

УДК 004:378

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.7>**Олексій ГРАЧОВ**

магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0009-0003-6346-3651

PLANT MONITORING SYSTEM: ШІ-СИСТЕМА ДЛЯ РОЗУМНОГО МОНІТОРИНГУ РОСЛИН

Анотація. Сучасне сільське господарство стикається з численними викликами, такими як нестача водних ресурсів, зміни клімату та необхідність точного контролю за станом культур. Традиційні методи моніторингу часто не забезпечують достатньої точності, що може призводити до зниження врожайності та нераціонального використання ресурсів.

Мета роботи – розробка та оцінка ефективності інтелектуальної системи SmartPlant AI для автоматизованого моніторингу рослин з метою оптимізації використання ресурсів, підвищення врожайності та зменшення впливу людського фактора.

Методологія. Система SmartPlant AI поєднує IoT-пристрої, хмарні технології та алгоритми штучного інтелекту для аналізу критичних параметрів довкілля в реальному часі. Використовуються сенсори для вимірювання вологості ґрунту, температури, освітлення та складу поживних речовин. Контролери ESP8266, ESP32, Raspberry Pi та Arduino передають ці дані у хмару через Wi-Fi або LoRaWAN, застосовуючи MQTT чи HTTP API. Алгоритми машинного навчання прогнозують загрози та формують рекомендації, зокрема нейронні мережі аналізують взаємозв'язки між параметрами середовища, регресійні моделі оцінюють їхній вплив на ріст рослин, а decision trees оптимізують полив і внесення добрив.

Наукова новизна. Запропонована система забезпечує інтеграцію IoT, хмарних обчислень та штучного інтелекту для автоматизованого моніторингу стану рослин, що дозволяє підвищити точність агротехнологій. Використання алгоритмів машинного навчання у процесі обробки даних дає змогу прогнозувати загрози та адаптувати догляд за рослинами відповідно до поточних умов.

Висновки. Результати тестування на прикладі вирощування томатів показали, що система SmartPlant AI знижує споживання води на 31%, стабілізує рівень вологості ґрунту та сприяє швидшому росту рослин на 34% у порівнянні з традиційними методами. Автоматизація процесу догляду за рослинами дозволяє зменшити вплив людського фактора, підвищити ефективність аграрного виробництва та мінімізувати ризики, пов'язані з кліматичними змінами. Подальші дослідження можуть включати інтеграцію додаткових сенсорів, використання дронів та супутникових даних для ще точнішого управління сільськогосподарськими процесами.

Ключові слова: SmartPlant AI, моніторинг рослин, IoT, штучний інтелект, автоматизація сільського господарства, машинне навчання, хмарні технології.

Oleksiy HRACHOV. PLANT MONITORING SYSTEM: AI SYSTEM FOR INTELLIGENT PLANT MONITORING

Abstract. Modern agriculture faces numerous challenges, such as water scarcity, climate change, and the need for accurate crop monitoring. Traditional monitoring methods often do not provide sufficient accuracy, which can lead to reduced yields and inefficient use of resources.

The aim of the work is to develop and evaluate the effectiveness of the SmartPlant AI intelligent system for automated plant monitoring in order to optimize resource use, increase yields, and reduce the impact of the human factor.

Methodology. The SmartPlant AI system combines IoT devices, cloud technologies, and artificial intelligence algorithms to analyze critical environmental parameters in real time. Sensors are used to measure soil moisture, temperature, lighting, and nutrient composition. ESP8266, ESP32, Raspberry Pi, and Arduino controllers transmit this data to the cloud via Wi-Fi or LoRaWAN using MQTT or HTTP API. Machine learning algorithms predict threats and generate recommendations, in particular, neural networks analyze the relationships between environmental parameters, regression models assess their impact on plant growth, and decision trees optimize irrigation and fertilization.

