



Original researches

Simulation of Seed Productivity of the Rice Varieties in the Conditions of the South of Ukraine

Received: 31 January 2019
Revised: 12 February 2019
Accepted: 13 February 2019

S. G. Vozhegov, M. I. Tsilinko, G. G. Zorina

Institute of Rice of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Antonivka, Ukraine

Institute of Rice of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Students'ka Str., 1, village Antonivka, Skadovsk district, Kherson region, 75705, Ukraine

Tel.: +38-066-280-87-12
+38-050-937-80-13
+38-066-870-04-77

E-mail: anna_zorina_3001@ukr.net
instofrice@gmail.com

Cite this article: Vozhegov, S. G., Tsilinko, M. I., & Zorina, G. G. (2019). Simulation of seed productivity of the rice varieties in the conditions of the South of Ukraine. *Agrology*, 2(1), 51–58.
doi: 10.32819/2617-6106.2018.14018

Abstract. The processes of simulation yields and water consumption of the rice varieties of domestic selection Ukraine-96, Premium, Viscount with the help of the FAO AquaCrop model are described. As experimental data, we used the results of research on improvement of growing technologies of rice seeds, which were conducted during 2016–2018 years at the Institute of Rice of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. The research was carried out in accordance with the common requirements of the experiment work and the technique of state strain testing of agricultural crops. The data of the climatic conditions of the South of Ukraine, biometric and structural characteristics of the varieties of culture under investigation, agrotechnics, physical soil and water indicators were introduced into the information system regarding the proposed AquaCrop algorithm and its conceptual provisions. The most optimal for water saving and the amount of biomass received among other simulation scenarios was the option of formation of biologically optimal irrigation schedule with an irrigation interval of allowable depletion 78% of RAW (readily available groundwater in the root zone) and a depth of 20 mm. The summarized results of simulation show that the most effective on the amount of accumulated biomass and yield was the Viscount variety with the values, respectively, 21.11 t/ha, 9.50 t/ha – in 2016 year and 19.20 t/ha, 8.83 t/ha – in 2017 year. Calculated by the program rate of irrigation in 2016 year 860 mm (8,600 m³/ha) was lower than the rate in 2017 year (900 mm) with the same rate of irrigation 200 m³/ha. In 2018, the highest indicators of biomass (21.99 t/ha) and crop yield (10.12 t/ha) were obtained in the variety Ukraine-96 with the irrigation rate of 880 mm. The results of our research with using FAO AquaCrop agrotechnology demonstrate this system as a progressive tool with a future perspective for planning the rice production process in crop yield simulation with the aim of comparison of existing and future perspective varieties according to their properties, creating the most optimal irrigation strategies for water saving and less pressure on environment.

Keywords: rice; AquaCrop; irrigation schedule; crop yield; water productivity; crop coverage; biomass.

Моделювання насінневої продуктивності сортів рису в умовах Півдня України

С. Г. Вожегов, М. І. Цілінко, Г. Г. Зоріна

Інститут рису Національної академії аграрних наук України, с. Антонівка, Україна

Анотація. Описані процеси моделювання врожайності та водоспоживання сортів рису вітчизняної селекції Україна-96, Преміум, Віконт за допомогою моделі FAO AquaCrop. Як експериментальні дані використовували результати досліджень з удосконалення технологій вирощування насіння рису, проведених протягом 2016–2018 рр. в Інституті рису НААНУ. Дослідження проводили згідно з вимогами дослідної справи та державної методики сортовипробування сільськогосподарських культур. Дані щодо кліматичних умов Півдня України, біометричних та структурних характеристик досліджуваних сортів культури, агротехніки, фізичних ґрунтових та водних показників вводили до інформаційної системи стосовно запропонованого алгоритму AquaCrop та її концептуальних положень. Найбільш оптимальним за економією води та кількістю отриманої біомаси серед інших сценаріїв моделювання виявився варіант формування біологічно оптимального графіка зрошення з критерієм допустимого виснаження 78% від RAW (легко доступні ґрунтові води в кореневій зоні) і глибини 20 мм. Узагальнені підсумки моделювання показують, що найпродуктивнішим за кількістю накопиченої біомаси та врожайності виявився сорт Віконт з показниками, відповідно, 21,11 та 9,50 т/га – у 2016 р.; 19,20 та 8,83 т/га – у 2017 р. Розрахована програмою зрошувальна норма 2016 року 860 мм (8600 м³/га) була нижчою за норму 2017 року (900 мм) з однаковими нормами поливу 200 м³/га. У 2018 році найвищі показники біомаси (21,99 т/га) і врожайності (10,12 т/га) отримані по сорту Україна-96 за норми зрошення 880 мм. Результати нашого дослідження за допомогою агротехнології FAO AquaCrop демонструють дану систему як прогресивний засіб з перспективою на

