

УДК [004.94:631.527]+58.035
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.3.4>

Станіслав ВЕДМЕДЄВ

аспірант кафедри системного аналізу та обчислювальної математики,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
vedmedev_s@ukr.net
ORCID: 0009-0005-9635-8879

Еліна ТЕРЕЩЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
elina_vt@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6207-8071

ЦИФРОВА МОДЕЛЬ РОСЛИНИ СОНЯШНИКА ДЛЯ ФЕНОТИПУВАННЯ В ЗАДАЧАХ СЕЛЕКЦІЇ

Анотація. Розробка високопродуктивних сортів є ключовим напрямом у контексті зростаючого тиску глобальних викликів, серед яких кліматичні зміни, демографічне зростання та обмеженість природних ресурсів. Для ефективної реалізації сучасних селекційних програм актуальним є удосконалення методів автоматизованого фенотипування.

Метою роботи є розробка цифрової моделі рослини соняшника, яка забезпечує ефективне та точне фенотипування в контексті селекційних досліджень з виведення сортів соняшнику кондитерського напрямку. Роботу виконано у співпраці з фахівцями лабораторії генетики та генетичних ресурсів Інституту олійних культур НААН України.

Методологічний підхід базується на визначенні характеристик фенотипування кондитерського соняшника, які необхідні для розв'язання задач селекції, а саме фіксації морфологічних, біохімічних, фізичних, агрономічних ознак, умов вирощування. Визначені категорії, характеристик, одиниць вимірювання, типу даних та джерела даних.

Наукова новизна полягає в створенні цифрової моделі рослини соняшника для фенотипування в задачах селекції соняшнику кондитерського напрямку.

Висновки. В роботі визначено набір даних, об'єднання яких є цифровою моделлю рослини соняшника для фенотипування в контексті селекційних досліджень. Для цього створено перелік характеристик морфологічних, біохімічних, фізичних, зовнішнього середовища та агротехнологій, вказано джерело даних цієї інформації. Це забезпечує передумови для розробки та застосування стандартизованих методів збору даних та уніфікованих алгоритмів обробки великих масивів даних в селекційних дослідженнях.

Ключові слова: цифрова модель, фенотипування, онтологія.

Stanislav VEDMEDEV, Elina TERESCHENKO. DIGITAL MODEL OF SUNFLOWER PLANT FOR PHENOTYPING IN BREEDING TASKS

Abstract. The development of high-yielding crop varieties is a critical objective in the context of increasing global pressures, including climate change, population growth, and limited natural resources. To ensure the effectiveness of modern breeding programs, the advancement of automated phenotyping methods is essential.

This study aims to develop a digital model of the sunflower plant that facilitates efficient and precise phenotyping for use in breeding programs targeting confectionery sunflower varieties. The research was conducted in collaboration with specialists from the Laboratory of Genetics and Genetic Resources of the Institute of Oilseed Crops, NAAS of Ukraine.

The methodological approach is based on identifying the key phenotypic traits of confectionery-type sunflower required for solving breeding tasks. These traits include morphological, biochemical, physical, and agronomic characteristics, as well as environmental growing conditions. Categories, parameters, measurement units, data types, and data sources were systematically defined. The scientific novelty of this work lies in the creation of a digital model of the sunflower plant tailored specifically for phenotyping in confectionery sunflower breeding.

Conclusions. The study defines a comprehensive dataset, the integration of which constitutes a digital model of the sunflower plant for use in phenotyping within breeding research. The model includes a structured list of morphological, biochemical, physical, environmental, and agrotechnological parameters, along with clearly defined data sources. This provides a foundation for the development and application of standardized data collection methods and unified algorithms for processing large-scale datasets in breeding programs.

Key words: Digital model, Phenotyping, Ontology.

