

ЛАКТИОНОВ Іван

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-7857-6382>

laktionov.i.s@nmu.one

СЕМЕНОВ Сергій

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-1244-9687>

semenov.s.y@nmu.one

КОМПАРАТИВНИЙ АНАЛІЗ ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНИХ РІШЕНЬ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ В РОСЛИННИЦТВІ ВІДКРИТОГО ГРУНТУ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Актуальність дослідження цієї статті обумовлена сьогоденними викликами у сільськогосподарській галузі, які потребують вирішення шляхом розробки й впровадження високоефективних цифрових і інформаційних технологій. Основна мета полягає в обґрунтуванні перспективних напрямків розвитку цифрових і інтелектуальних технологій прогнозування врожаю сільськогосподарських культур на основі детального компаративного аналізу сучасного стану програмно-алгоритмічних рішень моніторингу параметрів агровиробничих процесів рослинництва відкритого ґрунту. У статті представлено результати оглядово-аналітичних досліджень щодо компаративного аналізу й категоріального узагальнення сучасних підходів до інтелектуалізованого агромоніторингу під час прогнозування врожаю агрокультур у технологічних умовах рослинництва відкритого ґрунту. Здійснено критичний аналіз програмно-алгоритмічних рішень із урахуванням використовуваних технологій збору даних й багаторівневої інтелектуальної трансформації даних агромоніторингу. Доведено перспективність розробки та використання інформаційно-орієнтованих комбінованих моделей, що забезпечують адаптивність до змін агрокліматичних умов. Визначено основні обмеження наявних рішень і сформульовано перспективні напрями їх подальшого розвитку для підвищення точності, адаптивності, масштабованості та функціональної інтегрованості до аграрних підприємств.

Ключові слова: програмно-алгоритмічне забезпечення, прогнозування, врожай, агромоніторинг, аналіз.

LAKTIONOV Ivan, SEMENOV Sergii

Dnipro University of Technology

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE AND ALGORITHMIC SOLUTIONS FOR INTELLECTUALISED MONITORING IN OPEN-FIELD CROP PRODUCTION: CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

The relevance of this study is driven by current challenges in the agricultural sector, which require effective solutions through the development and implementation of advanced digital and information technologies. The main aim of the research is to substantiate prospective directions for the development of digital and intelligent technologies for crop yield prediction based on a detailed comparative analysis of the current state of software and algorithmic solutions for monitoring parameters of open-field crop production processes. The article presents the results of a review and analytical investigation focused on the comparative evaluation and categorical generalisation of modern approaches to intelligent agricultural monitoring in the context of yield prediction under open-field crop production conditions. A critical analysis of software and algorithmic solutions is carried out, taking into account data acquisition technologies and multi-level intelligent transformation of agricultural monitoring data. The study demonstrates the potential of developing and applying information-oriented hybrid models that offer adaptability to changing agroclimatic conditions. Key limitations of existing approaches have been identified, and prospective directions for their further improvement have been substantiated, with a focus on enhancing accuracy, adaptability, scalability, and functional integration into agricultural enterprises.

Keywords: software and algorithmic provision, prediction, yield, agricultural monitoring, analysis.

Стаття надійшла до редакції / Received 16.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

У теперішній час світова спільнота дедалі гостріше стикається з масштабними проблемами й викликами, що істотно дестабілізують агровиробничі системи та ставлять під загрозу стійкість сільськогосподарської діяльності. Серед найбільш впливових факторів, що значно й системно впливають на ефективність агровиробництва, слід виокремити такі: зміни клімату, прогресуюче виснаження природно-ресурсного потенціалу, деградація ґрунтів, а також демографічний тиск.

Результати аналітичних досліджень, оприлюднені провідними профільними міжнародними організаціями, підтверджують негативну динаміку в усіх вищезазначених напрямках. Зокрема, відповідно до статистичних даних від Національного управління океанічних та атмосферних досліджень США,

середньорічна швидкість глобального потепління за останні чотири десятиліття стабільно становить близько 0,2 °C на десятиліття [1]. У відповідності до даних Світового економічного форуму за 2024 р., щорічний приріст обсягів споживання природних ресурсів, включно з біомасою, сягає в середньому 2,3 % упродовж останніх 25 років [2]. Згідно даних, оприлюднених ООН у 2022 році, понад 40 % ґрунтів на Землі вже зазнали помірної або тяжкої деградації і за реальними прогнозами цей показник може зрости до 90 % до 2050 року внаслідок урбанізації, вирубки лісів, інтенсивного застосування агрохімікатів та інше [3]. Паралельно з цим, за оцінками демографічних служб, динаміка приросту населення планети зберігається на сталому рівні, за останні 30 років щорічне зростання коливалося в межах 0,84–1,57 % [4]. Логічним підсумком цього за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я станом на 2023 рік приблизно 733 мільйони людей у світі перебували в стані хронічного недоїдання [5].