майбутнє для планування процесу виробництва рису в моделюванні врожайності з метою порівняння існуючих та перспективних сортів за їх властивостями, створення найбільш оптимальних стратегій зрошення для економії водних ресурсів та меншого тиску на навколишнє середовище.

Ключові слова: рис; AquaCrop; графік зрошення; врожайність культури; водна продуктивність; покриття культурою; біомаса.

Вступ

Рис – один з найдавніших злаків планети. За десятки тисячоліть розвитку цієї культури виникло надзвичайне різноманіття форм та технологій його вирощування, які можуть істотно відрізнитися в несхожих ґрунтово-кліматичних зонах Землі (Lamo et al., 2017; Ginigaddara & Disanayake, 2018). Сьогодні рисова крупа належить до основних продуктів харчування понад три мільярди людей. Вирощування культури пов'язано з агроекологічними умовами, що найбільш піддаються регулюванню біологічними факторами. Тому рис серед усіх злаків має найбільші перспективи для підвищення своєї продуктивності, чим і пояснюється зростання інтересу до науки про рис та рисівництво.

Унаслідок постійних змін клімату виникає необхідність у пошуку методів адаптації до несприятливих абіотичних факторів середовища, у більш поглибленому аналізі селекційно-генетичних засад сортів рису, їх продуктивних якостей та водоспоживання (Sreenivasulu et al., 2015; Jiang et al., 2017; Lamo et al., 2017; Lapis et al., 2018), у тому числі в кліматичних умовах Півдня України (Vozhegova, 2010). Удосконалення якісних показників сортів рису є трудомістким процесом, оскільки на розвиток цієї сільськогосподарської культури негативно впливають високі й низькі температури, посухи та перезволоження, типи сортів, рівень агротехніки й інші чинники (Luman et al., 2013; Liu et al., 2015; Amanullah et al., 2017). У процесі вирощування рису обов'язково беруть до уваги фізіологічні, біометричні характеристики кожного з досліджуваних сортів, метеоумови місцевості, хімічний склад зрошувальної води, ґрунту, рівень його родючості, ступінь засміченості бур'янами. І звичайно, оптимальні терміни сівби, норми поливу культури та багато інших факторів. Тому для обробки та аналізу такого великого об'єму даних агрономи, гідротехники разом з ученими застосовують програмно-інформаційні системи, актуальність використання яких у сучасному агровиробництві є перспективним і безперечним фактом.

Протягом останнього часу для моделювання врожайності та планування зрошення зернових культур розроблено чимало інформаційних систем, які можуть бути використані для підвищення продуктивності та ефективності застосування води в агровиробництві. Наприклад, інформаційні технології DSSAT та CropWat, але жодна з них не розглядає фактор солоності води (Jones et al., 1998; Luo et al., 2015; Shakuntala et al., 2017; Amini et al., 2018).

Одним із стратегічних рішень для моделювання продуктивності води та врожайності сільськогосподарських культур стала розробка FAO AquaCrop (Vanuytrecht et al., 2014). Ця проста й надійна модель була успішно протестована для великої кількості культур у різних регіонах світу, зокрема й для рису (Abdul-Ganiyu et al., 2018; Muluneh et al., 2017; Mokh et al., 2017). У програмно-інформаційному комплексі AquaCrop досягнуто оптимального балансу між складністю, точністю і надійністю; розрахунки засновані на базових і біофізичних процесах, що допомагає в прийнятті управлінських рішень з планування врожайності, витрат на зрошення, економічної ефективності. Застосування такої системи привернуло увагу в напрямку проведення аналізу продуктивності та водоспоживання вітчизняних сортів рису ще не було висвітлено, тому вирішено провести дослідження і розглянути отримані результати.

