапах жизненного цикла.

Чтобы увеличить объем производительности в отрасли сельского хозяйства необходимо максимально точно отобразить ход работ в ГИС. Однако существуют значительные проблемы гео моделирования процессов в сельскохозяйственной отрасли, которые препятствуют получению своевременного прогноза урожайности культур и ликвидации обстоятельств, приносящих существенный урон фермерам.

В настоящее время в большинстве моделей учитываются исключительно природные факторы, не учитывающие мер соблюдения агрономических сроков, т. е. потенциальной модели прогноза урожайности по заранее заданным климатическим и географическим параметрам, соблюдающих все нормы, нет [3], [4]. Не обладая подобной моделью, возникает явная тенденция поиска метода повышения прибыльности сельскохозяйственной отрасли иными способами, что приводит к увеличению расходов.

Ориентируясь на результат экспертной системы [3], [4] по вопросу деятельности персонала сельскохозяйственного производства, необходимо подчеркнуть, что фермеру в течение одного сезона необходимо выполнить приблизительно около 40 задач за минимальный период времени. К этим задачам относятся:

- выбор культуры для возделывания в текущем сезоне;
- выбор семян для посева;
- определение периода времени для посева;
- выбор способа обработки культур;
- определение методов лечения заболевших культур;
- выбор стоимостных границ для продажи и пр.

Для полноценного предоставления точного прогноза, необходима геопространственная и иная информация, недостаток которой может привести к потере урожая.

Основная задача состоит в мониторинге и контроле показателей, оказывающих существенное влияние на урожайность культур. Следует отметить, что применение автоматизированных систем управления могло бы помочь справиться с этой задачей. Но, к сожалению, в настоящее время выявлена острая нехватка как денежных, так информационно-технологических ресурсов, необходимых для внедрения в сельскохозяйственную отрасль.

Ориентируясь на вышеперечисленные проблемы, возникает потребность в разработке метода моделирования сельскохозяйственной деятельности, а именно, в разработке ЦД, который, собирая информацию о погодных условиях, анализируя их с предыдущими показателями за заданный период времени, при этом проводя онлайн мониторинг, посредством объектов интернета вещей (IoT), состоянию почвенных слоев и т.п., прогнозирует урожайность и, в результате применения экспертных систем, формирует технологическую карту возделывания сельскохозяйственных

культур с рекомендациями о требуемых действиях. Вся информация, полученная с помощью методов искусственного интеллекта, предоставляет подробные данные об урожайности в текущий сезон, методах работы для получения максимальной прибыли, подробный отчет о возделываемых культурах, рекомендуемых для посева, подбирает оптимальную цену на конечный продукт, а также ориентирует на всевозможные климатические и технологические факторы, на которые стоит обратить внимание.

Для решения проблемы подключения техники в полях к сети Интернет стоит рассмотреть отечественный проект «Сфера», который нацелен на формирование глобальной многофункциональной инфокоммуникационной спутниковой системы связи (ГМИССС). Согласно прогнозам, к 2030 году она будет состоять из 300 различных спутников на низких, средних, высокоэллиптических и геостационарных орбитах. ГМИССС позволит реализовать полное покрытие сигналом поверхности Земли, совершать высокдетальную видеосъемку, а также обеспечивать качественное функционирование объектов IoT. Данный проект ориентирован на интеграцию следующих возможностей: услуги связи, передачи данных, навигации и дистанционного зондирования Земли – которые будут доступны на уровне абонентских устройств за счет наличия спутникового сигнала в любой точке страны [5], [6], [7] (рис.2).

