






УДК 631.54:633.282

## Математичні моделі прогнозування врожайності біоенергетичних культур

 О. І. Присяжнюк<sup>1</sup>,  О. А. Маляренко<sup>1</sup>,  A. Lazdiņš<sup>2</sup>,  
 В. В. Мусіч<sup>1</sup>,  О. М. Гончарук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна, \*e-mail: ollpris@gmail.com

<sup>2</sup>Latvian State Forest Research Institute "Silava", Riga street 111, Salaspils, Latvia

**Мета.** Визначити математичні моделі, придатні для прогнозування врожайності біоенергетичних культур, та закономірності моніторингу стану біоенергетичних культур. **Методи.** Польові дослідження проводили в умовах зон нестійкого (дослідне поле Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, с. Ксаверівка друга, Київська обл.) та достатнього зволоження (Ялтушківська дослідно-селекційна станція ІБКіЦБ, с. Черешневе, Вінницька обл.) Правобережного Лісостепу України впродовж 2022–2024 рр. **Результати.** Заморозки згубно діють на молоді паростки міскантусу гігантського, і попри повторне відростання, зниження врожайності культури сягало 15,5 % (зона достатнього зволоження) та 22,4 % (зона нестійкого зволоження). Недостатнє вологозабезпечення теж обмежує формування врожайності міскантусу гігантського, обмежуючи дозу удобрення до 20 кг/га. За таких умов прогнозу врожайність міскантусу можна розрахувати за рівнянням:  $y = 15,19 + 0,29 X - 0,005 X^2$ . В умовах же достатнього зволоження, невеликі дози добрив не обмежують функції лінійного приросту біомаси міскантусу гігантського. За таких умов прогнозу врожайність можна визначити за рівнянням:  $y = 18,44 + 0,25 X$ . **Висновки.** Для розрахунку прогнозованої врожайності в умовах конкретного регіону варто користуватись можливостями регресійної моделі, запропонованої Воссеном, яка враховує середню врожайність, лінійний часовий тренд та лінійну регресійну функцію. А для певного агрокліматичного регіону показник урожайності біоенергетичних культур визначається за формулою, яка враховує загальну площу земель регіону, частку площ, задіяних під вирощуванням біоенергетичної культури, та показників прогнозованої для умов регіону врожайності. Система прогнозування врожайності біоенергетичних культур умовно складається з таких рівнів: 1) визначення площ плантацій біоенергетичних культур у межах ГІС-карти регіону з уточненням віку плантації та сортів, що використовуються; 2) уточнення умов середовища (тип ґрунту, режим вологозабезпечення, мінеральне живлення); 3) спостереження за елементами погоди; 4) спостереження за вегетаційними індексами; 5) моделювання врожайності.

**Ключові слова:** верба енергетична; міскантус гігантський; індекс NDVI.

### Вступ

Математична модель – це абстрактне представлення певного об'єкта або системи, виражене математичними засобами. Модель культури – це набір математичних виразів, який описує те, як генетичні характеристики культури, агротехніка і вплив факторів довкілля взаємодіють і визначають її ріст і розвиток [24, 39]. Моделі давно вже визнані корисними інструментами, які дають змогу агрономам, фермерам, політикам і дослідникам приймати більш виважені рішення й надавати обґрунтованіші рекомендації щодо вирощування сільськогосподарських культур [40].

Завданням моделі культури є імітувати ріст рослини як результат численних серій взаємодій між рослиною, ґрунтом, кліматом та агротехнікою. Сама по собі модель культури є складною структурою, побудованою з простих алгоритмів, кожен з яких описує окрему взаємодію [39]. Усі сучасні сільськогосподарські моделі будують на основі опису процесів енерго- й масообміну між

рослинами й доквіллям. А підходи до моделювання базуються на трьох основоположних поняттях: система, модель та імітація [18]. «Система» – обмежена частина реальності, яка містить взаємопов'язані елементи, а сукупність взаємозв'язків між цими елементами в системі називається «структурою системи». «Модель» є спрощеним уявленням про систему, і модель, як і система має структуру. Моделі можуть бути динамічними або статичними, залежно від того, чи представляють вони системи, які змінюються з часом, чи ні. Моделі імітаційні є підвидом моделей динамічних, і представляють вони зміни станів у часі, тоді як моделі оптимізаційні (або статистичні) є підвидом статичних моделей. Поняття «імітація» належить до побудови математичних моделей і вивчення поведінки моделей у межах тієї системи, яку вони представляють [42].

Імітаційні моделі лише формально описують в електронному вигляді процеси, що відбуваються з рослиною у полі, насправді ж у них реальний живий об'єкт замінено комп'ютерним імітатором. Точність такої моделі повністю базується на сукупності знань і закономірностей зміни росту й розвитку рослин під впливом факторів навколишнього середовища [25]. Динамічні ж моделі дають змогу точніше прогнозувати ріст і розвиток рослин та аналізувати наслідки впливу зовнішніх факторів шляхом відтворення змін, що відбуваються з об'єктом, та урахуванням особливостей його функціонування залежно не тільки від вихідних даних, а й інформації про стан системи [1, 4, 5, 14]. Отже, динамічні моделі повніше описують процеси, адже вони дають можливість урахувати дискретно-безперервний характер природних явищ [30]. Але важливо зауважити, що у стадіях росту й розвитку рослин можна виділити періоди, які різко відрізняються один від одного за інтенсивністю та спрямованістю впливу факторів довкілля, своєрідні критичні точки. Тому вплив погодного-грунтового умов упродовж вегетаційного періоду та агротехніка повинні бути синхронізовані з настанням певних фенологічних фаз росту й розвитку рослин, щоб модель змогла реально оцінити вплив того чи іншого фактору на рослини [31].

Перші дієві моделі прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур з'явилися на початку 1970-х років. Здебільшого такі моделі були призначені для проведення нових досліджень, адже накопичених знань було недостатньо для їхнього виробничого використання [2, 18].

Розвиток моделювання в 70–80-х роках ХХ ст. у країнах колишнього СРСР та решті світу відбувався синхронно, проте з відмінностями, зокрема й підходів до побудови моделей. Глибокі знання з фізіології рослин та потужний математичний апарат, закладений в основу вітчизняних моделей росту й розвитку сільськогосподарських культур, давали змогу контролювати багато параметрів з високою точністю. Однак, складність реалізації та відсутність широкого розповсюдження комп'ютерної техніки призвели до того, що розроблені моделі не були реалізовані на практиці й не мали впровадження у виробничі процеси [49]. Водночас у країнах Заходу на початку 1980-х з'явилися перші програми, орієнтовані на прийняття рішень для планування зрошення, необхідності боротьби зі шкідниками та хворобами тощо [44, 46, 47].

Серед вітчизняних моделей варто виділити модель формування врожайності сільськогосподарських культур О. Д. Сиротенка, яка враховує вплив факторів довкілля на продуктивність рослин не тільки через процес фотосинтезу, але й через процеси дихання й старіння тканин. Ця модель призначена для використання в автоматизованій системі агрометеорологічного забезпечення сільського господарства. Рослини в моделі розглядаються як функціонально диференційоване ціле, у якому виділено п'ять структурних одиниць: листки, стебла, корені, оболонка колоса і зерно. Крок моделі – одна доба [49].

Модель впливу агрометеорологічних умов на ріст, розвиток і формування врожаю озимої пшениці В. С. Антоненка заснована на чотирьох періодах життєдіяльності озимої пшениці, а саме: проростання, осіння вегетація, зимівля й весняно-літня вегетація. Ці періоди становлять блоки. Окремим блоком є агрометеорологічні фактори. Усі блоки описують математичними рівняннями в межах кожного з факторів впливу з урахуванням розвитку ситуації як з погляду оптимального, так і неоптимального фізіологічного значення факторів, необхідних для росту й розвитку пшениці озимої [48].

Базова динамічна модель формування врожаю сільськогосподарських культур А. М. Польового побудована на основі закономірностей формування гідрометеорологічного режиму у системі «грунт – рослина – атмосфера» й біологічних уявлень про ріст і розвиток сільськогосподарських культур під впливом факторів навколишнього середовища. Модель складається з восьми блоків: вхідної інформації, радіаційно-теплового режиму рослинного покриву, водного режиму рослинного покриву, фотосинтезу, дихання і старіння рослин, мінерального живлення й росту рослин. В основі

моделі лежить система рівнянь радіаційного, теплового, водного балансів, а також балансу біомаси (вуглеводу та азоту) в рослинному покриві [49].

Серед міжнародних шкіл моделювання варто виділити «School of de Wit», яка була започаткована в Нідерландах у 70-х роках минулого століття Кісом де Вітом [47]. У різноманітних моделях цієї школи продукційний процес рослин представлено у вигляді системи інтенсивної взаємодії таких процесів, як асиміляція CO<sub>2</sub>, дихання, ріст і розвиток рослини. Швидкість протікання цих фізіологічних процесів визначають умови навколишнього середовища [10, 35]. Командою вчених під керівництвом Кіса де Віта було розроблено такі моделі, як ELCROS (Elementary CROp Simulator), BACROS (Basic CROp growth Simulator), у яких вологозабезпеченість і мінеральне живлення не лімітують продуктивності рослин. Модель PHOTON (Simulation of Daily Photosynthesis and Transpiration) було розроблено на базі BACROS – її більше деталізували та зменшили часовий крок [16, 41]. Наступним етапом розвитку цих моделей стала модель ARID CROP, яка враховує вплив вологи на продуктивність сільськогосподарських культур, і модель PAPRAN (Production of Arid Pastures limited by Rainfall and Nitrogen), яка враховує динаміку вмісту азоту в ґрунті та вплив доступності цього елемента на продуктивність рослин [10, 11].

Варто відзначити вагомий внесок у подальший розвиток моделювання рослин таких моделей, як SUCROS [10, 43], CERES і CROPGRO [5]. Доволі цікавою в плані нетрадиційної реалізації концептуальних підходів школи «School of de Wit» є модель LINTUL, у якій швидкість росту біомаси розраховують як продукт захоплення сонячного випромінювання рослинністю й ефективності використання світла [43].

