

Внедрение искусственного интеллекта в растениеводство для оптимизации орошения

Александр Юрьевич Федосов,
младший научный сотрудник,
e-mail: ffed@rambler.ru;

Александр Михайлович Меньших,
кандидат сельскохозяйственных наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: soulsunnet@gmail.com

Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал Федерального научного центра овощеводства, Московская область, Российская Федерация

Реферат. Обосновали актуальность внедрения искусственного интеллекта в сельское хозяйство для оптимизации орошения. (*Цель исследования*) Дать отчет о прогрессе, достигнутом в применении искусственного интеллекта для оптимизации орошения сельхозкультур. (*Материалы и методы*) Обзор сфокусировали на наиболее характерных фактах и важной научной информации о внедрении искусственного интеллекта в растениеводство. Использовали различные базы данных (Google Scholar, PubMed, Science Direct, SciFinder, Web of Science, РИНЦ) и онлайн-источники (Research Gate, Springer Nature Open Access, Wiley Online Library). Исследовали интеграцию моделей машинного обучения, которые могут обеспечить оптимальное управление решениями по ирригации. Рассмотрели тенденции исследований и применимость методов машинного обучения, а также развертывание разработанных моделей машинного обучения для использования фермерами в целях устойчивого управления орошением. (*Результаты и обсуждение*) Показали, как мобильные и веб-платформы могут обеспечить управление интеллектуальными процессами орошения. Машинное обучение – одна из центральных тем искусственного интеллекта, помогающая исследователям работать более творчески и эффективно. Отметим проблемы внедрения искусственного интеллекта в растениеводство и будущее направление исследований в области внедрения машинного обучения и решений для цифрового земледелия. (*Выводы*) Доказали актуальность интеллектуальной системы в ирригации и управлении водными ресурсами для устойчивого сельского хозяйства. Выявили, что, несмотря на обширную доступную литературу, моделирование машинного обучения для управления поливом сельхозкультур все еще находится в стадии становления, а лидируют в этой области Китай, США и Австралия.

Ключевые слова: точный полив, машинное обучение, мобильное приложение, веб-приложение, умное сельское хозяйство, цифровизация, оптимизации орошения сельхозкультур.

■ **Для цитирования:** Федосов А.Ю., Меньших А.М. Внедрение искусственного интеллекта в растениеводство для оптимизации орошения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №4. С. 45-53. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-4-45-53. EDN ZVINRU.

Implementation of Artificial Intelligence in Agriculture to Optimize Irrigation

Alexander Yu. Fedosov,
junior researcher, e-mail: ffed@rambler.ru;

Aleksandr M. Menshikh,
Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: soulsunnet@gmail.com

All-Russian Research Institute of Vegetable Growing – Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center", Moscow region, Russian Federation

Abstract. The relevance of artificial intelligence in agriculture is substantiated for irrigation optimization. (*Research purpose*) To report on the progress made over the past few years in the application of artificial intelligence to optimize crop irrigation. (*Materials and methods*) The review focuses on the most salient facts and important scientific information on the application of artificial intelligence in crop production. The review is based on Various databases (Google Scholar, PubMed, Science Direct, SciFinder, Web of Science, RSCI) and online sources (Research Gate, Springer Nature Open Access, Wiley Online Library). It is shown how the integration of machine learning models can provide intelligent irrigation management. The review reports on the research trends and applicability of machine learning methods, as well as the deployment of developed machine learning models for sustainable irrigation management. (*Results and discussion*) Mobile and web platforms are shown to be able to facilitate intelligent

irrigation management. Machine learning proves to be one of the central areas of artificial intelligence helping researchers to work more creatively and efficiently. The review notes the problems of introducing artificial intelligence in crop production and specifies the future research areas in the machine learning implementation and digital farming solutions. (*Conclusions*) The relevance of the intelligent system in irrigation and water management is proved for sustainable agriculture. It is revealed that, despite the extensive literature available, machine learning modeling for crop irrigation management is still in its infancy. The countries leading in this area are China, the United States and Australia.

Keywords: precision irrigation, machine learning, mobile application, web application, smart agriculture, digitalization, crop irrigation optimization.

For citation: Fedosov A.Yu., Menshikh A.M. Vnedrenie iskusstvennogo intellekta v rastenievodstvo dlya optimizatsii orosheniya [The implementation of artificial intelligence in agriculture to optimize irrigation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022.Vol. 16. N4. 45-53 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-4-45-53. EDN ZVINRU.

Сельскохозяйственный сектор потребляет 85% доступных ресурсов пресной воды во всем мире. Их сокращение неизбежно из-за изменения климата, повышения температуры воздуха и уменьшения количества осадков. Ограниченность водных ресурсов при увеличении населения и спроса на продукты питания вызывает необходимость в более эффективных технологиях, в частности при орошении. Ручное орошение, основанное на измерении влажности почвы, заменено методами автоматического планирования. При внедрении автономных оросительных машин учитывали эвапотранспирацию растений, которая зависит от влажности воздуха, скорости ветра, солнечной радиация, принимая во внимание стадию роста и густоту стояния растений, свойства почвы, наличие вредителей [1, 2].