Метою наших досліджень було за допомогою наданого інтерфейсу AquaCrop версії 6.0 змоделювати процес розвитку вегетаційного періоду кожного з досліджуваних сортів культури рису з урахуванням характеристик насіння сортів, кліматичних умов Півдня України та інших агрофізичних й агротехнічних параметрів, а також згенерувати оптимальні графіки зрошення і порівняти отримані результати моделювання за врожайністю, продуктивністю зрошувальної води для кожного сорту рису.

Матеріал і методи досліджень

Як експериментальні дані використовували результати досліджень з удосконалення технологічних процесів вирощування насіння сучасних сортів рису Україна-96, Преміум, Віконт з метою підвищення їх посівних і врожайних властивостей на полях Інституту рису НААН України (2016–2018 рр.).

Дослідження проводили згідно з вимогами дослідної справи (Ushkarenko et al., 2008), методики Державного сортопробування сільськогосподарських культур ДСТУ 4138. Облік щільності рослин рису здійснювали в період повних сходів та перед збиранням урожаю для визначення та проведення аналізу біометричних та структурних показників. Урожайність рису обліковували методом суцільного обмолоту ділянок малогабаритним комбайном типу “Yanmar”. Попередник – рис. Технологія вирощування – загальноприйнята для одержання насінневого матеріалу. Повторність в досліді чотирикратна, площа посівних ділянок 30, збиральних – 25 м².

Згідно зі запропонованим алгоритмом моделі AquaCrop та її концептуальними положеннями, результатами отриманих польових спостережень були введені до програми для здійснення адаптації (калібрування) по кожному зі сортів культури кожного з досліджуваних років і подальшого моделювання.

Оскільки алгоритм AquaCrop сконструйований на основі складних біофізичних процесів, потрібна була лише відносно невелика кількість параметрів для адаптації AquaCrop до різних кліматичних умов і культур. Основа концепції моделі AquaCrop становить лінійний зв'язок транспірації культури та її біомаси через параметр продуктивності води (WP). Протягом заданого інтервалу часу накопичена біомаса (B) є результатом водної продуктивності (Tr) і накопиченої транспірації листяного покриття (Foster et al., 2017):

$$B = WP \times \Sigma Tr. \quad (1)$$

Урожайність (Y) розподіляється з біомаси за допомогою параметра, відомого як індекс урожайності (Hi):

$$Y = Hi \times B. \quad (2)$$

AquaCrop представляє моделювання врожайності в чотири етапи: “Покриття культурою” – Canopy Cover (CC), “Транспірація” – Transpiration (Tr), “Біомаса” – Biomass (B), “Врожайність культури” – Crop Yield (Hi). Для встановлення показників розвитку культури як основи для розрахунку транспірації і моніторингу розвитку посівів модель використовує “покриття культурою” (CC), що являє собою частку поверхні ґрунту, покриту культурою (Vanuytrecht et al., 2014). Розвиток культури описується її характеристиками (дата сівби, фази розвитку і росту, норми висіву, густина стояння, маса 1000 зерен тощо). Ефект будь-якого екологічного стресу на виробництво рослин моделюється в AquaCrop коефіцієнтами стресу (K_s) як функціями показника водного, температурного або стресу засоленості.

Результати

Вхідні показники температурних даних, швидкості вітру, опадів до програми отримали з місцевої метеостанції за досліджуваній період у розрізі декад та дані тривалості сонячного дня, координат місцевості тощо брали з Інтернет-ресурсу. Еталонну евапотранспірацію розраховували за допомогою програмно-інформаційного комплексу ФАО CropWat та за-

вантажували до бази даних AquaCrop (Vozhegov et al., 2016). Середньорічну концентрацію CO₂ отримували з бази даних програми, що є історичним часовим діапазоном атмосферних концентрацій. У результаті завантаження вхідної інформації дістали графічні зображення даних опадів, еталонної евапотранспірації, температур та CO₂, що надало можливості наочно проаналізувати інформацію про кліматичні умови в роки дослідження на рисових чеках Скадовського району (рис. 1).

