

Модель адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур

С. І. Мельник¹, О. І. Присяжнюк^{1, 2*}, Є. М. Стариченко¹, К. М. Мажуга¹,
В. В. Бровкін¹, О. М. Мартинов¹, В. В. Маслечкін¹

¹Український інститут експертизи сортів рослин, вул. Генерала Родимцева, 15, м. Київ, 03041, Україна

²Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна,

*e-mail: ollpris@gmail.com

Мета. Розробити основні компоненти моделі адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур. **Методи.** Для проведення досліджень із встановлення основних структурних елементів адаптивної інформаційної моделі прогнозування продуктивності основних сільськогосподарських культур використовували метод побудови динамічних моделей. **Результати.** Детально проаналізовано концептуальні підходи до побудови математичних сільськогосподарських моделей і встановлено основні переваги й недоліки сучасних аналогів. Адаптивна інформаційна модель базується виключно на потребах рослини і власне на необхідності забезпечити ці потреби доступними ресурсами для отримання стабільно високої врожайності з високими показниками якості. Програмно-апаратний комплекс повинен мати зворотній зв'язок між його основними структурними елементами, адже за рахунок цього значно підвищується точність прогнозування продуктивності рослин. Дані, визначені на основі роботи певних механізмів або показники погодних умов та їхні прогнози використовують для прийняття рішень, однак, у випадку їхньої суттєвої зміни рішення про окремі елементи технології переглядають. Програмний продукт повинен бути пов'язаний з економічною частиною і при створенні рекомендацій враховувати кон'юнктуру ринку та прогнозні дані. У разі низької закупівельної ціни на продукцію рекомендувати застосовувати, чи не застосовувати певні агротехнічні операції (скажімо, підживлення по вегетації), крім того, коригувати їх у разі суттєвої зміни умов вирощування – коли застосування цих агрозаходів буде неефективним за рахунок негативної дії посухи тощо. **Висновки.** Адаптивну інформаційну систему прогнозування продуктивності в технологічному процесі вирощування сільськогосподарських культур формують на базі моделі, яка складається з трьох модулів ознак – підсумкової і двох компонентних. На кожному наступному етапі реалізації моделі підсумкова ознака стає компонентною, причому з максимальним внеском у підсумкову ознаку наступного модуля.

Ключові слова: математичне моделювання; динамічні моделі; ріст і розвиток рослин; урожайність.

Вступ

Математична модель – це по суті наближений до оригіналу певного об'єкту образ, точність якого визначають складністю математичного апарату емпіричних і теоретичних уявлень, які лежать в основі моделі [1–4].

Класичні прості моделі росту широко використовують для опису багатьох біологіч-

них процесів та легко адаптують, використовуючи стандартне статистичне програмне забезпечення, а їхні параметри дозволяють доволі широко інтерпретувати отримані дані. Однак, такі моделі, як правило, визначені для певних умов певної культури, а отримані результати не можна поширити на іншу зону вирощування. Також такі моделі не враховують динаміку змін біологічних процесів, природні втрати вегетативної маси чи, скажімо, обмежувальний вплив декількох факторів на ріст і розвиток рослин [5–8].

Усі сучасні сільськогосподарські моделі будують на основі опису процесів енерго- і масообміну між рослинами та умовами їхнього вирощування. Основні типи моделей, що використовують, можна поділити на імітаційні та динамічні [9–14].

Імітаційні моделі продукційного процесу лише формально описують в електронному вигляді процеси, що відбуваються з рослиною на полі, насправді ж у них реальний живий об'єкт замінено комп'ютерним імітатором. Точність такої моделі повністю базу-

Serhii Melnyk

<https://orcid.org/0000-0002-5514-5819>

Oleh Prysiazhniuk

<http://orcid.org/0000-0002-4639-424X>

Yevhen Starychenko

<http://orcid.org/0000-0001-8608-5268>

Kostiantyn Mazhuha

<http://orcid.org/0000-0002-1434-8687>

Volodymyr Brovkin

<https://orcid.org/0000-0002-3973-2255>

Oleksii Martynov

<http://orcid.org/0000-0001-7680-7490>

Vasyl Maslechkin

<https://orcid.org/0000-0003-3140-8335>

ється на сукупності знань і передбачень зміни росту і розвитку рослин залежно від впливу навколишнього середовища [15].

Динамічні моделі дозволяють точніше прогнозувати ріст і розвиток рослин та аналізувати наслідки впливу зовнішніх факторів за рахунок відтворення змін, що відбуваються з об'єктом та особливостей його функціонування залежно не тільки від вихідних даних, а й інформації про стан системи [16–21].

Отже, динамічні моделі повніше описують процеси, адже вони дозволяють врахувати дискретно-безперервний характер природних явищ [22, 23]. Однак, у стадіях росту і розвитку рослин можна виділити періоди, які різко відрізняються один від одного за інтенсивністю й спрямованістю впливу факторів, своєрідні критичні точки. Тому вплив умов вегетаційного періоду та агротехніки повинні бути синхронізовані з реальним настанням фенологічних фаз росту і розвитку рослин, щоб модель змогла реально оцінити вплив того чи іншого фактору на рослини [24].

Перші дієві моделі прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур з'явилися на початку 1970-их років. Здебільшого такі моделі були призначені виключно для проведення на їхній базі нових досліджень, адже накопичених знань було недостатньо для їхнього виробничого використання [25, 26].

Розвиток питань моделювання в 70–80-их роках в СРСР та решті світу відбувався синхронно, проте варто відмітити ряд відмінностей і принципових підходів до побудови моделей. Передусім глибокі знання фізіології та потужний математичний апарат, закладений в базис вітчизняних моделей росту і розвитку сільськогосподарських культур, Константинова О. Р., Дмитренко В. П., Образцова О. С., Галяміна Е. П., Сиротенка О. Д., Антоненко В. С., Польового А. М. дозволив контролювати багато параметрів та отримати високі показники їхньої точності [27–31]. Однак складність реалізації та відсутність широкого розповсюдження комп'ютерної техніки призвели до того, що розроблені моделі не мали практичної реалізації та впровадження у виробничі процеси [13, 27, 31].

У той же час в західних країнах на початку 1980-их з'явилися перші програми, орієнтовані на прийняття рішень стосовно планування зрошення, необхідності боротьби зі шкідниками та хворобами тощо [32–34].

Комплексна біофізична модель «погода–ґрунт–урожай» О. Р. Константинова враховує біологічні особливості культури, гідрометеорологічні елементи, родючість ґрунту й агротехніку вирощування, отже, вона має

чотири блоки: біологічний, метеорологічний, родючості ґрунту та агротехніки [30].

Модель урожайності сільськогосподарських культур В. П. Дмитренко враховує вплив на врожайність різних факторів у динаміці за періоди вегетації та побудована для озимої пшениці, ярого ячменю, кукурудзи, озимого жита, картоплі, буряків цукрових і соняшнику [28].

Комплексна модель формування врожайності кормових і зернових культур О. С. Образцова враховує вплив факторів на врожай у вигляді добутку максимальної потенційної врожайності культури в оптимальних умовах і нормованих функцій оптимальності факторів навколишнього середовища та елементів технології вирощування [31].

Модель формування врожаю агробіоценозу сільськогосподарських культур Е. П. Галяміна має блокову структуру, в якій описано вплив біотичних та абіотичних процесів. По суті перший блок накопичення або приростів біомаси описує збільшення її за рахунок асиміляції вуглекислоти повітря і надходження елементів мінерального живлення з ґрунту, а другий блок описує перерозподіл цих речовин в окремих органах у вигляді системи динамічних рівнянь [29].

Модель формування врожаю сільськогосподарських культур О. Д. Сиротенка враховує вплив факторів навколишнього середовища на продуктивність рослин не тільки через процес фотосинтезу, але й через процеси дихання і старіння тканин та призначена для використання в автоматизованій системі агрометеорологічного забезпечення сільського господарства. Рослини в моделі розглядають як функціонально диференційоване ціле, у якому виділено п'ять структурних одиниць: листки, стебла, корені, оболонка колоса і зерно. Крок моделі – одна доба [27].

Модель впливу агрометеорологічних умов на ріст, розвиток і формування урожаю озимої пшениці В. С. Антоненко побудована на знаннях щодо чотирьох періодів життєдіяльності озимої пшениці: проростання насіння, осінньої вегетації, перезимівлі рослин та весняно-літньої вегетації. Також окремо розташовують блок агрометеорологічних факторів. Усі блоки описують математичними рівняннями в межах кожного з факторів впливу з урахуванням розвитку ситуації як з точки зору оптимального, так і неоптимального фізіологічного значення факторів, необхідних для росту і розвитку пшениці озимої [35].

Базову динамічну модель формування врожаю сільськогосподарських культур А. М. Польового визначають, виходячи з закономір-

ностей формування гідрометеорологічного режиму у системі «ґрунт–рослина–атмосфера» і біологічних уявлень про ріст і розвиток сільськогосподарських культур під впливом чинників зовнішнього середовища. Модель складається з восьми блоків: вхідної інформації; радіаційно-теплогового режиму рослинного покриву; водного режиму рослинного покриву; фотосинтезу; дихання і старіння рослин; мінерального живлення та росту рослин. В основі моделі лежить система рівнянь радіаційного, теплового і водного балансів, балансу біомаси (вуглеводу та азоту) в рослинному покриві [27].

Моделі міжнародних шкіл моделювання можна класифікувати за декількома принципово відмінними напрямками: модель продукційного процесу рослин Сеппа-Тоомінга, різноманітні моделі голландської школи моделювання «School of de Wit», моделі американської та англійської шкіл моделювання продукційного процесу сільськогосподарських культур [36–41].

В основу моделі продукційного процесу рослин Сеппа-Тоомінга покладено концепцію максимальної продуктивності рослин Х. Г. Тоомінга і метод еталонних урожаїв, який впливає з цієї концепції. При цьому потенційну врожайність визначають шляхом врахування фотосинтетично-активної радіації (ФАР) та біологічних особливостей культури (сорт) при оптимальному режимі метеорологічних факторів, а метеорологічно можливу врожайність розглядають як найвищу врожайність в існуючих метеорологічних умовах [42, 43].