Подібна модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), яка була розроблена для моделювання якості та кількості поверхневих і підземних вод, а також для прогнозування екологічних наслідків землекористування, методів управління землею та зміни клімату [27] була трансформована в модель SWAP (Soil–Water–Atmosphere–Plant), яка фактично є деталізованою агрогідрологічною моделлю, у якій моделюються взаємозв'язки між ґрунтом, водою, погодою і рослиною [16, 45]. Модель SWAP включає низку підмоделей для обробки різних аспектів системи «ґрунт – рослина – атмосфера», а саме: рух води в ґрунті, передача тепла в ґрунті, транспортування розчинів, переміщення поживних речовин і забруднювачів, ріст рослин, зрошення і дренаж, система поверхневих вод.

Модель WOFOST (WOrld FOod STudies) [17] є механістичним, динамічним інструментом моделювання, розробленим для аналізу росту та продуктивності однорічних польових культур. Вона кількісно оцінює ріст культур на основі основних процесів, таких як фотосинтез і дихання, та як ці процеси впливають на умови навколишнього середовища. Сьогодні параметри цієї моделі визначено для озимої пшениці, кукурудзи, ярого ячменю, рису, буряків цукрових, картоплі, кормових бобів, сої, озимого ріпаку і соняшнику [8, 33]. Модель включає кількісний аналіз – розраховує потенційну врожайність, використання води тощо, на основі типу ґрунту, виду культури, погодних даних та агротехніки. Має три рівні продуктивності: потенційну, досяжну (обмежену) та фактичну (знижену). Застосування: WOFOST використовується в системі моніторингу росту культур у ЄС для моніторингу польових культур і прогнозування врожайності та для оцінки невикористаного потенціалу виробництва культур. WOFOST підтримується Wageningen Environmental Research у співпраці з Wageningen University & Research. Спрощена версія моделі WOFOST інтегрована в модель SWAP 2.0. Обидві моделі мають подібні вимоги до вхідних даних і часто використовуються разом для моделювання росту культур і водного балансу в сільськогосподарських системах [17].

Модель CERES-Wheat належить до американської школи моделювання. Вона відображає вплив густоти рослин, погоди, вологості ґрунту і вмісту азоту на ріст, розвиток і формування врожаю злакових культур. Модель має два рівні прогнозу – локальний і регіональний [23]. Вона прогнозує фази розвитку, кількість листків на головному стеблі, кількість пагонів і кількість зерен у колосі. Фактично, модель CERES-Wheat була розроблена для оцінювання продуктивності різних видів пшениці з точки зору формування потенційної врожайності [37]. Команда розробників постійно вдосконалює свій продукт, і наразі моделі CROPGRO та CERES є частиною набору з прогнозування росту сільськогосподарських культур, наявних у програмному забезпеченні під назвою DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) [28, 29]. Однак система DSSAT має низку обмежень, що ускладнюють її експлуатацію та не дають змогу користувачам легко інтегрувати ці моделі й імітувати вплив сівозмін, що важливо з погляду ведення сучасного землеробства [9].

Імітаційну модель процесного типу EPIC було розроблено для оцінювання впливу зміни клімату, землекористування й агрономічних заходів на продуктивність культур і екологічну стабільність. Її застосовують для оцінювання ерозії ґрунтів, водокористування, росту культур і колообігу поживних речовин [15].

Модель CropSyst накопичує багаторічні експериментальні дані та, на відміну від аналогів, має крок моделювання врожайності один день, а не настання певних фенологічних фаз росту й розвитку. Модель імітує баланс вологи в ґрунті, ерозійні процеси, баланс азоту в системі «ґрунт – рослина», ріст і розвиток рослин, накопичення сухої речовини, врожайність, побічні продукти або поживні рештки та їх розкладання. Варіанти управління включають: вибір сорту, сівозміни, зрошення, удобрення азотом, обробіток ґрунту (понад 80 варіантів) та управління залишками. Модель адаптована для таких культур, як кукурудза, пшениця, ячмінь, соя, картопля, сочевиця, сорго, люпин, чай і виноград [6, 7, 19, 20, 21, 22, 38].

Процесна модель культур APSIM поєднує елементи як механістичних, так і емпіричних підходів. Вона подібна до CropSyst і представлена як платформа для моделювання систем рільництва. Вона містить набір модулів, які дають змогу моделювати системи для різноманітних взаємодій рослин, ґрунту, клімату і технологій вирощування [32, 36].

Розвиток технологій відкриває можливості поєднання моделей культур із сучасними технологіями, такими як зображення з супутників або БПЛА, машинне навчання (Machine Learning, великі дані (Big Data) та ШІ. Досягнення в застосуванні штучного інтелекту (ШІ) можуть забезпечити точні та реальні прогнози врожайності, використовуючи великі набори даних з різних джерел, наприклад, супутникові знімки, дані про стан ґрунтів і показники здоров'я рослин. Індекси рослинності отримують із супутникових або безпілотникових знімків і використовують для оцінки й прогнозування врожайності. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати ці набори даних для виявлення закономірностей і кореляцій [3, 13]. Такі технології часто потребують нових типів моделей або перепакування старих моделей рослин на нові мови програмування, що полегшує їх інтеграцію із сучасними типами та великими обсягами даних [17]. Нові джерела й великі обсяги даних стають доступними для моделювання культур, а це дає змогу застосовувати моделі культур у більших просторових і часових масштабах [26].

Для створення моделі врожайності культури насамперед потрібна модель культури, тобто математичне представлення її росту й розвитку. Вона допомагає моделювати, як різні умови навколишнього середовища та методи управління вирощуванням впливають на врожайність. Прикладом можуть бути механістичні моделі DSSAT і APSIM. Другим етапом є збір даних (історичні дані про погоду, ґрунт, методи управління культурою та врожайність). Далі з масивів даних виділяються релевантні ознаки (наприклад, параметри погоди або характеристики ґрунту), які можуть впливати на врожайність культури. Наступним кроком є вибір алгоритму машинного навчання для прогнозування. Це можуть бути популярні алгоритми машинного навчання (Machine Learning), такі як Random Forest і Support Vector Machine, Neural Networks та ін. Обраний алгоритм навчають за допомогою історичних даних та перевіряють його продуктивність за допомогою окремого набору даних, щоб забезпечити точність і надійність. Після навчання та валідації модель можна використовувати для прогнозування майбутніх урожаїв на основі поточних та прогнозованих умов [12, 34, 39]. Отже, комбінуючи модель культури з алгоритмами машинного навчання, як-от RF або SVM, можна ефективно прогнозувати врожайність та оптимізувати сільськогосподарські практики.

Моделі культур є основним інструментом для дослідження можливих майбутніх сценаріїв продовольчої безпеки та адаптації до змін клімату та для поглиблення нашого розуміння того, як культури реагують на біо- та абіотичні стреси. Попри їх доведену корисність, очевидно те, що наявні моделі культур потребують удосконалення і що необхідний безперервний цикл досліджень, що включає моделювання та експериментування. Майбутні дослідження повинні приділяти пріоритетну увагу розроблянню моделей інших культур, крім основних культур, для яких моделі вже є, та розширенню поточних можливостей моделей культур [42].

**Мета досліджень** – визначити математичні моделі, придатні для прогнозування врожайності біоенергетичних культур, та закономірності моніторингу стану біоенергетичних культур.

### **Матеріали та методика досліджень**

Польові дослідження виконували в умовах зони нестійкого зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідному полі Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН

України (с. Ксаверівка друга, Київська обл.), а також зони достатнього зволоження Правобережного Лісостепу України на дослідних ділянках Ялтушківської дослідно-селекційної станції ІБКіЦБ (с. Черешневе, Вінницька обл.) упродовж 2022–2024 рр.

Спостереження за біоенергетичними рослинами проводили за допомогою дрона DJI Mavic 3M Multispectral, що має мультиспектральну камеру, здатну вести зйомку в діапазонах Near infrared (NIR) 860 nm, Red edge (RE) 730 nm, Red (R) 650 nm, Green (G) 560 nm, а також RGB камеру видимого спектру. Також використовували можливості супутникового спостереження за полями з використанням даних, отриманих супутником Sentinel 2, та агрегування їх за допомогою програмного забезпечення OneSoil, яке дає змогу визначити межі ділянок, зайнятих під вирощуванням біоенергетичних культур, та працювати з даними агрегування елементів погоди (середньодобові температури повітря, сума активних температур, кількість опадів та їх сума), а також показниками визначення NDVI індексів посівів.

Ґрунт дослідного поля ІБКіЦБ – чорнозем глибокий середньосуглинковий на лесовидному суглинку: вміст гумусу – 2,58 % (за Тюрнім), лужногідролізованого азоту – 176 мг/кг ґрунту (за Корнфільдом), рухомих сполук фосфору та калію – 160 і 95 мг/кг ґрунту (за Чиріковим),  $pH_{\text{сольове}}$  – 6,75, сума ввібраних основ – 305 мг-екв/кг ґрунту, гідролітична кислотність – 9,1 мг-екв/кг. Уміст гумусу та лужногідролізованого азоту середній, рухомого фосфору – високий, а калію – підвищений.

Ґрунт Ялтушківської ДСС ІБКіЦБ – сірий лісовий легкосуглинковий на лесовидному суглинку: вміст гумусу – 1,86% (за Тюрнім), лужногідролізованого азоту – 62 мг/кг ґрунту (за Корнфільдом), рухомих сполук фосфору та калію – 110 і 120 мг/кг ґрунту (за Чиріковим),  $pH_{\text{сольове}}$  – 5,52, сума ввібраних основ – 227 мг-екв/кг ґрунту, гідролітична кислотність – 2,9 мг-екв/кг. Уміст гумусу та лужногідролізованого азоту дуже низький, фосфору та калію – підвищений.