Благодаря быстрым успехам, наблюдаемым в интеграции Интернета вещей (*Internet of Things – IoT*) с технологиями беспроводной сенсорной сети (*wireless sensor network – WSN*) для интеллектуальных сельскохозяйственных приложений посредством дистанционного зондирования, контролируемый мониторинг процессов позволил лучше понять динамику изменения погоды, почвы и состояния посевов в течение вегетационного периода. Данные в режиме реального времени можно непрерывно собирать с помощью датчиков или устройств с поддержкой *IoT*, таких как датчики из точечного источника или установленные на беспилотных летательных судах, спутниках, тракторах или подвижных ирригационных платформах, таких как боковые или центральные поворотные платформы перемещения машин с целевого поля [3].

Существует несколько доступных коммерческих платформ, которые используются для сбора данных о почве, растениях и погоде в режиме реального времени. Но они могут быть неэффективными, поскольку в систему не интегрированы алгоритмы машинного обучения или математические модели на основе данных, результаты которых должны быть в числах, чтобы понять необработанную информацию. Следовательно, используя массивные пространственные и временные переменные данные, которые собирают-

ся и хранятся на облачных или пограничных серверах, можно принимать разумные решения с использованием различных моделей машинного обучения [4].

Цель исследования – дать отчет о прогрессе, достигнутом в применении искусственного интеллекта для оптимизации орошения сельхозкультур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Провели обзор литературы, который сфокусировали на наиболее характерных фактах и важной современной научной информации о внедрении искусственного интеллекта в растениеводство. В обзор включены различные базы данных (*Google Scholar, PubMed, Science Direct, SciFinder, Web of Science, РИНЦ*) и онлайн-источники (*Research Gate, Springer Nature Open Access, Wiley Online Library*).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для разработки устойчивой системы точного орошения важную роль играет интеграция вычислительного интеллекта, аграрной гидроинформатики, информационных технологий, способствуя эффективному управлению данными о почве, растениях и погоде [5]. Совершенствование моделей, связанных с погодой и окружающей средой, для оценки потребности растений в воде учитывает запрос сельхозтоваропроизводителей на доступ к простому мониторингу и визуализации различных параметров на смартфонах или других компьютерных устройствах для принятия решений вручную или интеллектуально [6].

Существующие работы сосредоточены на применении контролируемого и неконтролируемого обучения для интеллектуальных ирригационных систем. Из 9 изученных работ только в одной не предусмотрено контролируемое обучение, еще в одной – неконтролируемое [7-15]. Что касается обучения с подкреплением и объединенного обучения, то этим задачам посвящена лишь одна статья (точное управление орошением с использованием машинного обучения), и две – приложениям для цифрового земледелия. Разработки проведены в странах с фронтрованными исследованиями в области научно-технической и инновационной политики, где востребованы и широко применяются изучаемые программные продукты.

Машинное обучение базируется на опыте и зада-



чах выполнять действия, аналогичные функциям людей, и направлено на то, чтобы сделать машины умнее [16]. Оно способно решать сложные проблемы ирригационной системы, включая многовариантные, нелинейные и изменяющиеся во времени факторы. Методы машинного обучения могут использоваться для автоматического извлечения новой информации в виде обобщенных правил принятия решений для выполнения точных действий по орошению. В области управления точным орошением применение моделей машинного обучения (обучение с учителем, без учителя, с подкреплением и объединенное обучение) стало популярным для решения сложных задач, таких как классификация и прогнозирование [17].

- Результаты нашего обзора ($n=21$) контролируемых методов обучения для управления орошением показывают, что их широко используют для предсказуемого управления орошением, фертигацией в целях повышения урожайности и экономии воды. В других исследованиях ($n=10$) важной тенденцией стало обучение под наблюдением (табл. 1)

- В таблице 2 обобщены другие исследования, в которых изучалось интеллектуальное управление орошением с использованием подхода к обучению под наблюдением. Только две работы посвящены одновременно и моделированию и облачному хранению информации. Наибольшее количество исследований в этой сфере проведено в Китае, США, Австралии, Индии, Иране, Франции.

Метод неконтролируемого обучения может быть реализован для вывода закономерностей, содержащихся в наборе данных о параметрах почвы, растений и погоды, для принятия оптимальных решений по ирригации в различных зонах орошения [18]. Примерами моделей обучения без учителя служат кластеризация, искусственная нейронная сеть (ANN), уменьшенные размерности, иерархическая кластеризация и т.д.

Неконтролируемое обучение широко используется для управления орошением. Для обучения различных моделей с целью получения точных прогнозов с использованием этих методов требуется большой набор экспериментальных данных. Определение скрытого паттерна в немаркированном наборе данных – наиболее распространенная функция этого метода машинного обучения. Тем не менее большая часть обзорных работ реализована только с использованием моделирования (табл. 2).

Будущая работа в этой области должна быть больше сосредоточена на реализации моделирования как на краевых, так и на облачных платформах, а также на переводе на цифровые решения. В большинстве случаев сельхозтоваропроизводители не могут установить датчики и оборудование из-за высокой стоимости.

Применение обучения с подкреплением (*Application of Reinforcement Learning – RL*) для интеллектуального управления орошением основано на концепции,

согласно которой фермер или агент может учиться с помощью действий и обратной связи, основанных на сигналах вознаграждения. Он учится выбирать оптимальную схему посева, определяемую типом культуры, площадью для возделывания, данными посева и планом орошения, в зависимости от наличия воды в начале сельскохозяйственного сезона. Для получения нужной информации каждый агент взаимодействует с окружающей средой, которая состоит из экологических и социально-экономических модулей, содержащих различные процессы.