Постановка проблеми. Сучасне сільське господарство функціонує в умовах зростаючого тиску глобальних викликів, серед яких кліматичні зміни, демографічне зростання та обмеженість природних ресурсів. У цьому контексті особливої актуальності набуває селекція сільськогосподарських культур як ключовий інструмент забезпечення стабільного та ефективного агровиробництва. Селекція соняшника,

© С. Ведмедєв, Е. Терещенко, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

як однієї з основних олійних культур світу, має стратегічне значення для продовольчої безпеки та стало-го землеробства, зважаючи на його роль у формуванні сівозмін та адаптивний потенціал у різних агро-кліматичних умовах. Посилення вимог до врожайності, адаптивності та біотичної стійкості сортів і гібридів зумовлює необхідність інтеграції сучасних технологічних підходів у селекційний процес.

Серед таких підходів важливе місце займає моделювання, яке забезпечує формалізоване відображення об'єктів, процесів або явищ із метою їх аналізу, прогнозування та оптимізації. У галузі біології та аграрних наук моделі використовуються для кількісного опису фізіолого-біохімічних процесів, морфологічних характеристик рослин, а також для аналізу взаємодії з абіотичними та біотичними факторами середовища. Застосування моделей у селекції соняшника дозволяє інтегрувати інформацію про генотип, фенотип та умови вирощування для підвищення точності добору, прискорення циклів селекції та формування високопродуктивного, адаптивного вихідного матеріалу. В умовах обмежених ресурсів і зростаючої варіабельності зовнішніх факторів моделювання стає важливим інструментом для підвищення ефективності прийняття рішень у селекційній практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із перспективних підходів є технологія цифрових двійників (digital twins, DT), яка передбачає створення динамічної віртуальної моделі фізичного об'єкта або процесу з постійним оновленням її параметрів на основі даних у реальному часі. Цифровий двійник рослини (digital twin of a plant) – це комп'ютерно реалізована динамічна модель, яка безперервно відображає морфофізіологічний стан реального біологічного об'єкта, підтримує двосторонній зв'язок з фізичним середовищем і оновлюється на основі даних сенсорного моніторингу та зовнішніх впливів [3; 4; 11; 22; 23; 27; 30]. За рахунок використання оптичних, спектральних, глибинних і екологічних сенсорів модель акумулює дані про ключові ознаки росту (геометрія, орієнтація листа, щільність надземної маси, стан генеративних органів) та виявляє аномальні відхилення у розвитку [4; 24]. У практиці фенотипування широко застосовуються mesh-моделі, які відтворюють зовнішню поверхню об'єкта на основі трикутної сітки, та voxel-моделі, що формують об'ємне представлення на основі регулярної тривимірної дискретизації [24; 19]. Цифровий двійник виконує функцію відтворюваної цифрової репрезентації, що може бути збережена у форматі багат шарової бази даних, масштабована, використана в симуляційних експериментах, або передана в інші дослідницькі чи виробничі середовища [22; 25]. NeRF метод використовується для реконструкції складних геометрій рослин та дрібних структур у статичному лабораторному середовищі, тому може бути корисним для селекційної роботи з рослинами при відповідній розробці умов фіксації [20, 21; 29]. Також методи 3D реконструкції на основі NeRF, згорткових нейронних мереж та 3D Гаусового розсіювання розглянуто в роботах [15; 16; 18]. Важливим напрямом є розробка моделей, що враховують розвиток рослини в часі, тобто темпоральних цифрових двійників. У роботі GrowSplat [8] запропоновано підхід на основі 3D Gaussian Splatting, що дозволяє створювати послідовності 3D-моделей для кожного моменту часу та виконувати їх вирівнювання (alignment). Це забезпечує відстеження морфологічних змін і динамічний аналіз росту.

Аналіз досліджень та публікацій демонструє активне застосування інформаційних технологій для різних завдань в агрономії, що породжує необхідність побудови різноманітних моделей під певний тип задачі. Далі розглянемо застосування поняття цифрової моделі рослини для селекції. В попередній роботі авторів [14] введено поняття цифрової моделі рослини як набору цифрових даних, що містять характеристики рослини та агротехнологій. В роботі визначено набір характеристик, важливих для селекції соняшника кондитерського, а саме насіння та кошика, що є тільки частиною необхідної інформації для фенотипування.