Енергетичну вербу висаджували за такою схемою: відстань між саджанцями – 0,60 м, відстань між рядами – 0,70 м. Площа садивної та облікової ділянок – 30 м<sup>2</sup>, повторність – триразова, загальна площа дослідів – 720 м<sup>2</sup>. Густота насаджень – 20 тис. живців на 1 га. Сорт верби – ‘Збруч’.

Міскантус гігантський висаджували за такою схемою: площа облікової ділянки – 20 м<sup>2</sup>, загальна площа дослідів – 1080 м<sup>2</sup>. Повторність дослідів – триразова. Сорт міскантусу гігантського – ‘Осіній зорецвіт’. Дослідження вмісту елементів живлення виконували за допомогою Palintest SKW 500 Complete Soil Kit.

Погодні умови були строкатими, з градацією від надмірного зволоження до посухи, однак такими, що дали змогу ефективно визначити стан рослин біоенергетичних культур. Зокрема, в зоні нестійкого зволоження випадало в середньому 500–550 мм, тоді як у зоні достатнього зволоження – 600–650 мм опадів, що достатньо для розвитку біоенергетичних культур та формування високого рівня їх продуктивності.

У контрольованих умовах рослини вирощували в горщиках, за щільності фотосинтетичного потоку фотонів (PPF, 360–830 нм) 354 ммоль/с та ефективності фотонного потоку (PPF/3, 360–830 нм) 4,46 ммоль/с. Для освітлення використовували лампи LPL-1-144-L-FITO (Ледпрофлайн, Львів, Україна) з фотоперіодом 16 годин. Денна / нічна температура – 27 / 20 °С, відносна вологість повітря – 50–70 %.

## Результати досліджень

Сьогодні в Україні є декілька баз даних для аграріїв, які заслуговують уваги. Зокрема, це «Агrometeorологічний моніторинг УкрГМІ», що дає змогу отримувати агrometeorологічні параметри та параметри біопродуктивності сільськогосподарських культур з різним часовим інтервалом (доба, декада, місяць), які надалі використовуються для прогнозування врожайності.

В основі моніторингу лежить адаптована для України система CGMS (<https://dat.uhmi.org.ua>). «Онлайн платформа AgroStats» містить відкриті дані державної статистики сільського господарства України. Охоплено період 1980–2023 рр. для України та 1990–2023 рр. для областей України. AgroStats може допомогти аграріям оцінити потенційний виробничий результат, обрати найприбутковіші культури, визначити необхідну кількість насіння та добрив. Науковці та держслужбовці агросектору за допомогою AgroStats можуть оцінити динаміку розвитку рослинництва України, зміну відсотка посівних площ, тренди врожайності та внесення добрив (<https://agrostats.uhmi.org.ua/>). Однак, спільними недоліками цих систем є те, що з 2022 року вони не наповнюються даними повноцінно, наповнення даних відбувається за областями, а багато областей України в своїх межах мають поєднання різних агрокліматичних зон. Бази даних містять фактичні

дані, з представленням даних Держстату у вигляді картографічної інформації та прогнозуванням урожайності на наступний рік. При цьому не враховується ґрунтово-кліматичний аспект вирощування сільськогосподарських культур.

Якщо детальніше розглянути структуру системи «Агrometeorологічний моніторинг УкрГМІ», то вона побудована на базі CGMS (Crop Growth Monitoring System) фахівцями УкрГМІ спільно з УкрГМЦ. Спочатку вони провели методичну і технологічну адаптацію цієї системи для оцінки умов вирощування пшениці озимої в Україні для виконання таких завдань: створення баз метеорологічних і агrometeorологічних даних (проінтерпольованих у сітку ґридів 50 × 50 км), бази даних характеристик ґрунтів (було використано карту ґрунтів у масштабі 1:2 500 000), бази даних врожайності сільськогосподарських культур (надані відділом агrometeorології УкрГМЦ).

База даних працює за такою структурою (рис. 1) та містить рівні оцінки метеорологічних умов вирощування (1), моделювання продукційного процесу рослин (2), прогнозування врожайності (3).

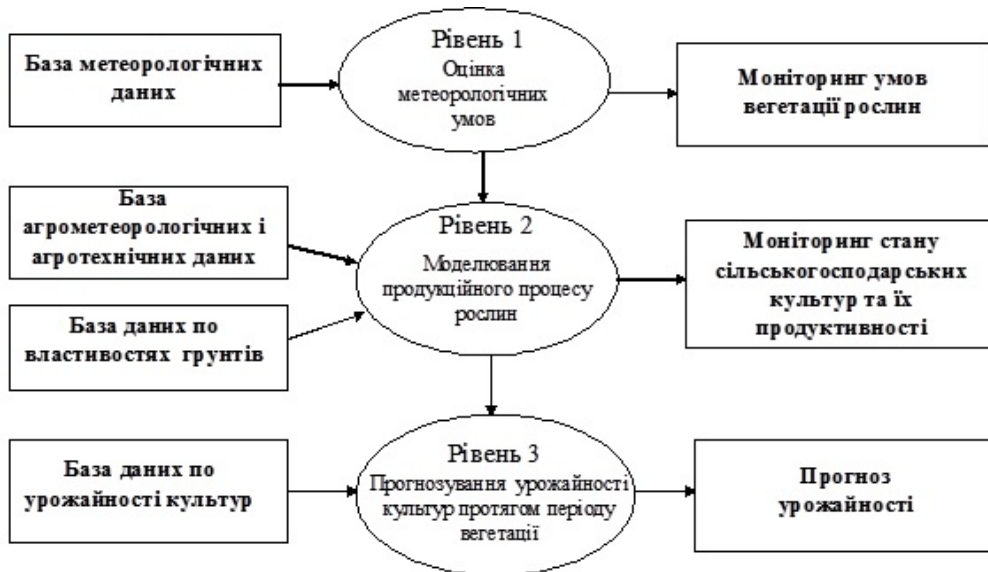


Рис. 1. Загальна структура системи CGMS [49]

На першому рівні збираються щоденні дані радіаційного, термічного режиму та режиму зволоження території, дати початку, закінчення і тривалості вегетації, сортовий склад, показники світло-, тепло- та вологопотребі, типологічні ознаки за потребою у факторах життя, критичні значення метеорологічних величин у різні фази розвитку, дані про властивості ґрунтів. Більшість метеорологічних та агrometeorологічних величин, які заносяться у базу даних, визначаються шляхом безпосередніх вимірювань на гідрометеорологічних станціях. Характеристики ґрунтів отримують на основі картографічних та довідкових джерел. Дані з урожайності заносяться в базу даних із джерел офіційної статистики.

Що стосується моніторингу умов погоди у період вегетації сільськогосподарських культур, то в Україні є 185 гідрометеорологічних станцій, які формують щоденні дані наземних метеорологічних спостережень (рис. 2). Проте, просторова інтерполяція метеорологічних даних у вузли регулярної сітки розміром 50 × 50 км представляє труднощі в плані формування достовірності отримуваних даних, оскільки розташування гідрометеорологічних станцій не відповідає розмірам цієї сітки. Адже для покриття площі України з рівномірним розміщенням гідрометеорологічних станцій у вузлах регулярної сітки розміром 50 × 50 км потрібно приблизно 240 метеостанцій. При цьому ми все одно не можемо гарантувати точність отримуваних елементів погоди, оскільки на конкретному полі все досить сильно залежить від мікрорельєфу й супутніх факторів.

При цьому маємо невирішеним питання визначення вологості ґрунту. Маємо тільки кількості опадів, що випали в регіоні. Але саме вологість ґрунту є більш інформативним показником до оцінювання стану рослин. А пошарове визначення вологості ґрунту вимагає додаткового автоматизованого обладнання або ж рутинної ручної праці.

Також потрібно розуміти, що питання організації щоденного моніторингу елементів погоди не важливі в контексті прогнозування продуктивності багаторічних біоенергетичних культур, що є

наслідком значно вищого рівня їх стійкості до змін основних показників – температур повітря та опадів, порівняно з однорічними культурами.

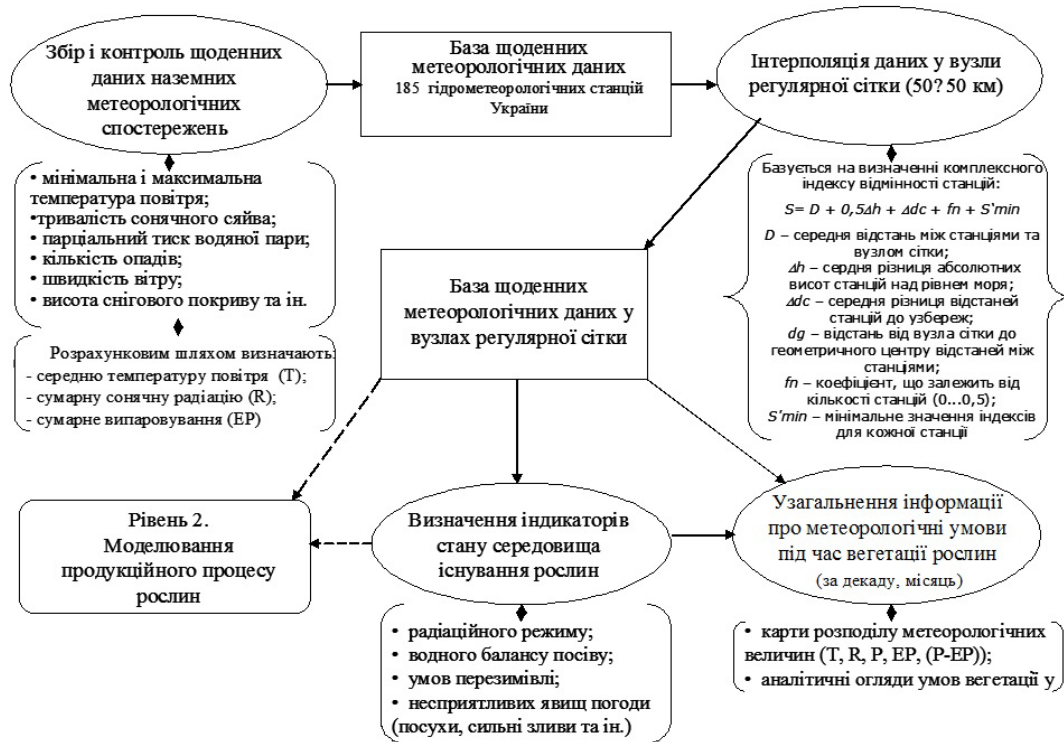


Рис. 2. Схема моніторингу погодних умов у системі CGMS [49]

У цій системі моніторинг урожайності сільськогосподарських культур передбачає три етапи: моделювання продукційного процесу рослин; просторова агрегація індикаторів продуктивності сільськогосподарських культур у межах адміністративних територіальних одиниць; комплексна кількісна та якісна оцінка стану посівів сільськогосподарських культур (рис. 3).