У різноманітних моделях, що базуються на класичних підходах голландської школи моделювання «School of de Wit» продукційний процес рослин представлено у вигляді системи інтенсивної взаємодії таких процесів як асиміляція CO₂, дихання, ріст і розвиток. Швидкість протікання цих фізіологічних процесів визначають умови навколишнього середовища [40, 44, 45].

Логічним продовженням ідей голландської школи моделювання було створення моделей: ELCROS (Elementary CROp Simulator), BACROS (Basic CROp growth Simulator), в яких вологозабезпеченість і мінеральне живлення не лімітують продуктивності рослин. Модель PHOTON (simulation of daily PHOTOSynthesis and transpiration), створена на базі BACROS, деталізованіша та з меншим часовим кроком [26].

Наступним етапом розвитку даних моделей було створення моделі ARID CROp, яка враховує вплив вологи на продуктивність сіль-

ськогосподарських культур. А модель PAR-RAN (Production of Arid Pastures limited by Rainfall and Nitrogen) зважає на особливості зміни вмісту азоту в ґрунті та вплив його доступності на продуктивність рослин [40, 46].

Варто відмітити вагомий внесок у розвиток моделювання рослин таких моделей як SUCROS [40], CERES і CROPGRO [47]. Доволі цікавою в плані нетрадиційної реалізації концептуальних підходів голландської школи моделювання «School of de Wit» є модель LINTUL, у якій швидкість росту біомаси розраховують як продукт перехоплення радіації рослинністю й ефективності використання світла [46].

З часом агрогідрологічну модель SWATR було трансформовано в модель SWAP (Soil–Water–Atmosphere–Plant). Фактично вона є деталізованою агрогідрологічною моделлю, в якій моделюються взаємозв'язки між ґрунтом, водою, погодою і рослиною, та базується на рівнянні Річардса, яке моделює транспорт води в комбінації із законом Дарсі і законом збереження маси [48, 49]. У SWAP відображено три моделі росту рослин: проста модель, деталізована модель (WOFOST) і проста модель, пристосована для моделювання росту трав [48–50].

Модель WOFOST (World Food Studies) детально розглядає фотосинтез і розвиток рослин, а також вплив водного і соляного стресу на розвиток рослин. На даний час параметри цієї моделі визначено для озимої пшениці, кукурудзи, ярого ячменю, рису, буряків цукрових, картоплі, кормових бобів, сої, озимого ріпаку і соняшнику [51–55].

До американської школи моделювання належить CERES-Wheat, яка відображає вплив густоти рослин, погоди, вологості ґрунту і вмісту азоту на ріст, розвиток і формування врожаю злаків. Модель має декілька рівнів прогнозу і контролю – як локальний, так і регіональний [56–58]. Вона прогнозує фази розвитку, кількість листків на головному стеблі, кількість пагонів і кількість зерен в колосі. Фактично модель CERES-Wheat розроблено для оцінювання продуктивності різних пшениць, з точки зору формування ними потенційного врожаю [59].

Команда розробників постійно вдосконалює свій продукт і на даний час моделі CROPGRO та CERES є частиною набору з прогнозування росту сільськогосподарських культур, наявних у програмному забезпеченні під назвою «Система підтримки прийняття рішень для передачі агротехнологій (DSSAT)» [47, 60, 61]. Однак система DSSAT має низку обмежень, що ускладнюють її екс-

платуацію та не дозволяють користувачам легко інтегрувати ці моделі та імітувати вплив сівозмін, що важливо з точки зору ведення сучасного землеробства [60, 61].

Модель EPIC було розроблено для оцінювання продуктивності ґрунтів, що постраждали від ерозії, вона також забезпечує ефективне моделювання багаторічних культур, хоча й має обмеження через простоту описів процесів росту і розвитку [34].

Модель CropSyst накопичує багаторічні експериментальні дані та на відміну від аналогів має щоденний крок моделювання врожаю, а не з огляду на настання певних фенологічних фаз росту і розвитку. Модель імітує баланс вологи в ґрунті, азоту в системі «ґрунт-рослини», ріст і розвиток рослин, накопичення сухої речовини, врожайність, виробництво і розкладання залишків та ерозію. Варіанти управління включають: вибір сорту, сівозміну, зрошення, підживлення азотом, обробку ґрунту (понад 80 варіантів) та управління залишками. Модель адаптована для таких культур як кукурудза, пшениця, ячмінь, соя, картопля, сочевиця, сорго, люпин, чай і виноград [62–70].

Симулятор сільськогосподарських виробничих систем (APSIM) подібний до моделі CropSyst та представлений платформою для моделювання сільськогосподарських систем. Він містить набір модулів, які дозволяють моделювати системи для різноманітних взаємодій рослин, ґрунту, клімату і технологій вирощування [71–78].

Крім універсальних варто згадати й окремий напрям моделей, які адаптовано під певні культури, скажімо, буряки цукрові. Такі моделі як SUBGRO [79], SUCROS [46], Patefield та Austin [80] мають складну фізіологічну основу, що вимагає великої кількості параметрів, але не враховують особливості динамічного розподілу асимілятів у рослині. Їхнім недоліком є обмеження регіоном та умовами, для яких їх було розроблено.

Для успішного оцінювання біологічного потенціалу сортів сільськогосподарських культур потрібні знання про істотність внеску окремих ознак у формування врожаю та якості. Адже власне знання мінливості ознак у поєднанні з фізіологічними аспектами їхнього формування дозволять розробити та запровадити агротехнічні прийоми впливу на рослину [81–84].

При створенні математичних моделей рослин одним з найпріоритетніших сучасних завдань є розроблення адаптивних систем з розвинутими механізмами самоналаштування, які забезпечуватимуть стійкість функціо-

нування і стабільність кінцевого продукту в конкретних умовах зовнішнього середовища. Управління адаптивними системами якісно інше – не через регулювання зовнішнього середовища, а через вплив на внутрішні процеси, тобто регуляція біологічних процесів синтезу органічної речовини, перетворення її в корисну продукцію росту й розвитку і в цілому фенотипової реалізації генетичної інформації [85–88].

Розроблені моделі повинні містити таку інформацію: характеристику зони вирощування сорту, детальний опис селекційно значущих ознак з доказами їхнього значення для продуктивності, якості продукції і стійкості проти несприятливих факторів середовища. Тому вирішальними стають знання біологічних процесів і управління ними, моделювання стає наукоємним й інформаційно емним, а управління інформаційними ресурсами – центральною проблемою розробки моделі [13, 89–91].

Загалом продуктивність рослин може бути сформована за рахунок оптимального співвідношення усіх елементів структури. Адже за ліміту факторів, необхідних для розвитку одного з елементів структури рослин, індивідуальний рівень продуктивності можна компенсувати повнішим розвитком інших елементів. Також загальновідомим є те, що окремі елементи структури, що визначають продуктивність рослин, закладаються на різних етапах органогенезу, а тому для їхнього оптимального розвитку необхідні різні, інколи контрастні умови. І фактори, що обмежували формування однієї ознаки, слугують своєрідними каталізаторами для іншої [92–95].

Проте, за настання несприятливих умов вирощування чи не дотримання базових вимог технології вирощування сортів не варто покладатись на адаптивний потенціал рослин як засіб формування високого рівня продуктивності. Адже межі варіабельності кожного окремого елемента структури продуктивності можливі лише за певних, генетично визначених меж його пластичності [96, 97, 99].

Мета досліджень – розробити основні компоненти адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур.

Методи досліджень

Для проведення досліджень зі встановлення основних структурних елементів адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур використовували метод побудови дина-

мічних моделей. Динамічні моделі включають в себе три різновиди динаміки системи: функціонування, росту і розвитку. За першого варіанту динаміки системи враховують процеси, спрямовані на виконання системою своїх функцій, а моделі росту і розвитку системи дозволяють спрогнозувати параметри системи упродовж тривалого проміжку часу.

При побудові динамічної моделі враховували, що процеси її росту і розвитку не є взаємозамінними, адже ріст систем пов'язаний із збільшенням їхніх розмірів, включенням у систему об'єктів із зовнішнього середовища, матеріальних та інших ресурсів. Розвиток безпосередньо відбувається без збільшення розмірів системи, а інколи навіть при її оптимізації та зменшенні, і передбачає зміну зв'язків між елементами моделі, спрощення, удосконалення окремих функцій тощо. Особливо яскраво дані процеси трансформації моделі відповідають біологічним закономірностям росту і розвитку рослин.

Моделювання динамічних систем проводили за використання методів, заснованих на теорії множин, а тому сукупність станів системи може бути дискретною, або ж неперервною. Відповідно динаміку системи розглядали як послідовний перехід системи з одного стану в інший. Для вивчення динаміки систем будували множини вхідних і вихідних процесів.

Визначення основних структурних компонентів моделі адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур проводили з використанням емпіричної, теоретичної та математичної частин. До емпіричної частини відносили аналіз масиву експериментальних даних, що накопичуються Інститутом експертизи сортів рослин в польових дослідженнях (фенологічні спостереження, продуктивність та якість врожаю сортів різних культур в умовах пунктів досліджень, тощо). Теоретичну частину базували на основних концепціях, необхідних для об'єднання й пояснення з єдиної точки зору отриманих експериментальних закономірностей та явищ. Математична частина включала в себе основні методи обробки експериментальних даних: дисперсійний, кореляційно-регресійний, кластерний аналіз.

Першим кроком до побудови моделі було опрацювання емпіричної частини масиву експериментальних даних за допомогою математичних методів аналізу. На основі проведених аналізів було вдосконалено структуру теоретичної частини моделі адаптивної

інформаційної системи прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур.

Результати досліджень

В основу побудови головних структурних компонентів моделі адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур покладено ієрархічність прояву ознак в онтогенезі та відповідність їхнього прояву в органогенезі. Оскільки етапи реалізації в фенотипі ознак відображають фази росту і розвитку рослин, то взаємозв'язок між компонентами моделі можна вважати показником динамічної впорядкованості взаємодії між елементами генетичної системи.