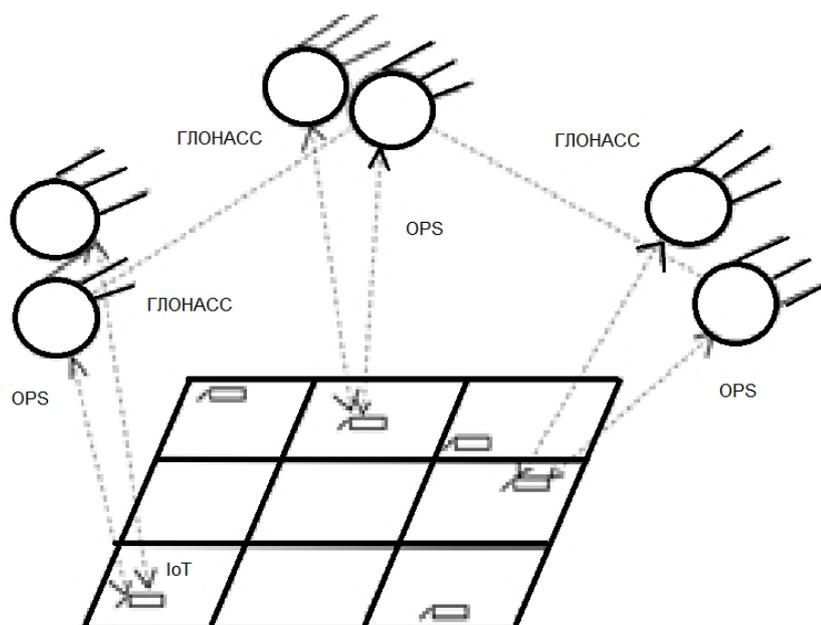


Рисунок 2 - Возможная схема взаимодействия объектов IoT и ГМИССС

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.155.3>

Математический аппарат для моделирования урожайности

При определении уровня урожайности большое число моделей работают исключительно с параметрами, ориентированными на природные показатели, т. е. не включая меры по соблюдению актуальных агрономических факторов. Подобные расчеты исключают наличие нарушений в сфере сельскохозяйственного производства. Однако нарушения нельзя исключать.

Стоит подчеркнуть, что в работе авторов [8] «Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы» выделяют несколько методов прогнозирования урожайности культур, которые все реализуются в ЦД, к примеру:

- исследование тенденции и периодичности в динамике жизненного цикла урожайности культур;
- обнаружение года-аналога;
- регрессивный метод;
- ситуативное моделирование;
- анализ синоптических процессов.

Модель прогноза урожайности, которая функционирует на основе методов искусственного интеллекта, аккумулирует в себе информацию о метеорологических факторах, географические данные, график выполнения агротехнических манипуляций, учитывая уровень соответствия качества земли для получения предельного результата от возделываемой на ней сельскохозяйственной культуры, при этом коммуникация осуществляется посредством использования глобальной многофункциональной инфокоммуникационной спутниковой системы связи, является инновационной. Основное достоинство такой модели заключается в проведении качественной и своевременной оценки, которая позволяет минимизировать действия и количество принимаемых решений фермерами, максимизировать степень удовлетворения потребительского спроса.

Применение ЦД на основе технологии ГИС в сельскохозяйственном производстве с целью контроля и мониторинга деятельности позволит в полном объеме собирать и хранить все необходимые данные, такие как:

- геолокация поля;

- состояние поля;
- сбор урожая;
- статистические данные о технологической карте прошлых и текущего вегетационных сезонов;
- этапы выполнения технологической карты;
- данные с датчиков уборочной техники;
- данные с датчиков температуры и влажности и т. д.

Посредством анализа вышеописанной информации из ЦД получится сформировать адекватный прогноз, а также план развития на ближайший период.

Для полноценной реализации ЦД сельскохозяйственного производства, анализа методологий определения и моделирования урожайности можно использовать модель прогнозирования урожайности [9] на основе набора вегетационных индексов, накопленных за фиксированный период с текущего года с момента начала вегетации, представленную следующим образом

$$V_{kr} = f_{kr}(v(t), v(t+1), v(t+2), \dots) \quad (1)$$

где v_{kr} – прогнозируемое значение урожайности на окончание текущего сезона для территориального региона r и сельскохозяйственной культуры k ;

f_{kr} – искомая функция прогноза урожайности для региона r и сельскохозяйственной культуры k ;

$v(t)$ – значение вегетационного индекса для данного участка посевов, время t отчисляется с момента начала измерений в текущем периоде вегетации, при этом $t+1, t+2 \dots$ соответствует дискретным моментам времени измерений, проводившихся в течение данного периода.