Рис. 3. Функціональні й інформаційні блоки системи моніторингу формування врожайності сільськогосподарських культур [49]

Ця система базується на динамічній точковій моделі WOFOST [8, 33, ], у якій накопичення врожаю сільськогосподарськими культурами описується на основі даних фенологічного розвитку, асиміляції CO<sub>2</sub> і утворення сухої речовини, розподілу асимілятів, транспірації та дихання.

Такі підходи занадто складні для визначення потенційної врожайності культур, особливо багаторічних, що мають свою специфіку утворення вегетативної маси та накопичення запасних поживних речовин, запаси яких здебільшого важко оцінити з позиції правильного класифікування руху асимілятів у рослині.

Також потенційні можливості до формування біомаси рослинами першого, другого та наступних років вегетації різуче відрізняються, у зв'язку із чим класичні моделі не можуть бути використаними для прогнозування (табл. 1).

Таблиця 1

**Урожайність верби й міскантусу гігантського різних років вегетації (за даними багаторічних дослідів ДПДГ «Саливонківське» та Ялтушківської ДСС)**

Рік вегетації	Урожайність сухої маси верби, т/га	Урожайність сухої маси міскантусу, т/га
1-й	-	-
2-й	3-5	5-7
3-й	7-9	12-18
4-й	14-18	20-25
5-й та наступні до 15 року	до 20	до 25
з 16 до 20-го року	до 16-18	до 20

У перші роки вегетації продуктивність плантацій далека від прогнозних показників зі щорічного отримання 20 т/га сухої біомаси верби та до 25 т/га міскантусу гігантського. Причому вербу збирають принаймі раз на два роки, оскільки щорічне збирання фактично призводить до знищення плантацій через значне травмування кущів.

Тому, для оцінювання потенційної продуктивності біоенергетичних рослин в умовах регіону слід вираховувати сценарії їх росту й розвитку, першочергово з урахуванням віку біоенергетичних плантацій. Оскільки вище біологічних вікових обмежень рослини не здатні сформувати показники врожайності. А вже з урахуванням вікових обмежень плантацій, потенційна продуктивність їх визначається для двох сценаріїв – сприятливі умови зволоження та умови недостатнього вологозабезпечення. При цьому, плантації міскантусу гігантського слід оцінювати також на ранніх етапах відновлення вегетації на предмет знищення сходів заморозками. Культура міскантусу – багаторічна і в своєму кореневищі має значну кількість бруньок, здатних прокинутись і сформувати повторні паростки, проте, як показали дослідження рослин, сходи яких були знищені заморозками, ми отримуємо мінімум 15 % недобору врожайності, порівняно з тими самими умовами, де сходи рослин не були знищені заморозками (табл. 2).

Для імітації впливу заморозків ми видаляли всю наземну біомасу рослин через два тижні після появи сходів, а другу половину ділянки залишали вегетувати. При цьому, там, де сходи міскантусу були знищені, рослини відростали повторно, формуючи нові пагони зі сплячих бруньок на ризомах кореневищ (табл. 2).

Таблиця 2

**Оцінка врожайності міскантусу гігантського (т/га) за знищення сходів заморозками та різних рівнів вологозабезпечення (за даними 2023-2024 рр., ДПДГ «Саливонківське» та Ялтушківська ДСС)**

Вплив на сходи	Недостатнє вологозабезпечення (ДПДГ «Саливонківське»)	Сприятливі умови вологозабезпечення (Ялтушківська ДСС)
Вегетують	19,6	23,8
Знищені через 14 діб після початку вегетації	15,2	20,1
Зниження врожайності, %	22,4	15,5

Як бачимо, за настання умов недостатнього вологозабезпечення насадження міскантусу гігантського потрапляють у більш складні щодо відростання умови, пов'язані вже і з дефіцитом вологи в більш пізні періоди.

Також у процесі формування системи прогнозування врожайності слід враховувати той факт, що за багатьма параметрами багаторічні рослини відрізняються від класичних однорічних або озимих.



Особливо важливим показником є густина насаджень, яка в разі закладання багаторічників регулюється більш точно, причому завжди є змога додатково досадити рослини, тим самим підвищивши якість насадження. У традиційних сільськогосподарських культур такої можливості немає, а особливо критичною ситуація є з озимими або зимуючими видами. Отже, параметр густоти посівів можна ігнорувати за вищого вирощування багаторічних біоенергетичних культур.

Також слід враховувати елементи агротехніки, або ж аргументувати їх не врахування в системі прогнозування врожайності. Такі культури, як міскантус гігантський та верба енергетична потребують невеликої кількості мінерального живлення, яке, зазвичай, закладається під час створення плантації або ж, як у випадку з міскантусом гігантським, вноситься в нормах 20–60 кг/га добрив щорічно. Тому, за прогнозування врожайності цих культур вважаємо, що виробничники сформувавши оптимальні для верби дози мінеральних добрив. Тоді як для міскантуса гігантського варто докладніше вивчити реакцію рослин на щорічні зміни мінерального живлення, а особливо дефіцитного його компоненту – азоту (табл. 3).

Таблиця 3

**Оцінка врожайності міскантуса гігантського (т/га) за різних доз азотних добрив та рівнів вологозабезпечення (за даними 2023–2024 рр., ДПДГ «Саливонківське» та Ялтушківська ДСС)**

Доза азотних добрив у д. р., кг/га	Недостатнє вологозабезпечення (ДПДГ «Саливонківське»)		Сприятливі умови вологозабезпечення (Ялтушківська ДСС)	
	урожайність	NDVI	урожайність	NDVI
Без добрив	15,6	0,73	18,3	0,80
5	16,0	0,75	19,7	0,83
10	17,4	0,77	21,0	0,85
15	18,2	0,81	22,4	0,87
20	19,6	0,84	23,8	0,90
25	19,4	0,83	24,5	0,92
30	19,0	0,81	26,0	0,94
HP <sub>0,05</sub>	0,14	0,01	0,17	0,01

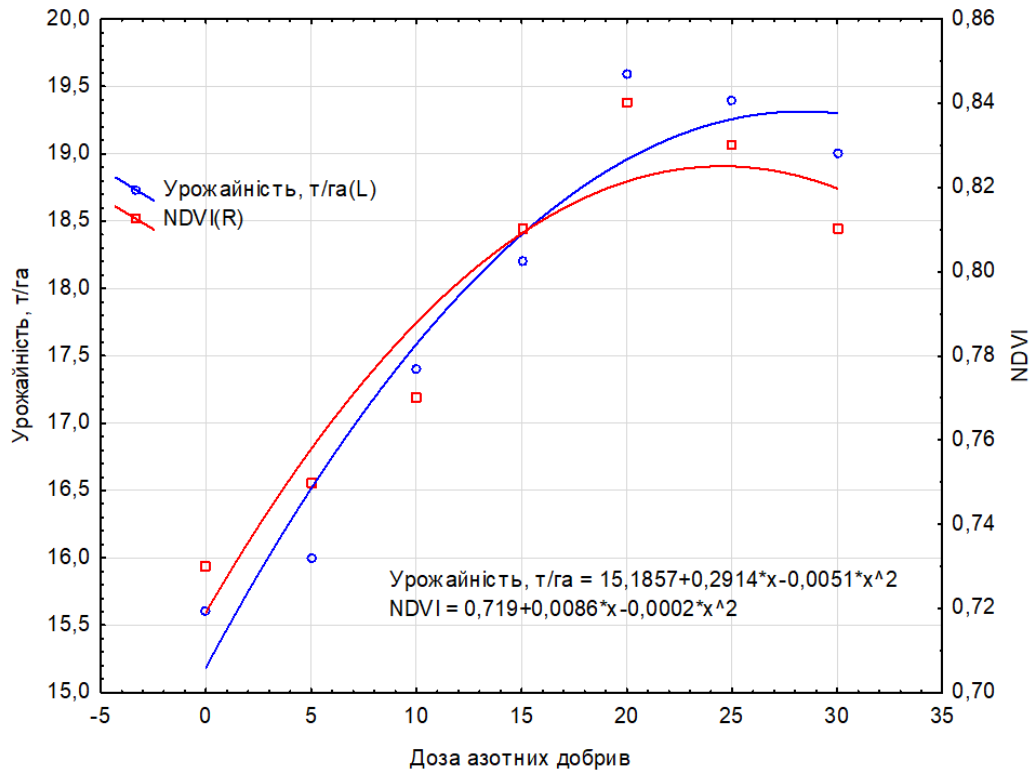
Також ми визначали індекс NDVI цих дослідних ділянок у період активного наростання біомаси біоенергетичних культур (перша декада серпня) за допомогою дрона DJI Mavic 3M Multispectral, що має мультиспектральну камеру, здатну вести зйомку в діапазонах Near infrared (NIR) 860 nm, Red edge (RE) 730 nm, Red (R) 650 nm, Green (G) 560 nm, а також RGB камеру видимого спектру.

