

4. James J. A., Manching H. K., Hulse-Kemp A. M., Beksi W. J. Few-shot fruit segmentation via transfer learning // *arXiv*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.02556>

Корольов А. В.,

здобувач вищої освіти спеціальності F3 Комп'ютерні науки

Науковий керівник: Пархоменко О. Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедри економічної кібернетики, комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ «ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ» ФЕРМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗМІН НА ВРОЖАЙНІСТЬ

В дослідженні розглянуто можливості застосування технології Digital Twins (цифрових двійників) у поєднанні з методами машинного навчання для створення високоточних моделей агроєкосистем, що дозволяють здійснювати прогнозування врожайності в умовах кліматичної нестабільності [1]. Актуальність теми обумовлена тим, що сучасне сільське господарство функціонує в умовах підвищеної невизначеності, спричиненої глобальними кліматичними змінами, які проявляються у вигляді частих посух, різких температурних коливань та нерівномірного розподілу опадів [2]. Традиційні методи планування врожайності, що базуються на історичних статистичних даних, втрачають ефективність, оскільки не враховують нелінійність та динамічність сучасних природних процесів. У зв'язку з цим виникає потреба у впровадженні нових підходів, здатних забезпечити адаптивне управління агровиробництвом на основі аналізу даних у реальному часі.

Цифровий двійник ферми являє собою інтегровану інформаційно-аналітичну систему, яка поєднує фізичні об'єкти з їх віртуальними копіями шляхом безперервного обміну даними [3]. Основою функціонування такого двійника є використання мережі сенсорів, які вимірюють параметри ґрунту та навколишнього середовища, зокрема вологість, температуру, рівень освітленості, а також концентрацію основних поживних елементів, таких як азот, фосфор і калій. Отримані дані передаються за допомогою сучасних бездротових технологій зв'язку до хмарних платформ, де відбувається їх накопичення, обробка та аналіз. Важливим компонентом системи є інтеграція супутникових даних, зокрема з апаратів Sentinel-2, що дозволяє отримувати інформацію про стан рослинності на великих площах та оцінювати її за допомогою вегетаційних індексів [5].

Одним із ключових показників стану рослин є нормалізований відносний індекс рослинності, який визначається за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

де NIR – відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні, RED – відбиття в червоному спектрі. Значення цього індексу дозволяє оцінити рівень розвитку

біомаси, виявити стресові стани рослин та здійснювати просторовий аналіз посівів.

Для моделювання процесів, що відбуваються в агроєкосистемі, цифровий двійник використовує математичні моделі, які описують водний баланс, теплові процеси та динаміку росту рослин. Зокрема, баланс вологи в ґрунті визначається рівнянням:

$$\Delta W = P - ET - R - D$$

де ΔW – зміна запасів вологи в ґрунті за певний період, P – опади, ET – евапотранспірація, R – поверхневий стік, D – дренаж. Дане рівняння дозволяє оцінити зміну запасів вологи в ґрунті та визначити критичні умови, за яких рослини можуть зазнавати водного стресу. Для більш точного визначення евапотранспірації використовується рівняння Пенмана–Монтейта, яке враховує метеорологічні параметри, такі як температура, швидкість вітру та радіаційний баланс.

Значну роль у функціонуванні цифрового двійника відіграють методи машинного навчання, які дозволяють виявляти приховані закономірності у великих масивах даних та будувати прогностичні моделі [6]. Зокрема, ефективним є використання рекурентних нейронних мереж типу LSTM, які здатні враховувати часові залежності та забезпечують високу точність прогнозування змін вологості ґрунту, температури та росту рослин. Поєднання фізико-математичних моделей з алгоритмами штучного інтелекту дозволяє створити гібридні системи, що поєднують інтерпретованість класичних моделей з адаптивністю машинного навчання.

Важливою перевагою цифрових двійників є можливість моделювання різних кліматичних сценаріїв. Зокрема, система дозволяє імітувати умови тривалої посухи, підвищених температур або надлишкового зволоження, що дає змогу оцінити їх вплив на розвиток сільськогосподарських культур та визначити оптимальні стратегії управління. У процесі моделювання визначаються критичні фази розвитку рослин, у яких вони найбільш чутливі до стресових факторів, а також формується система рекомендацій щодо зрошення, внесення добрив та інших агротехнічних заходів.

Результати застосування цифрових двійників свідчать про значний потенціал цієї технології у підвищенні ефективності агровиробництва. Використання таких систем дозволяє зменшити витрати водних ресурсів, оптимізувати застосування добрив та засобів захисту рослин, а також підвищити врожайність за рахунок більш точного управління виробничими процесами. Особливо важливим є використання цифрових двійників у регіонах із підвищеним ризиком ведення сільського господарства, де вплив кліматичних факторів є найбільш відчутним.