Методология построения архитектуры ЦД сельскохозяйственного производства

Формирование архитектуры ЦД сельскохозяйственного производства предполагает наличие ЦД всей сельскохозяйственной техники, зданий, сооружений, вычислительной техники в случае необходимости [10]. Ориентируясь на полученные данные от датчиков IoT, учитываются географические параметры объектов (технического состояния оборудования, режима эксплуатации, системы орошения (при наличии) и т. д.), при этом предполагается, что некоторые ЦД обладают функцией обратной связи с физическим аналогом.

Рассматривая ЦД полей, стоит отметить, что информация представляется в форме виртуальной модели, которая опирается на географические координаты, полученные от ГИС [10], составляющие почвенных показателей, статистику севооборота, транспортную доступность, анализ посевов, временные ряды осадков, температур и т. д.

Немаловажное значение имеет также и ЦД животных и растений, которые предоставляют информацию о текущем состоянии поголовья скота сельскохозяйственной отрасли, которые формируются на основе данных датчиков IoT [10], [11], [12], показывая динамику развития возделываемых сельскохозяйственных культур.

Архитектура цифрового двойника

Архитектура ЦД сельскохозяйственного производства предполагает наличие нескольких уровней:

- Уровень потребления данных: визуализация и отчетность для пользователей ЦД. Выполняется подписка на серверы данных, которые формируются на уровне обслуживания, далее данные предоставляются ПО для последующей визуализации, с последующей передачей конечному пользователю.

- Уровень обслуживания: API всевозможных аналитических моделей ЦД. Мониторинг и управление подписок на сервисы данных.

- Уровень выводов и заключений формирует:

1. Расчеты по готовым формулам;

2. Ассоциации и консолидации данных;

3. Имитационную модель при заранее определенных метаданных;

4. Методы оптимизации, предполагающие наличие возможности получения максимально эффективных методов решения;

5. Интеллектуальный анализ данных.

- Уровень хранения: хранилище данных и метаданных системы. Данные в базах SQL, NoSQL и files. Определяется разграничение доступа, оптимизация хранения данных по видам и частоте запросов, а также хранение консолидированных данных.

- Уровень поступления данных: необработанные данные, которые извлекаются из интерфейсов уровня формирования данных, после чего данные видоизменяются в определённые форматы для последующего хранения. Данные поступают от внешних БД.

- Физический уровень: машины, сенсоры IoT, персонал и т. д., это могут быть всевозможные объекты, генерирующие и собирающие данные физического двойника [13], [14], [15] (рис.3).