The scientific novelty. The proposed system provides integration of IoT, cloud computing, and artificial intelligence for automated monitoring of plant health, which allows to increase the accuracy of agricultural technologies. The use of machine learning algorithms in the data processing process makes it possible to predict threats and adapt plant care to current conditions.

Conclusions. The results of testing on the example of growing tomatoes showed that the SmartPlant AI system reduces water consumption by 31%, stabilizes soil moisture levels, and promotes faster plant growth by 34% compared to traditional methods. Automation of the plant care process allows to reduce the impact of the human factor, increase the efficiency of agricultural production, and minimize the risks associated with climate change. Further research may include integrating additional sensors, using drones and satellite data for even more precise management of agricultural processes.

Key words: SmartPlant AI, plant monitoring, IoT, artificial intelligence, agricultural automation, machine learning, cloud technologies.

Вступ. Сучасне сільське господарство стикається з рядом складнощів: зміна клімату, обмеженість водних ресурсів, високі ціни на добрива та засоби захисту рослин і потреба в постійному контролі за станом культур. Традиційні методи моніторингу, зокрема, оцінка зовнішнього вигляду та систематичне

взяття проб ґрунту станом на сьогодні виявились непрацездатними та менше ефективними через низьку частоту вимірювань [8, с. 152]. Недостача своєчасної і точної інформації про стан рослин призводить до зниження урожайності, надмірного використання води та добрив, запізненого реагування на хвороби або шкідників.

З розвитком сучасних технологій Інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту (AI) з'явилася можливість створення автономних систем моніторингу. Вони забезпечують постійний збір та аналіз даних у реальному часі [1, с. 20]. Використання різних сенсорів для вимірювання вологості ґрунту, температури, рН-рівня і вологості повітря разом з комп'ютерною обробкою даних і алгоритмами машинного навчання значно покращують точність та швидкість процесу прийняття рішень [4, с. 2].

Саме ці виклики та можливості надихнули до створення смарт-системи моніторингу рослин – інтелектуального рішення для автоматизованого контролю за рослинами. Основна мета системи полягає у наданні фермерам та власникам теплиць інструменту для виявлення проблем на початкових етапах, оптимізації використання ресурсів та покращення загальної ефективності у галузі сільського господарства.

З огляду на це основна мета дослідження полягала в розробці та оцінці ефективності системи SmartPlant AI, яка автоматизує контроль за станом рослин, забезпечує оптимальне використання ресурсів і підвищує врожайність. Для досягнення цієї мети необхідно було створити автономну систему моніторингу, що об'єднує IoT-пристрої, хмарні технології та алгоритми штучного інтелекту, розробити програмне забезпечення для обробки отриманих даних, визначити оптимальні сенсорні модулі для контролю вологості ґрунту та інших показників, а також протестувати систему у реальних умовах. У цій статті викладені ключові аспекти розробки системи, особливості її функціонування та переваги з оптимальною проекцією даних порівняно з традиційними методами моніторингу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В умовах сьогодення чимало науковців працюють над автоматизацією рутинної роботи пов'язаної з виконанням технічних робіт на підприємствах загалом та теплицях зокрема.

Так, у дослідженні М. Мохамеда та колег [3] представлено розробку та впровадження системи керування інтелектуальним електромагнітним клапаном, першого винаходу такого роду. Це рішення на основі штучного інтелекту з підтримкою 5G розроблено для моніторингу в режимі реального часу та прогнозного обслуговування електромагнітних клапанів (SOV) у промислових умовах, щоб запобігти помилковим відключенням і збоям у роботі заводу. Ця система використовує неінтрузивні датчики для вимірювання параметрів електричного контуру котушок SOV. Ці дані передаються через модуль 5G на хмарну платформу, де передові алгоритми штучного інтелекту аналізують їх, щоб передбачити можливі збої. Система містить веб-панель для аналізу тенденцій у режимі реального часу, надаючи ранні сповіщення для проактивного обслуговування. Процес забезпечує безперервну інтеграцію та безперервний потік даних від датчиків до хмари, забезпечуючи надійні стратегії моніторингу та обслуговування [3, с. 2].