У сукупності зазначені чинники й процеси формують негативні прогнози для глобальної продовольчої безпеки, а отже, актуалізується науково-прикладна проблема необхідності обґрунтування й широкого впровадження ефективних, адаптивних і технологічно-орієнтованих рішень для подолання негативних тенденцій і забезпечення сталого розвитку аграрного сектору. Таким чином, аграрна галузь потребує постійного інноваційного оновлення технологічного базису задля підвищення показників адаптивності й продуктивності виробничих систем. Виходячи з цього особливої значущості набуває науково-технічна задача точного та достовірного прогнозування врожайності агрокультур з урахуванням інтегрального впливу сукупності екологічних, агрокліматичних і техніко-технологічних факторів. Вирішення цієї задачі є стратегічно важливим під час забезпечення раціонального середньо- та довгострокового планування сільськогосподарської діяльності, мінімізації втрат агропродукції, зниження продовольчих ризиків, а також оптимізації використання обмежених природних і технічних ресурсів. Таким чином, основна мета цієї статті полягає в обґрунтуванні перспективних напрямків розвитку цифрових і інтелектуальних технологій прогнозування врожаю сільськогосподарських культур на основі детального компаративного аналізу сучасного стану програмно-алгоритмічних рішень моніторингу параметрів агровиробничих процесів рослинництва відкритого ґрунту.

ПІДХОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методологічним базисом досліджень цієї статті є кросдисциплінарний підхід, що ґрунтується на загальнонаукових засадах критичного аналізу, формалізації та логічного узагальнення високоефективних рішень у галузях інформаційних і цифрових технологій та вимог прикладного їх застосування в умовах агровиробництва рослинництва відкритого ґрунту. У цій статті реалізовано компаративний підхід до аналізу відомих програмно-алгоритмічних рішень інтелектуалізованого моніторингу, використовуваних у сфері польового рослинництва. Під час цього враховано значний спектр параметрів агротехнологічних процесів, зокрема кліматичні, ґрунтові, біофізичні та технологічні показники, які є інформативними та дестабілізуючими у процесах прогнозування врожайності сільськогосподарських культур. На першому етапі здійснено аналіз сучасних моделей і підходів щодо обробки даних агромоніторингу задля прогнозування врожаю агрокультур. Наступним етапом був аналіз і систематизація відомих методів і програмно-алгоритмічних технологій інтелектуалізованого опрацювання даних агромоніторингу. Завершальним етапом стало формулювання перспективних напрямків подальших розробок і досліджень щодо підвищення ефективності відомих програмно-алгоритмічних рішень прогнозування врожаю.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ СУЧАСНИХ МОДЕЛЕЙ І ПІДХОДІВ ОБРОБКИ ДАНИХ АГРОМОНІТОРИНГУ ПІД ЧАС ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЮ АГРОКУЛЬТУР

Як було зазначено вище, одним із ключових векторів цифрової трансформації сільськогосподарської діяльності є формування інтелектуально-орієнтованих підходів до оперативного планування й адаптивного виконання агротехнічних процедур упродовж усього виробничого циклу вирощування агрокультур. Таке планування стає можливим на практиці завдяки впровадженню програмно-алгоритмічних інструментів, що спроможні здійснювати збір та прецизійну обробку агрокліматичних, біофізичних і технологічних даних у реальному часі, використовуючи аналітичні моделі предикативного аналізу показників врожайності.

Варто зазначити, що впродовж останніх років методологічні засади прогнозування врожаю зазнали суттєвої еволюції, що в тому числі обумовлено розвитком цифрових технологій, що відображається в переході від статичних і емпіричних до адаптивних і динамічних інформаційно-орієнтованих моделей, які базуються на алгоритмах машинного навчання та штучного інтелекту. Поєднання сенсорних технологій і обчислювальних пристроїв із вбудованим програмним забезпеченням надає можливість подієво-орієнтованої аналітики агрокліматичних параметрів. Практична реалізація таких програмно-технічних рішень демонструє високу ефективність під час вирішення задач адаптивного керування агротехнологічними процесами, забезпечення стабільної врожайності в умовах кліматичної нестабільності, а також у побудові систем автоматизованої підтримки прийняття рішень [6] (див. рис. 1). Аналіз відомих напрацювань дослідницьких груп [7, 8], свідчить про існування різних методологічних підходів до створення систем прогнозування, що враховують як природу технологій одержання вимірювальних даних, так і специфіку використовуваних

обчислювальних алгоритмів і моделей. Відомі принципи та підходи, що набули широкого застосування у світовій практиці, узагальнено в табл. 1, яка відображає результати компаративного аналізу їх сфери застосування та показників ефективності.