Предложена стратегия принятия решений на основе Q -обучения с подкреплением, основанная на прошлом опыте орошения и краткосрочном прогнозе погоды для полива рисового поля, и сопоставлена с обычным планированием орошения. Оценивалась прогнозируемая эффективность орошения для суточного количества осадков в течение 7 дней [28].

CropGym, открытая интеллектуальная среда, реализована для изучения процесса фертигации с использованием модели состояния роста растений и данных о погоде для создания действий и вознаграждения, оптимизации использования удобрений, а также повышения урожайности [29].

Эффективность использования воды требует усовершенствования ирригационных систем, основанного на решениях для цифрового земледелия, таких как мобильные и веб-приложения. Датчики, используемые для управления орошением, собирают различные экологические и метеорологические данные с поля, такие как E_t (эталонная эвапотранспирация), осадки, температура и влажность воздуха. Эти данные загружаются в базу облачного сервера. Фермеры могут использовать мобильные приложения для удаленного регулирования водяных клапанов, вентиляторов и других элементов управления, в зависимости от тенденций визуализируемых данных о почве, растениях и погоде [28]. Мобильное приложение «Умная ферма» помогает фермерам анализировать информацию, не присутствуя на поле. Предложена распределенная система мониторинга окружающей среды на основе *IoT* для воздуха, температуры воды и растворенного кислорода, с учетом уровня восприятия, передачи информации, системной архитектуры для гидропоники, возможностью управления аквакультурой. Для отправки данных датчиков задействован протокол связи дальнего действия, а для сбора данных и отправки их на облачную платформу – *4G* [35].

Внедрение веб-приложений и мобильных приложений становится все более важным в управлении ирригационными системами. Веб-инфраструктура может быть интегрирована с базами данных, чтобы пользователи могли выполнять манипулирование данными, визуализацию, аналитику и удаленное управление, например, принимать решения, связанные с орошением, такие как расчет общего количе-

Таблица 1

Table 1

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С УЧИТЕЛЕМ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРОШЕНИЕМ
SUMMARY OF PREVIOUS WORK ON SUPERVISED MACHINE LEARNING MODELS FOR SMART IRRIGATION MANAGEMENT

Используемая контролируемая модель Supervised model used	Функции Features	Моделирование Simulation	Экспериментальная реализация Experimental implementation	
			облако cloud	преимущество edge
PCA, K-means Clustering, GMM	Модель использует онлайн-данные о погоде и влажности почвы для определения нормы орошения. Модель уведомляет оператора о необходимом объеме полива посредством отправки коротких сообщений (short message sending – SMS) [19] The model uses online weather and soil moisture data to decide on the irrigation rate. The model notifies the operator of the required irrigation volume through short message sending (SMS) [19]	✓	✓	✓
KNN, DT, SVM, Logistic Regression	Ирригационные системы с машинным обучением и поддержкой Интернета вещей с отслеживанием температуры, влажности, питательных веществ и осадков в режиме реального времени для прогнозирования количества воды и удобрений, необходимых растениям для орошения [20] IoT-enabled machine learning irrigation systems with real-time monitoring of temperature, moisture, nutrients, and rainfall, to forecast the amount of water and fertilizer required for plant irrigation [20]	×	✓	✓
SVR, Bagging	Ансамблевая модель машинного обучения базируется на собранных данных о погоде в режиме реального времени для принятия оптимизированного решения с точностью до 90%. Прогнозируемое содержание влаги в почве используется для управления включением/выключением водяного насоса [21] The ensemble machine learning model is trained with collected real-time weather data to make an optimized decision, with an accuracy of 90%. The predicted soil moisture content is used to control the On/Off of the water pump [21]	✓	×	✓
DT, RF, ANN, SVM	Адаптивное управление орошением с применением машинного обучения для прогнозирования времени дня для орошения с использованием данных о влажности и температуре воздуха и почвы, текущего времени дня, скорости ветра и направлении ветра. Собранные данные визуализируются удаленно в мобильном приложении. Приложение взаимодействует с API через транспорт телеметрии с очередью сообщений (message-queuing telemetry transport — MQTT) для удаленного управления приводами [14] Adaptive irrigation management using machine learning to predict the time of the day for irrigation using the air-soil humidity and temperature, the current time of the day, wind speed, and direction data. The data collected is visualized remotely on a mobile app. The app is interfaced with an API through message-queuing telemetry transport (MQTT) for the remote control of actuators [14]	✓	×	✓
SVM, KNN, Naïve Bayes	Мониторинг в режиме реального времени с использованием датчиков и хранения данных в облаке ThingSpeak. Модели машинного обучения выполняют классификацию на основе порогового значения. Точность классификации моделей: SVM – 87,5%, KNN – 70,8%, Naïve Bayes – 76,4% [22] Real-time monitoring using sensors and data storage on the ThingSpeak cloud. The machine learning models perform classification based on a threshold value. The classification accuracy for the models is, namely, SVM – 87.5%, Naïve Bayes – 76.4%, and KNN – 70.8% [22]	✓	×	✓
GBRT	Испытательный стенд обнаружения и срабатывания на периферийном устройстве, решение по орошению в облаке. Модель смогла изучить решения по поливу для разных растений, адаптируясь к изменяющейся динамике окружающей среды [23] Sensing and actuation test bed on an edge device, irrigation decision on a cloud. The model was able to learn irrigation decisions for different plants while adapting to the changing dynamics of the environment [23]	✓	✓	✓
MLR, KNN, DT, RF	Прогноз осадков с использованием онлайн-данных с метеостанции для принятия решений по ирригации. Производительность модели с точки зрения RMSE, полученного для MLR, KNN, DT и RF, составляет 0,165; 0,103; 0,094 и 0,083 соответственно [24] Prediction of rainfall using online data from the weather station to guide irrigation decisions. The model performance, in terms of RMSE obtained for MLR, KNN, DT, and RF, is 0.165, 0.103, 0.094, and 0.083, respectively [24]	✓	×	✓
MLR, KNN-Regression	Точность MLR лучше, чем KNN-R; следовательно, он интегрирован с приложением для Android, которое позволяет точно планировать фертигацию в режиме реального времени в нужное время, когда ее необходимо применить [25] The accuracy of MLR is better than that of KNN-R; hence, it is integrated with an Android application. The Android app enables accurate real-time scheduling of the fertigation at the correct time it needs to be applied [25]	✓	×	✓
KNN	Система сельскохозяйственного мониторинга и аналитики с использованием данных дронов, обработанных алгоритмом KNN [26] Agricultural monitoring system and analytics using drone data processed with a KNN algorithm [26]	✓	×	✓
ANN	Прогноз ЕТо (эталонной эвапотранспирации) с использованием погодной переменной для определения графика орошения [27] Prediction of ETo (reference evapotranspiration) using weather variable to decide on irrigation scheduling [27]	✓	×	✓