Метою статті є розробка цифрової моделі рослини соняшника, яка забезпечує ефективне та точне фенотипування в контексті селекційних досліджень, включаючи морфологічні, біохімічні та фізичні характеристики, вплив зовнішнього середовища та агротехнологій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Селекція як наука і практика спрямована на створення нових сортів, ліній та гібридів культурних рослин з покращеними господарсько цінними ознаками. У контексті селекції соняшника, як однієї з провідних олійних культур, особливо актуальними є задачі підвищення врожайності, стійкості до біотичних та абіотичних чинників, а також поліпшення якісних показників насіння. Для успішного розв'язання цих задач селекціонеру необхідно, по-перше, обрати або розробити ефективну методику ідентифікації та кількісної оцінки цільових ознак, важливих у селекційному процесі. По-друге, використовуючи цю методику, провести всебічну оцінку наявного селекційного матеріалу, встановити варіабельність та рівень спадковості досліджуваних ознак. По-третє, на основі отриманих даних створити нові генотипи із бажаним проявом цільових характеристик. Основними вхідними даними в процесі є генетичне різноманіття вихідного матеріалу, умови вирощування, результати фенотипової та, за можливості, генотипової оцінки. Ключовими викликами

залишаються складність контролю багатьох кількісних ознак, вплив навколишнього середовища на їх реалізацію, а також необхідність поєднання традиційних методів селекції з сучасними молекулярно-генетичними підходами. Таким чином, ефективна селекція соняшника потребує комплексного підходу, що включає інтеграцію новітніх технологій із класичними принципами генетики та агрономії.

Фенотип, як інтегральний прояв генотипу в конкретних умовах середовища, становить основну оцінну одиницю в селекційній практиці, оскільки саме за фенотиповими параметрами здійснюється добір генотипів із підвищеною адаптивною та продуктивною цінністю. Комплекс ознак, таких як продуктивність, вміст олії, рівень резистентності до біотичних агентів та толерантність до абіотичних стресорів, визначає господарську придатність гібридів, ліній та сортів для впровадження у виробництво. Проте валідна інтерпретація фенотипічної варіабельності можлива виключно за умови точного знання агроекологічного контексту, в якому реалізується відповідний генотип, з огляду на істотний вплив факторів середовища на експресію спадкових ознак.

У зв'язку з цим постає необхідність у створенні уніфікованих інформаційно-аналітичних систем, які б інтегрували фенотипічні дані з параметрами зовнішнього середовища, зокрема, ґрунтовими характеристиками, кліматичними умовами, агротехнічними прийомами та іншими релевантними чинниками. Формування такої єдиної бази знань є критично важливим для підвищення точності селекційної оцінки, забезпечення репродуктивності результатів між дослідними платформами, сезонами та географічними зонами, а також для об'єктивного аналізу складних кількісних ознак у процесі генетичного поліпшення соняшника. Розробці онтології вирощування соняшника присвячено попередню роботу авторів [13].

У процесі генетичного поліпшення сільськогосподарських культур, зокрема соняшника (*Helianthus annuus* L.), перед селекціонером постає комплекс завдань, що визначають ефективність селекційного циклу. Першочерговим є розроблення або вдосконалення аналітичних методик і протоколів кількісного оцінювання ознак, які мають суттєве господарське значення. Наступним критичним етапом є застосування цих методик для репрезентативного фенотипування селекційного генофонду з метою встановлення спадкової стабільності та генетичної детермінованості відповідних ознак. Заключним кроком у селекційному процесі є формування нових генотипічних конструкцій – ліній, сортів або гібридів, які характеризуються стабільним і високим рівнем експресії цільових фенотипових ознак.

На сучасному етапі розвитку аграрної науки важливу роль у цьому процесі відіграє фенотипування, що є технологією високоточної кількісної оцінки морфологічних, фізіологічних та біохімічних ознак рослин. Традиційно оцінка складних ознак, таких як стійкість до абіотичних (засуха, висока температура) та біотичних (збудники хвороб, шкідники) факторів, здійснювалася переважно за допомогою суб'єктивних бальних шкал, які ґрунтувались на візуальних спостереженнях дослідника. У багатьох випадках така оцінка супроводжувалася умовною кількісною інтерпретацією, наприклад, у вигляді відсотка уражених рослин або ступеня ураження листової поверхні. Водночас обмежена кількість повторень, обумовлена ресурсними факторами, додатково знижувала достовірність отриманих результатів.