Як бачимо, за умов недостатнього вологозабезпечення спостерігається обмеження формування врожайності міскантуса гігантського, спричинене саме фактором недостатнього вологозабезпечення, що відповідає рівню удобрення у 20 кг/га. При цьому, за недостатнього рівня вологозабезпечення нами отримано поліноміальні залежності між показниками (рис. 4), а за необмеженості рослин міскантуса гігантського вологою маємо лінійну функцію зростання врожайності культури (рис. 5).

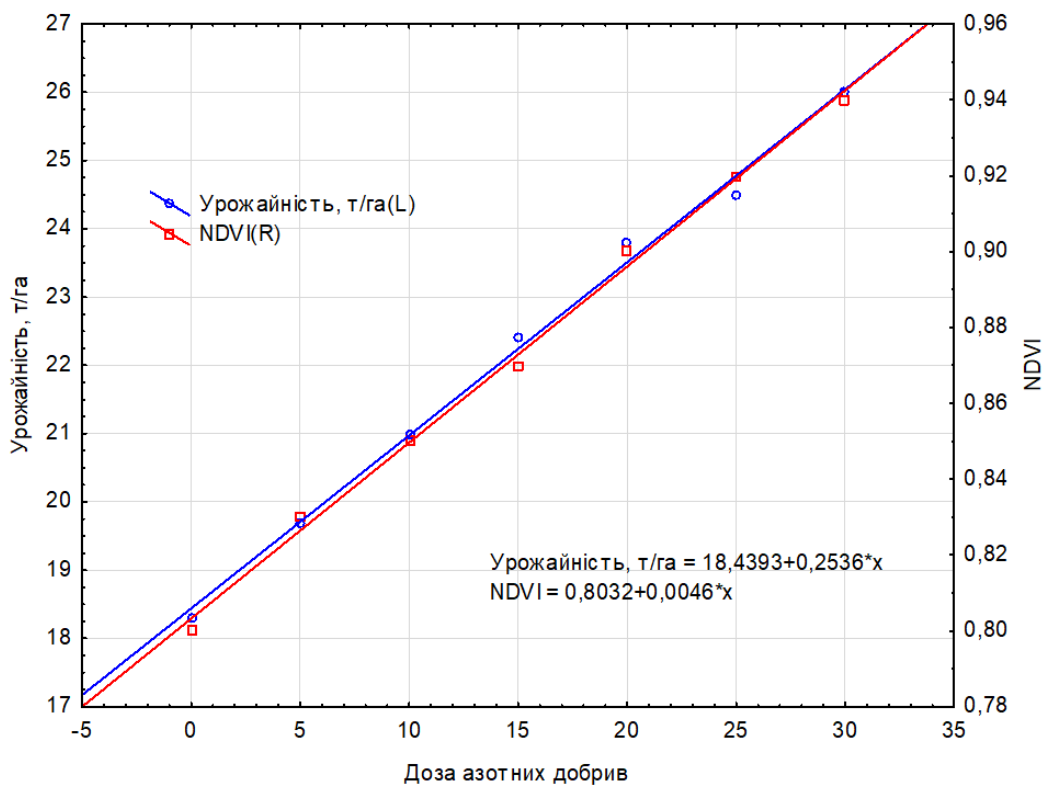
Отже, для прогнозування врожайності міскантуса гігантського за різного рівня удобрення в умовах недостатнього вологозабезпечення слід використовувати рівняння:  $y = 15,19 + 0,29 X - 0,005 X^2$ . Водночас невеликі дози добрив не обмежують функції лінійного приросту біомаси міскантуса гігантського й визначити прогнозну врожайність за достатнього рівня вологозабезпечення можна за таким рівнянням:  $y = 18,44 + 0,25 X$ .

Негативний вплив на ріст і розвиток рослин чинять також шкідники, хвороби та бур'яни, проте й тут ми маємо відмінності, порівняно з традиційними культурами. Зокрема, бур'яни чинять основний негативний вплив на розвиток біоенергетичних культур у перший рік вегетації, коли не передбачається комерційного їх використання. Надалі щільність вегетативної маси та сформована листкова поверхня є достатньою для ефективного контролювання небажаної рослинності.

Щодо хвороб та шкідників, то для міскантуса гігантського поки що в Україні не встановлено специфічних шкочинних об'єктів. Натомість, верба може пошкоджуватись певними листогризучими видами шкідників, або ж грибковими хворобами, проте дослідження шкочинності цих об'єктів саме на енергетичній вербі не проведені в достатній мірі, щоб можна виділити їх економічні пороги шкідливості та врахувати потенційні втрати. Тому цей блок не будемо брати до уваги в системі прогнозування врожайності біоенергетичних культур.



**Рис. 4. Залежність урожайності та показника NDVI міскантусу гігантського в умовах недостатнього рівня вологозабезпечення (ДПДГ «Саливонківське»)**



**Рис. 5. Залежність урожайності та показника NDVI міскантусу гігантського в умовах достатнього рівня вологозабезпечення (Ялтушківська ДСС)**

Основними параметрами продуктивності біоенергетичних культур є потенційна загальна суха біомаса та індекс листової поверхні, які слід враховувати в системах дистанційного прогнозування врожайності.

Також, подібно як у моделі WOFOST, для отримання максимально точного прогнозу врожайності слід концентруватись на точковій моделі визначення продукційного процесу. Проте, не слід оцінювати всліпу усі масиви в межах певних клітинок або агроґрунтових регіонів, адже плантацій

біоенергетичних культур досить мало, порівняно з традиційними сільськогосподарськими культурами. Окрім того, важливо зазначити, що дистанційне зондування не в змозі відповісти на питання визначення віку плантацій, як ключового елемента отримання певного рівня продуктивності біоенергетичних культур.

Отже, процес роботи над отриманням прогнозованої врожайності біоенергетичних культур умовно можна поділити на такі етапи:

*Перший етап* – визначення площ плантацій біоенергетичних культур у межах ГІС карти регіону з уточненням віку плантації та сортів, що використовуються;

*Другий етап* – уточнення умов середовища: тип ґрунту, режиму вологозабезпечення, мінерального живлення;

*Третій етап* – спостереження за елементами погоди;

*Четвертий етап* – спостереження за вегетаційними індексами;

*П'ятий етап* – моделювання врожайності.

За формування показників базової прогнозованої врожайності в умовах конкретного регіону варто користуватись можливостями регресійної моделі, запропонованої Воссеном [49], що враховує середню врожайність, лінійний часовий тренд та лінійну регресійну функцію:

$$Y_m = Y_0 + Y_t \times T + K$$

де  $Y_m$  – урожайність прогнозована для умов регіону;  $Y_0$  – середня багаторічна фактична урожайність в регіоні;  $Y_t$  – тренд зміни урожайності залежно від прогнозованих показників року;  $T$  – рік аналізу;  $K$  – лінійна регресійна функція.

Лінійний часовий тренд відображає вплив різноманітних чинників, як-от інтенсивність використання добрив тощо, тоді як вплив мінливості метеорологічних умов відображають випадкові коливання врожайності.

Зважаючи на це, для певного агрокліматичного регіону показник урожайності біоенергетичних культур визначається за формулою:

$$Y = \frac{A \times C \times Y_m}{A \times C}$$

де  $Y$  – урожайність біоенергетичної культури в межах певного агрокліматичного регіону, т/га;  $A$  – загальна площа земель регіону;  $C$  – частка площі земель, задіяних під вирощуванням біоенергетичної культури;  $Y_m$  – урожайність, прогнозована для умов регіону.

Якщо з формули вилучити знаменник, то також можуть бути визначені валові показники продуктивності посівів біоенергетичних культур у регіоні. Проте, важливо зауважити, що розрахунки виконуються окремо для кожного регіону та для кожного віку плантацій, оскільки різновікові плантації, як ми показали вище, мають зовсім інші потенціали продуктивності.

Система прогнозування врожайності біоенергетичних культур, за правильної структурної її побудови, дає змогу отримувати достатньо точні прогнози врожайності на національному та регіональному рівнях. При цьому, для отримання кінцевого прогнозу врожайності використовуються різні джерела та види вхідної інформації: фактична врожайність, агрометеорологічні показники, параметри продуктивності посівів (загальна потенційна суха біомаса), дані супутникового моніторингу для визначення NDVI реальних плантацій біоенергетичних культур, довідкова інформація. Ідеальною ситуацією можна вважати внесення всіх крупних ділянок вирощування біоенергетичних культур у базу даних та їх подальший супутниковий моніторинг з визначенням вегетаційних індексів та максимально можливих елементів погоди, або хоча б мінімально середньодобових температур, суми активних температур та кількості опадів.

Саме за таких умов можна говорити про кардинальне спрощення (на половину) алгоритму прогнозування врожайності біоенергетичних культур. Проте, за відсутності повного моніторингу полів, в алгоритмі прогнозу використовуються різні методи й програмні засоби (рис. 6).

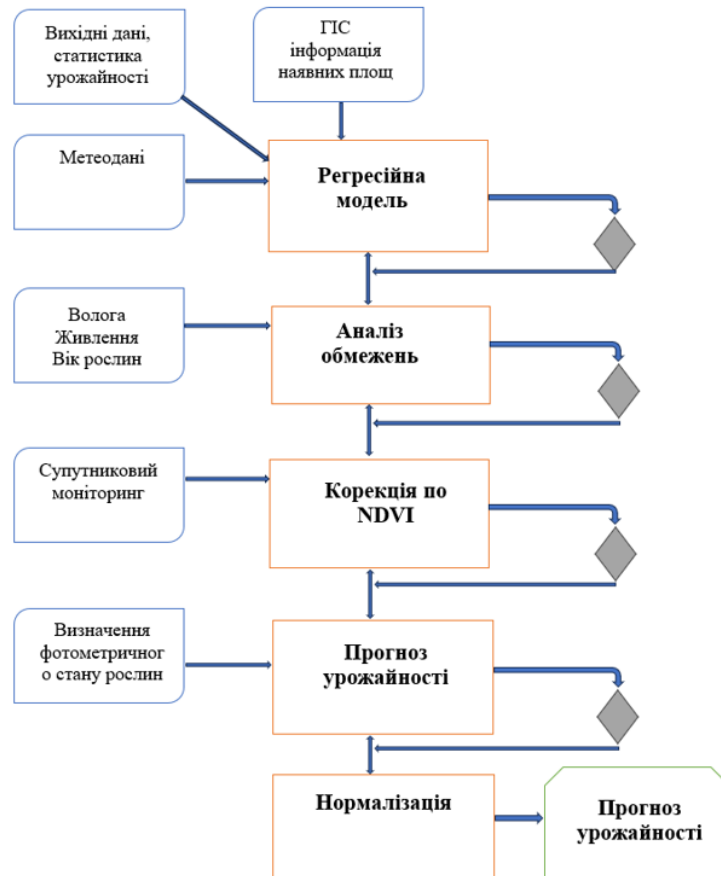


Рис. 6. Алгоритм прогнозування врожайності біоенергетичних культур

Етапи прогнозування врожайності певної біоенергетичної культури змінюють один одного в послідовному циклі розрахунків. Це дає змогу уникнути помилок під час розрахунків. Адже, коли не визначені базові обмеження, то подальші розрахунки можуть мати недостатній рівень точності. Та навпаки – переходити до наступного етапу прогнозування можна з огляду на виконання завдань попереднього.