За аналогією з моделями, висвітленими в працях В. А. Драгавцева, П. П. Літуна та А. Л. Зозулі, модель складається з трьох модулів ознак – підсумкової і двох компонентних. Суттєвою відмінністю від пропонованих підходів до моделювання є використання розробленої нами моделі для прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур, а підходи, описані в працях інших науковців, спрямовані на опис існуючих взаємозв'язків та їхнього внеску у формування продуктивності сортів сільськогосподарських культур.

За підсумкові ознаки беруть ті, що мають між собою екологічно стабільні зв'язки та найвищий сумарний внесок у кінцеву підсумкову ознаку – продуктивність рослин. На кожному наступному етапі побудови моделі підсумкова ознака стає компонентною, причому з максимальним внеском у підсумкову ознаку наступного модуля.

Моделі ознак продуктивності досліджуваних сортів мають такі спільні риси: значення ознак продуктивності обумовлені біологічними особливостями конкретного сорту; їхню варіабельність визначають реакцією генотипу на зміну умов вирощування; підсумкова ознака характеризується стабільно високим кореляційним зв'язком з ознакою, що в наступному модулі є підсумковою.

На даний час існує безліч використовуваних на практиці моделей, особливо яскраво їхні особливості можна показати на прикладі систем точного землеробства. Такі практичні моделі, на відміну від теоретичних чи суто наукових, спрямовані на вирішення питання точного передбачення потреб рослин та, відповідно, прогнозування їхнього врожаю. Загалом для розуміння принципів відмінностей їхньої побудови можна сформувати загальну структуру таких моделей (рис. 1).

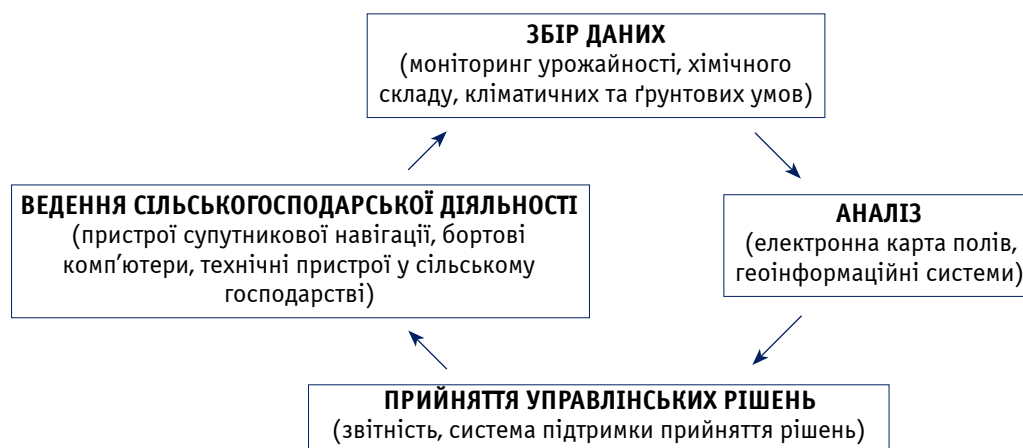


Рис. 1. Структура формування моделей, що використовують в системах точного землеробства

Основними недоліками практичної реалізації моделей, які покладено в основу систем точного землеробства є те, що вони розроблені як продукт, який повинні використовувати в своїй професійній роботі біологи та агрономи. З практичної точки зору моделі WOFOST, CERES, CropSyst та аналогічні їм потребують від агрономів глибоких знань. Альтернативою є запровадження систем точного землеробства.

Суто технічний підхід до вирішення проблем моделювання полягає в тому, що детальний аналіз потреб рослин та побажання агрономів ставлять на друге місце в гонитві за технічною досконалістю та простотою випуску готової технічної продукції. Так широко впроваджують окремі модулі (контроль палива, переміщення техніки, агрохімічні карти, карти врожайності культур) без прив'язування їх до єдиної цілісної системи прийняття рішень.

Переважна більшість методів дистанційного аналізу станів рослин ґрунтується лише на обробленні супутникових або аерофотознімків, або на обробленні даних, отриманих із сенсорів агротехнічних знарядь. Тобто, сенсори можуть не контактувати на пряму з рослинами, а комп'ютерні системи аналізу проводять усереднення інформації за закритим алгоритмом без її уточнення. У результаті отримання інформації за допомогою таких методів важко визначити чи зміна кольору листків рослин на фото була наслідком хвороб листкового апарату, чи неправильного застосування агрохімікатів, чи тимчасової недоступності, чи постійного дефіциту елементів живлення в ґрунті тощо. Тому аналіз отриманої таким чином інформації не може забезпечити достатню точність прогнозування, адже цифрові технології запрограмовані ігнорувати похибки, особливо

такі, що не передбачені алгоритмом відповідних програм. Сучасні методи точного землеробства, зазвичай, не передбачають комунікацій між собою та зворотнього зв'язку, необхідного для коригування рішень в процесі зміни умов вирощування внаслідок дії непереборних факторів. Таким чином, важливо сформувати основну структуру цифрової технології рослин як таку, що взаємодіє з рослинами за допомогою відповідного технічного, інформаційного, програмного та математичного забезпечення (рис. 2).

Саме наявність зворотнього зв'язку, реалізованого за допомогою відповідних алгоритмів роботи з інформацією, та автоматизованих датчиків дозволить постійно верифікувати дані та отримувати продукт високої точності. Через постійне коригування моделі можна уникнути накопичення систематичної похибки.

Серед усіх представлених компонентів структури взаємодії цифрової технології рослин найбільше вивчені математичне, інформаційне та програмне забезпечення. При побудові конкретних математичних моделей можна доволі швидко адаптувати ці модулі до особливостей структури взаємодії основних компонентів. А технічне забезпечення в плані створення та впровадження нових сенсорів визначення стану рослин потребує особливої уваги. Адже, від цього залежить не тільки точність моделі а й крок моделі – власне з яким часовим інтервалом можна буде прогнозувати вплив на рослини змін умов вирощування та відповідно реагувати на них.

Відповідно, для створення точної моделі отримувана інформація повинна базуватись на застосуванні сучасних сенсорів, які інтегрують в агроценоз поля і передають інформацію про стан рослин та умови навколишнього

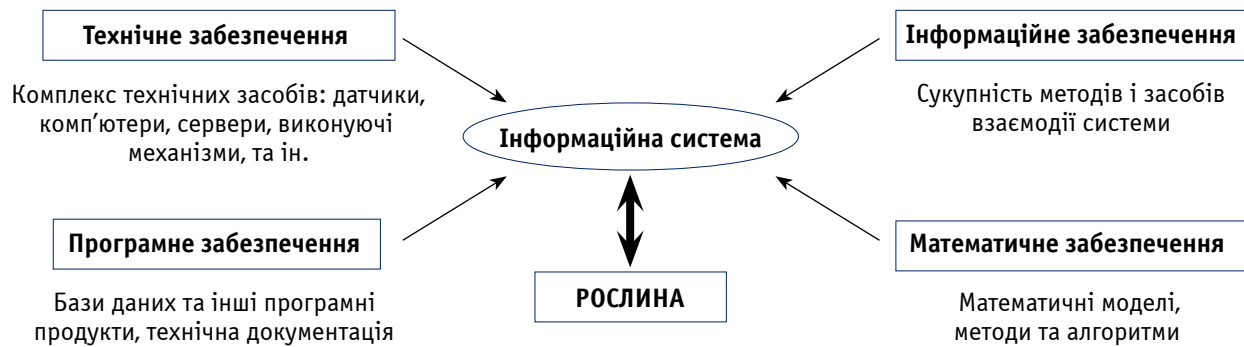


Рис. 2. Структура взаємодії основних компонентів цифрової технології вирощування рослин

середовища в режимі он-лайн 24 години на добу 7 днів на тиждень. Інформацію, отриману з приладів, легко співвідносити з даними метеорологічних та агрохімічних спостережень. За рослинами можна спостерігати як до проведення основних агротехнічних операцій, так і під час їхнього виконання і після (чого не зробиш в ручному режимі одразу після застосування, скажімо, пестицидів). Сенсори об'єднують в єдину систему, їхні дані передають в єдину мережу, концентрують та обробляють за допомогою одного сервера та відповідного програмного забезпечення. Такі особливості мережевої роботи сенсорів дозво-

ляють не тільки підвищити швидкість зняття інформації (адже ґрунтообробна техніка чи оприскувач, що проходить по полю може знімати дані з сенсорів визначення стану рослин), а й уніфікувати алгоритми та пришвидшити обробку отриманої інформації.

Отже, аналіз і систематизація безлічі математичних моделей та власні теоретичні й практичні напрацювання в побудові математичних моделей рослин дозволяють сформулювати блок-схему основних трьох модулів ознак – підсумкової і двох компонентних моделі прогнозування продуктивності рослин (рис. 3).

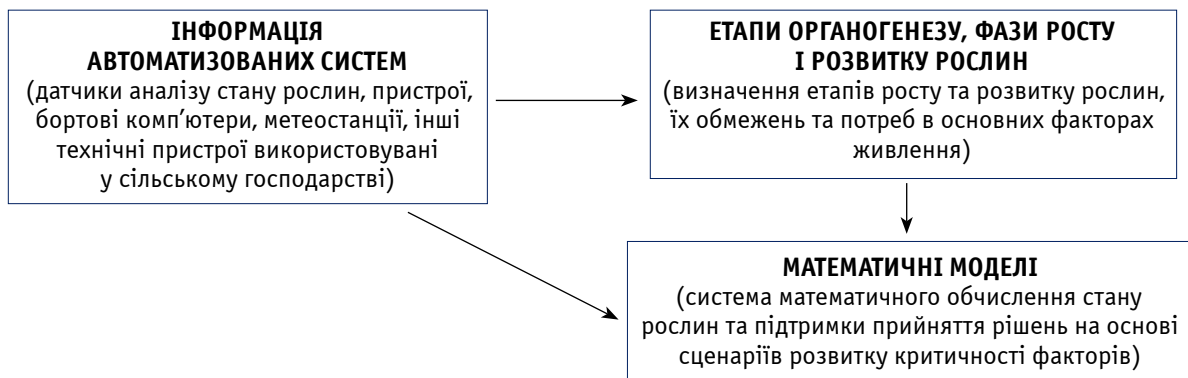


Рис. 3. Модель прогнозування продуктивності рослин

Фактично на кожному етапі росту і розвитку рослин визначають свою блок-схему модулів ознак, які залежать від особливостей впливу факторів вирощування на рослини відповідної культури, критичних періодів росту і розвитку, можливостей опису отримуваних взаємодій математичним апаратом. При цьому крок моделі може відповідати мінімально можливому кроку датчиків, розташованих на полі, хоча доцільніше встановити крок, що відповідає одній добі або ж настанню відповідних фенологічних фаз росту і розвитку культури.