Для узагальнення основних джерел даних, що використовуються у цифровому двійнику ферми, доцільно представити їх у вигляді таблиці 1.

Для ілюстрації ефективності запропонованого підходу розглянемо гіпотетичний сценарій застосування цифрового двійника на фермі площею 200 га в умовах півдня України. Вхідними даними слугують: щогодинні вимірювання з 10 ґрунтових сенсорів (вологість на глибинах 10, 30 та 60 см),

щоденні метеопараметри з локальної станції, а також супутникові знімки Sentinel-2 з періодичністю 5 діб для розрахунку NDVI та NDWI. Після навчання LSTM-моделі на історичних даних за 2018–2023 роки система здатна прогнозувати врожайність озимої пшениці з середньою абсолютною похибкою (MAE) не більше 4,2 ц/га, що відповідає відносній похибці близько 6–8%. У разі симуляції посушливого сценарію (зменшення опадів на 30% відносно норми) цифровий двійник дозволяє завчасно (за 14–21 добу) рекомендувати коригування графіку зрошення, що знижує потенційні втрати врожаю приблизно на 25% порівняно з традиційним підходом.

Таблиця 1. Джерела даних для функціонування цифрового двійника ферми

Джерело даних	Тип параметрів	Періодичність оновлення	Призначення
ІоТ – сенсори	Вологість, температура, ґрунту	10-60 хв	Моніторинг
Супутникові дані	NDVI, спектральні дані	5-10 днів	Аналіз рослинності
Метеостанції	Температура, опади, вітер	1 година	Кліматичний аналіз
Історичні дані	Урожайність, агрохімія	Сезонно	Навчання моделей

Таким чином, використання технології цифрових двійників у сільському господарстві дозволяє перейти до нового рівня управління агровиробництвом, що базується на інтеграції даних, математичного моделювання та штучного інтелекту. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із підвищенням точності моделей, розширенням джерел даних та адаптацією систем до специфічних умов окремих регіонів, що забезпечить підвищення стійкості аграрного сектору до викликів сучасності.

Список використаних джерел

1. Tao F., Qi Q. Make more digital twins. *Nature*. 2019. Vol. 573, no. 7775. P. 490-491. URL: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>.
2. Human Influence on the Climate System. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. 2023. P. 423-552. URL: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.005>.
3. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science / J. W. Jones et al. *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 155. P. 269-288. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.021>.
4. Big Data in Smart Farming – A review / S. Wolfert et al. *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 153. P. 69-80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>.
5. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services / M. Drusch et al. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 25-36. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

6. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735-1780.
URL: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.

Крохін Д. П.,

здобувач вищої освіти спеціальності F3 Комп'ютерні науки

Науковий керівник: Пархоменко О. Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедри економічної кібернетики, комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв

ТЕХНОЛОГІЇ EDGE-COMPUTING ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМ ПОЛИВУ НА ОСНОВІ ДАНИХ З ДАТЧИКІВ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

Сучасний етап розвитку аграрного виробництва характеризується активним впровадженням цифрових технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання ресурсів та забезпечення сталого розвитку. Одним із ключових напрямів є автоматизація систем поливу, яка базується на використанні сенсорних мереж та інтелектуальних алгоритмів управління. Особливе місце у цьому контексті займає концепція edge-computing, що передбачає перенесення обчислювальних потужностей ближче до джерела даних. Такий підхід дозволяє мінімізувати затримки, знизити навантаження на мережу та забезпечити автономність роботи систем навіть за умов нестабільного інтернет-з'єднання.

Актуальність застосування edge-computing у системах зрошення зумовлена необхідністю оперативного реагування на зміни вологості ґрунту, що безпосередньо впливає на ріст і розвиток рослин. Традиційні системи поливу, які працюють за фіксованими графіками, не враховують динамічних змін природного середовища, що призводить до нераціонального використання водних ресурсів. Натомість системи, оснащені датчиками вологості ґрунту та edge-пристроями, здатні в режимі реального часу аналізувати стан ґрунту та приймати рішення щодо доцільності поливу. Це дозволяє уникнути як пересушування, так і перезволоження ґрунту, що є критично важливим для забезпечення оптимальних умов росту рослин.

Функціонування таких систем базується на інтеграції кількох технологічних компонентів. По-перше, це сенсорна мережа, яка здійснює безперервний моніторинг параметрів ґрунту. Найбільш поширеними є ємнісні та резистивні датчики вологості, які забезпечують достатню точність вимірювань при відносно низькій вартості. По-друге, це edge-контролери, які виконують обробку даних безпосередньо на місці їх збору. Завдяки цьому зменшується обсяг переданих даних та підвищується швидкість реагування системи. По-третє, це виконавчі механізми, зокрема електромагнітні клапани, які реалізують команди на полив.

Використання edge-computing дозволяє реалізувати складні алгоритми обробки даних без необхідності постійного підключення до хмарних сервісів.