## Висновки

Система прогнозування врожайності біоенергетичних культур умовно складається з таких етапів: перший етап – визначення площ плантацій біоенергетичних культур у межах ГІС-карти регіону з уточненням віку плантації та сортів, що використовуються; другий – уточнення умов середовища: типу ґрунту, режиму вологозабезпечення, мінерального живлення; третій – спостереження за елементами погоди; четвертий – спостереження за вегетаційними індексами; п'ятий етап – моделювання врожайності.

Для визначення показників прогнозованої врожайності в умовах конкретного регіону варто користуватись можливостями регресійної моделі, запропонованої Воссеном, що враховує середню врожайність, лінійний часовий тренд та лінійну регресійну функцію. А для певного агрокліматичного регіону прогнозна урожайність біоенергетичних культур визначається за формулою, що передбачає врахування загальної площі земель регіону, частки площі задіяних під вирощуванням біоенергетичної культури та показників урожайності, прогнозованої для умов регіону.

Потенційні можливості формування біомаси рослинами першого, другого та наступних років вегетації значно відрізняються, внаслідок чого класичні моделі не можуть бути використаними для прогнозування. Зокрема, лише з 4–5-го року вегетації плантації забезпечують 20 т/га сухої біомаси верби та до 25 т/га міскантусу гігантського.

Настання заморозків після появи сходів міскантусу гігантського здатне знищити плантацію. Попри повторне відростання рослин, зниження врожайності культури у нашому дослідженні сягало 15,5 % у зоні достатнього зволоження та 22,4 % у зоні нестійкого зволоження. Тому, в моделі

прогнозування продуктивності присутній блок відстеження стану міскантусу гігантського за індексом NDVI, а також супутніми метеорологічними спостереженнями.

За умов недостатнього вологозабезпечення спостерігається зменшення врожайності міскантусу гігантського, спричинене саме фактором недостатнього вологозабезпечення, що відповідає рівню азотного удобрення 20 кг/га. При цьому, прогнозувану врожайність міскантусу гігантського можна визначити з рівняння:  $y = 15,19 + 0,29 X - 0,005 X^2$ . Водночас, в умовах достатнього зволоження, невеликі дози добрив не обмежують функції лінійного приросту біомаси міскантусу гігантського, тож прогнозу врожайність можна визначити за рівнянням:  $y = 18,44 + 0,25 X$ .

**Фінансування та підтримка дослідження.** Дослідження проведено в рамках договору НДР: «Комплексна система прогнозування врожайності біоенергетичних культур» за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

### Використана література

1. Anderson P. K., Cunningham A. A., Patel N. G. et al. Emerging infectious diseases of plants: Pathogen pollution, climate change, and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution*. 2004. Vol. 19. P. 535–544. doi: 10.1016/j.tree.2004.07.021
2. Arkin G. F., Vanderlip R. L., Ritchie J. T. A dynamic grain sorghum growth model. *Transactions of the ASAE*. 1976. Vol. 19. P. 622–626. doi: 10.13031/2013.36082
3. 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, Iss. 18. Article 8277. doi: 10.3390/su16188277
4. Audsley E., Pearn K. R., Simota C. et al. What can scenario modeling tell us about future European-scale agricultural land use, and what not? *Environmental Science & Policy*. 2006. Vol. 9. P. 148–168. doi: 10.1016/j.envsci.2005.11.008
5. Baker R. H. A., Sansford C. E., Jarvis C. H. et al. The role of climatic mapping in predicting the potential distribution of non-indigenous pests under current and future climates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2000. Vol. 82. P. 57–71. doi: 10.1016/S0167-8809(00)00216-4
6. Berti A., Morari F., Borin M., Giardini L. Use of CropSyst to simulate a four-year rotation with different fertilization levels. *Proceedings of the Second International Symposium Modelling Cropping Systems*. Florence, Italy, 2001. P. 105–106.
7. Bocchi S., Confalonieri R., Bechini L. CropSyst for rice in Northern Italy. *Proceedings of the Second Modelling Cropping Systems International Symposium*. Florence, Italy, 2001. P. 51–52.
8. Boogaard H. L., de Wit A. J. W., te Roller J. A., van Diepen C. A. User's guide for the WOFOST Control Centre 2.1 and WOFOST 7.1.7 crop growth simulation model. Wageningen : Alterra, Wageningen University & Research Centre. 2014. 133 p.
9. Jones K. J., Hoogenboom J. W., Pickering N. B. The CROPGRO model for grain legumes. *Understanding options for agricultural production* / G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P. K. Thornton (Eds.). Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1998. P. 99–128. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4\_6
10. Bouman B. A. M., van Keulen H., van Laar H. H., Rabbinge R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*. 1996. Vol. 52. P. 171–198. doi: 10.1016/0308-521x(96)00011-x
11. Cammarano D., Miguez F. E., Puntel L. Process-based models and simulation of nitrogen dynamics. *Precision agriculture: Modelling* / D. Cammarano, F. K. van Evert, C. Kempenaar (Eds.). Cham : Springer, 2023. P. 105–127. doi: 10.1007/978-3-031-15258-0\_5
12. Cen H., Wan L. Crop yield estimation and prediction. *QEncyclopedia of smart agriculture technologies* / Zhang (Ed.). Cham : Springer, 2023. P. 1–13. doi: 10.1007/978-3-030-89123-7\_48-1
13. Chapman S., Potgieter A., George-Jaegli B. et al. Extending the phenotype – combining proximal sensing with crop models to characterize radiation use efficiency. *Book of abstracts Second International Crop Modelling Symposium (iCROP2020): Crop modelling for the future*. Le Corum, Montpellier, France, 2020.
14. Chloupek O., Hrstkova P., Schweigert P. Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilization over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crops Research*. 2004. Vol. 85. P. 167–190. doi: 10.1016/S0378-4290(03)00162-X
15. Choruma D. J., Akamagwuna F. C., Odume N. O. et al. Simulating the impacts of climate change on maize yields using EPIC: A case study in the Eastern Cape Province of South Africa. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, Iss. 6. Article 794. doi: 10.3390/agriculture12060794
16. de Wit A., Boogaard H., Fumagalli D. et al. 25 Years of the WOFOST Cropping Systems Model. *Agricultural Systems*. 2019. Vol. 168. P. 154–167. doi: 10.1016/j.agsy.2018.06.018
17. de Wit A. J. W., van Diepen C. A., Kroes J. G. Application of remote sensing data as inputs for the WOFOST 7.1 and SWAP 2.0 models. *Use and availability of meteorological information from different sources as input in agrometeorological models* / G. Maracchi, A. Mestre, L. Toullos, B. Gozzini (Eds.). [S. l.] : EC DG XII, 2005. P. 362–378.