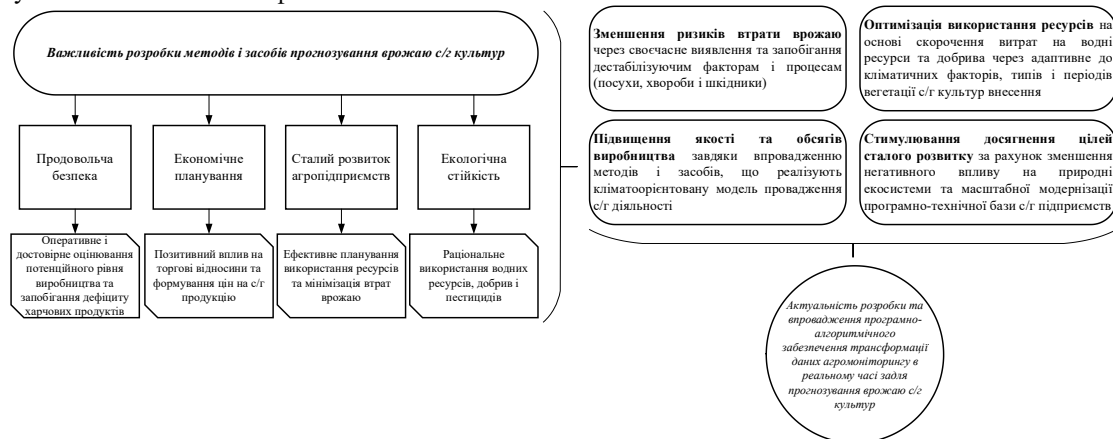


Рис. 1. Графічна інтерпретація ефекту від інтелектуалізації підходів прогнозування врожаю агрокультур

Таблиця 1.

Результати узагальнення відомих підходів до прогнозування врожаю агрокультур

Підхід	Принципи функціонування	Характеристика ефективності
Біофізичний	Базується на фізіологічних засадах росту агрокультур та їх взаємодії з навколишнім середовищем	Дозволяє врахувати біофізичні особливості агрокультур задля оцінки ефективності їх вирощування
Агрокліматичний	Основою є засади багатфакторного врахування кліматичних умов, характеристик ґрунту та виконуваних агропроцедур	Дозволяє передбачати вплив ґрунтових і кліматичних змін на врожайність культур і використовується в процесах планування посівів та внесення добрив
Інформаційно-орієнтований	Ґрунтується на використанні різноманітних інформаційних технологій збору даних та методах їх інтелектуального аналізу	Дає змогу достовірно аналізувати значні масиви просторово-часових даних із обліком дестабілізуючих факторів

Додатково варто зазначити, що відомі підходи до прогнозування врожаю агрокультур (див. табл. 1), класифікуються відповідно до засад формалізації інформативних і дестабілізуючих факторів, ступеня обліку агрокліматичних, біофізичних і технологічних чинників, а також характером обчислювальних алгоритмів. Узагальнені результати компаративного аналізу найбільш популярних і ефективних моделей прогнозування врожаю агрокультур представлені в табл. 2.

Таблиця 2.

Результати аналізу відомих моделей прогнозування врожаю сільськогосподарських культур

Вид моделі	Використовувані підходи та технології	Посилання
Емпіричні	Функціональний базис становлять алгоритми регресії та аналізу просторово-часових результатів спостережень щодо врожайності агрокультур та впливних факторів без обліку біологічних показників	[9, 10]
Геоінформаційні	Функціональною основою є супутникові знімки та результати картографування поверхні Землі з обліком кліматичних показників під час прогнозування врожаю агрокультур на великих територіях	[11, 12]
Механістичні	В основу функціонування покладено закономірності зміни показників продуктивності вирощування агрокультур від ґрунтових і агрокліматичних даних, агротехнологічних особливостей провадження сільськогосподарської діяльності, біологічного потенціалу агрокультур та інше	[13, 14]
Моделі на основі алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту	Функціональну основу являють алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту, що застосовуються для встановлення закономірностей впливу агрокліматичних даних на продуктивність вирощування агрокультур	[15, 16]
Комбіновані	В основу функціонування покладено логіку поєднання декількох вищезазначених моделей з метою обліку більшої кількості факторів задля підвищення точності прогнозів та адаптації до динаміки впливних факторів	[17, 18]

У результаті проведеного компаративного аналізу та логіко-аналітичного узагальнення існуючих підходів і формалізованих моделей прогнозування врожаю агрокультур (див. табл. 1 і 2) встановлено, що на сучасному етапі розвитку засобів цифрової трансформації агровиробництва найбільшої масштабності набули

технологічні рішення, побудовані на засадах інформаційно-орієнтованої парадигми з використанням комбінованих моделей.