Практична реалізація адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктив-

ності культур повинна передбачати окремі аспекти цифрових технологій вирощування, що об'єднують у відповідний програмно-апаратний комплекс:

Цифрова технологія базується виключно на потребах рослини і власне на необхідності забезпечити ці потреби доступними ресурсами для отримання стабільно високої врожайності з високими показниками якості (екологічності, тощо).

Програмний комплекс повинен самонавчатись у процесі накопичення даних для аналізу. Зі збільшенням кількості років прогнозування врожайності повинна зростати точність прогнозів.

Програмно-апаратний комплекс повинен мати зворотній зв'язок між його основними структурними елементами. Дані, визначені на основі роботи певних механізмів або показники погодних умов та їхні прогнози, використовують для прийняття рішень, однак, у випадку їхньої суттєвої зміни рішення про окремі елементи технології переглядають.

Програмний продукт повинен бути пов'язаний з економічною частиною і враховувати кон'юнктуру ринку та прогнозні дані. У випадку низької закупівельної ціни на продукцію – рекомендувати застосовувати чи не застосовувати певні агротехнічні операції (скажімо, підживлення по вегетації), коригувати їх у разі суттєвої зміни умов вирощування, коли застосування цих агрозаходів буде неефективним унаслідок негативної дії посухи тощо.

Цифрову технологію вирощування створюють на основі існуючих кращих рішень, наявних на ринку систем точного землеробства, але з використанням власних ключових вузлів «ноу-хау».

Програмний продукт повинен наповнюватись науковими даними з вивчення нових сортів сільськогосподарських культур у різних агрокліматичних зонах України, з дослідження ефективності нових агрозаходів тощо.

Практичне застосування адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності в технологічному процесі вирощування сільськогосподарських культур дозволить з високою точністю спрогнозувати перебіг процесів росту і розвитку рослин та рекомендувати проведення додаткових агрозаходів, орієнтуючись на багаторічні дані з вирощування культур у конкретному господарстві, а в підсумку – беручи до уваги й оперативну зміну умов вирощування. Фактично система дозволить використовувати дієві елементи технології вирощування та пропонувати зміни в них відповідно до впливу різних факторів, що важко прорахувати без застосування інформаційних технологій.

Висновки

Упровадження моделі адаптивної інформаційної системи прогнозування продуктивності в технологічному процесі вирощування сільськогосподарських культур дозволить підвищити точність прогнозування перебігу процесів росту і розвитку рослин та рекомендувати проведення додаткових агрозаходів, орієнтуючись на багаторічні дані з вирощування культур у конкретному господарстві.

Дану модель формують на базі трьох модулів ознак – підсумкової і двох компонентних. Підсумковими є ознаки, що мають між собою екологічно стабільні зв'язки та найвищий сумарний внесок у кінцеву підсумкову ознаку – продуктивність рослини. На кожному наступному етапі реалізації генетичної структури ознаки продуктивності підсумкова стає компонентною, причому з максимальним внеском у підсумкову ознаку наступного модуля.

Використана література

1. Афонников Д. А., Генаев М. А., Дорошков А. В. и др. Методы высокопроизводительного фенотипирования растений для массовых селекционно-генетических экспериментов. *Генетика*. Т. 52. № 7. С. 788–803. doi: 10.7868/s001667581607002x
2. Genaev M. A., Doroshkov A. V., Pshenichnikova T. A. et al. Extraction of quantitative characteristics describing wheat leaf pubescence with a novel image-processing technique. *Planta*. 2012. Vol. 236, Iss. 6. P. 1943–1954. doi: 10.1007/s00425-012-1751-6
3. Некрасова Г. Ф., Киселева И. С. Экологическая физиология растений. Руководство к лабораторным и практическим занятиям. Екатеринбург, 2008. 157 с.
4. Лаханов А. П. Оценка экологической пластичности и стабильности формирования урожайности зерна у сортов гречихи. *Доклады Россельхозакадемии*. 2001. № 1. С. 6–9.
5. Acutis M., Donatelli M., Stuckle C. O. Performance of two weather generators as a function of the number of available years of measured climatic data. *Proc. First Int. Symp. Modelling Cropping Systems* (Lleida, Spain, 21–23 June). Lleida, 1999. P. 129–130.
6. Acutis M., Donatelli M., Stuckle C. O. Comparing the performance of three weather generators. *Proceedings of the Fifth European Society for Agronomy Congress* (28 June–2 July 1998, Nitra, Slovak Republic). Nitra, 1998. Vol. II. P. 117–118.
7. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome : UN-FAO, 1998. 15 p. URL: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
8. Badini O., Stuckle C. O., Franz E. H. Application of crop simulation modeling and GIS to agroclimatic assessment in Burkina Faso. *Agric. Ecosyst. Environ.* 1997. Vol. 64. P. 233–244. doi: 10.1016/S0167-8809(97)00041-8
9. Генаев М. А., Дорошков А. В., Пшеничникова Т. А. и др. Информационная поддержка селекционно-генетического эксперимента у пшеницы в системе WheatPGE. *Математическая биология и биоинформатика*. 2012. Т. 7, № 2. С. 410–424. doi: 10.17537/2012.7.410
10. Генаев М. А., Дорошков А. В., Морозова Е. В. и др. Компьютерная система WheatPGE для анализа взаимосвязи фенотип–генотип–окружающая среда у пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2011. Т. 15. С. 784–793.
11. Неттевич Э. Д. Влияние условий возделывания и продолжительности изучения на результаты оценки сорта по урожайности. *Вестник РАСХН*. 2001. № 3. С. 34–38.
12. Мельникова О. В., Клименков Ф. И. Оценка адаптивности, пластичности и стабильности сортов ярового ячменя, возделываемых в Брянской области. *Зерновое хозяйство*. 2007. № 3–4. С. 13–15.
13. Лавриненко Ю. О. Эколого-генетична мінливість кількісних ознак зернових культур та її значення для селекції в умовах зрошення : дис. ... д-ра с.-г. наук : 06.01.05 «Селекція рослин» / Ін-т землеробства південного регіону. Херсон, 2005. 386 с.
14. Костин В. И., Колбасова Н. И. Анализ экологической пластичности растительных семейств ценозообразователей Поволжского региона. *Известия Оренбургского ГАУ*. 2009. № 3. С. 202–205.

15. 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). Environmental Change Unit, University of Oxford, UK, 2000. P. 367–390.
16. Anderson P. K., Cunningham A. A., Patel N. G. et al. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends Ecol. Evol.* 2004. Vol. 19, Iss. P. 535–544. doi: 10.1016/j.tree.2004.07.021
17. Audsley E., Pearn K. R., Simota C. et al. What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural and use, and what not? *Environ. Sci. Pol.* 2006. Vol. 9. P. 148–168. doi: 10.1016/j.envsci.2005.11.008
18. 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. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2000. Vol. 82. P. 57–71. doi: 10.1016/S0167-8809(00)00216-4
19. Bale J. S., Masters G. J., Hodkinson I. D. et al. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biol.* 2002. Vol. 8. P. 1–16. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x
20. Chloupek O., Hrstkova P., Schweigert P. Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crops Res.* 2004. Vol. 85, Iss. 2–3. P. 167–190. doi: 10.1016/S0378-4290(03)00162-x
21. Christensen J. H., Christensen O. B. A summary of PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change* 2007. Vol. 81. P. 7–30. doi: 10.1007/s10584-006-9210-7
22. Hilden M., Lethtonen H. The practice and process of adaptation in Finnish agriculture. FINADAPT Working paper 5, Helsinki, Finnish Environment Institute Mimeographs, 2005. P. 335.
23. Jongman R. H. G., Bunce R. G. H., Metzger M. J. et al. Objectives and application of a statistical environmental stratification of Europe. *Landscape Ecol.* 2006. Vol. 21, Iss. 3. P. 409–419. doi: 10.1007/s10980-005-6428-0
24. Kaukoranta T., Hakala K. Impact of spring warming on sowing times of cereal, potato and sugar beet in Finland. *Agric. Food Sci.* 2008. Vol. 17. P. 165–176. doi: 10.2137/145960608785328198
25. Arkin G. F., Vanderlip R. L., Ritchie J. T. A dynamic grain sorghum growth model. *Trans. ASAE.* 1976. Vol. 19. P. 622–626, 630. doi: 10.13031/2013.36082
26. de Wit C. T., Brouwer R., Penning de Vries F. W. T. The simulation of photosynthetic systems. *Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969* / I. Setlik (Ed.). Pudoc, Wageningen, The Netherlands, 1970. P. 47–50.
27. Польовий А. М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агроєкосистем. Одеса : Екологія, 2013. 433 с.
28. Дмитренко В. П. О методике оценки гидрометеорологических условий формирования урожая сельскохозяйственных культур. *Тр. УкрНИГМИ.* 1973. Вып. 128. С. 3–23.
29. Галямин Е. П. Оптимизация оперативного распределения водных ресурсов в орошении. Ленинград : Гидрометеоздат, 1981. 272 с.
30. Константинов А. Р. Погода, почва и урожай озимой пшеницы. Ленинград : Гидрометеоздат, 1978. 248 с.
31. Образцов А. С. Системный метод: применение в земледелии. Москва : Агропромиздат, 1990. 303 с.
32. Swaney D. P., Jones J. W., Boggess W. G. et al. Real-time irrigation decision analysis using simulation. *Trans. ASAE.* 1983. Vol. 26. P. 562–568. doi: 10.13031/2013.33979
33. Ventrella D., Rinaldi M. Comparison between two simulation models to evaluate cropping systems in Southern Italy. Yield response and soil water dynamics. *Agric. Med.* 1999. Vol. 129. P. 99–10.
34. Williams J. R., Jones C. A., Dyke P. T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 1984. Vol. 27. P. 129–144.
35. Антоненко В. С. Динамическое моделирование роста, развития и формирования продуктивности озимой пшеницы. Київ : АртЭк, 2002. 64 с.
36. Acutis M., Donatelli M. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Eur. J. Agron.* 2003. Vol. 18. P. 373–377. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00128-4
37. Bechini L., Bocchi S., Maggiore T. Spatial interpolation of soil properties for irrigation planning. A simulation study in northern Italy. *Eur. J. Agron.* 2003. Vol. 19. P. 1–14. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00013-8
38. Belhouchette H., Donatelli M., Braudeau E., Wery J. Test of the cropping systems model CropSyst in Tunisian conditions. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, 16–18 July, Florence, Italy, 2001. P. 47–48.
39. Bindi M., Donatelli M., Fibbi L., Stuckle C. O. Estimating the effect of climate change on cropping systems at four European sites. *Proceedings First International Symposium Modelling Cropping Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June, 1999. P. 147–148.
40. 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. *Agric. Syst.* 1996. Vol. 52. P. 171–198. doi: 10.1016/0308-521x(96)00011-x
41. Bouniols A., Cabelguenne M., Jones C. A. et al. Simulation of soybean nitrogen nutrition for a silty clay soil in southern France. *Field Crop Res.* 1991. Vol. 26. P. 19–34. doi: 10.1016/0378-4290(91)90054-y
42. Donatelli M., Acutis M., Fila G., Bellocchi G. A method to quantify time mismatch of model estimates. *Seventh Congress of the European Society for Agronomy*, Cordoba, Spain, July 15–18, 2002. P. 269–270.
43. Donatelli, M., Bellocchi, G., Fontana, F. RadEst3.00: Software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. *Eur. J. Agron.* 2003. Vol. 18. P. 363–367. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00130-2
44. Ferrer-Alegre F., Villar J.M., Castellví F. et al. Contribution of simulation techniques to the evaluation of alternative cropping systems in Andorra. *Proceedings First International Symposium Modelling Cropping Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June, 1999. P. 177–178.
45. Marchetti, R., Donatelli, M., Spallacci, P. Testing denitrification functions of dynamic crop models. *J. Envir. Qual.* 1997. Vol. 26, Iss. 2. P. 394–401. doi: 10.2134/jeq1997.00472425002600020009x
46. Spitters C J T, van Keulen H, van Kraailingen D W G. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: Rabbinge R, Ward SA, van Laar HH, eds. *Simulation and systems management in crop protection. Simulation Monographs* 32, Pudoc, Wageningen, 1989. P. 147–181. doi: 10.1007/bf00024963
47. Boote, K. J., Jones, J. W., Hoogenboom, G., Pickering, N. B. The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1998. P. 99–128. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4_6
48. Kroes, J. G., Supit I. Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in The Netherlands using historical and future climate data. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 2011. Vol. 144, Iss. 1. P. 370–381. doi: 10.1016/j.agee.2011.09.008
49. 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
50. De Jong van Lier, Q., van Dam J. C., Durigon A et al. Modeling water potentials and flows in the soil-plant system comparing hydraulic resistances and transpiration reduction functions. *Vadose Zone Journal.* 2013. Vol. 11, Iss. 3. doi: 10.2136/vzj2013.02.0039