Такі дослідники як В. Куреші, Ц. Гао, О. Ельшербіні, А. Моша, М. Туніо, Дж. Куреші [6] доводять, що системи розумного землеробства з підтримкою Інтернету речей використовують датчики для безперервного моніторингу поживних речовин і виявлення газів (наприклад, NO₂, O₃, NH₃), забезпечуючи автоматизовані модифікації для підвищення аеропонічної ефективності. Ґрунтуючись на короткому огляді поточної літератури, це дослідження робить висновок, що майбутня інтеграція плазмової технології з III та Інтернетом речей може вирішити обмеження аеропоніки. Інтеграція плазмової технології з інтелектуальним туманом і системами керування на основі даних може покращити аеропонічні системи для сталого та ефективного сільськогосподарського виробництва. Це дослідження підтримує існуючу кількість досліджень, які виступають за інновації на основі плазми та інтелектуальні сільськогосподарські рішення в точному землеробстві [6, с. 3].

У роботі С. Іслама, М. Рези, С. Самсузамана, Ш. Ахмеда, Й. Чо, Д. Ноха, С.-О. Чона, С. Хона [2] було зосереджено увагу на останніх досягненнях у методах обробки зображень, розроблених для ідентифікації стресу рослин, і обговорено роль вилучення ознак, класифікації та прогнозного моделювання в досягненні надійних результатів. Було вивчено потенціал III у фізіології стресу рослин та його роль у подоланні обмежень традиційних методів, а також використання неконтрольованої ідентифікації візуальних симптомів для кількісної оцінки тяжкості стресу, що дозволяє ідентифікувати різні типи стресу рослин. Крім того, обговорювався потенціал технології машинного бачення та штучного інтелекту для моніторингу в режимі реального часу та систем підтримки прийняття рішень у точному сільському господарстві. Результати цього огляду сприяють зростанню галузі сільськогосподарських технологій, пропонуючи уявлення про розробку автоматизованих інструментів, які могли б допомогти фермерам і дослідникам у пом'якшенні впливу абіотичних стресових факторів на здоров'я та продуктивність культур / рослин [2, с. 2].

Л. Яо, Г. Ковальчук, Р. Ван де Зедде [9] представляють напрям робототехніки та екофенотипування та досліджують окремі аспекти, важливі для цієї нової області екофенотипування рослин. Зокрема, враховуючи сценарії моніторингу фенотипної інформації в різних масштабах, використана технологія інтелектуального робота, ефективна платформа автоматизації та сучасне сенсорне обладнання підсумовуються в деталях. Обговорено виклики, пов'язані з поточними дослідженнями, а також майбутні тенденції розвитку застосування технологій роботів та екофенотипування рослин. Вони включають використання зібраних даних для додатків штучного інтелекту та передачу даних із високою пропускну здатністю, а також підходи до зберігання великих добре структурованих (мета) даних у рослинництві та сільському господарстві [9, с. 4].

Дослідники С. Прабу, Р. Сентілраджа, А. Алі, С. Джаяпоорані, М. Арун [5] запропонували керовану штучним інтелектом структуру прогнозного обслуговування, яка використовує технологію Digital Twin для забезпечення моніторингу в реальному часі, діагностики несправностей і прогнозування збоїв у промислових середовищах. Фреймворк інтегрує моделі машинного навчання (ML), методи глибокого навчання та периферійні обчислення для аналізу даних датчиків, виявлення аномалій та оптимізації графіків технічного обслуговування. Для динамічного коригування стратегій технічного обслуговування, що скорочує час простою та подовжує термін служби обладнання, використовується модель прийняття рішень, заснована на навчанні. Крім того, моделі штучного інтелекту, засновані на фізиці, включені в архітектуру цифрового близнюка для імітації операційної поведінки та прогнозування потенційних збоїв з високою точністю. Запропонована система перевірена на прикладі інтелектуального виробничого підприємства, що демонструє 35% підвищення точності прогнозування, 40% скорочення незапланованих простоїв і 25% оптимізацію витрат на технічне обслуговування порівняно з традиційними підходами до прогнозованого технічного обслуговування. Отримані дані свідчать про те, що інтеграція штучного інтелекту та DTT значно підвищує надійність і ефективність кіберфізичних виробничих систем (CPMS), прокладаючи шлях для більш автономних і інтелектуальних промислових операцій [5, с. 4].