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ Й СИСТЕМАТИЗАЦІЇ ВІДОМИХ МЕТОДІВ І ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНОГО ОПРАЦЮВАННЯ АГРОДАНИХ

Шляхом ґрунтовного опрацювання релевантних наукових джерел [19, 20] обґрунтовано доцільність реалізації багаторівневої методики опрацювання даних агромоніторингу, що дозволяє забезпечити необхідні показники адекватності й об'єктивності аналітичних результатів. Такий підхід потребує інтеграції кількох етапів у рамках єдиної апаратно-програмної архітектури: масштабований збір агроданих, первинне опрацювання, інтелектуальна аналітика і впровадження механізмів автоматизованої підтримки прийняття рішень (див. табл. 3).

Таблиця 3.

Результати систематизації етапів інтелектуальної трансформації даних агромоніторингу

Етап	Застосовувані технології та базовий функціонал
Збір даних	Бездротові мережі сенсорів, дрони, супутники, цифрові метеостанції, результати лабораторного аналізу, веб-сервіси та інше
Первинна обробка	Фільтрація, агрегація, заповнення пропусків у даних, усереднення, форматування, балансування, нормалізація та стандартизація
Інтелектуальний аналіз	Факторний аналіз, вилучення інформативних ознак, предикативний аналіз на основі алгоритмів машинного навчання та/або штучного інтелекту
Інтерпретація результатів	Графічна візуалізація, автоматизована інтерпретація моделей зі залученням методів пояснювального штучного інтелекту
Автоматизована підтримка рішень	Подієво-орієнтоване сповіщення користувачів, забезпечення сумісності із зовнішніми сервісами, зокрема на основі генеративного штучного інтелекту

Одним із базових етапів аналітики агромоніторингових даних є вилучення інформативних ознак, що націлено на підвищення продуктивності прогностичних моделей на основі алгоритмів машинного навчання. Існуючі методи вилучення інформативних ознак в основному поділяються на три групи: вбудовані, обгорткові та фільтраційні. Своєю чергою, ці методи можуть бути реалізовані на основі використання певної кількості алгоритмів [21], як показано на рис. 2. Також варто зазначити, що на теперішній час алгоритми машинного навчання є значно розвиненими й можуть бути класифіковані за показником наявності міток у навчальних масивах даних [22], як показано на рис. 3. Слід підкреслити, що результати прогнозування врожайності агрокультур, отримані шляхом застосування програмних засобів на основі алгоритмів машинного навчання щодо трансформації ґрунтокліматичних даних, вимагають не лише високої точності, але й обов'язкової автоматизованої інтерпретації з метою забезпечення довіри до відповідних моделей. У цьому контексті особливого значення набуває використання методів пояснювального штучного інтелекту (див. рис. 4) [23], що дозволяють деталізовано розкривати логіку прийняття рішень моделлю, формалізувати залежності між вхідними параметрами та прогнозованими результатами врожаю та адаптувати моделі під конкретні сценарії використання.

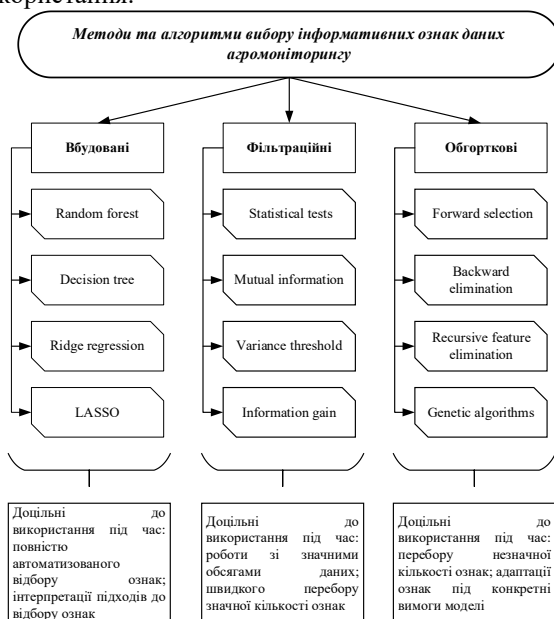


Рис. 2. Класифікація методів і алгоритмів вилучення інформативних ознак у агроданих