51. 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.agry.2018.06.018
52. 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. Alterra, Wageningen University & Research Centre, Wageningen. 2014.
53. Diepen, C. A., Wolf, J., Keulen, H., Rappoldt C. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 1989. Vol. 5. P. 16–24. doi: 10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x
54. Modelling of agricultural production: Weather, soils and crops / H. van Keulen, J. Wolf (Eds). Wageningen, The Netherlands : PUDOC, 1986, 478 p.
55. Supit, I., Hooijer, A. A., Diepen van, C. A. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS, Volume 1: Theory and Algorithms. EUR 15956 EN, Joint Research Center, Commission of the European Communities, Luxembourg. 1994.
56. Ferrer-Alegre, F., Stuckle, C. O. A model for assessing crop response to salinity. *Irrig. Sci.* 1999. Vol. 19. P. 15–23. doi: 10.1007/s002710050067
57. Ferrer-Alegre, F., Villar, J. M., Carrasco, I., Stuckle, 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 Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June, 1999. P. 175–176.
58. Marcos, J., Fiez, T., Stuckle, C. O., Huggins, D. Model based assessment of alternative crop adaptation to the dryland cropping areas of the Pacific Northwest. *Agronomy Abstracts*, ASA Annual Meeting, Salt Lake City, UT, American Society of Agronomy, Madison, WI. 1999.
59. Meinke, H., Baethgen, W. E., Carberry, P. S. et al. Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches. *Agric. Syst.* 2001. Vol. 70. P. 493–513. doi: 10.1016/s0308-521x(01)00057-9
60. Jones, J. W., Keating, B. A., Porter, C. H. Approaches to modular model development. *Agric. Syst.* 2001. Vol. 70. P. 421–443. doi: 10.1016/s0308-521x(01)00054-3
61. Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G. et al. Decision support system for agrotechnology transfer DSSAT v3. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1998. P. 157–177. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4_8
62. Berti, A., Morari, F., Borin, M., Giardini, L. Use of CropSyst to simulate a four year rotation with different fertilization levels. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*. Florence, Italy, 16–18 July, 2001. P. 105–106.
63. Bocchi, S., Confalonieri, R., Bechini, L. CropSyst for rice in Northern Italy. *Proceedings Second Modelling Cropping Systems International Symposium*. Florence, Italy, 16–18 July 2001. P. 51–52.
64. Castellvi, F., Stuckle, C. O., Ibanez, M. Comparing a locally calibrated versus a generalized temperature generation process. *Trans. ASAE*. 2002. Vol. 44. P. 1143–1148. doi: 10.13031/2013.6442
65. 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 Second International Symposium Modelling Cropping Systems*. Florence, Italy, 16–18 July, 2001. P. 127–128.
66. 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 Fourth European Society for Agronomy Congress*. Veldhoven-Wageningen, The Netherlands, 7–11 July, 1996. Vol. I. P. 342–343.
67. Donatelli, M., Stuckle, C. O., Ceotto, E., Rinaldi, M. CropSyst validation for cropping systems at two locations of Northern and Southern Italy. *Eur. J. Agron.* 1997. Vol. 6. P. 35–45. doi: 10.1016/s1161-0301(96)02029-1
68. Donatelli, M., Stuckle, 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 Seventh ICCTA Conference*. Firenze, Italy, 16–17 November 1998, 1999. P. 114–121.
69. Morari, F., Berti, A., Borin, M., Giardini, L. CropSyst model in simulating cropping systems with different input levels. *Proceedings Ninth International Conference on the UN-FAO ESCORENA network*, Gargnano del Garda (BS), Italy, 6–9 September, 2000. P. 257–262.
70. Pala, M., Stuckle, 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. *Agric. Syst.* 1996. Vol. 51. P. 147–163. doi: 10.1016/0308-521x(95)00043-5
71. Donatelli, M., Stuckle, C. O., Nelson, R. L. et al. Using the software CropSyst and ARCVIEW in evaluating the effect of management in cropping systems in two areas of the low Povalley, Italy. *Rev. de Cien. Agric.* 1999. Vol. 22. P. 87–108.
72. Eryugur, O.H. Use of bio-physical models in agricultural economics: an application of Cropsyst. MS thesis, Dept. Agr. Economics, Middle East Technical University of Ankara, Turkey, 2000. P. 139.
73. Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L. et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 2003. Vol. 18. P. 267–288. doi: 10.1016/s1161-0301(02)00108-9
74. 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. *Agric. Syst.* 1996. Vol. 50. P. 255–271. doi: 10.1016/0308-521x(94)00055-v
75. Pannkuk, C. D., Stuckle, C. O., Papendick, R. I. Validation of CropSyst for winter and spring wheat under different tillage and residue management practices in a wheat-fallow region. *Agric. Syst.* 1998. Vol. 57. P. 121–134. doi: 10.1016/s0308-521x(97)00076-0
76. Rivington, M., Matthews, K. B., Sibbald, A. R., Stuckle, C. O. Integrating CropSyst with a multiple-objective land use planning tool (LADSS). *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, Florence, Italy, 16–18 July, 2001. P. 171–172.
77. Silvestri, N., Bellocchi, G., Mazzoncini, M., Menini, S. Evaluation of the CropSyst model for simulating soil water, soil nitrate, green area index and above-ground biomass of maize under different managements. *Proceedings of International Symposium Modelling Cropping Systems – European Society for Agronomy Division Agroclimatology and Agronomic Modelling*. Lleida, 21–23 June, 1999. P. 253–254.
78. Stöckle, C. O., Cabelguenne, M., Debaeke, P. Comparison of CropSyst performance for water management in Southwestern France using submodels of different levels of complexity. *Eur. J. Agron.* 1997. Vol. 7. P. 89–98. doi: 10.1016/s1161-0301(97)00033-6
79. Fick G. W., Williams W. A., Loomis R. S. Computer simulation of dry matter distribution during sugar beet growth. *Crop Science*. 1973. Vol. 13. P. 413–417. doi: 10.2135/cropsci1973.0011183x001300040006x
80. Patefield W.M., Austin R. B. A model for the simulation of the growth of *Beta vulgaris* L. *Annals of Botany*. 1971. Vol. 35. P. 1227–1250. doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a084557
81. Chen, S., Zhao, B., Stockle, C. O., Harrison, J., Nelson, R. Use of models as decision support tools in dairy nutrient management. *ASAE Paper No. 02-4094*, St. Joseph, MI. 2002. doi: 10.13031/2013.10486
82. Confalonieri, R., Maggiore, T., Bechini, L. Application of the simulation model CropSyst to an intensive forage system in Northern Italy. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*. Florence, Italy, 16–18 July, 2001. P. 59–60.
83. Crisci, A., Moonen, C., Ercoli, L., Bindi, M. Study of the impact of climate change on wheat and sunflower yields using an historical weather data-set and a crop simulation model. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*. Florence, Italy, 16–18 July, 2001. P. 119–120.