У зв'язку з цим фенотипування набуло особливого поширення насамперед у дослідженнях стресостійкості, де дозволило досягти істотного прогресу завдяки більш об'єктивному, відтворюваному та кількісному підходу до оцінки ознак [9; 17]. Паралельно з розвитком фенотипових платформ активно розвиваються молекулярно-генетичні технології, зокрема методи картування геному та аналізу асоціацій генотип-ознака. Завдяки цим підходам було ідентифіковано численні локуси, пов'язані з такими ознаками, як посухостійкість. Найбільш глибокі дослідження дозволили локалізувати відповідні гени на конкретних ділянках геному [12; 28]. Однак наступним кроком у розумінні природи цих ознак є вивчення функціональної ролі відповідних генів у формуванні фенотипу, що потребує залучення фізіолого-біохімічних досліджень [26]. Такі роботи мають поодинокий характер через їх високу вартість, трудомісткість і технологічну складність як на фенотиповому, так і на молекулярному рівні.

Для створення цифрової моделі рослини, необхідно визначитися з переліком характеристик, що є важливими для селекційного відбору. При селекційному відборі соняшника важливими є ознаки насінини та кошика, а саме розмір насіння, натура, лушпинність, щільність лушпиння, обрушуваність, відсоток крупного насіння, форма, розміри, забарвлення насіння, вміст білку та олій. В роботі [14] було визначено перелік характеристик для кондитерського соняшнику за ознаками насінини та кошика, який базується на вимогах Державної методики України «Методика визначення однорідності та стабільності (ВОС)» та досліджень Інституту олійних культур НААН України [10]. Дослідниками Інституту олійних культур було розширено набір характеристик й введені нові градації для деяких з них. Запропоновано нові градації і вимір ознак у кількісному варіанті для співвідношення площ темного та світлого забарвлень та сили руйнування оболонки насінини. В роботі [14] зафіксовано такий

перелік характеристик для цифрової моделі рослини соняшнику для фенотипування: довжина насінини (мм, см), ширина насінини (мм, см), товщина насінини (мм, см), форма насінини (категоріальна), товщина відносно ширини (тонка, середня, товста), основний колір насінини (категоріальна), смуги на краю насінини (відсутні, слабкі, виражені), колір смуг (категоріальна), співвідношення площ темного та світлого забарвлення (< 1/4, 1/4–3/4, > 3/4), плямистість перикарпію (відсутня, наявна), вага насінини (г), вміст олії у насінні (%), вміст білку у насінні (%), лушпинність (%), вміст олеїнової кислоти в олії (%), вміст пальмітинової кислоти в олії (%), вміст лінолевої кислоти в олії (%), вміст лінолевої кислоти в олії (%), сила руйнування оболонки насінини (Н), положення кошику (кут у градусах або категоріальна), розмір кошику (см), форма кошику зі сторони сім'янок (категоріальна), кількість насінин у кошику (шт.), кількість спіралей насінин у кошику (шт.), кількість насінин у кожній спіралі (шт.), вага насінин у кошику (г). Визначено джерело отримання даних та метод зберігання.

Визначимо додатково характеристики, що має містити цифрова модель рослини соняшника. Для оцінки генотипу та впливу зовнішнього середовища дуже важливими є такі показники як висота рослин і площа та колір листя. Для оцінки можливості успішного виживання рослини в складних умовах необхідно враховувати довжину головного кореня та об'єм ґрунту охопленого коренями рослини.

Далі визначимо параметри впливу зовнішнього середовища, які потребують визначення при фенотипуванні в контексті селекційних досліджень.