У роботі Ф. Чжана, Д. Лі, Г. Лі, Ш. Сюя [10] описано ключові технології в розробці нових передових датчиків, таких як мікронанотехнологія, технологія гнучкої електроніки та технологія мікроелектромеханічної системи. Систематично викладено останні технологічні досягнення та тенденції розвитку принципів датчиків, процесів виготовлення та параметрів продуктивності в ґрунті та різних сценаріях сегментованих культур. Нарешті, обговорюються майбутні можливості, виклики та перспективи. Очікується, що запровадження передових технологій, таких як нанотехнології та штучний інтелект, швидко й радикально змінить точність та інтелект сільськогосподарських датчиків, що призведе до нових рівнів інновацій [10, с. 2].

З опорою на здійснений аналіз можна констатувати, що питання, пов'язане з формуванням III-системи для розумного моніторингу рослин є достатньо дослідженим, проте містить декілька аспектів, які потребують подальшого наукового дослідження та опрацювання.

Метою роботи є розробка та оцінка ефективності інтелектуальної системи SmartPlant AI для автоматизованого моніторингу рослин з метою оптимізації використання ресурсів, підвищення врожайності та зменшення впливу людського фактора.

Алгоритм роботи системи. SmartPlant AI об'єднує IoT-пристрої, хмарні технології та алгоритми штучного інтелекту, щоб стежити за станом рослин у реальному часі, аналізувати зміни в середовищі та прогнозувати ризики.

Сенсори постійно вимірюють вологість ґрунту, температуру, рівень освітлення та склад поживних речовин. Контролери ESP8266, ESP32, Raspberry Pi та Arduino передають ці дані у хмару через Wi-Fi або LoRaWAN, використовуючи MQTT чи HTTP API. Завдяки цьому SmartPlant AI працює без збоїв навіть у місцях із нестабільним інтернет-з'єднанням.

Система аналізує дані у AWS, Google Cloud та Firebase, забезпечуючи швидкий доступ і надійне збереження інформації. Алгоритми машинного навчання прогнозують можливі загрози та формують точні рекомендації. Нейронні мережі визначають зв'язки між факторами довкілля, регресійні моделі оцінюють їхній вплив на ріст рослин, а decision trees підбирають оптимальний режим поливу та внесення добрив.

Користувач керує системою через мобільний або веб-додаток. Інтерфейс у реальному часі відображає всі зміни, надсилає важливі сповіщення та дає змогу контролювати автоматизовану систему поливу.

Тестування системи SmartPlant AI. Для перевірки роботи SmartPlant AI було проведено тестування на невеликій ділянці з молодими рослинами томатів. Протягом 30 днів порівнювались дані на ділянці з автоматизованим доглядом та на іншій ділянці з традиційним методом вирощування.

Для тестування було визначено саме стадію, коли рослини активно ростуть, розвивають кореневу систему та формують перші справжні листки. У цей період будь-які перепади вологості, нестача

поживних речовин або неправильний полив миттєво сповільнюють розвиток або ж сильно шкодять рослині.

SmartPlant AI підтримувала оптимальні умови, точно регулювала подачу води та контролювала рівень вологості. Завдяки такому догляду розсада отримувала стабільний догляд без ризику пересихання або надмірного зволоження.