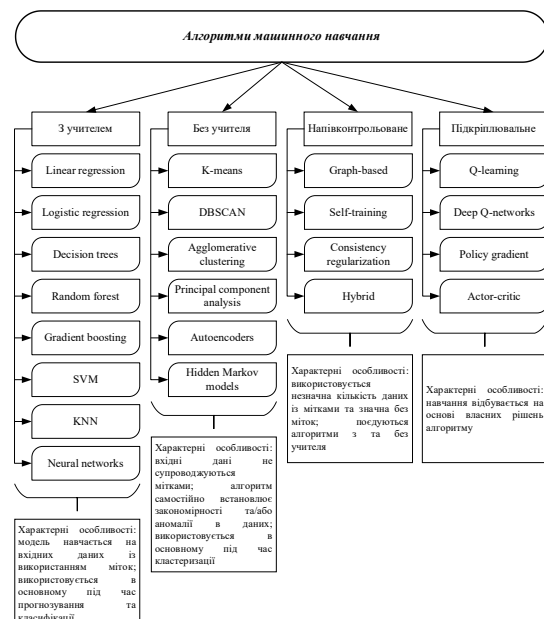


Рис. 3. Класифікація алгоритмів машинного навчання задля аналітики даних агромоніторингу

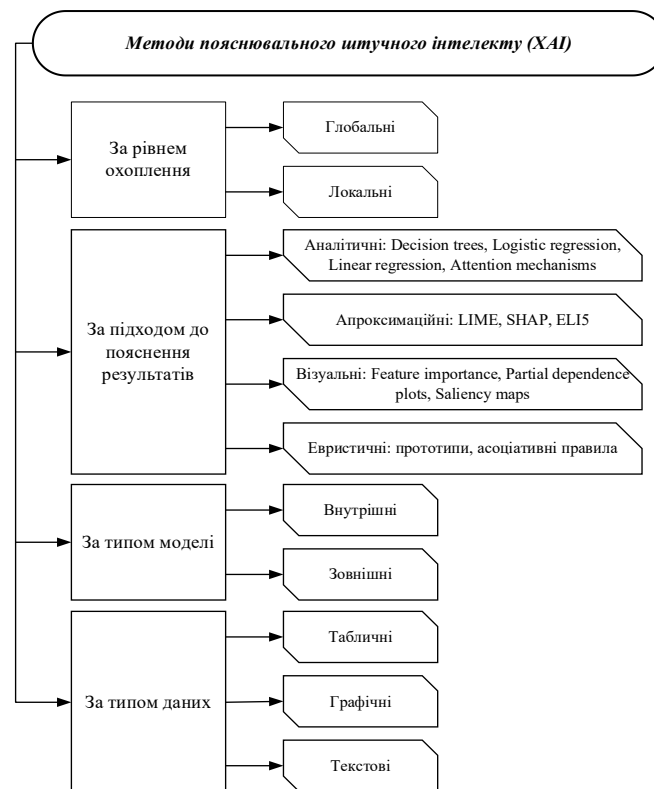


Рис. 4. Класифікація існуючих методів пояснювального штучного інтелекту

Отже, результати аналізу й систематизації відомих методів і програмно-алгоритмічних технологій інтелектуалізованого опрацювання даних агромоніторингу доводять, що на сьогоднішній день тренд цифрової трансформації сільського господарства шляхом створення й упровадження інтелектуалізованих програмно-алгоритмічних засобів комплексної аналітики даних агромоніторингу є динамічним і актуальним.

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ РОЗРОБОК І ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГРАМНО-АЛГОРИТМІЧНИХ РІШЕНЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЮ

У результаті проведених досліджень щодо критичного аналізу й систематизації наукових джерел і практичних напрацювань, які відображають сучасний стан розвитку програмно-алгоритмічного забезпечення цифровізації й інтелектуалізації агротехнологічних процесів у рослинництві, виявлено актуальну потребу в подальшому розвитку й удосконаленні підходів до створення й використання комплексних програмно-алгоритмічних архітектур інтелектуальних інформаційних систем прогнозування врожаю агрокультур. Ця потреба зумовлена рядом обмежень, які залишаються недостатньо проробленими, а саме:

- спостерігається дефіцит науково обґрунтованих підходів до синтезу комплексних архітектур програмно-алгоритмічного забезпечення інтелектуалізованої трансформації агромоніторингових даних, що надходять із різномірних джерел, а також недостатньо формалізованими залишаються етапи міжрівневої взаємодії під час багатоетапної обробки – від попереднього статистичного аналізу до інтелектуальної аналітики з пояснення результатів прогнозу та автоматизованої генерації рішень у режимі реального часу;

- існує певна обмеженість у методологічних основах об'єктивного розподілу обчислювального навантаження між ієрархічними рівнями інформаційно-вимірювальних систем, особливо в умовах реалізації архітектур на основі концепції туманних обрахунків, відомі на сьогоднішній день результати досліджень із інтеграції та оптимізації функціонального навантаження в розподілених обчислювальних середовищах здебільшого носять фрагментарний характер і потребують поглиблення в контексті аграрної специфіки;

- переважна більшість відомих прогнозних моделей щодо оцінки врожаю агрокультур синтезовані на основі історичних даних, що знижує їх адаптивність до просторово-часової варіативності агрокліматичних умов, які спостерігаються на сьогоднішній день, обмежена гнучкість таких моделей спостерігається під час врахування мінливості типів ґрунтів, фаз вегетації агрокультур і варіативності технологічних практик.

Все це доводить необхідність і важливість проведення подальших досліджень із удосконалення методів, засобів і моделей побудови програмно-алгоритмічних рішень інтелектуалізованого агромоніторингу в контексті підвищення показників адаптивності, масштабованості та релевантності до реальних агровиробничих умов.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У цій статті вирішено актуальну науково-прикладну задачу обґрунтування перспективних напрямків розвитку цифрових і інтелектуальних технологій прогнозування врожаю агрокультур на основі детального компаративного аналізу сучасного стану програмно-алгоритмічних рішень моніторингу параметрів агровиробничих процесів рослинництва відкритого ґрунту. Основні результати досліджень полягають у такому:

1. Обґрунтовано, що відомі підходи й моделі прогнозування врожаю агрокультур є доволі розвиненими та в більшості випадків ґрунтуються на різних фізичних і хіміко-біологічних аспектах агровиробничих процесів, а також на широкому спектрі використовуваних технологій збору й обробки даних агромоніторингу. Доведено перспективність і доцільність подальших досліджень із розробки програмно-алгоритмічних засобів інтелектуалізованої трансформації даних агромоніторингу задля прогнозування врожаю агрокультур на базі комбінованого підходу із використанням формалізованих моделей оцінки впливу кліматичних параметрів на ефективність вирощування з обліком дестабілізуючого впливу факторів різної природи.

2. У результаті проведеного класифікаційного аналізу релевантних інформаційно-орієнтованих методів і програмно-алгоритмічних засобів інтелектуальної трансформації агромоніторингових даних обґрунтовано доцільність багаторівневої архітектури програмно-алгоритмічного забезпечення, що має охоплювати етапи збору, обробки й інтерпретації даних з урахуванням сучасних інфокомунікаційних та інтелектуальних технологій.

3. Проведений компаративний аналіз і категоріальне структурування наявних наукових підходів і прикладних розробок у галузі програмно-алгоритмічного забезпечення інтелектуальної обробки агромоніторингових даних дозволили локалізувати основні техніко-функціональні обмеження сучасних рішень. Це, в свою чергу, дозволило сформулювати підґрунтя для формулювання перспективних напрямків досліджень із розробки та практичного застосування програмно-алгоритмічних рішень інтелектуального агромоніторингу.

ВПРОВАДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження статті виконані в рамках науково-дослідної теми «Розвиток програмно-апаратного забезпечення інтелектуальних технологій для сталого вирощування сільськогосподарських культур у воєнний та повоєнний час» (номер держреєстрації 0124U000289).