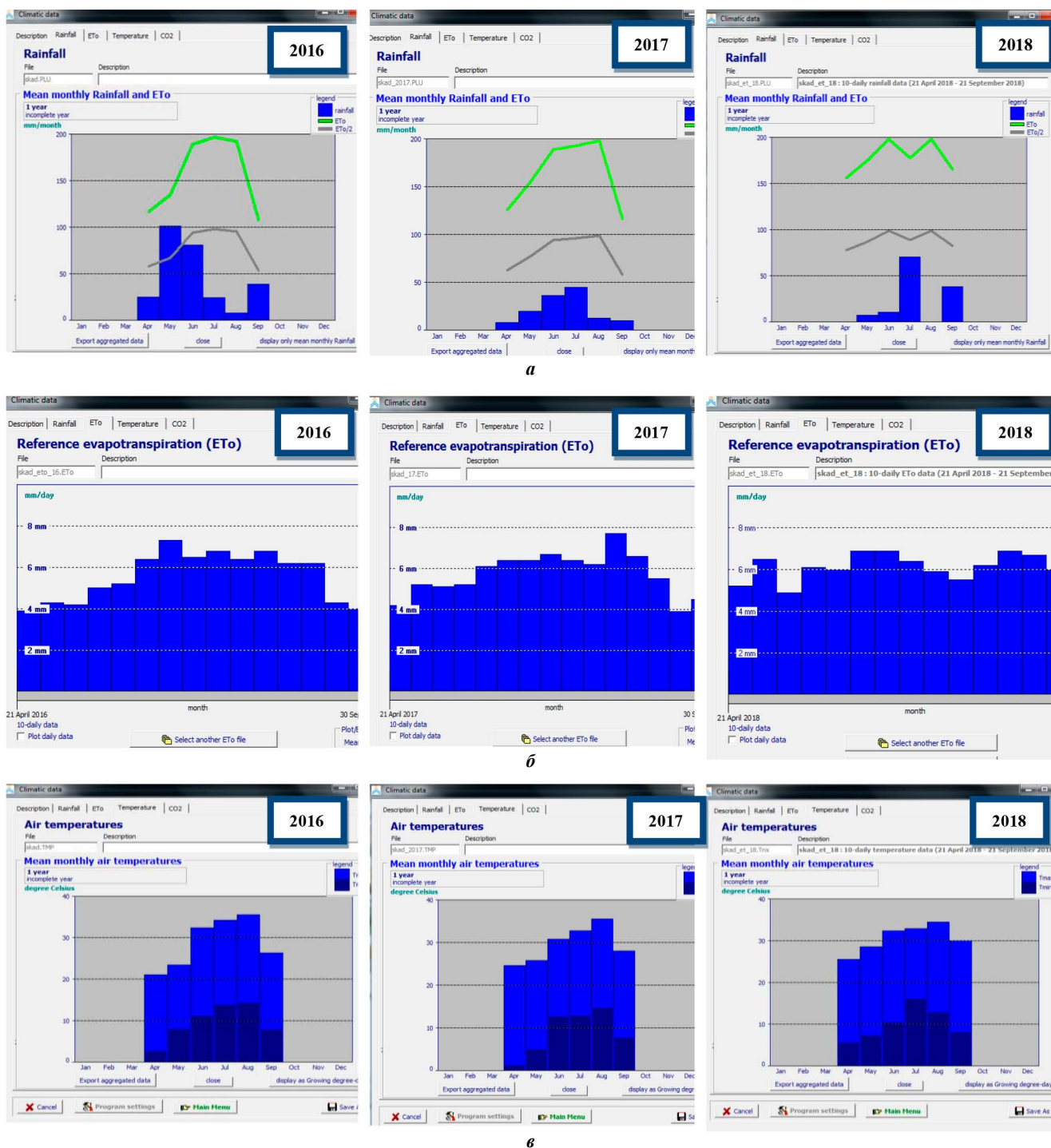


Рис. 1. Сформовані AquaCrop діаграми подекадно по роках:
а – опади; б – еталонна евапотранспірація; в – максимальна та мінімальна температури

Початок вегетаційного періоду 2016 року визначався достатньою кількістю опадів у квітні, а наступного місяця – близько 100 мм, що можна чітко простежити на діаграмі. Опади 2017 року, порівняно з 2016 роком, мали дуже незначну кількість, особливо на початку вегетаційного періоду, і, як наслідок, збільшення значення еталонної евапотранспірації в динаміці. Максимальне значення еталонної евапотранспірації (ЕТо) спостерігалось в серпні, коли опадів було надто мало, а денні та нічні температури досягали свого максимального річного значення. У 2018 році випало більше опадів, ніж 2017 року, але в серпні їх взагалі не було; початковий період вегетації відрізнявся найвищими температурами за досліджувані роки.