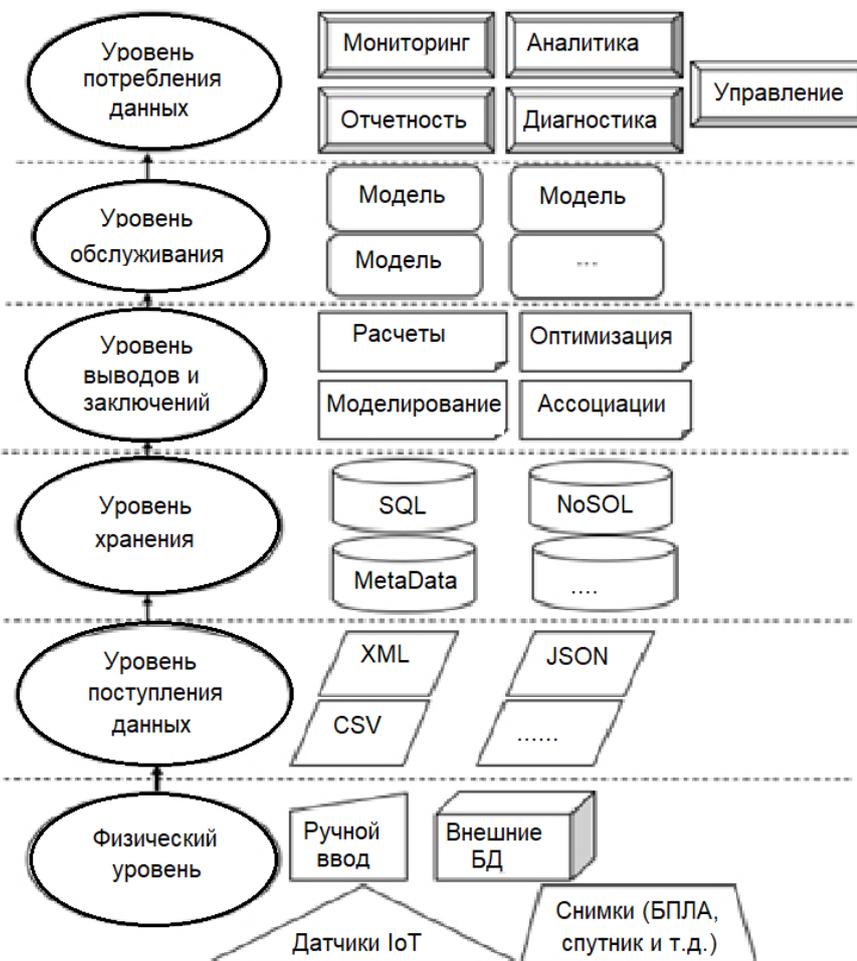


Рисунок 3 - Модель ЦД агропредприятия
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.155.4>

Заключение

Формирование системы цифрового сельского хозяйства, которая включает взаимодействие глобальной многофункциональной инфокоммуникационной спутниковой системы связи с объектами IoT в сельскохозяйственном производстве, допускает организацию комплекса ЦД отдельных подсистем, что позволит:

- вести наблюдение за сельскохозяйственной техникой;
- контролировать передвижение скота и наличие корма;
- управлять посевным фондом;
- прогнозировать урожайность культур;
- принимать решение по срокам посадки и уборки культур;
- оптимизировать внутрихозяйственные маршруты, учитывая расположение полей от дорог и складов, минимизируя расходы топлива.

ЦД дает возможность вести мониторинг состояния почвенного покрова. А если учесть, что у ЦД имеется собственная метеостанция, то можно спрогнозировать погодные изменения. Применение цифровых технологий позволит существенно увеличить урожай, улучшить ситуацию с состоянием земельного фонда сельского хозяйства.

Основная задача применения ЦД в сельскохозяйственной отрасли сводится к уменьшению вредного воздействия пестицидов на внешнее окружение, всевозможных удобрений, соблюдая при это адекватное потребление водных ресурсов, если учесть, что в сельском хозяйстве задействовано 70% пресной воды от общего расхода во всем мире. Применение ЦД системы орошения позволит существенно минимизировать потребление воды, ориентируясь на состояние сельскохозяйственных культур, показателей почвы и прочих параметров.