18. de Wit C. T., Brouwer R., Penning de Vries F. W. T. The simulation of photosynthetic systems. *Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969*. Wageningen : Pudoc, 1970. P. 47–50.
19. Diaz-Ambrona C. G. H., O’Leary G. J., O’Connell M. G., Connor D. J. Application of CropSyst to a new location and crops: Advantages and limitations. *Proceedings of the Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, Florence, Italy, 2001. P. 127–128.
20. Donatelli M., Spallacci P., Marchetti R., Papini R. Evaluation of CropSyst simulations of growth of maize and of water balance and soil nitrate content following organic and mineral fertilization applied to maize. *Proceedings of the Fourth European Society for Agronomy Congress*. Veldhoven-Wageningen, The Netherlands, 1996. Vol. I. P. 342–343.
21. Donatelli M., Stöckle C. O., Ceotto E. CropSyst validation for cropping systems at two locations of Northern and Southern Italy. *European Journal of Agronomy*. 1997. Vol. 6. P. 35–45. doi: 10.1016/s1161-0301(96)02029-1
22. Donatelli M., Stöckle C. O., Nelson R. L., Francaviglia R. Evaluating cropping systems in lowland areas of Italy using the cropping system simulation model CropSyst and the GIS software ARCVIEW. *Proceedings of the Seventh ICCTA Conference*. Firenze, Italy, 1999. P. 114–121.
23. Ferrer-Alegre F., Villar J. M., Carrasco I., Stöckle C. O. Developing management decision tools from yield experiments with the aid of a simulation model: An example with N fertilization in corn. *Proceedings of the First International Symposium Modelling Cropping System*. Lleida, Spain, 1999. P. 175–176.
24. García-Tejera O., López-Bernal Á., Villalobos F. J. Crop models. *Principles of agronomy for sustainable agriculture* / F. J. Villalobos, E. Fereres (Eds.). Cham : Springer, 2024. P. 599–611. doi: 10.1007/978-3-031-69150-8\_40
25. Harrison P. A., Butterfield R. E., Orr J. L. Modelling climate change impacts on wheat, potato and grapevine in Europe. *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe* / T. E. Downing, P. A. Harrison, R. E. Butterfield, K. G. Lonsdale (Eds.). Oxford, UK : Environmental Change Unit, University of Oxford, 2000. P. 367–390.
26. Huang J., Gomez-Dans J. L., Huang H. et al. Assimilation of remote sensing into crop growth models: Current status and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. Vol. 276–277. Article 107609. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.06.008
27. Janjić J., Tadić L. Fields of application of SWAT hydrological model: A review. *Earth*. 2023. Vol. 4, Iss. 2. P. 331–344. doi: 10.3390/earth4020018
28. Jones J. W., Tsuji G. Y., Hoogenboom G. et al. Decision support system for agrotechnology transfer DSSAT v3. *Understanding options for agricultural production* / G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, P. K. Thornton (Eds.). Kluwer Academic Publishers, 1998. P. 157–177. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4\_8
29. Jones J. W., Porter C. H., Boote K. J. et al. DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*. 2003. Vol. 18. P. 235–265. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7
30. Jongman R. H. G., Bunce R. G. H., Metzger M. J. et al. Objectives and application of a statistical environmental stratification of Europe. *Landscape Ecology*. 2006. Vol. 21. P. 409–419. doi: 10.1007/s10980-005-6428-0
31. Kaukoranta T., Hakala K. Impact of spring warming on sowing times of cereal, potato and sugar beet in Finland. *Agricultural and Food Science*. 2008. Vol. 17. P. 165–176. doi: 10.2137/145960608785328198
32. Keating B. A., Carberry P. S., Hammer G. L. et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*. 2003. Vol. 18. P. 267–288. doi: 10.1016/s1161-0301(02)00108-9
33. Modelling of agricultural production: Weather, soils, and crops / H. Van Keulen, J. Wolf (Eds.). Wageningen, Netherlands : Pudoc, 1986. 479 c.
34. Khaki S., Wang L., Archontoulis S. V. A CNN-RNN framework for crop yield prediction. *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. Article 1750. doi: 10.3389/fpls.2019.01750
35. Marchetti R., Donatelli M., Spallacci P. Testing denitrification functions of dynamic crop models. *Journal of Environmental Quality*. 1997. Vol. 26, No 2. P. 394–401. doi: 10.2134/jeq1997.00472425002600020009x
36. McCown R. L., Hammer G. L., Hargreaves J. N. G. et al. APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*. 1996. Vol. 50. P. 255–271. doi: 10.1016/0308-521x(94)00055-v
37. Meinke H., Baethgen W. E., Carberry P. S. et al. Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches. *Agricultural Systems*. 2001. Vol. 70. P. 493–513. doi: 10.1016/s0308-521x(01)00057-9
38. Pala M., Stöckle C. O., Harris H. C. Simulation of durum wheat (*Triticum durum*) growth under differential water and nitrogen regimes in a Mediterranean type of environment using CropSyst. *Agricultural Systems*. 1996. Vol. 51. P. 147–163. doi: 10.1016/0308-521x(95)00043-5
39. Pasley H., Brown H., Holzworth D. et al. How to build a crop model. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2023. Vol. 43. Article 2. doi: 10.1007/s13593-022-00854-9.
40. Sadeh Y., Zhu X., Dunkerley D. et al. Versatile crop yield estimator. *Agronomy for Sustainable Development*. 2024. Vol. 44. Article 42. doi: 10.1007/s13593-024-00974-4
41. Silva J. V., Giller K. E. Grand challenges for the 21st century: What crop models can and can’t (yet) do. *The Journal of Agricultural Science*. 2020. Vol. 158, Iss. 10. P. 794–805. doi: 10.1017/S0021859621000150
42. Silva J. V., Giller K. E. Grand challenges for the 21st century: What crop models can and can’t (yet) do. *The Journal of Agricultural Science*. 2021. Vol. 158, Iss. 10. P. 794–805. doi: 10.1017/S0021859621000150

43. Spitters C. J. T., van Keulen H., van Kraalingen D. W. G. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. *Simulation and systems management in crop protection* / R. Rabbinge, S. A. Ward, H. H. van Laar (Eds.). Wageningen : Pudoc, 1989. P. 147–181. doi: 10.1007/bf00024963
44. Swaney D. P., Jones J. W., Boggess W. G. et al. Real-time irrigation decision analysis using simulation. *Transactions of the ASAE*. 1983. Vol. 26. P. 562–568. doi: 10.13031/2013.33979
45. Van Dam J. C., Groenendijk P., Hendriks R. F. A., Kroes J. G. Advances of modelling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*. 2008. Vol. 7. P. 640–653. doi: 10.2136/vzj2007.0060
46. Ventrella D., Rinaldi M. Comparison between two simulation models to evaluate cropping systems in Southern Italy. Yield response and soil water dynamics. *Agricoltura Mediterranea*. 1999. Vol. 129. P. 99–110.
47. Yin X., Struik P. C. Modelling the crop: from system dynamics to systems biology. *Journal of Experimental Botany*. 2010. Vol. 61, Iss. 8. P. 2171–2183. doi: 10.1093/jxb/erp375
48. Антоненко В. С. Динамічне моделювання росту, розвитку і формування продуктивності озимої пшениці. Київ : АртЕк, 2002. 64 с.
49. Польовий А. М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем. Одеса : Екологія, 2013. 433 с.

## References

1. Anderson, P. K., Cunningham, A. A., Patel, N. G., Morales, F. J., Epstein, P. R., & Daszak, P. (2004). Emerging infectious diseases of plants: Pathogen pollution, climate change, and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, 19, 535–544. doi: 10.1016/j.tree.2004.07.021
2. Arkin, G. F., Vanderlip, R. L., & Ritchie, J. T. (1976). A dynamic grain sorghum growth model. *Transactions of the ASAE*, 19, 622–626. doi: 10.13031/2013.36082
3. 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), Article 8277. doi: 10.3390/su16188277
4. Audsley, E., Pearn, K. R., Simota, C., Cojocar, G., Koutsidou, E., Rounsevell, M. D. A., Trnka, M., & Alexandrov, V. (2006). What can scenario modeling tell us about future European-scale agricultural land use, and what not? *Environmental Science & Policy*, 9, 148–168. doi: 10.1016/j.envsci.2005.11.008
5. Baker, R. H. A., Sansford, C. E., Jarvis, C. H., Cannon, R. J. C., MacLeod, A., & Walters, K. F. A. (2000). The role of climatic mapping in predicting the potential distribution of non-indigenous pests under current and future climates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82, 57–71. doi: 10.1016/s0167-8809(00)00216-4
6. Berti, A., Morari, F., Borin, M., & Giardini, L. (2001). Use of CropSyst to simulate a four-year rotation with different fertilization levels. In *Proceedings of the Second International Symposium Modelling Cropping Systems* (pp. 105–106). Florence, Italy.
7. Bocchi, S., Confalonieri, R., & Bechini, L. (2001). CropSyst for rice in Northern Italy. In *Proceedings of the Second Modelling Cropping Systems International Symposium* (pp. 51–52). Florence, Italy.
8. Boogaard, H. L., de Wit, A. J. W., te Roller, J. A., & van Diepen, C. A. (2014). *User's guide for the WOFOST Control Centre 2.1 and WOFOST 7.1.7 crop growth simulation model*. Wageningen: Alterra, Wageningen University & Research Centre.
9. Jones, K. J., Hoogenboom, J. W., & Pickering, N. B. (1998). The CROPGRO model for grain legumes. In G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, & P. K. Thornton (Eds.), *Understanding options for agricultural production* (pp. 99–128). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4\_6
10. Bouman, B. A. M., van Keulen, H., van Laar, H. H., & Rabbinge, R. (1996). The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, 52, 171–198. doi: 10.1016/0308-521x(96)00011-x
11. Cammarano, D., Miguez, F. E., & Puntel, L. (2023). Process-based models and simulation of nitrogen dynamics. In D. Cammarano, F. K. van Evert, & C. Kempenaar (Eds.), *Precision agriculture: Modelling* (pp. 105–127). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-031-15258-0\_5
12. Cen, H., & Wan, L. (2023). Crop yield estimation and prediction. In Zhang (Ed.), *Encyclopedia of smart agriculture technologies* (pp. 1–13). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-89123-7\_48-1
13. Chapman, S., Potgieter, A., & George-Jaegli, B. (2020). Extending the phenotype – combining proximal sensing with crop models to characterize radiation use efficiency. In *Book of abstracts Second International Crop Modelling Symposium (iCROM2020): Crop modelling for the future*. Le Corum, Montpellier, France.
14. Chloupek, O., Hrstkova, P., & Schweigert, P. (2004). Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilization over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crops Research*, 85, 167–190. doi: 10.1016/s0378-4290(03)00162-x
15. Choruma, D. J., Akamagwuna, F. C., & Odume, N. O. (2022). Simulating the impacts of climate change on maize yields using EPIC: A case study in the Eastern Cape Province of South Africa. *Agriculture*, 12(6), Article 794. doi: 10.3390/agriculture12060794
16. de Wit, A., Boogaard, H., Fumagalli, D., Janssen, S., Knapen, R., van Kraalingen, D., ... van Diepen, K. (2019). 25 Years of the WOFOST Cropping Systems Model. *Agricultural Systems*, 168, 154–167. doi: 10.1016/j.agsy.2018.06.018