Аналіз отриманих результатів. Дані дослідження показують очевидні результати переваги автоматизованої системи над ручним доглядом. Детальні числові дані наведені нижче.

На графіку вологості ґрунту (рис. 1) чітко видно конкретні пробої у вимірах ручного догляду. Коливання рівня вологості в межах 40–60% призводило рослини до стресу. У контрольній групі, де працювала SmartPlant AI, підтримувалась стабільна вологість 50–60%. А отже, коренева система активно росла та рівномірно розвивалась.

З ручним контролем вологості рослини отримали періодичні перепади, що врешті відобразилось на їх стані і розвитку.

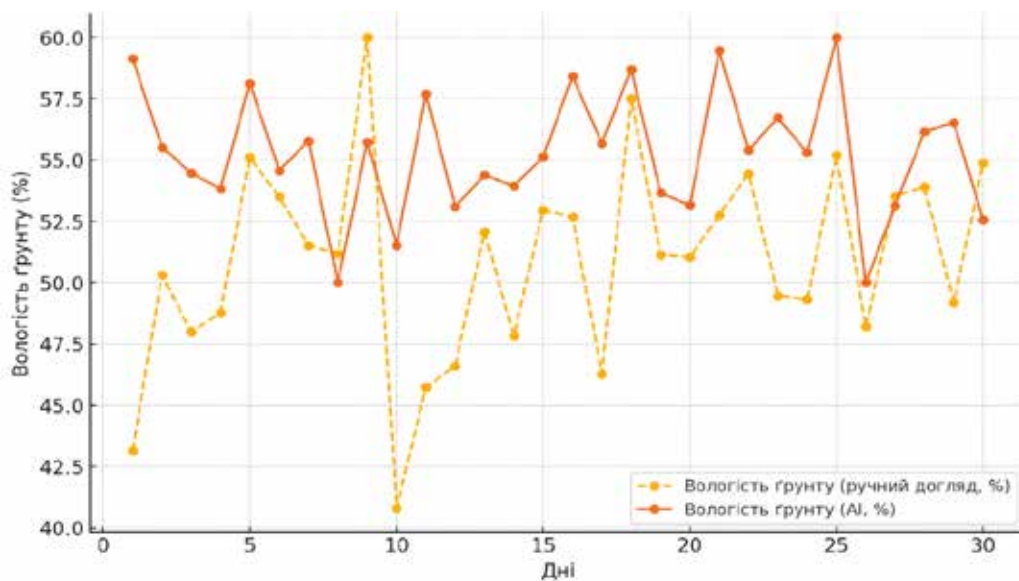


Рис. 1. Графік порівняння вологості ґрунту

На графіку витрат води (рис. 2) проілюстровано суттєву різницю у автоматизованому та ручному догляді. У традиційному догляді витрати води на одну рослину становили у середньому 3,2 л / день. SmartPlant AI оптимізувала цей показник до 2,2 л / день, зменшила таким чином загальне споживання на 31%.