Примечание / Note: PCA – Principal Component Analysis, GMM – Gaussian Mixture Model, KNN – K-Nearest Neighbor, DT – Decision Tree, SVM – Support Vector Machine, SVR – Support Vector Regression, RF – Random Forest, ANN – Artificial Neural Network, GBRT – Gradient Boosting Regression Tree, MLR – Multiple Linear Regression.

Таблица 2

Table 2

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ БЕЗ УЧИТЕЛЯ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРОШЕНИЕМ
SUMMARY OF PREVIOUS WORK ON UNSUPERVISED MACHINE LEARNING MODELS FOR SMART IRRIGATION MANAGEMENT

Используемая контролируемая модель Supervised model used	Функции Features	Моделирование Simulation	Экспериментальная реализация Experimental implementation	
			облако cloud	преимущество edge
Hidden Markov	Система использовала данные о влажности почвы, температуре воздуха и влажности листьев и сравнивала их с заранее установленными пороговыми значениями для различных почв и конкретных культур, чтобы принимать решения по ирригации. Markov-модель обнаружила возможные заболевания растений [30] The system made use of data on soil moisture content, air temperature, and leaf wetness and compared it with the predetermined threshold values of various soil and specific crops to guide irrigation decisions. The Markov model detected possible plant disease conditions [30]	✓	✓	✓
CNN	В системе использовался аналитический подход к орошению на основе Интернета вещей, чтобы улучшить интеллектуальное земледелие путем интеграции с распознаванием растений и обнаружением увядания [31] The system made use of an analytical approach for IoT-based irrigation to enhance smart farming by integrating plant recognition and wilt detection [31]	✓	✓	✓
Mask R-CNN, NN	Алгоритм автоматически обнаруживает воду на аэрофотосъемке ирригационных систем, используя изображения, полученные от беспилотных воздушных судов. Программное обеспечение для интеллектуального распознавания помогло в проверке системы орошения, тем самым сократив время и затраты на техническое обслуживание системы. Это помогло выявить неисправные ирригационные системы, снизить уровень недостаточного или чрезмерного полива [32] The algorithm automatically detected water from aerial footage of irrigation systems, using UAV-captured images. The smart recognition software helped the irrigation system inspection, therefore reducing time and costs on system maintenance. This helped to identify malfunctioning irrigation systems, to reduce under- or overwatering [32]	✓	✓	✓
ANFIS	На Raspberry Pi реализован интеллектуальный нейро-нечеткий контроллер для управления капельным орошением; достигнута эффективность откачки воды 95% [33] An intelligent neuron-fuzzy controller was implemented on Raspberry Pi for drip irrigation management; 95% water pumping efficiency was achieved [33]	✓	×	✓
RNN	Автономная система орошения использовалась для оптимизации урожайности и сокращения расхода воды на орошения [34] An autonomous irrigation system was used to optimize yield and reduce water consumption for irrigation [34]	✓	×	✓

ства использованной воды для орошения и стоимости орошения, оценка состояния воды в почве (потребление воды) и дистанционное управление ирригационным оборудованием. Кроме того, интеграция *IoT* и аналитика больших данных в облачных базах данных (БД), предоставляют возможность анализа сохраненных экспериментальных данных для прогноза с помощью мобильной и веб-инфраструктуры при фертигации, а также маркетингового прогноза собранной продукции.

Рассмотрим, как применяются мобильные и веб-приложения для интеллектуального управления орошением (табл. 3). Архитектура орошения включает в себя данные, полученные от беспилотных воздушных судов и спутников (например, изображения растений и вегетационный индекс), информацию о почве (влажность, тип), о погоде – с местной метеостанции, онлайн-базу данных о погоде (ET_0 , температура воздуха, солнечная радиация, влажность воздуха и т.д.). Если облачный сервер интегрирован с моделью машинного обучения, то она может предсказуемо рекомендовать решения по ирригации и планированию

для ирригационного поля.