84. Палагін О. В., Сарахан Є. В., Присяжнюк О. І. Інформаційні технології у прецизійному землеробстві. *Наукові праці Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків*. 2012. Вип. 14. С. 582–585.
85. Fila, G., Bellocchi, G., Acutis, M., Donatelli, M. IRENE: a software to evaluate model performance. *Eur. J. Agron.* 2003. Vol. 18. P. 369–372. doi: 10.2134/agronj2003.1330
86. Jara, J., Stuckle, C.O. Simulation of corn water uptake using models with different levels of process detail. *Agron. J.* 1999. Vol. 91. P. 256–265. doi: 10.2134/agronj1999.00021962009100020013x
87. Mazzetto, F., Ceccon P., Bonera R. et al. A model of multicriteria analysis aimed at evaluating different cropping systems. *Proceedings Second Modelling Cropping Systems International Symposium*. Florence, Italy, 16–18 July 2001. P. 150–151.
88. Peralta, J. M., Stuckle, C. O. Nitrate from an irrigated crop rotation at the Pasco-Quincy area (Washington, USA) available for groundwater contamination: a long-term simulation study. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2001. Vol. 88. P. 23–34.
89. Ross, P. J., Bristow, K. L. Simulating water movement in layered and gradational soils using the Kirchhoff transform. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1990. Vol. 54, Iss 6. P. 1519–1524. doi: 10.2136/sssaj1990.03615995005400060002x
90. Sadras, V. O. Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. *Field Crops Res.* 2002. Vol. 77. P. 201–215. doi: 10.1016/s0378-4290(02)00083-7
91. Karpuk L., Prysiazniuk O. Construction of multiple regressive models of sugar beet growth and development. *Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія: Рослинництво, селекція і насінництво, плодоовочівництво*. 2014. Вип. 2. С. 74–82.
92. Castellvi, F., Stuckle, C. O. Comparing the performance of WGEN and ClimGen in the generation of temperature and solar radiation. *Trans. ASAE*. 2001. Vol. 44. P. 1683–1687. doi: 10.13031/2013.7038
93. Lindemann, E. R., Stuckle, C. O., Redell, D. Field testing a computer-assisted on-farm irrigation scheduling program. *ASAE Paper No. 87 /2560*, St. Joseph, MI, 1987.
94. Marchetti, R., Spallacci P., Ceotto E., Papini R. Predicting yield variability for corn grown in a silty-clay soil in Northern Italy. In: *Proceedings Fourth International ASA-CSSA-SSSA Conference on Precision Agriculture*, St. Paul, MN, 19–22 July, 2015. P. 467–478. doi: 10.2134/1999.precisionagproc4.c41
95. McKinion, J. M., Baker, D. N., Whisler, F. D., Lambert, J. R. Application of the GOSSYM/COMAX system to cotton crop management. *Agricultural Systems*. 1989. Vol. 31, Iss. 1. P. 55–65. doi: 10.1016/0308-521x(89)90012-7
96. Porter, J. R., Leigh, R. A., Semenov, M. A., Miglietta, F. Modelling the effects of climatic change and genetic modification on nitrogen use by wheat. *Eur. J. Agron.* 1995. Vol. 4. P. 419–429. doi: 10.1016/s1161-0301(14)80094-4
97. Richter, G. M., Agostini, F., Donatelli, M. et al. Modelling the N-dynamics of a wheat-sugar beet rotation at different complexity. *Proceedings First International Symposium Modelling Cropping Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June 1999. P. 239–240.
98. Ritchie J. T., Singh U., Godwin D. C., Bowen W. T. Cereal growth, development and yield. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1998. P. 79–98. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4_5
99. Scott, M., Vail L. W., Jaksch J. A. et al. Early warning of ENSO events for regional agriculture. *Report for the Office of Global Programs, U.S. NOAA*, Contract 28340A. Battelle Pacific Northwest Division, Richland, Washington. 2001.
100. periments. *Genetika* [Russian Journal of Genetics], 52(7), 688–701. doi: 10.7868/s001667581607002x [in Russian]
101. Genaev M. A., Doroshkov A. V., Pshenichnikova T. A., Kolchanov N. A., & Afonnikov D. A. (2012). Extraction of quantitative characteristics describing wheat leaf pubescence with a novel image-processing technique. *Planta*, 236, 1943–1954. doi: 10.1007/s00425-012-1751-6
102. Nekrasova G. F., & Kiseleva I. S. (2008). Ecological physiology of plants. Guide to laboratory and practical exercises. Ekaterinburg. [in Russian]
103. Lakhanov, A. P. (2001). Assessment of environmental plasticity and stability of formation of grain yield in buckwheat varieties. *Doklady` Rossel` khozakademii* [Reports of the Russian Agricultural Academy], 1, 6–9. [in Russian]
104. Acutis, M., Donatelli, M., & Stuckle, C. O. (1999). Performance of two weather generators as a function of the number of available years of measured climatic data. *Proceedings First International Symposium Modelling Cropping Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June, p. 129–130.
105. Acutis, M., Donatelli, M., & Stuckle, C. O. (1998). Comparing the performance of three weather generators. *Proceedings of the C.O. Stuckle et al. / Europ. J. Agronomy* 18 (2003) 289_/307 303 Fifth European Society for Agronomy Congress, Nitra, Slovak Republic, 28 June – 2 July, vol. II, pp. 117–118.
106. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *Irr. Drain. Paper* 56. UN-FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
107. Badini, O., Stuckle, C. O., & Franz, E. H. (1997). Application of crop simulation modeling and GIS to agroclimatic assessment in Burkina Faso. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 64, 233–244. doi: 10.1016/s0167-8809(97)00041-8
108. Genaev M. A., Doroshkov A. V., Pshenichnikova T. A. (2012). Information support for the selection and genetic experiment in wheat in the WheatPGE system. *Matematicheskaya biologiya i bioinformatika* [Mathematical biology and bioinformatics], 7(2), 410–424. doi: 10.17537/2012.7.410 [in Russian]
109. Genaev M. A., Doroshkov A. V., & Morozova E. V. (2011). Wheat-PGE computer system for analysis of the phenotype – genotype – environment relationship in wheat. *Vavilovskij zhurnal genetiki i selekcii* [Vavilov Journal of Genetics and Breeding], 15, 784–793. [in Russian]
110. Nettevich, E. D. (2001). The influence of cultivation conditions and the duration of the study on the results of evaluation of varieties by yield. *Vestnik RASKhN* [Bulletin of the RAAS], 3, 34–38. [in Russian]
111. Mel`nikova O. V., Klimenkov F. I. (2007). Assessment of adaptability, ductility and stability of spring barley cultivated in the Bryansk region. *Zernovoe khozyajstvo* [Grain farming], No. 3/4, 13–15. [in Russian]
112. Lavrynenko, Yu. O. (2005). Ecological-genetic variability of quantitative traits of cereals and its importance for selection in irrigation conditions: diss. Doctor of Agricultural Sciences Sciences: 06. 01. 05 «Plant breeding». Kherson, 386 p. [in Ukrainian]
113. Kostin, V. I., Kolbasova N. I. (2009). Analysis of ecological plasticity of plant families of coenoids of the Volga region. *Izvestiya Orenburgskogo GAU* [News of the Orenburg State Agrarian University], 3(23), 202–205 [in Russian]
114. Harrison, P. A., Butterfield, R. E., Orr, J. L. (2000). Modelling climate change impacts on wheat, potato and grapevine in Europe. In: Downing, T.E., Harrison, P.A., Butterfield, R.E., Lonsdale, K.G. (Eds.), *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe*. Environmental Change Unit, University of Oxford, UK, pp. 367–390.
115. 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 Ecol. Evol.*, 19, 535–544. doi: 10.1016/j.tree.2004.07.021

Reference

1. Afonnikov, D. A., Genaev, M. A., Doroshkov, A. V., Komyshev, E. G., & Pshenichnikova, T. A. (2016). Methods of high-throughput plant phenotyping for large-scale breeding and genetic ex-