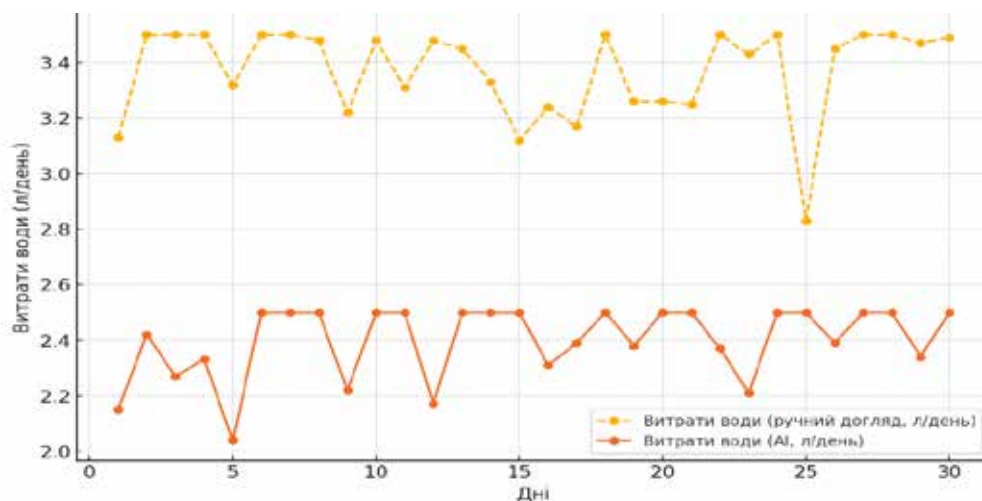


Рис. 2. Графік порівняння витрат води

Система чітко уникала надмірних витрат води та вимивання поживних речовин із ґрунту. З використанням ручного контролю рівень поливу залишався нерівномірним, і це негативно вплинуло на розвиток коренів, пригальмовуючи їхній ріст.

Графік зростання рослин (рис. 3) демонструє значний ріст томатів протягом місяця у контрольній групі з автоматизацією. У групі з ручним доглядом рослини вирости у середньому на 12,5 см.

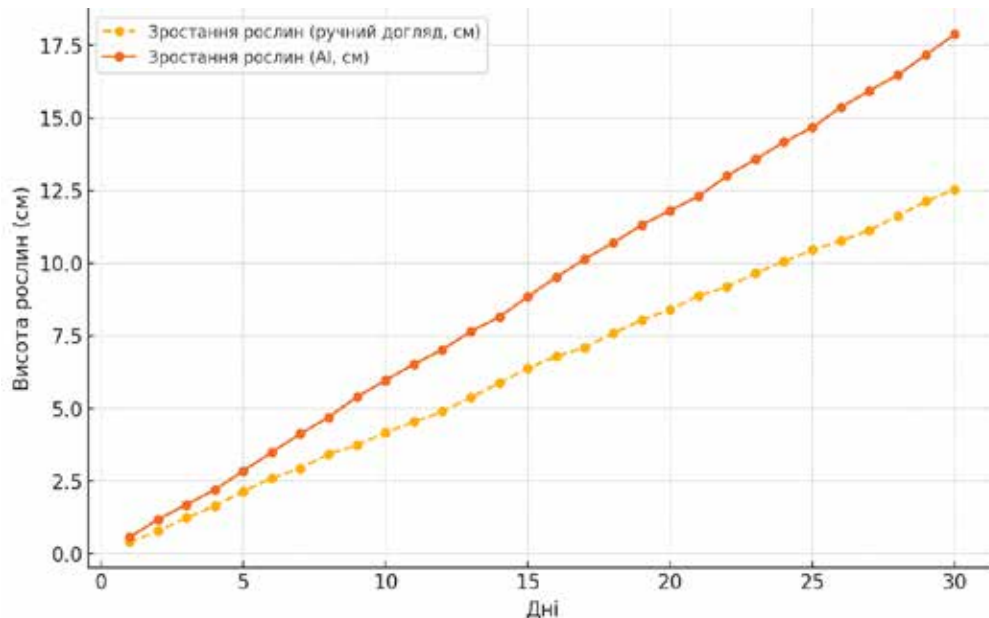


Рис. 3. Графік порівняння темпів росту томатів

Різниця у 34% між обома групами доводить ефективність автоматизації у процесі вирощування томатів. Завдяки стабільним умовам енергія рослин повністю трансформувалась у ріст без зайвих пристосувань до змін середовища.