Наступним кроком технології було адаптування інформації щодо норм висіву (sowing rate), маси 1000 зерен (1000 seed mass), рівня проростання (germination rate), відстаней між рядами (row spacing) та між рослинами (plant spacing), кількості днів вегетаційного періоду по фазах для кожного зі сортів рису за досліджувані роки (рис. 2a). Після введення зазначеної вище інформації програма автоматично розрахувала густоту стояння рослин і початковий розмір “покриву культурою” (рис. 2б) по кожному сорту рису. Після формування декількох сценаріїв моделювання по кожному з досліджуван-

них років кращі показники врожайності виявилися з наступними датами сівби сортів рису (співпадали з датами початку моделювання): 30.04 для 2016 року; 23.04 для 2017 року; 25.04 – для 2018 року.

Територія дослідних ділянок розташована в підзоні Південного Сухого Степу в межах Скадовського агрогрунтового підрайону. Грунтовий покрив представлений в основному темно-каштановими, залишково-солончоватими, середньосуглинковими ґрунтами в комплексі зі солонцями, глибокими та середніми солончакуватими (до 10%).

Необхідні гідравлічні характеристики ґрунтів за кожний з досліджуваних років були взяті з польових спостережень (дані найменшої польової вологості – FC; точки в’янення – WP) та зіставлені з показниками текстури ґрунтових ресурсів бази даних AquaCrop відповідно до властивостей місцевих середньосуглинкових ґрунтів на двох ґрунтових рівнях: 30 та 90 см (рис. 3). Після введення вищезазначених показників система розрахувала необхідні для визначення водного балансу об’ємний вміст води при насиченні (SAT), загальну доступну ґрунтову вологу (TAW) та гідравлічну провідність (Ksat). Показник ґрунтових вод у нашому дослідженні становив 1,7–1,8 м від поверхні землі, електропровідність брали на рівні рекомендо-

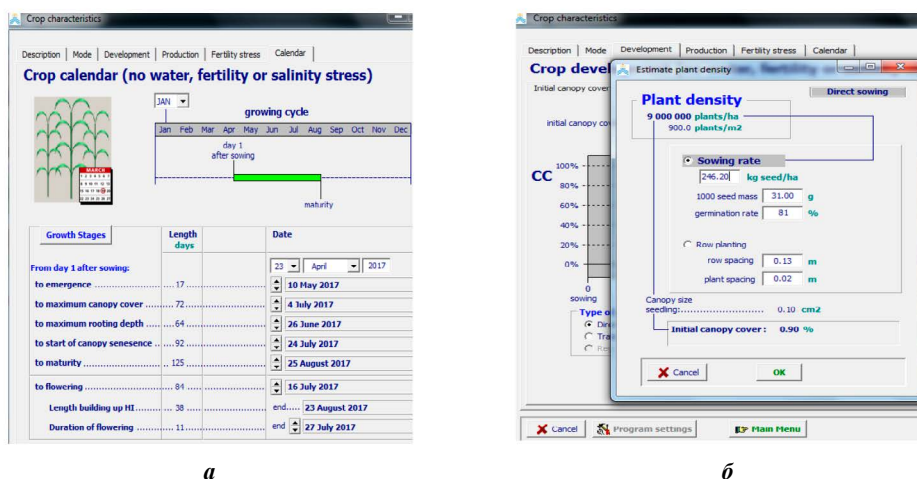


Рис. 2. Калібрування інформації сорту рису Україна-96 за 2017 рік: а – тривалість фаз розвитку; б – густота стояння рослин і початковий розмір “покриву культурою”