17. Audsley, E., Pearn, K. R., Simota, C., Cojocaru, G., Koutsidou, E., Rounsevell, M. D. A., Trnka, M., Alexandrov, V. (2006). What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use, and what not? *Environ. Sci. Pol.*, 9, 148–168. doi: 10.1016/j.envsci.2005.11.008
18. 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. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 82, 57–71. doi: 10.1016/S0167-8809(00)00216-4
19. Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C., Bezemer, T. M., Brown, V. K., ... Whittaker, J. B. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biol.*, 8, 1–16. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x
20. Chloupek, O., Hrstkova, P., Schweigert, P. (2004). Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crops Res.*, 85, 167–190. doi: 10.1016/S0378-4290(03)00162-x
21. Christensen, J. H., & Christensen, O. B. (2007). A summary of PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, 81, 7–30. doi: 10.1007/s10584-006-9210-7
22. Hilden, M., & Lethtonen, H. (2005). *The practice and process of adaptation in Finnish agriculture*. FINADAPT Working paper 5, Helsinki, Finnish Environment Institute Mimeographs, p. 335.
23. Jongman, R. H. G., Bunce, R. G. H., Metzger, M. J., Mucher, C. A., Howard, D. C., & Mateus, V. L. (2006). Objectives and application of a statistical environmental stratification of Europe. *Land-landscape Ecol.*, 21, 409–419. doi: 10.1007/s10980-005-6428-0
24. Kaukoranta, T., & Hakala, K. (2008). Impact of spring warming on sowing times of cereal, potato and sugar beet in Finland. *Agric. Food Sci.*, 17, 165–176. doi: 10.2137/145960608785328198
25. Arkin, G. F., Vanderlip, R. L., & Ritchie, J. T. (1976). A dynamic grain sorghum growth model. *Trans. ASAE*, 19, 622–626, 630. doi: 10.13031/2013.36082
26. de Wit, C. T., Brouwer, R., & Penning de Vries, F. W. T. (1970). The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), *Prediction and measurement of photosynthetic productivity. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969*. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 47–50.
27. Polovyi, A. M. (2013). Model of hydrometeorological regime and productivity of agroecosystems. Odessa. [in Ukrainian]
28. Dmitrenko, V. P. (1973). On the methodology for assessing the hydrometeorological conditions of crop formation. *Tr. UkrNIG-MI.*, 128, 3–23. [in Russian]
29. Galyamin, E. P. (1981). *Optimization of the operational distribution of water resources in irrigation*. L.: Gidrometeoizdat. [in Russian]
30. Konstantinov, A. R. (1978). *Weather, soil and winter wheat crop*. L.: Gidrometeoizdat. [in Russian]
31. Obratsov, A. S. (1990). *Systemic method: application in agriculture*. M.: Agropromizdat. [in Russian]
32. Swaney, D. P., Jones, J. W., Boggess, W. G., Wilkerson, C. G., & Mishoe, J. W. (1983). Real-time irrigation decision analysis using simulation. *Trans. ASAE*, 26, 562–568. doi: 10.13031/2013.33979
33. Ventrella, D., & Rinaldi, M. (1999). Comparison between two simulation models to evaluate cropping systems in Southern Italy. Yield response and soil water dynamics. *Agric. Med.*, 129, 99–10.
34. Williams, J. R., Jones, C. A., & Dyke, P. T. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE*, 27, 129–144.
35. Antonenko, V. S. (2002). *Dynamic modeling of the growth, development and formation of winter wheat productivity*. K.: ArtEk. [in Russian]
36. Acutis, M., Donatelli, M. (2003). SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *Eur. J. Agron.*, 18, 373–377. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00128-4
37. Bechini, L., Bocchi S., & Maggiore, T. (2003). Spatial interpolation of soil properties for irrigation planning. A simulation study in northern Italy. *European Journal of Agronomy*, 19, 1–14. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00013-8
38. Belhouchette, H., Donatelli, M., Braudeau, E., & Wery, J. (2001). Test of the cropping systems model CropSyst in Tunisian conditions. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, 16–18 July, Florence, Italy, pp. 47–48.
39. Bindi, M., Donatelli, M., Fibbi, L., & Stuckle, C. O. (1999). Estimating the effect of climate change on cropping systems at four European sites. *Proceedings First International Symposium Modelling Cropping Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June, pp. 147–148.
40. 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. *Agric. Syst.*, 52, 171–198. doi: 10.1016/0308-521X(96)00011-X
41. Bouniols, A., Cabelguenne, M., Jones, C. A., Chalamet, A., Charpentier, J. L., & Marty, J. R. (1991). Simulation of soybean nitrogen nutrition for a silty clay soil in southern France. *Field Crops Res.*, 26, 19–34. doi: 10.1016/0378-4290(91)90054-y
42. Donatelli, M., Acutis, M., Fila, G., & Bellocchi, G. (2002). A method to quantify time mismatch of model estimates. *Seventh Congress of the European Society for Agronomy*, Cordoba, Spain, July 15–18, 269–270.
43. Donatelli, M., Bellocchi, G., & Fontana, F. (2003). RadEst3.00: Software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. *Eur. J. Agron.*, 18, 363–367. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00130-2
44. Ferrer-Alegre, F., Villar, J.M., Castelló, F., Ballesta, A., & Stuckle, C. O. (1999). Contribution of simulation techniques to the evaluation of alternative cropping systems in Andorra. *Proceedings First International Symposium Modelling Cropping Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June, pp. 177–178.
45. Marchetti, R., Donatelli, M., & Spallacci, P. (1997). Testing denitrification functions of dynamic crop models. *J. Envir. Qual.*, 26(2), 394–401. doi: 10.2134/jeq1997.00472425002600020009x
46. Spitters, C. J. T., van Keulen, H., & van Kraalingen, D. W. G. (1989). A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: Rabbinge R, Ward SA, van Laar HH, eds. *Simulation and systems management in crop protection. Simulation Monographs 32*, Pudoc, Wageningen, 147–181. doi: 10.1007/bf00024963
47. Boote, K. J., Jones, J. W., Hoogenboom, G., & Pickering, N. B. (1998). The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 99–128. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4_6
48. Kroes, J. G., & Supit, I. (2011). Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in The Netherlands using historical and future climate data. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 370–381. doi: 10.1016/j.agee.2011.09.008
49. Van Dam, J. C., Groenendijk P., Hendriks R. F. A., & Kroes J. G. (2008). Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7, 640–653. doi: 10.2136/vzj2007.0060
50. De Jong van Lier, Q., van Dam J. C., Durigon A., dos Santos M. A., & Metselaar K. (2013). Modeling water potentials and flows in the soil-plant system comparing hydraulic resistances and transpiration reduction functions. *Vadose Zone Journal*, 11(3). doi: 10.2136/vzj2013.02.0039
51. de Wit, A., Boogaard H., Fumagalli D., Janssen S., Knapen R., van Kraalingen D., Supit I., van der Wijngaart R., & van Diepen K. (2019). 25 Years of the WOFOST Cropping Systems Model. *Agricultural Systems*, 168, 154–167. doi: 10.1016/j.agry.2018.06.018
52. 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. Alterra, Wageningen University & Research Centre, Wageningen.
53. Diepen, C. A., Wolf, J., Keulen, H., Rappoldt C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5, 16–24. doi: 10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x

54. Keulen, H., & van Wolf, J. (Eds). (1986). *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*. Wageningen, The Netherlands : PUDOC.
55. Supit, I., Hooijer, A. A., & Diepen van, C. A. (1994). System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS, Volume 1: Theory and Algorithms. EUR 15956 EN, Joint Research Center, Commission of the European Communities, Luxembourg.
56. Ferrer-Alegre, F., & Stückle, C. O. (1999). A model for assessing crop response to salinity. *Irrig. Sci.*, 19, 15–23. doi: 10.1007/s002710050067
57. Ferrer-Alegre, F., Villar, J. M., Carrasco, I., & Stückle, C. O. (1999). 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 Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June, pp. 175–176.
58. Marcos, J., Fiez, T., Stückle, C. O., & Huggins, D. (1999). Model based assessment of alternative crop adaptation to the dryland cropping areas of the Pacific Northwest. Agronomy Abstracts, ASA Annual Meeting, Salt Lake City, UT, American Society of Agronomy, Madison, WI.
59. Meinke, H., Baethgen, W. E., Carberry, P. S., Donatelli, M., Hammer, G. L., Selvaraju, R., & Stückle, C. O. (2001). Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches. *Agric. Syst.*, 70, 493–513. doi: 10.1016/s0308-521x(01)00057-9
60. Jones, J. W., Keating, B. A., Porter, C. H. (2001). Approaches to modular model development. *Agric. Syst.*, 70, 421–443. doi: 10.1016/s0308-521x(01)00054-3
61. Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Thornton, P. K., Wilkens, P. W., Imamura, D. T., Bowen, W. T., Singh, U. (1998). Decision support system for agrotechnology transfer DSSAT v3. In: Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Thornton, P. K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 157–177. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4_8
62. Berti, A., Morari, F., Borin, M., & Giardini, L. (2001). Use of CropSyst to simulate a four year rotation with different fertilization levels. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, Florence, Italy, 16–18 July, pp. 105–106.
63. Bocchi, S., Confalonieri, R., & Bechini, L. (2001). CropSyst for rice in Northern Italy. *Proceedings Second Modelling Cropping Systems International Symposium*, Florence, Italy, 16–18 July 2001, pp. 51–52.
64. Castellvi, F., Stückle, C. O., & Ibanez, M. (2002). Comparing a locally calibrated versus a generalized temperature generation process. *Trans. ASAE*, 44, 1143–1148. doi: 10.13031/2013.6442
65. 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. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, Florence, Italy, 16–18 July, pp. 127–128.
66. 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. *Proceedings Fourth European Society for Agronomy Congress*, Veldhoven-Wageningen, The Netherlands, 7–11 July, vol. I, pp. 342–343.
67. Donatelli, M., Stückle, C. O., Ceotto, E., & Rinaldi, M. (1997). CropSyst validation for cropping systems at two locations of Northern and Southern Italy. *Eur. J. Agron.*, 6, 35–45. doi: 10.1016/s1161-0301(96)02029-1
68. Donatelli, M., Stückle, 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. *Proceedings Seventh ICCTA Conference*, Firenze, Italy, 16–17 November 1998, pp. 114–121.
69. Morari, F., Berti, A., Borin, M., & Giardini, L. (2000). CropSyst model in simulating cropping systems with different input levels. *Proceedings Ninth International Conference on the UN-FAO ESCORENA network*, Gargnano del Garda (BS), Italy, 6–9 September, pp. 257–262.
70. Pala, M., Stückle, 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. *Agric. Syst.*, 51, 147–163. doi: 10.1016/0308-521x(95)00043-5
71. Donatelli, M., Stückle, C. O., Nelson, R. L., Gardi, C., Bittelli, M., & Campbell, G. S. (1999). Using the software CropSyst and ARCVIEW in evaluating the effect of management in cropping systems in two areas of the low Povalley, Italy. *Rev. de Cien. Agric.*, 22, 87–108.
72. Eruygur, O. H. (2000). Use of bio-physical models in agricultural economics: an application of Cropsyst. *MS thesis, Dept. Agr. Economics*, Middle East Technical University of Ankara, Turkey, pp. 139.
73. 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. *Eur. J. Agron.*, 18, 267–288. doi: 10.1016/s1161-0301(02)00108-9
74. 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. *Agric. Syst.*, 50, 255–271. doi: 10.1016/0308-521x(94)00055-v
75. Pannkuk, C. D., Stückle, C. O., & Papendick, R. I. (1998). Validation of CropSyst for winter and spring wheat under different tillage and residue management practices in a wheat-fallow region. *Agric. Syst.*, 57, 121–134. doi: 10.1016/s0308-521x(97)00076-0
76. Rivington, M., Matthews, K. B., Sibbald, A. R., & Stückle, C. O. (2001). Integrating CropSyst with a multiple-objective land use planning tool (LADSS). *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, Florence, Italy, 16–18 July, pp. 171–172.
77. Silvestri, N., Bellocchi, G., Mazzoncini, M., Menini, S. (1999). Evaluation of the CropSyst model for simulating soil water, soil nitrate, green area index and above-ground biomass of maize under different managements. *Proceedings of International Symposium Modelling Cropping Systems – European Society for Agronomy Division Agroclimatology and Agronomic Modelling – Lleida*, 21–23 June, 253–254.
78. Stöckle, C. O., Cabelguenne, M., & Debaeke, P. (1997). Comparison of CropSyst performance for water management in Southwestern France using submodels of different levels of complexity. *Eur. J. Agron.*, 7, 89–98. doi: 10.1016/s1161-0301(97)00033-6
79. Fick, G. W., Williams, W. A., & Loomis, R. S. (1973). Computer simulation of dry matter distribution during sugar beet growth. *Crop Science*, 13, 413–417. doi: 10.2135/cropsci1973.0011183x001300040006x
80. Patefield, W. M., & Austin, R. B. (1971). A model for the simulation of the growth of *Beta vulgaris* L. *Annals of Botany*, 35, 1227–1250. doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a084557
81. Chen, S., Zhao, B., Stockle, C. O., Harrison, J., & Nelson, R. (2002). Use of models as decision support tools in dairy nutrient management. *ASAE Paper No. 02-4094*, St. Joseph, MI. doi: 10.13031/2013.10486
82. Confalonieri, R., Maggiore, T., & Bechini, L. (2001). Application of the simulation model CropSyst to an intensive forage system in Northern Italy. In: *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, Florence, Italy, 16–18 July, pp. 59–60.
83. Crisci, A., Moonen, C., Ercoli, L., & Bindi, M. (2001). Study of the impact of climate change on wheat and sunflower yields using an historical weather data-set and a crop simulation model. *Proceedings Second International Symposium Modelling Cropping Systems*, Florence, Italy, 16–18 July, pp. 119–120.
84. Palahin, O. V., Sarakhan, Ye. V., & Prysiashniuk, O. I. (2012). Information technologies in precision agriculture. *Nauk. pracm Mnst. bmoenerg. kul't. cukrov. burbkmv* [Scientific papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet], 14, 582–585. [in Ukrainian]