Рослина соняшнику знаходиться на межі впливу двох стихій, а саме ґрунту та повітря. Значна частина успіху у реалізації генотипу залежить від складу та стану ґрунту, що добре описано у роботах з ґрунтознавства, агрохімії, агрономії та інших науках [6]. Головними факторами для рослин є вміст головних поживних елементів у вигляді доступних сполук азоту, фосфору, калію, а також наявність відповідної органічної складової – гумусу та мікроелементів [2]. Однак і інші складові теж мають свій внесок і можуть при достатній кількості основних факторів виявити свій основний вплив. Основні характеристики ґрунту представлено в (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики ґрунту, які фіксуються для задач фенотипування соняшнику

Категорія	Характеристика	Одиниця вимірювання / Тип даних	Джерело даних
Фізичні властивості	Тип ґрунту	Класифікаційна категорія	Лабораторний аналіз / польова оцінка
	Структура ґрунту	Якісна оцінка	Візуальна оцінка / сенсори
	Щільність	г/см ³	Лабораторія / польові сенсори
	Пористість	%	Розрахунок
	Вологість	%	Вологоємні сенсори
	Температура	°C	ґрунтові термометри
	Кам'янистість	% або кількість каміння на м ²	Візуальна оцінка / сенсори
Хімічні властивості	pH	Шкала кислотності (0–14)	Лабораторія / pH-метри
	Електропровідність	dS/m	Сенсори / лабораторія
	Вміст гумусу	%	Лабораторія
	Вміст органічної речовини	%	Лабораторія
	Азот (N)	мг/кг	Лабораторія
	Фосфор (P)	мг/кг	Лабораторія
	Калій (K)	мг/кг	Лабораторія
	Мікроелементи (Fe, Mn, Zn, B тощо)	мг/кг	Лабораторія
Біологічні властивості	Мікробіологічна активність	Кількість колоній / активність	Лабораторія
	Наявність патогенів	Виявлено / Не виявлено	Лабораторія
Агротехнічні фактори	Історія обробітку поля	Текст / запис	База агрономічних даних
	Система удобрення	Типи добрив, дози, дати внесення	Агрономічна документація
	Зрошення	Обсяг, частота	Сенсори / агродокументація
	Попередники	Назви культур	План сівозміни / документація

Основні кліматичні характеристики, які фіксуються для фенотипування рослин у селекційних дослідженнях представлено в (табл. 2). Джерелами кліматичних даних можуть бути локальні метеостанції, мобільні агрокліматичні сенсори, супутникові платформи (Copernicus, NASA POWER), дані з агрометеорологічних сервісів (Meteoblue, NOAA, Weather API). Ці впливи мають тенденції до змін, які зараз відтворюються в глобальне потепління. В умовах України збільшується посушливість клімату, що доведено Семеновою І.Г. [7].

Таблиця 2

**Кліматичні характеристики, які фіксуються для фенотипування рослин
у селекційних дослідженнях**

Категорія	Характеристика	Одиниця вимірювання / Тип даних	Джерело даних
Температурні умови	Середньодобова температура	°C	Метеостанції / датчики
	Максимальна денна температура	°C	Метеостанції / логери
	Мінімальна нічна температура	°C	Метеостанції / логери
	Температурні стреси (кількість днів >30°C або <5°C)	Кількість днів	Метеорологічні архіви
	Сума активних температур за період вегетації рослин	°C	Метеостанції / логери
Опади	Загальна кількість опадів	мм	Метеостанції / дощоміри
	Інтенсивність опадів	мм/год або мм/доба	Метеостанції
	Посушливі періоди	Кількість днів без опадів	Аналіз метеоданих
	Сума опадів за період вегетації рослини	мм	Метеостанції / дощоміри
Сонячне випромінювання	Сонячна радіація (інсоляція)	МДж/м ² /день або Вт/м ²	Радіометри / супутникові дані
	Тривалість світлового дня	Години	Астрономічні розрахунки
	Кількість похмурих / сонячних днів	Днів	Супутникові знімки / архіви
Вологість повітря	Середня відносна вологість	%	Метеостанції / гігрометри
	Мінімальна / максимальна вологість	%	Метеостанції / логери
Вітер	Середня швидкість вітру	м/с	Анемометри / метеостанції
	Максимальні пориви вітру	м/с	Метеостанції
	Напрямок вітру	Кут / сектор (N, NE, E, тощо)	Метеостанції
Інші показники	Атмосферний тиск	гПа або мм рт. ст.	Барометри
	Випаровуваність (Evapotranspiration, ET0)	мм/доба	Розрахунок за формулами FAO
	Кількість градобоїв / буревіїв / заморозків	Події (факт фіксації)	Метеозведення / польові спостереження
Кліматичні індекси	Сума активних температур (>10°C)	°C	Агрономічні розрахунки
	Індекс аридності (засушливості)	Безрозмірна величина	Розрахунок за метеоданими
	Кількість сприятливих днів для вегетації	Дні	Агрономічні моделі