Обучение с подкреплением имеет хороший потенциал для адаптивного управления ирригационными системами. Дальнейшая работа может помочь изучить способы влияния на динамику растений с учетом параметров погоды, регулировать процесс фертигации.

Объединенное обучение – это процедура, которая позволяет узлам, датчикам и другим устройствам совместно обучать и использовать модели прогнозирования. При этом отдельные устройства сохраняют свои данные. Глобальная статистическая модель разрабатывается на основе данных, хранящихся на локальных или удаленных устройствах. Затруднения, связанные с приложениями объединенного обучения, вызваны проблемами связи, возникающими при отправке обновлений модели с разнородных устройств, а также необходимостью защиты конфиденциальности [36]. Тем не менее ожидается, что потенциальные выгоды от применения объединенного обучения привлекут исследовательский интерес как научных кругов, так и промышленности.

Таблица 3

Table 3

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ БЕЗ УЧИТЕЛЯ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРОШЕНИЕМ
SUMMARY OF PREVIOUS WORK ON UNSUPERVISED MACHINE LEARNING MODELS FOR SMART IRRIGATION MANAGEMENT

Название приложения App Name	Функции Features	Android	iOS	Веб-страница Webpage
Agrowetter	Оценка погоды и испарения влаги растениями сельхозкультур для принятия решений по ирригации [37] Estimation of weather and moisture evaporation by crop plants to guide irrigation decisions [37]	✓	✓	✓
WebGIS application	Прогноз погоды, фертигация, карты орошения [38] Weather forecasting, fertigation, irrigation maps [38]	✓	✓	✓
eRAMS App	Планировщик орошения дождеванием, ежедневные обновления погоды [39] Sprinkler irrigation scheduler, daily weather updates [39]	✓	✓	✓
AWD app	Сервер Node.js предназначен для хранения данных и создания предупреждений, а веб-клиент использовался в качестве панели инструментов для отображения всех параметров AWD, таких как уровень воды и время работы насоса, с помощью приложения для смартфона или онлайн-интерфейса [40] A Node.js server was used to store data and produce alerts, and a web client was utilized as a dashboard to show all the AWD parameters, such as water level and pump operating times, using either the smartphone app or the online interface [40]	✓	✓	✓
Masa app	Консультационное и маркетинговое приложение для фермеров на основе машинного обучения [41] Machine learning-driven advisory and marketing app for farmers [41]	✓	✓	✓
AIST	Позволяет в точности с заданными условиями поддерживать динамику влажности почвы в соответствии с фазами роста растений. Объем затраченной воды на 6,5-17,6% меньше, чем при применении обычной технологии капельного полива в ручном режиме, и до 60% меньше, чем при поливе дождеванием [42] It allows to maintain the dynamics of soil moisture exactly with the given conditions and in accordance with the phases of plant growth. The volume of water used is 6.5-17.6% less than that when using conventional drip irrigation technology in manual mode, and up to 60% less than when using sprinkler irrigation	✓	✓	✓

Технологии цифровых двойников представляют собой комбинацию нескольких технологий, таких как Интернет вещей, имитационное моделирование, анализ данных и моделирование [43]. Тем не менее исследования по развертыванию интеллектуальных ирригационных систем, использующих цифровые двойники и машинное обучение, все еще ограничены. Ожидается, что разработка цифровых двойников с использованием машинного обучения и цифровых программных приложений откроет новые возможности для исследований.

Выводы. Определили тенденции внедрения машинного обучения и решений для цифрового земледелия, направленные на улучшение устойчивого точного орошения: применение обучения с подкреплением, объединенное обучение, модели цифровых двойников. Это открывает отличные перспективы для выращивания растений в рамках нынешнего сценария земледелия, когда изменение климата заставляет переосмыслить всю практику ведения сельского хозяйства.

Существует множество моделей машинного обучения, основанных на прогнозировании эвапотранспирации эталонной культуры. Показали, что контролируемое и неконтролируемое обучение в основном использовалось для точной ирригации с положительными результатами. Однако из-за многих преимуществ объединенного обучения, таких как конфиденциальность и безопасность данных, в этой области ожидается больше исследований. Стремление к Индустрии 4.0 в сельском хозяйстве вызовет дополнительные исследовательские работы по внедрению технологии цифровых двойников в интеллектуальных ирригационных системах. Размер набора данных может быть расширен в результате включения большего количества технологий, таких как блокчейн, Интернет вещей, облачные вычисления и другие, которые широко используются в растениеводстве. Будущая работа должна быть направлена на решение экологических проблем, связанных с использованием цифровых решений для управления орошением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Иванова М.И., Рубцов А.А. Инновационные технологии орошения овощных культур. М.: Ким Л.А. 2021. 306 с.
2. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Иванова М.И. Дефицитное орошение овощных культур // *Овощи России*. 2022. N3. С. 44-49.



3. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10.
4. Ронжин А.Л., Савельев А.И. Системы искусственного интеллекта в решении задач цифровизации и роботизации агропромышленного комплекса // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. N2. С. 22-29.
5. Камышова Г.Н. Моделирование нейропрогнозирующего управления дождевальными машинами // *Природообустройство*. 2021. N1. С. 14-22.
6. Jaafar H., Kharroubi S.A. Views, practices and knowledge of farmers regarding smart irrigation apps: A national cross-sectional study in Lebanon. *Agricultural Water Management*. 2021. N248. 106759.
7. Liakos K.G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*. 2018. N18. 2674.
8. Ait Issad H., Aoudjit R., Rodrigues J.J.P.C. A comprehensive review of data mining techniques in smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2019. N12. 511-525.
9. Çetin M., Yıldız S., Beyhan S. Water need models and irrigation decision systems: A survey on machine learning and control theory. arXiv. 2021. arXiv:2103.11133.
10. Hans K., Jayakumar A. A review of intelligent practices for irrigation prediction. arXiv. 2016. arXiv:1612.02893.
11. Jimenez A.F., Cardenas P.F., Canales A., Jimenez F., Portacio A. A survey on intelligent agents and multi-agents for irrigation scheduling. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. N176. 105474.
12. Jha K., Doshi A., Patel P., Shah M. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019. N2. 1-12.
13. Balducci F., Impedovo D., Pirlo G. Machine learning applications on agricultural datasets for smart farm enhancement. *Machines*. 2018. N6. 38.
14. Glória A., Cardoso J., Sebastião P. Sustainable irrigation system for farming supported by machine learning and real-time sensor data. *Sensors*. 2021. N21. 3079.
15. Abioye E.A., Hensel O., Esau T.J., Elijah O., Abidin M.S.Z., Ayobami A.S., Yerima O., Nasirahmadi A. Precision Irrigation Management Using Machine Learning and Digital Farming Solutions. *AgriEngineering*. 2022. N4. 70-103.
16. Mekonnen Y., Namuduri S., Burton L., Sarwat A., Bhansali S. Review – Machine learning techniques in wireless sensor network based precision agriculture. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. N167. 037522.
17. Sayari S., Mahdavi-Meymand A., Zounemat-Kermani M. Irrigation water infiltration modeling using machine learning. *Computers and electronics in agriculture*. 2021. N180. 105921.
18. Kumar A., Surendra, A., Mohan H., Valliappan K.M., Kirthika N. Internet of things based smart irrigation using regression algorithm. In Proceedings of the 2017 International Conference on Intelligent Computing, *Instrumentation and Control Technologies (ICICT) Internet*. Kerala, India. 2017. 1652-1657.
19. Gu W., Yi Z. Machine learning on minimizing irrigation water for lawns. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. 2020. N8. 701-714.
20. Arulsevi G., Poornima D. Implementation of precision soil and water conservation agriculture (Pswca) through machine learning, cloud enabled IoT integration and wireless sensor network. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*. 2020. N7. 5426-5446.
21. Ramya S., Swetha A.M., Doraipandian M. IoT framework for smart irrigation using machine learning technique. *Journal of Computer Science*. 2020. N16. 355-363.
22. Bhanu K.N., Mahadevaswamy H.S., Jasmine H.J. IoT based smart system for enhanced irrigation in agriculture. In Proceedings of the International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems. *Coimbatore*. India. 2020. 760-765.
23. Cagri Serdaroglu K., Onel C., Baydere S. IoT based smart plant irrigation system with enhanced learning. In Proceedings of the 2020 IEEE Computing, *Communications and IoT Applications (ComComAp)*. Beijing, China. 2020.
24. Shalini H., Aravinda C.V. An IoT-Based Predictive Analytics for Estimation of Rainfall for Irrigation. *Springer: Singapore*. 2021. V. 1133.
25. Torres-Sanchez R., Navarro-Hellin H., Guillamon-Frutos A., San-Segundo R., Ruiz-Abellón M.C., Domingo-Miguel R. A decision support system for irrigation management: Analysis and implementation of different learning techniques. *Water*. 2020. N12. 548.
26. Meivel S., Maheswari S. Standard agricultural drone data analytics using KNN algorithm. *Test Engineering and Management*. 2020. N82. 206-215.
27. Nawandar N.K., Cheggoju N., Satpute V. ANN-based model to predict reference evapotranspiration for irrigation estimation. In Proceedings of the International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications. Hyderabad, India. Springer: Singapore. 2020. 671-679.
28. Chen Y.A., Hsieh W.H., Ko Y.S., Huang N.F. An ensemble learning model for agricultural irrigation prediction. In Proceedings of the 2021 International Conference on Information Networking (ICOIN). Jeju Island, Korea. 2021. 311-316.
29. Overweg H., Berghuijs H.N.C., Athanasiadis I.N. CropGym: A reinforcement learning environment for crop management. arXiv. 2021. arXiv:2104.04326.
30. Yashaswini L.S., Vani H.U., Sinchana H.N., Kumar N. Smart automated irrigation system with disease prediction. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). Chennai, China. 2017. 422-427.
31. Agastya C.S., Ghebremusse S., Anderson I., Reed C., Vahabi H., Aug C.V. Self-supervised contrastive learning for irrigation detection. arXiv. 2021. arXiv:2108.05484.
32. Albuquerque C.K.G., Polimante S., Torre-Neto A., Prati R.C. Water spray detection for smart irrigation systems with mask R-CNN and UAV Footage. IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry. Trento, Italy. 2020. 236-240.
33. Bellahirich S., Mezghani D., Mami A. Design and Implementation of an Intelligent ANFIS Controller on a Raspber-