Література

1. National Centers for Environmental Information: Global Climate Report. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113> (дата звернення 25.05.2025).
2. World Economic Forum: Our resources are running out. These charts show how urgently action is needed. URL: <https://www.weforum.org/stories/2024/03/sustainable-resource-consumption-urgent-un/> (дата звернення 23.05.2025).
3. United Nations: Global Land Outlook 2. URL: <https://www.unccd.int/resources/global-land-outlook/glo2> (дата звернення 21.05.2025).
4. Worldometer: Current World Population. URL: <https://www.worldometers.info/world-population/> (дата звернення 22.05.2025).
5. World Health Organization: Hunger numbers stubbornly high for three consecutive years as global crises deepen: UN report. URL: <https://www.who.int/news/item/24-07-2024-hunger-numbers-stubbornly-high-for-three-consecutive-years-as-global-crises-deepen--un-report> (дата звернення 26.05.2025).
6. Muruganantham P., Wibowo S., Grandhi S., Samrat N.H., Islam N. A Systematic Literature Review on Crop Yield Prediction with Deep Learning and Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14 (9). P. 1–21.
7. Schauburger B., Jägermeyr J., Gornott C. A systematic review of local to regional yield forecasting approaches and frequently used data resources. *European Journal of Agronomy*. 2020. Vol. 120. P. 1–15.
8. Abu Javed Md., Murad M.A.A. Crop yield prediction in agriculture: A comprehensive review of machine learning and deep learning approaches, with insights for future research and sustainability. *Heliyon*. 2024. Vol. 10 (24). P. 1–19.
9. Hegedus P.B., Maxwell B.D., Mieno T. Assessing performance of empirical models for forecasting crop responses to variable fertilizer rates using on-farm precision experimentation. *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24. P. 677–704.
10. Szostek K., Mazur D., Drafus G., Kuszniar J. Analysis of the Effectiveness of ARIMA, SARIMA, and SVR Models in Time Series Forecasting: Case Study of Wind Farm Energy Production. *Energies*. 2024. Vol. 17 (19). P. 1–18.
11. Kryvoshein O., Kryvobok O., Kozhushko O. Correlation of satellite-based LAI and actual crop yield. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2023. Vol. 10 (3). P. 21–27.

12. Zhuo W., Fang S., Gao X., Wang L., Wu D., Fu S., Wu Q., Huang J. Crop yield prediction using MODIS LAI, TIGGE weather forecasts and WOFOST model: A case study for winter wheat in Hebei, China during 2009–2013. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 106. P. 1–14.
13. Food and Agriculture Organization: Decision-Support System for Agro-technology Transfer. URL: <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1027490/> (дата звернення 10.06.2025).
14. APSIM: The Leading Software Framework for Agricultural Systems Modelling and Simulation. URL: <https://www.apsim.info/> (дата звернення 10.06.2025).
15. Diachenko G., Laktionov I., Vinyukov O., Likhushyna H. A Decision Support System for Wheat Powdery Mildew Risk Prediction Using Weather Monitoring, Machine Learning and Explainable Artificial Intelligence. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. Vol. 230. P. 1–24.
16. Aslan M.F., Sabanci K., Aslan B. Artificial Intelligence Techniques in Crop Yield Estimation Based on Sentinel-2 Data: A Comprehensive Survey. *Sustainability*. 2024. Vol. 16 (18). P. 1–23.
17. Sun Q., Zhang Y., Che X., Chen S., Ying Q., Zheng X., Feng A. Coupling Process-Based Crop Model and Extreme Climate Indicators with Machine Learning Can Improve the Predictions and Reduce Uncertainties of Global Soybean Yields. *Agriculture*. 2022. Vol. 12 (11). P. 1–15.
18. Zare H., Weber T.K.D., Ingwersen J., Nowak W., Gayler S., Streck T. Combining Crop Modeling with Remote Sensing Data Using a Particle Filtering Technique to Produce Real-Time Forecasts of Winter Wheat Yields under Uncertain Boundary Conditions. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14 (6). P. 1–26.
19. Liu Y., Bao Y. Review on automated condition assessment of pipelines with machine learning. *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 53. P. 1–22.
20. Laktionov I., Diachenko G., Kashtan V., Vizniuk A., Gorev V., Khabarлак K., Shedlovska Y. A Comprehensive Review of Recent Approaches and Hardware-Software Technologies for Digitalisation and Intellectualisation of Open-Field Crop Production: Ukrainian Case Study in the Global Context. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 225. P. 1–31.
21. Barbieri M.C., Grisci B.I., Dorn M. Analysis and comparison of feature selection methods towards performance and stability. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 249 (B). P. 1–32.
22. Pandya H., Jaiswal K., Shah M. A Comprehensive Review of Machine Learning Algorithms and Its Application in Groundwater Quality Prediction. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024. Vol. 31. P. 4633–4654.
23. Abusitta A., Li M.Q., Fung B.C.M. Survey on Explainable AI: Techniques, challenges and open issues. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 255 (C). P. 1–18.