Частину кліматичних умов і властивостей ґрунту можна цілеспрямовано модифікувати за допомогою агротехнічних прийомів. Зокрема, йдеться про здійснення додаткового зрошення, внесення мінеральних та органічних добрив, глибоке рихлення ґрунту. Біотичні фактори, обумовлені дією кліматичних чинників і навколишнього середовища – зокрема шкідники та патогенні організми – також чинять істотний вплив на розвиток рослин. Їхня шкодочинність може змінюватися під впливом

агротехнічних прийомів і засобів хімічного чи біологічного походження, що застосовуються в агрономічній практиці. Отже, агрономічні заходи відіграють ключову роль у реалізації потенціалу генотипу та його адаптації до конкретних кліматичних умов регіону. Тому врахування агрономічного впливу є необхідною умовою як у процесі фенотипування рослин, так і при побудові цифрових моделей їх розвитку. Дослідження, що проводяться в умовах контрольованого середовища, як правило, передбачають моделювання лише тих факторів, які створені людиною. Відтак, виникає необхідність забезпечення рослини всіма основними ресурсами: водою, світлом, теплом, макро- і мікроелементами. Включення впливу агрономічних чинників, насамперед агротехнічних прийомів (табл. 3), сприяє підвищенню точності аналізу фенотипових ознак. Інформація збирається вручну, за допомогою агро-ІТ-систем або автоматично з дронів, сенсорів чи машинної телеметрії.

Таблиця 3

Агротехнічні характеристики, які фіксуються та враховуються при фенотипуванні рослин

Категорія	Характеристика	Одиниця вимірювання / Тип даних	Джерело даних
Обробіток ґрунту	Тип основного обробітку (оранка, глибоке рихлення, mini-till, no-till)	Кваліфікатор (назва методу)	Польовий журнал, агроплан
	Глибина основного обробітку	см	Агроагрегати, агрономічна карта
	Тип передпосівного обробітку	Кваліфікатор	Польові записи
Сівба	Дата сівби	Дата	Журнал агротехнологій
	Густота стояння рослин	тис. рослин/га	Польові обміри / дрони
	Глибина загортання насіння	см	Польові виміри
	Схема сівби	міжряддя (см)	Сівалки, документація
Добрива	Вид добрив	НРК, органічні, мікроелементи	Агроплани, лабораторні аналізи
	Доза внесення	кг/га або л/га	Польові журнали
	Спосіб внесення (в основне, припосівне, листове, фертигація)	Кваліфікатор	Агрокартографія
	Кількість внесення	Кількість разів	План-графік
Зрошення / волога	Спосіб зрошення (краплинне, дощування, борозенкове)	Кваліфікатор	План зрошення
	Об'єм поданої води	мм або м ³ /га	Системи зрошення
	Кількість поливів	Разів	Агроніма
Захист рослин	Вид ЗЗР (гербіциди, фунгіциди, інсектициди)	Назва + діюча речовина	Журнал обробок, AgroScout
	Дата та фаза внесення	Дата / фенологічна фаза	Скаутинг, агрокалендар
	Доза внесення	л/га або кг/га	Сертифікат, обприскувач
	Спосіб обробки	Наземний, авіаційний, дрон	Польові журнали
Інші агроприйоми	Мульчування	Наявність / тип	Польові спостереження
	Інокуляція / стимуляція	Препарати / методика	Журнал агрозаходів
	Суміжні культури / сівозміна	Попередник, наступна культура	Агрономічний план

Питанням зберігання та структурування даних присвячено попередні роботи авторів [13].