- ry Pi Nano-Computer for Photovoltaic Pumping Intended for Drip Irrigation. *Energies*. 2021. N14. 5217.
34. Anuslu T. Smart Precision Agriculture with Autonomous Irrigation System Using RNN-Based Techniques. MEF University: Istanbul, Turkey. 2017.
 35. Zhang C., Yue P., Di L., Wu Z. Automatic identification of center pivot irrigation systems from landsat images using convolutional neural networks. *Agriculture*. 2018. N8. 147.
 36. Li T., Sahu A.K., Talwalkar A., Smith V. Federated learning: Challenges, methods, and future directions. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2020. N37. 50-60.
 37. AgroWeather app. <https://www.appsforagri.com/en/agroweather-app/>.
 38. Vuolo F., Essl L., Atzberger C. Costs and benefits of satellite-based tools for irrigation management. *Frontiers of Environmental Science*. 2015. N3. 52.
 39. Andales A.A. Tactical irrigation management using the wise online tool. In Proceedings of the 29th Annual Central Plains Irrigation Conference. Burlington, USA. 2017. 95-99.
 40. Siddique T., Barua D., Ferdous Z., Chakrabarty A. Automated farming prediction. In Proceedings of the Intelligent Systems Conference. London, UK. 2017. 757-763.
 41. Ogubuike R., Adib A., Orji R. Masa: AI-adaptive mobile app for sustainable agriculture. IEEE 12th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference. Vancouver, Canada. 2021. 1-7.
 42. Фартуков В.А., Ханов Н.В. Технологии контроля и дифференцированной подачи воды для полива // *Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки*. 2021. N6(87). С. 10-11.
 43. Neethirajan S., Kemp B. Digital twins in livestock farming. *Animals*. 2021. N11. 1008.

REFERENCES

1. Fedosov A.Yu., Men'shikh A.M., Ivanova M.I., Rubtsov A.A. Innovatsionnye tekhnologii orosheniya ovoshchnykh kul'tur [Innovative technologies for vegetable crop irrigation]. Moscow: Kim L.A. 2021. 306 (In Russian).
2. Fedosov A.Yu., Men'shikh A.M., Ivanova M.I. Defitsitnoe oroshenie ovoshchnykh kul'tur [Deficient irrigation of vegetable crops]. *Ovoshchi Rossii*. 2022. N3. 44-49 (In Russian).
3. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Tsiifrovyye tekhnologii i robotizirovannyye tekhnicheskiye sredstva dlya sel'skogo khozyaystva [Digital technologies and robotic devices in agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (In Russian).
4. Ronzhin A.L., Savel'ev A.I. Sistemy iskusstvennogo intellekta v reshenii zadach tsiifrovizatsii i robotizatsii agropromyshlennogo kompleksa [Artificial intelligence systems for solving problems of agroindustrial complex digitalization and robotization]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N2. 22-29 (In Russian).
5. Kamyshova G.N. Modelirovaniye neyroprognoziryuyushchego upravleniya dozhdeval'nymi mashinami [Modeling of neural predictive control of irrigation machines]. *Prirodobuystroystvo*. 2021. N1. 14-22 (In Russian).
6. Jaafar H., Kharroubi S.A. Views, practices and knowledge of farmers regarding smart irrigation apps: A national cross-sectional study in Lebanon. *Agricultural Water Management*. 2021. N248. 106759 (In English).
7. Liakos K.G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*. 2018. N18. 2674 (In English).
8. Ait Issad H., Aoudjit R., Rodrigues J.J.P.C. A comprehensive review of data mining techniques in smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2019. N12. 511-525 (In English).
9. Çetin M., Yildiz S., Beyhan S. Water need models and irrigation decision systems: A survey on machine learning and control theory. arXiv. 2021. arXiv:2103.11133 (In English).
10. Hans K., Jayakumar A. A review of intelligent practices for irrigation prediction. arXiv. 2016. arXiv:1612.02893 (In English).
11. Jimenez A.F., Cardenas P.F., Canales A., Jimenez F., Portacio A. A survey on intelligent agents and multi-agents for irrigation scheduling. *Computers and electronics in agriculture*. 2020. N176. 105474 (In English).
12. Jha K., Doshi A., Patel P., Shah M. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2019. N2. 1-12 (In English).
13. Balducci F., Impedovo D., Pirlo G. Machine learning applications on agricultural datasets for smart farm enhancement. *Machines*. 2018. N6. 38 (In English).
14. Glória A., Cardoso J., Sebastião P. Sustainable irrigation system for farming supported by machine learning and real-time sensor data. *Sensors*. 2021. N21. 3079 (In English).
15. Abioye E.A., Hensel O., Esau T.J., Elijah O., Abidin M.S.Z., Ayobami A.S., Yerima O., Nasirahmadi A. Precision Irrigation Management Using Machine Learning and Digital Farming Solutions. *AgriEngineering*. 2022. N4. 70-103 (In English).
16. Mekonnen Y., Namuduri S., Burton L., Sarwat A., Bhansali S. Review – Machine learning techniques in wireless sensor network-based precision agriculture. *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. N167. 037522 (In English).
17. Sayari S., Mahdavi-Meymand A., Zounemat-Kermani M. Irrigation water infiltration modeling using machine learning. *Computers and electronics in agriculture*. 2021. N180. 105921 (In English).
18. Kumar A., Surendra, A., Mohan H., Valliappan K.M., Kirthika N. Internet of things based smart irrigation using regression algorithm. In Proceedings of the 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT) Internet. Kerala. India. 2017. 1652-1657 (In English).
19. Gu W., Yi Z. Machine learning on minimizing irrigation water for lawns. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. 2020. N8. 701-714 (In English).
20. Arulselvi G., Poornima D. Implementation of precision soil and water conservation agriculture (Pswca) through machine learning, cloud enabled IoT integration and wireless sensor network. *European Journal of Molecular & Clinical Medi-*