17. de Wit, A. J. W., van Diepen, C. A., & Kroes, J. G. (2005). Application of remote sensing data as inputs for the WOFOST 7.1 and SWAP 2.0 models. In G. Maracchi, A. Mestre, L. Toullos, & B. Gozzini (Eds.), *Use and availability of meteorological information from different sources as input in agrometeorological models* (pp. 362–378). [S. l.]: EC DG XII.
18. de Wit, C. T., Brouwer, R., & Penning de Vries, F. W. T. (1970). The simulation of photosynthetic systems. In *Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969* (pp. 47–50). Wageningen: Pudoc.
19. Diaz-Ambrona, C. G. H., O'Leary, G. J., O'Connell, M. G., & Connor, D. J. (2001). Application of CropSyst to a new location and crops: Advantages and limitations. In *Proceedings of the Second International Symposium Modelling Cropping Systems* (pp. 127–128). Florence, Italy.
20. Donatelli, M., Spallacci, P., Marchetti, R., & Papini, R. (1996). Evaluation of CropSyst simulations of growth of maize and of water balance and soil nitrate content following organic and mineral fertilization applied to maize. In *Proceedings of the Fourth European Society for Agronomy Congress* (Vol. I, pp. 342–343). Veldhoven-Wageningen, The Netherlands.
21. Donatelli, M., Stöckle, C. O., & Ceotto, E. (1997). CropSyst validation for cropping systems at two locations of Northern and Southern Italy. *European Journal of Agronomy*, 6, 35–45. doi: 10.1016/s1161-0301(96)02029-1
22. Donatelli, M., Stöckle, C. O., Nelson, R. L., & Francaviglia, R. (1999). Evaluating cropping systems in lowland areas of Italy using the cropping system simulation model CropSyst and the GIS software ARCVIEW. In *Proceedings of the Seventh ICCTA Conference* (pp. 114–121). Firenze, Italy.
23. Ferrer-Alegre, F., Villar, J. M., Carrasco, I., & Stöckle, C. O. (1999). Developing management decision tools from yield experiments with the aid of a simulation model: An example with N fertilization in corn. In *Proceedings of the First International Symposium Modelling Cropping System* (pp. 175–176). Lleida, Spain.
24. García-Tejera, O., López-Bernal, Á., & Villalobos, F. J. (2024). Crop models. In F. J. Villalobos, & E. Fereres (Eds.), *Principles of agronomy for sustainable agriculture* (pp. 599–611). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-031-69150-8\_40
25. Harrison, P. A., Butterfield, R. E., & Orr, J. L. (2000). Modelling climate change impacts on wheat, potato and grapevine in Europe. In T. E. Downing, P. A. Harrison, R. E. Butterfield, & K. G. Lonsdale (Eds.), *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe* (pp. 367–390). Oxford, UK: Environmental Change Unit, University of Oxford.
26. Huang, J., Gomez-Dans, J. L., Huang, H., Ma, H., Wu, Q., Lewis, P. E., ... Xie, X. (2019). Assimilation of remote sensing into crop growth models: Current status and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276–277, Article 107609. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.06.008
27. Janjić, J., & Tadić, L. (2023). Fields of application of SWAT hydrological model: A review. *Earth*, 4(2), 331–344. doi: 10.3390/earth4020018
28. Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Thornton, P. K., Wilkens, P. W., ... Singh, U. (1998). Decision support system for agrotechnology transfer DSSAT v3. In G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, & P. K. Thornton (Eds.), *Understanding options for agricultural production* (pp. 157–177). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4\_8
29. Jones, J. W., Porter, C. H., Boote, K. J., & Batchelor, W. (2003). DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235–265. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7
30. Jongman, R. H. G., Bunce, R. G. H., Metzger, M. J., & van Dijk, J. (2006). Objectives and application of a statistical environmental stratification of Europe. *Landscape Ecology*, 21, 409–419. doi: 10.1007/s10980-005-6428-0
31. Kaukoranta, T., & Hakala, K. (2008). Impact of spring warming on sowing times of cereal, potato and sugar beet in Finland. *Agricultural and Food Science*, 17, 165–176. doi: 10.2137/145960608785328198
32. Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., ... Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18, 267–288. doi: 10.1016/s1161-0301(02)00108-9
33. Van Keulen, H., & Wolf, J. (Eds.). (1986). *Modelling of agricultural production: Weather, soils, and crops*. Wageningen, Netherlands: Pudoc.
34. Khaki, S., Wang, L., & Archontoulis, S. V. (2019). A CNN-RNN framework for crop yield prediction. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 1750. doi: 10.3389/fpls.2019.01750
35. Marchetti, R., Donatelli, M., & Spallacci, P. (1997). Testing denitrification functions of dynamic crop models. *Journal of Environmental Quality*, 26(2), 394–401. doi: 10.2134/jeq1997.00472425002600020009x
36. McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holtzworth, D. P., & Freebairn, D. M. (1996). APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50, 255–271. doi: 10.1016/0308-521x(94)00055-v
37. Meinke, H., Baethgen, W. E., Carberry, P. S., Donatelli, M., Hammer, G. L., Selvaraju, R., & Stöckle, C. O. (2001). Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches. *Agricultural Systems*, 70, 493–513. doi: 10.1016/s0308-521x(01)00057-9
38. Pala, M., Stöckle, C. O., & Harris, H. C. (1996). Simulation of durum wheat (*Triticum durum*) growth under differential water and nitrogen regimes in a Mediterranean type of environment using CropSyst. *Agricultural Systems*, 51, 147–163. doi: 10.1016/0308-521x(95)00043-5



39. Pasley, H., Brown, H., Holzworth, D., Whish, J., Bell, L., & Huth, N. (2022). How to build a crop model. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 43, Article 2. doi: 10.1007/s13593-022-00854-9
40. Sadeh, Y., Zhu, X., Dunkerley, D., Walker, J. P., Chen, Y., & Chenu, K. (2024). Versatile crop yield estimator. *Agronomy for Sustainable Development*, 44, Article 42. doi: 10.1007/s13593-024-00974-4
41. Silva, J. V., & Giller, K. E. (2020). Grand challenges for the 21st century: What crop models can and can't (yet) do. *The Journal of Agricultural Science*, 158(10), 794–805. doi: 10.1017/S0021859621000150
42. Silva, J. V., & Giller, K. E. (2021). Grand challenges for the 21st century: What crop models can and can't (yet) do. *The Journal of Agricultural Science*, 158(10), 794–805. doi: 10.1017/S0021859621000150
43. Spitters, C. J. T., van Keulen, H., & van Kraailingen, D. W. G. (1989). A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In R. Rabbinge, S. A. Ward, & H. H. van Laar (Eds.), *Simulation and systems management in crop protection* (pp. 147–181). Wageningen: Pudoc. doi: 10.1007/bf00024963
44. Swaney, D. P., Jones, J. W., Boggess, W. G., Wilkerson, C. G., & Mishoe, J. W. (1983). Real-time irrigation decision analysis using simulation. *Transactions of the ASAE*, 26, 562–568. doi: 10.13031/2013.33979
45. Van Dam, J. C., Groenendijk, P., Hendriks, R. F. A., & Kroes, J. G. (2008). Advances of modelling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7, 640–653. doi: 10.2136/vzj2007.0060
46. Ventrella, D., & Rinaldi, M. (1999). Comparison between two simulation models to evaluate cropping systems in Southern Italy. Yield response and soil water dynamics. *Agricoltura Mediterranea*, 129, 99–110.
47. Yin, P. C., & Struik, X. (2010). Modelling the crop: from system dynamics to systems biology. *Journal of Experimental Botany*, 61(8), 2171–2183. doi: 10.1093/jxb/erp375
48. Antonenko, V. S. (2002). *Dynamic modelling of growth, development, and productivity formation of winter wheat*. Kyiv: ArtEk. [In Ukrainian]
49. Polovyi, A. M. (2013). *Modelling of the hydrometeorological regime and productivity of agroecosystems*. Odesa: Ekolohiia. [In Ukrainian]

UDC 631.54:633.282

**Prysiazhniuk, O. I.<sup>1</sup>, Maliarenko, O. A.<sup>1</sup>, Lazdinš, A.<sup>2</sup>, Musich, V. V.<sup>1</sup>, & Honcharuk, O. M.<sup>1</sup>** (2024). Mathematical Models for Yield Prediction of Bioenergy Crop. *Advanced Agritechnologies*, 12(3). <https://doi.org/10.47414/na.12.3.2024.317422> [In Ukrainian]

<sup>1</sup>*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine, \*e-mail: ollpris@gmail.com*

<sup>2</sup>*Latvian State Forest Research Institute "Silava", Riga street 111, Salaspils, LV-2169, Latvia*

**Purpose.** To determine mathematical models suitable for yield prediction of bioenergy crops and to establish the patterns of the crop health monitoring. **Methods.** Field studies were conducted in the zone of unstable soil moisture (Experimental Field of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS of Ukraine, Ksaverivka Druha, Kyiv region) and sufficient soil moisture (Yaltushkiv Experimental Breeding Station of the IBCSB NAAS of Ukraine, Cheresheve, Vinnytsia region) in the Right-Bank Forest Steppe of Ukraine in 2022–2024. **Results.** Frosts can destroy new giant miscanthus sprouts and reduce crop yield by 15.5% in the sufficient soil moisture zone and by 22.4% in the unstable soil moisture zone. Additionally, under the conditions of unstable soil moisture, yield formation of giant miscanthus is limited by insufficient soil moisture, as miscanthus plants can efficiently use only 20 kg/ha of nitrogen fertiliser. In this case, the yield of giant miscanthus can be predicted using the equation:  $y = 15.19 + 0.29X - 0.005X^2$ . Meanwhile, under the conditions of sufficient soil moisture, small doses of fertilisers do not limit the linear biomass growth function, and the equation for yield prediction is:  $y = 18.44 + 0.25X$ . **Conclusions.** For yield prediction in the specific region, it is advisable to use the regression model proposed by Vossen, which takes into account the average yield, linear time trend, and linear regression function. For a specific agroclimatic region, the potential yield of bioenergy crops could be determined by a formula that considers the total land area of the region, the share of bioenergy plantations, and the predicted yield for the specific conditions of the region. Yield prediction model for bioenergy crop consists of the following levels: (1) determining the areas of bioenergy plantations in the GIS map of the region, specifying the plantation age and the varieties used; (2) refining environmental conditions (soil type, moisture regime, and mineral nutrition); (3) weather observation; (4) vegetation index observation; and (5) yield modelling.

**Keywords:** energy willow; giant miscanthus; NDVI.

Надійшла / Received 21.10.2024  
Погоджено до друку / Accepted 08.11.2024