Висновки. Створення доступних, стандартизованих і відтворюваних інструментів фенотипування є актуальним напрямом сучасної селекції. Для ефективного використання інформаційних технологій у селекційних програмах цифрова модель повинна точно відображати морфологічні, фізіологічні та розвиткові характеристики рослин. Це можливо завдяки інтеграції даних з різних джерел таких як сенсори, комп'ютерний зір і екологічні вимірювання. Такі інструменти мають забезпечувати кількісну цифрову оцінку цільових ознак рослин з фіксацією умов зовнішнього середовища. Це дозволяє здійснювати об'єктивне порівняння між генотипами та математично обґрунтовувати виявлені відмінності. Ефективність подібних рішень можлива лише за умов дотримання стандартизованих методів збору даних та уніфікованих алгоритмів обробки. У цьому контексті запропоновано створення цифрової моделі рослини соняшнику для фенотипування в задачах селекції. Запропонований підхід не лише підвищує точність фенотипової оцінки, а й створює передумови для автоматизації обробки

великих масивів даних. Це є важливим кроком у цифровій трансформації сучасної селекційної науки. Крім того, цифрова модель рослини може стати основою для створення складніших прогнозних систем, спрямованих на оцінку стану рослин і оптимізацію агротехнологічних рішень.

Список використаних джерел:

1. Атлас морфологічних ознак сортів рослин соняшнику однорічного *Helianthus annuus* L. (наочне доповнення до Методики проведення кваліфікаційної експертизи на ВОС соняшнику однорічного) / Міністерство аграрної політики та продовольства України; Український інститут експертизи сортів рослин. К.: Український інститут експертизи сортів рослин, 2018. 79 с.
2. Господаренко Г. М., Черно О. Д., Мартинюк А. Т., Бойко В. П. Винесення основних елементів живлення з ґрунту культурами польової сівозміни за різного удобрення. *AgroChemistry and Soil Science*. 2021. № 91. С. 31–40.
3. Грачов О. Plant monitoring system: III-система для розумного моніторингу рослин. Інформаційні технології та суспільство. 2025. Вип. 1 (16). С. 59–64. <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.7>
4. Зозуля О. Л., Швартау В. В., Михальська Л. М., інші. Сучасні методи цифрового моніторингу в рослинництві. frg.org.ua. URL: <https://frg.org.ua>
5. Кендзьора Н. З. Динаміка температури атмосферного повітря і режим опадів як фактори змін фенологіки рослин в період 2010–2019 років. *Екологія, природокористування та охорона навколишнього середовища: прикладні аспекти*. 2020. С. 51–54.
6. Примак І. Д., Купчик В. І., Лозінський М. В., Войтовик М. В., Панченко О. Б., Косолап М. П., Панченко І. А. Агрономічне ґрунтознавство. К.: 2017. 580 с.
7. Семенова І. Г. Синоптичні та кліматичні умови формування посух в Україні: монографія. Одеський державний екологічний університет. Х.: ФОП Панов А. М., 2017. 236 с.
8. Adebola T, Zhang Y, Kim J, Navlakha S. GrowSplat: Dynamic 3D Gaussian splatting for plant morphology alignment. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2505.10923. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.10923>
9. AgEval: A Benchmark for Zero-Shot and Few-Shot Plant Stress Phenotyping with Multimodal LLMs. *arXiv preprint*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2306.05431>
10. Aliyev E. B. Development of a device for automatic phenotyping of sunflower seed material. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. Vol. 10, No. 1. P. 11–17. ISSN 2663-1334. (Kyiv, Ukraine).
11. Andres F, Wiechers D, Langensiepen M, Kage H. Field Robot Platform for Phenotyping Maize. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 182. Article ID: 105991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.105991>
12. Atkinson N. J., Lilley C. J., Urwin P. E. Genome-Wide Association Mapping of Time-Dependent Growth Responses to Moderate Drought Stress in Arabidopsis. *Plant Cell and Environment*. 2013. Vol. 36, Issue 2, pp. 262–276. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02598.x>
13. Bakurova A., Vedmedeva K., Vedmedev S., Tereschenko E. Ontological model of *Helianthus* cultivation in Ukrainian conditions. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3396. P. 130–140.
14. Bakurova A., Vedmedeva K., Vedmedev S., Tereschenko E., Shyrokograd D. Development of the System for the Digital Model of the *Helianthus* Phenotype. *Proceedings of the VI International Scientific Congress Society of Ambient Intelligence 2023 (ISC SAI 2023)*. 20–25 November 2023. P. 20–25. ISBN 978-80-88618-46-1. DOI: 10.46489/ISCSAI-23-30.
15. Gao Y, Qi X. Neural 3D Gaussian Splatting for Plant Structure Reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*. 2024. Vol. 43, No. 4. P. 1–14.
16. Hu M., Zhao W., Li J. NeRF-based dynamic 3D modeling of plant growth using multi-view time series. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2024. (in press).
17. Intelligent Monitoring of Stress Induced by Water Deficiency in Plants using Deep Learning. *arXiv preprint*. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2205.09364>
18. Li Q., Wang Z., Chen L., Xu Y. Integrating 3D Gaussian Fields with NeRF for High-Fidelity Plant Reconstruction. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 3. Article ID: 987. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25030987>
19. Liu S., Wang H., Yan J., Chen Y. 3D Plant Phenotyping with Voxel-Based Reconstruction Techniques. *Plant Methods*. 2020. Vol. 16. Article ID: 116. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00652-1>
20. Martin-Brualla R., Radwan N., Sajjadi M. S. M., Barron J. T., Dosovitskiy A., Duckworth D. NeRF in the Wild: Neural Radiance Fields for Unconstrained Photo Collections. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2021. P. 7210–7219.
21. Mildenhall B., Srinivasan P. P., Tancik M., Barron J. T., Ramamoorthi R., Ng R. NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. *Communications of the ACM*. 2021. Vol. 65, No. 1. P. 99–106.
22. Shi Y., Zhang Y., Xu J., Li B. Digital twins in plant phenotyping: Concepts, applications, and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article ID: 1038810. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1038810>
23. Tardieu F, Cabrera-Bosquet L, Pridmore T, Bennett M. Plant Phenomics, From Sensors to Knowledge. *Current Biology*. 2017. Vol. 27, No. 15. P. R770–R783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.055>
24. Tsaftaris S. A., Minervini M., Scharf H. Machine learning for plant phenotyping needs image processing. *Trends in Plant Science*. 2016. Vol. 21, No. 12. P. 989–991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.10.002>
25. Ubbens J. R., Stavness I., Francis P. The use of plant models in deep learning: An overview and roadmap. *Plant Methods*. 2018. Vol. 14. Article ID: 36. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0312-8>
26. Wang, J., et al. Transcriptome Profiles Reveal Response Mechanisms and Key Role of PsNAC1 in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to Drought Stress. *BMC Plant Biology*. 2022. Vol. 22, Article 72. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03475-7>

27. Yu Y., Schlüter U., Weber M. DT-FieldPheno: A digital twin approach for high-throughput field phenotyping. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 188. Article ID: 106349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106349>
28. Zhang, Z., et al. Molecular Mechanisms of Drought Resistance Using Genome-Wide Association Mapping in Maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11, Article 1109. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01109>
29. Zhu H., Huang L., Li Y. High-resolution 3D reconstruction of plants using NeRF-based models in controlled environments. *Journal of Plant Research and Imaging*. 2024. Vol. 29, No. 2. P. 145–159.
30. Ziamtsov I., Navlakha S. GrowSplat: Data-driven modeling of plant architecture using voxelized imaging. *Bioinformatics*. 2020. Vol. 36, Suppl_1. P. i125–i132. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa432>

Дата надходження статті: 27.09.2025

Дата прийняття статті: 20.10.2025

Опубліковано: 04.12.2025