- cine*. 2020. N7. 5426-5446 (In English).
21. Ramya S., Swetha A.M., Doraipandian M. IoT framework for smart irrigation using machine learning technique. *Journal of Computer Science*. 2020. N16. 355-363 (In English).
 22. Bhanu K.N., Mahadevaswamy H.S., Jasmine H.J. IoT based smart system for enhanced irrigation in agriculture. In Proceedings of the International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems. Coimbatore. India. 2020. 760-765 (In English).
 23. Cagri Serdaroglu K., Onel C., Baydere S. IoT based smart plant irrigation system with enhanced learning. In Proceedings of the 2020 IEEE Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp). Beijing. China. 2020 (In English).
 24. Shalini H., Aravinda C.V. An IoT-Based Predictive Analytics for Estimation of Rainfall for Irrigation. Springer: Singapore. 2021. V. 1133 (In English).
 25. Torres-Sanchez R., Navarro-Hellin H., Guillamon-Frutos A., San-Segundo R., Ruiz-Abellón M.C., Domingo-Miguel R. A decision support system for irrigation management: Analysis and implementation of different learning techniques. *Water*. 2020. N12. 548 (In English).
 26. Meivel S., Maheswari S. Standard agricultural drone data analytics using KNN algorithm. *Test Engineering and Management*. 2020. N82. 206-215 (In English).
 27. Nawandar N.K., Cheggoju N., Satpute V. ANN-based model to predict reference evapotranspiration for irrigation estimation. In Proceedings of the International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications. Hyderabad. India. Springer: Singapore. 2020. 671-679 (In English).
 28. Chen Y.A., Hsieh W.H., Ko Y.S., Huang N.F. An ensemble learning model for agricultural irrigation prediction. In Proceedings of the 2021 International Conference on Information Networking (ICOIN). Jeju Island. Korea. 2021. 311-316 (In English).
 29. Overweg H., Berghuijs H.N.C., Athanasiadis I.N. CropGym: A reinforcement learning environment for crop management. arXiv. 2021. arXiv:2104.04326 (In English).
 30. Yashaswini L.S., Vani H.U., Sinchana H.N., Kumar N. Smart automated irrigation system with disease prediction. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). Chennai. China. 2017. 422-427 (In English).
 31. Agastya C.S., Ghebremusse S., Anderson I., Reed C., Vahabi H., Aug C.V. Self-supervised contrastive learning for irrigation detection. arXiv. 2021. arXiv: 2108. 05484 (In English).
 32. Albuquerque C.K.G., Polimante S., Torre-Neto A., Prati R.C. Water spray detection for smart irrigation systems with mask R-CNN and UAV Footage. IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry. Trento. Italy. 2020. 236-240 (In English).
 33. Bellahirich S., Mezghani D., Mami A. Design and Implementation of an Intelligent ANFIS Controller on a Raspberry Pi Nano-Computer for Photovoltaic Pumping Intended for Drip Irrigation. *Energies*. 2021. N14. 5217 (In English).
 34. Anuslu T. Smart Precision Agriculture with Autonomous Irrigation System Using RNN-Based Techniques. MEF University: Istanbul. Turkey. 2017 (In English).
 35. Zhang C., Yue P., Di L., Wu Z. Automatic identification of center pivot irrigation systems from landsat images using convolutional neural networks. *Agriculture*. 2018. N8. 147.
 36. Li T., Sahu A.K., Talwalkar A., Smith V. Federated learning: Challenges, methods, and future directions. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2020. N37. 50-60 (In English).
 37. AgroWeather app. <https://www.appsforagri.com/en/agroweather-app/>.
 38. Vuolo F., Essl L., Atzberger C. Costs and benefits of satellite-based tools for irrigation management. *Frontiers of Environmental Science*. 2015. N3. 52 (In English).
 39. Andales A.A. Tactical irrigation management using the wise online tool. In Proceedings of the 29th Annual Central Plains Irrigation Conference. Burlington. USA. 2017. 95-99 (In English).
 40. Siddique T., Barua D., Ferdous Z., Chakrabarty A. Automated farming prediction. In Proceedings of the Intelligent Systems Conference. London. UK. 2017. 757-763 (In English).
 41. Ogubuike R., Adib A., Orji R. Masa: AI-adaptive mobile app for sustainable agriculture. IEEE 12th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference. Vancouver. Canada. 2021. 1-7 (In English).
 42. Fartukov V.A., Khanov N.V. Tekhnologiya kontrolya i differentsirovannoy podachi vody dlya poliva [Technology of control and differentiated water supply for irrigation]. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh. Seriya: tekhnicheskije i fiziko-matematicheskie nauki*. 2021. N6(87). 10-11 (In Russian).
 43. Neethirajan S., Kemp B. Digital twins in livestock farming. *Animals*. 2021. N11. 1008 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Федосов А.Ю. – концептуализация, методология, написание обзора;

Меньших А.М. – программное обеспечение, валидация, доработка текста, формирование общих выводов и литературный анализ, визуализация.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

05.08.2022

13.10.2022

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Fedosov A.Yu. – conceptualization, methodology review writing.

Menshikh A.M. – software, validation, the manuscript revision, developing general conclusions and literature review, visualization.

The authors read and approved the final manuscript.