В результате полноценной реализации проекта «Сфера» применение ЦД на основе технологии ГИС станет эффективным инструментом для организации продовольственной безопасности и управления сельскохозяйственной отраслью.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Сафонова Т.В. Обзор технологий создания интеллектуальных геоинформационных систем / Т.В. Сафонова // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2020. — №3(39). — с. 18-27.
2. Сафонова Т.В. Определение состояния лесного массива в ГИС с использованием мультиагентного подхода / Т.В. Сафонова, О.Н. Колбина, Н.В. Яготинцева // Международный научно-исследовательский журнал. — 2021. — 4-1(106). — с. 73-77. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.011.
3. Сафонова Т.В. Использование мультиагентных систем в лесном хозяйстве / Т.В. Сафонова, О.Н. Колбина, Н.В. Яготинцева, А.В. Мокряк // IOP Conference Series: Наука о Земле и окружающей среде. — 2021. — vol 806. — с. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012028.
4. Rashid M. Challenge Advisory / M. Rashid. — 2018 — URL: <https://www.challenge.org/knowledgeitems/why-modern-farming-need-the-digital-twins/> (accessed: 06.10.2023)
5. Технологическая блокада: смогут ли спутники проекта «Сфера» конкурировать со Starlink? // Forbes. — URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/480372-tehnologiceskaa-blokada-smogut-li-sputniki-proekta-sfera-konkurirovat-so-starlink> (дата обращения: 06.10.2023)
6. Наш ответ Starlink: кто делает и запускает спутники связи в России? // ТРЕНДЫ. — URL: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/60e5820b9a794780092fd979> (дата обращения: 06.10.2023)
7. Проект «Сфера» переходит к практической реализации // РОСКОСМОС. — URL: <https://www.roscosmos.ru/33771/> (дата обращения: 25.07.2022)
8. Савин И.Ю. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы / И.Ю. Савин, С.А. Бартаев, Е.А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т.7. — №3. — с. 275-285.
9. Бондур В.Г. Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации / В.Г. Бондур, К.Ю. Гороховский, В.Ю. Игнатъев [и др.] // Дистанционное зондирование и мониторинг земель. — 2013. — №6. — с.61-68
10. Прохоров А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. / А. Прохоров, М. Лысачев — Москва: Издание первое, исправленное и дополненное. — М.: ООО «АльянсПринт», 2021. — 401 с.
11. Макаров В.Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий / В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Г.Л. Бекларян // Бизнес-информатика. — 2019. — Т. 13. — №4. — с. 7-16. DOI: 10/17323/1998-0663.2019.4.7.16.
12. Ракутько Е.Н. Цифровой двойник растения в светокультуре на примере перца (*capsicum annuum* L.) в рассадный период / Е.Н. Ракутько, С.А. Ракутько, А.П. Мишанов [и др.] // АгроЭкоИнженерия. — 2021. — 3(108). — с. 13-33.
13. Михайленко И.М. Математическое моделирование и оценивание химического состояния почвенной среды по данным дистанционного зондирования Земли. / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин // Международный научно-исследовательский журнал. — 2018. — 9-2 (75). — с. 26-38. DOI: 10.23670/IRJ.2018.75.9.029.
14. Макаров В. Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян // Бизнес-информатика. — 2019. — №4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tsifrovyyh-dvoynikov-dlya-proizvodstvennyh-predpriyatij> (дата обращения: 06.10.2023).
15. Fahed M. An Effective Architecture of Digital Twin System to Support Human Decision Making and AI-driven Autonomy / Mostafa Fahed, Tao Longquan, Yu Wenjin // Concurrency and Computation: Practice and Experience. — 2021. — 33(19):e6111. — DOI:10.1002/cpe.6111.9

Список литературы на английском языке / References in English

1. Safonova T.V. Obzor tehnologij sozdaniya intellektual'nyh geoinformatsionnyh sistem [Overview of Technologies for Creating Intelligent Geographic Information Systems] / T.V. Safonova // Information Technologies and Systems: Management, Economics, Transport, Law. — 2020. — №3(39). — p. 18-27. [in Russian]
2. Safonova T.V. Opredelenie sostojaniya lesnogo massiva v GIS s ispol'zovaniem mul'tiagentnogo podhoda [Determining the State of the Forest Location in GIS Using the Multi-agent Approach] / T.V. Safonova, O.N. Kolbina, N.V. Jagotintseva // International Research Journal. — 2021. — 4-1(106). — p. 73-77. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.011. [in Russian]
3. Safonova T.V. Ispol'zovanie mul'tiagentnyh sistem v lesnom hozjajstve [The Use of Multi-agent Systems in Forestry] / T.V. Safonova, O.N. Kolbina, N.V. Jagotintseva, A.V. Mokryak // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2021. — vol 806. — p. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/806/1/012028. [in Russian]
4. Rashid M. Challenge Advisory / M. Rashid. — 2018 — URL: <https://www.challenge.org/knowledgeitems/why-modern-farming-need-the-digital-twins/> (accessed: 06.10.2023)
5. Tekhnologicheskaya blokada: smogut li sputniki proekta «Sfera» konkurirovat' so Starlink? [Technological blockade: will the satellites of the Sphere project be able to compete with Starlink?] // Forbes. — URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/480372-tehnologiceskaa-blokada-smogut-li-sputniki-proekta-sfera-konkurirovat-so-starlink>