85. Fila, G., Bellocchi, G., Acutis, M., & Donatelli, M. (2003). IRENE: a software to evaluate model performance. *Eur. J. Agron.*, 18, 369–372. doi: 10.2134/agronj2003.1330
86. Jara, J., & Stuckle, C.O. (1999). Simulation of corn water uptake using models with different levels of process detail. *Agron. J.*, 91, 256–265. doi: 10.2134/agronj1999.00021962009100020013x
87. Mazzetto, F., Ceccon P., Bonera R., Sacco D., & Acutis M. (2001). A model of multicriteria analysis aimed at evaluating different cropping systems. *Proceedings Second Modelling Cropping Systems International Symposium*, Florence, Italy, 16–18 July 2001, pp. 150–151.
88. Peralta, J. M., & Stuckle, C. O. (2001). Nitrate from an irrigated crop rotation at the Pasco-Quincy area (Washington, USA) available for groundwater contamination: a long-term simulation study. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 88, 23–34.
89. Ross, P. J., & Bristow, K. L. (1990). Simulating water movement in layered and gradational soils using the Kirchhoff transform. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 1519–1524. doi: 10.2136/sssaj1990.03615995005400060002x
90. Sadras, V. O. (2002). Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. *Field Crops Res.*, 77, 201–215. doi: 10.1016/s0378-4290(02)00083-7
91. Karpuk, L., & Prysiazniuk, O. (2014). Construction of multiple regressive models of sugar beet growth and development. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriya: Roslynynytstvo, selektsiia i nasynnytstvo, plodoovochivnytstvo* [Bulletin of Kharkiv National Agrarian University. Series: Crop production, breeding and seed production, horticulture], 2, 74–82.
92. Castellvi, F., & Stuckle, C. O. (2001). Comparing the performance of WGEN and ClimGen in the generation of temperature and solar radiation. *Trans. ASAE*, 44, 1683-1687. doi: 10.13031/2013.7038
93. Lindemann, E. R., Stuckle, C. O., & Redell, D. (1987). Field testing a computer-assisted on-farm irrigation scheduling program. *ASAE Paper No. 87 /2560*, St. Joseph, MI.
94. Marchetti, R., Spallacci P., Ceotto E., & Papini R. (2015). Predicting yield variability for corn grown in a silty-clay soil in Northern Italy. In: *Proceedings Fourth International ASA-CSSA-SSSA Conference on Precision Agriculture*, St. Paul, MN, 19-22 July, pp. 467-478. doi: 10.2134/1999.precisionagproc4.c41
95. McKinion, J. M., Baker, D. N., Whisler, F. D., & Lambert, J. R. (1988). Application of the GOSSYM/COMAX system to cotton crop management. *ASAE Paper No. 88 7532*, St. Joseph, MI. doi: 10.1016/0308-521x(89)90012-7
96. Porter, J. R., Leigh, R. A., Semenov, M. A., & Miglietta, F. (1995). Modelling the effects of climatic change and genetic modification on nitrogen use by wheat. *Eur. J. Agron.*, 4, 419–429. doi: 10.1016/s1161-0301(14)80094-4
97. Richter, G. M., Agostini, F., Donatelli, M., Smith, P., & Smith, J. (1999). Modelling the N-dynamics of a wheat-sugar beet rotation at different complexity. *Proceedings First International Symposium Modelling Cropping Systems*, Lleida, Spain, 21–23 June, pp. 239–240.
98. Ritchie, J. T., Singh, U., Godwin, D. C., & Bowen, W. T. (1998). Cereal growth, development and yield. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 79–98. doi: 10.1007/978-94-017-3624-4_5
99. Scott, M., Vail L. W., Jaksch J. A., Anderson K. K., & Stockle, C. O. (2001). Early warning of ENSO events for regional agriculture. *Report for the Office of Global Programs, U.S. NOAA, Contract 28340A*. Battelle Pacific Northwest Division, Richland, Washington.

УДК 631.559.2:004.942

Мельник С. И.¹, Присяжнюк О. И.^{1,2*}, Стариченко Е. М.¹, Мажуга К. Н.¹, Бровкин В. В.¹, Мартынов О. М.¹, Маслечкин В. В.¹ Модель адаптивной информационной системы прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур // *Plant Varieties Studying and Protection*. 2020. Т. 16, № 1. С. 63–77. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.16.1.2020.201349>

¹Украинский институт экспертизы сортов растений, ул. Генерала Родимцева, 15, г. Киев, 03141, Украина

²Институт биоэкономических культур и сахарной свеклы НААН Украины, ул. Клиническая, 25, г. Киев, 03110, Украина, *e-mail: ollpris@gmail.com

Целью данного исследования была разработка основных компонентов модели адаптивной информационной системы прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур. **Методы.** Для проведения исследований по установлению основных структурных элементов адаптивной информационной модели прогнозирования продуктивности основных сельскохозяйственных культур использовали метод построения динамических моделей. **Результаты.** Проведен детальный анализ концептуальных подходов к построению математических сельскохозяйственных моделей и установлены основные преимущества и недостатки современных аналогов. Определено, что адаптивная информационная модель базируется исключительно на потребностях растения и собственно необходимость обеспечить эти потребности доступными ресурсами с целью получения стабильно высокой урожайности с хорошими показателями качества. Программно-аппаратный комплекс должен иметь обратную связь между его основными структурными элементами, ведь за счет этого значительно повышается точность прогнозирования продуктивности растений. Данные полученные на основе работы определенных механизмов или показатели погодных условий и их прогнозы используются для

принятия решений, однако, в случае их существенного изменения решение об отдельных элементах технологии пересматриваются. Программный продукт должен быть связан с экономической частью и при создании рекомендаций учитывать конъюнктуру рынка и прогнозные данные. В случае низкой закупочной цены на продукцию рекомендовать применять или не применять определенные агротехнические операции (скажем удобрение по вегетации), кроме того, корректировать их в случае существенного изменения условий выращивания – когда применение этих элементов технологии будет неэффективно за счет негативного воздействия других факторов. **Выводы.** Адаптивная информационная система прогнозирования продуктивности в технологическом процессе выращивания сельскохозяйственных культур формируется на базе модели состоящей из трех модулей признаков – результирующей и двух компонентных. На каждом следующем этапе реализации модели результирующий признак становится компонентным, причем с максимальным вкладом в результирующий признак следующего модуля.

Ключевые слова: математическое моделирование; динамические модели; рост и развитие растений; урожайность.

UDC 631.559.2:004.942

Melnyk, S. I.¹, Prysiazniuk, O. I.^{1,2*}, Starychenko, Ye. M.¹, Mazhuha, K. M.¹, Brovkin, V. V.¹, Martynov, O. M.¹, & Maslechkin, V. V.¹ (2020). Model of adaptive information system for forecasting crop productivity. *Plant Varieties Studying and Protection*, 16(1), 63–77. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.16.1.2020.201349>

¹Ukrainian Institute for Plant Variety Examination, General Rodymtseva St., 15, Kyiv, 03141, Ukraine

²Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, NAAS of Ukraine, Clinical St., 25, Kyiv, 03110, Ukraine, *e-mail: ollpris@gmail.com

Purpose of this study was to develop the main components of a model of an adaptive information system for predicting crop productivity. **Methods.** To conduct research on the establishment of the basic structural elements of an adaptive information model for predicting the productivity of basic crops used the method of constructing dynamic models. **Results.** A detailed analysis of conceptual approaches to the construction of mathematical agricultural models is carried out and the main advantages and disadvantages of modern analogues are established. It is determined that the adaptive information model is based solely on the needs of the plant and actually on the need to provide these needs with available resources in order to obtain consistently high yields with high quality indicators. The hardware and software complex must have a feedback relationship between its basic structural elements, because it significantly improves the accuracy of predicting plant productivity. Data based on the operation of certain mechanisms or indicators of weather conditions and their forecasts are used for decision making,

however, if they are substantially changed, decisions about individual technology elements are reviewed. The software should be related to the economic part and should take into account market conditions and forecast data when making recommendations. In the case of low purchase prices for products, we recommend that certain agrotechnical operations (say vegetation feeding) be applied or not, in the case of significant change in growing conditions - when the application of these agro-measures will be ineffective due to the negative effects of drought, etc. **Conclusions.** Adaptive information system for forecasting productivity in the technological process of growing crops is formed on the basis of a model consisting of three modules of characteristics – the resultant and two components. At each subsequent stage of implementation of the model, the resulting feature becomes component, with the maximum contribution to the resulting feature of the next module.

Keywords: *mathematical modelling; dynamic models; plant growth and development; crop capacity.*

Надійшла / Received 20.01.2020

Погоджено до друку / Accepted 19.03.2020