Без автоматизації ріст розсади був менш інтенсивний, а витрати води – значно вищими. Рослини витрачали більше ресурсів на адаптацію, а нерівномірний догляд спричиняв нестабільні результати.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати тестування довели, що SmartPlant AI ефективно автоматизує догляд за рослинами, оптимізує споживання ресурсів і забезпечує стабільні умови для розвитку. Автоматизована система моніторингу зменшує ризик пересушування або надмірного поливу, підвищує точність прогнозування стану рослин і мінімізує залежність від людського фактора. Впровадження таких технологій у сільське господарство значно підвищить ефективність виробництва. Завдяки автоматичному контролю фермери регулюватимуть витрати води, збільшуватимуть ефективність врожаю без втрат через несприятливі умови та отримуватимуть стабільно високі показники росту. Порівнюючи SmartPlant AI з традиційними методами догляду, система забезпечує набагато точніше регулювання поливу та живлення.

Майбутні дослідження важливо зосередити на розширенні функціональності системи. Додаткові сенсори вимірювання рівня вуглекислого газу, вологості повітря та швидкості росту рослин дадуть ще точніші результати стану рослин. Інтеграція з дронами та супутниковими даними відкриває нові можливості для масштабного моніторингу. Алгоритми машинного навчання створять безпомилкове та точне прогнозування та персоналізовані рекомендації. Подальше впровадження SmartPlant AI одночасно створить сприятливі умови для розвитку екологічного фермерства, технологічного, рентабельного і незалежного від кліматичних ризиків.

Список використаних джерел:

1. Foysal F. M., Rahman M. M., Islam M. S., Hossain M. I., Hasan M. K. Scalable IoT-based smart plant monitoring and control system for sustainable agriculture. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2025. Vol. 27. № 1. P. 16–32.
2. Islam S., Reza M. N., Samsuzzaman S., Ahmed S., Cho Y., Noh D., Chung S.-O., Hong S. Machine vision and artificial intelligence for plant growth stress detection and monitoring: A review. *Precision Agriculture Science and Technology*. 2024. Vol. 6. P. 33–57. DOI: 10.12972/pastj.20240003.

3. Mohamed M., Ghazali M., Mokhtar Z., Hashim A., Nordin M., Zulkifly M., Idris D., Ainarappan N. State-of-the-Art Intelligent Solenoid Valve Management System: AI-Driven Real-Time Monitoring and Predictive Maintenance. 2024. DOI: 10.2118/222613-MS.
4. Pavan S. S. P., Pallavi H. S. Survey on plant health monitoring system using AI. *International Journal on Science and Technology (IJSAT)*. 2025. Vol. 16. № 1. P. 1–5.
5. Prabu S., Senthilraja R., Ali A., Jayapoorani S., Arun M. AI-Driven Predictive Maintenance for Smart Manufacturing Systems Using Digital Twin Technology. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2025. Vol. 11. DOI: 10.22399/ijcesen.1099.
6. Qureshi W., Gao J., Elsherbiny O., Moshia A., Tunio M., Qureshi J. Boosting Aeroponic System Development with Plasma and High-Efficiency Tools: AI and IoT-A Review. *Agronomy*. 2025. Vol. 15. № 546. DOI: 10.3390/agronomy15030546.
7. Rosell-Polo J. R., Cheein F. A., Gregorio E., Andújar D., Puigdomènech L., Masip J., Escolà A. Advances in structured light sensors applications in precision agriculture and livestock farming. *Advances in Agronomy*. 2015. Vol. 133. P. 71–112. DOI: 10.1016/bs.agron.2015.05.002.
8. Sharma K., Shivandu S. K. Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. *Sensors International*. 2024. № 5. P. 151–158. DOI: 10.1016/j.sintl.2024.100292.
9. Yao L., Kowalchuk G. A., Van de Zedde R. Recent developments and potential of robotics in plant eco-phenotyping. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2021. Vol. 5. DOI: 10.1042/ETLS20200275.
10. Zhang F., Li D., Li G., Xu S. New horizons in smart plant sensors: key technologies, applications, and prospects. *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 15. DOI: 10.3389/fpls.2024.1490801.