<https://www.forbes.ru/tekhnologii/480372-tehnologiceskaa-blokada-smogut-li-sputniki-proekta-sfera-konkurirovat-so-starlink> (accessed: 10.06.2023) [in Russian]

6. Nash otvet Starlink: kto delaet i zapuskaet sputniki svyai v Rossii? TRENDY [Our answer to Starlink: who makes and launches satellites in Russia?] // TRENDS. — URL: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/60e5820b9a794780092fd979> (accessed: 10/06/2023) [in Russian]

7. Proyekt «Sfera» perekhodit k prakticheskoy realizatsii [The Sphere project is moving to practical implementation] // ROSCOSMOS. — URL: <https://www.roscosmos.ru/33771/> (accessed: 25.07.2022) [in Russian]

8. Savin I.Ju. Prognozirovaniye urozhajnosti sel'skohozjajstvennykh kul'tur na osnove sputnikovoykh dannyyh: vozmozhnosti i perspektivy [Forecasting the Productivity of Agricultural Crops Based on Satellite Data: Opportunities and Prospects] / I.Ju. Savin, S.A. Bartalev, E.A. Lupjan // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. — 2010. — Vol.7. — №3. — p. 275-285. [in Russian]

9. Bondur V.G. Metod prognozirovaniya urozhajnosti po kosmicheskim nablyudeniyam za dinamikoj razvitiya vegetacii [Method for Forecasting Productivity by Space Observations of the Dynamics of Vegetation] / V.G. Bondur, K.Yu. Gorokhovskiy, V.Yu. Ignatiev [et al.] // *Distantsionnoe zondirovaniye i monitoring zemel'* [Remote Sensing and Land Monitoring]. — 2013. — №6. — p.61-68 [in Russian]

10. Prohorov A. Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoj opyt [Analysis, Trends, World Experience] / A. Prohorov, M. Lysachev — Moscow: First edition, revised and supplemented. — M.: OOO «AlyansPrint», 2021. — 401 p. [in Russian]

11. Makarov V.L. Razrabotka tsifrovyykh dvoynikov dlja proizvodstvennykh predpriyatij [Development of Digital Doubles for Manufacturing Enterprises] / V.L. Makarov, A.R. Bahtizin, G.L. Beklarjan // *Biznes-informatika* [Business Informatics]. — 2019. — Vol. 13. — №4. — p. 7-16. DOI: 10/17323/1998-0663.2019.4.7.16. [in Russian]

12. Rakut'ko E.N. Tsifrovoy dvoynik rastenija v svetokul'ture na primere pertsy (*capsicum annuum* L.) v rassadnyj period [Digital Twin of a Plant in Light Culture on the Example of Pepper (*Capsicum annuum* L.) in the Seedling Period] / E.N. Rakut'ko, S.A. Rakut'ko, A.P. Mishanov [et al.] // *AgroEkoInzheneriya* [AgroEcoEngineering]. — 2021. — 3(108). — p. 13-33. [in Russian]

13. Mihajlenko I.M. Matematicheskoe modelirovaniye i otsenivaniye himicheskogo sostojaniya pochvennoj sredy po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli. [Mathematical Modeling and Estimation of the Chemical State of the Soil Environment according to the Earth Remote Sensing Data] / I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Research Journal]. — 2018. — 9-2 (75). — p. 26-38. DOI: 10.23670/IRJ.2018.75.9.029. [in Russian]

14. Makarov V. L. Razrabotka cifrovyykh dvoynikov dlya proizvodstvennykh predpriyatij [Development of Digital Twins for Manufacturing Enterprises] / V. L. Makarov, A.R. Bakhtizin, G. L. Beklaryan // *Biznes-informatika* [Business Informatics]. — 2019. — No. 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tsifrovyykh-dvoynikov-dlya-proizvodstvennykh-predpriyatij> (accessed: 10/06/2023). [in Russian]

15. Fahed M. An Effective Architecture of Digital Twin System to Support Human Decision Making and AI-driven Autonomy / Mostafa Fahed, Tao Longquan, Yu Wenjin // *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. — 2021. — 33(19):e6111. — DOI:10.1002/cpe.6111.9