References

1. National Centers for Environmental Information: Global Climate Report. Retrieved from: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202113>
2. World Economic Forum: Our resources are running out. These charts show how urgently action is needed. Retrieved from: <https://www.weforum.org/stories/2024/03/sustainable-resource-consumption-urgent-un/>
3. United Nations: Global Land Outlook 2. Retrieved from: <https://www.unccd.int/resources/global-land-outlook/glo2>
4. Worldometer: Current World Population. Retrieved from: <https://www.worldometers.info/world-population/>
5. World Health Organization: Hunger numbers stubbornly high for three consecutive years as global crises deepen: UN report. Retrieved from: <https://www.who.int/news/item/24-07-2024-hunger-numbers-stubbornly-high-for-three-consecutive-years-as-global-crises-deepen-un-report>
6. Muruganantham P., Wibowo S., Grandhi S., Samrat N.H., Islam N. (2022). A Systematic Literature Review on Crop Yield Prediction with Deep Learning and Remote Sensing. *Remote Sensing*, 14 (9), 1–21.
7. Schauburger B., Jägermeyr J., Gornott C. (2020). A systematic review of local to regional yield forecasting approaches and frequently used data resources. *European Journal of Agronomy*, 120, 1–15.
8. Abu Jaded Md., Murad M.A.A. (2024). Crop yield prediction in agriculture: A comprehensive review of machine learning and deep learning approaches, with insights for future research and sustainability. *Heliyon*, 10 (24), 1–19.
9. Hegedus P.B., Maxwell B.D., Mieno T. (2023). Assessing performance of empirical models for forecasting crop responses to variable fertilizer rates using on-farm precision experimentation. *Precision Agriculture*, 24, 677–704.
10. Szostek K., Mazur D., Drafus G., Kuszniar J. (2024). Analysis of the Effectiveness of ARIMA, SARIMA, and SVR Models in Time Series Forecasting: Case Study of Wind Farm Energy Production. *Energies*, 17 (19), 1–18.
11. Kryvoshein O., Kryvobok O., Kozhushko O. (2023). Correlation of satellite-based LAI and actual crop yield. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 10 (3), 21–27.
12. Zhuo W., Fang S., Gao X., Wang L., Wu D., Fu S., Wu Q., Huang J. (2022). Crop yield prediction using MODIS LAI, TIGGE weather forecasts and WOFOST model: A case study for winter wheat in Hebei, China during 2009–2013. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106, 1–14.
13. Food and Agriculture Organization: Decision-Support System for Agro-technology Transfer. Retrieved from: <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1027490/>
14. APSIM: The Leading Software Framework for Agricultural Systems Modelling and Simulation. Retrieved from: <https://www.apsim.info/>
15. Diachenko G., Laktionov I., Vinyukov O., Likhushyna H. (2025). A Decision Support System for Wheat Powdery Mildew Risk Prediction Using Weather Monitoring, Machine Learning and Explainable Artificial Intelligence. *Computers and Electronics in Agric.*, 230, 1–24.
16. Aslan M.F., Sabanci K., Aslan B. (2024). Artificial Intelligence Techniques in Crop Yield Estimation Based on Sentinel-2 Data: A Comprehensive Survey. *Sustainability*, 16 (18), 1–23.

-
17. Sun Q., Zhang Y., Che X., Chen S., Ying Q., Zheng X., Feng A. (2022). Coupling Process-Based Crop Model and Extreme Climate Indicators with Machine Learning Can Improve the Predictions and Reduce Uncertainties of Global Soybean Yields. *Agriculture*, 12 (11), 1–15.
18. Zare H., Weber T.K.D., Ingwersen J., Nowak W., Gayler S., Streck T. (2022). Combining Crop Modeling with Remote Sensing Data Using a Particle Filtering Technique to Produce Real-Time Forecasts of Winter Wheat Yields under Uncertain Boundary Conditions. *Remote Sensing*, 14 (6), 1–26.
19. Liu Y., Bao Y. (2022). Review on automated condition assessment of pipelines with machine learning. *Advanced Engineering Informatics*, 53, 1–22.
20. Laktionov I., Diachenko G., Kashtan V., Vizniuk A., Gorev V., Khabaralak K., Shedlovska Y. (2024). A Comprehensive Review of Recent Approaches and Hardware-Software Technologies for Digitalisation and Intellectualisation of Open-Field Crop Production: Ukrainian Case Study in the Global Context. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225, 1–31.
21. Barbieri M.C., Grisci B.I., Dorn M. (2024). Analysis and comparison of feature selection methods towards performance and stability. *Expert Systems with Applications*, 249 (B), 1–32.
22. Pandya H., Jaiswal K., Shah M. (2024). A Comprehensive Review of Machine Learning Algorithms and Its Application in Groundwater Quality Prediction. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31, 4633–4654.
23. Abusitta A., Li M.Q., Fung B.C.M. (2024). Survey on Explainable AI: Techniques, challenges and open issues. *Expert Systems with Applications*, 255 (C), 1–18.