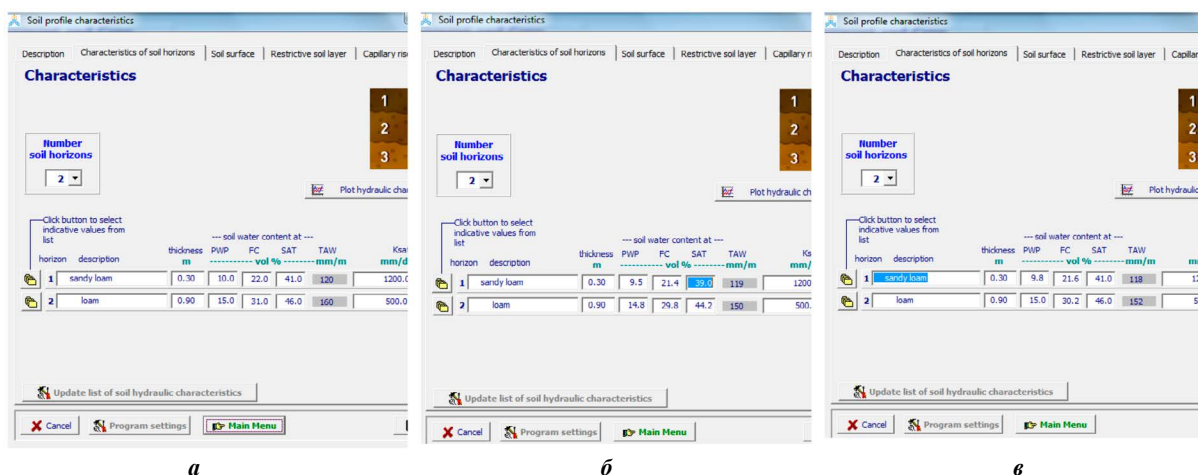


Рис. 3. Характеристики профілів ґрунтів: а – 2016 р.; б – 2017 р.; в – 2018 р.

ваних статистичних величин FAO для середньосуглинкового типу ґрунту 1,5–1,6 dS/m.

Відомо, що на сучасному рівні розвитку зрошувального землеробства використовуються три основних типи режимів зрошення: біологічно оптимальний, водозберігаючий, ґрунтозахисний (Bodner et al., 2015). AquaCrop надає можливість формувати графіки зрошення з урахуванням конкретних ґрунтово-кліматичних та господарсько-економічних чинників залежно від обраної у господарстві стратегії ведення зрошення. У нашому дослідженні найбільш оптимальним за економією води та кількістю отриманої біомаси серед інших сценаріїв моделювання виявився варіант формування біологічно оптимального графіка зрошення з критерієм допустимого виснаження 78% від RAW (легко доступні ґрунтові води в кореневій зоні) і критерієм глибини 20 мм, спосіб поливу – крапельне зрошення (рис. 4).

Перевага викладеного режиму формування графіка зрошення полягає в тому, що втрати води через глибоке промочування обмежені, а стрес води і втрати врожаю виключаються, оскільки зберігається вміст води в ґрунті між FC(НПВ) і порогом RAW. Така ситуація надзвичайно важлива для вирощування культури рису.

Після введення інформації щодо кліматичних умов, характеристик кожного з досліджуваних сортів рису, ґрунтових характеристик, вибраного графіка зрошення та інших показників,

що вимагає програма згідно зі своїм алгоритмом функціонування, коригування водних стресів, були отримані діаграми моделювання врожайності біомаси та зерна. На рис. 5 спостерігаємо динаміку транспірації культури (*Tr*) протягом вегетаційного періоду 2016 року, покритв культурою та вміст води в кореневій зоні (*Dr*) по кожній фазі розвитку рису, зокрема цвітіння, сорту Віконт. У нижній частині демонструється глибина, на якій корені сягають рівнів *FC*, *PWP*.

За отриманими даними зведена форма водного балансу всіх вхідних та вихідних потоків, сформований графік іригації біологічно оптимального режиму зрошення в умовах 78% виснаження від RAW з датами поливів і фіксованою поливною нормою 20 мм (еквівалентно 200 м³/га) та виведена загальна зрошувальна норма даного сорту рису з глибиною зрошення 860 мм (8600 м³/га) – рис. 5. Загальна сума евапотранспірації за вегетаційний період (30.04 – 31.08.2016 р.) становила 734,7 мм при опадах 218,5 мм та концентрації CO₂ 402,55 частини на мільйон. Урожайність насіння дорівнювала 9,50 т/га (біомаса 21,11 т/га), співвідношення між реально отриманою та потенційною біомасою сорту Віконт з обліком відсутності стресів за період розвитку культури – 100%, водна продуктивність – 1,32 кг (врожаю)/м³ води. Еталонний індекс урожайності Ні 45% не був скоригований по факту відсутності стресів, що сприяло отриманню максимальної врожайності. У такий самий спосіб сформовано й низку діаграм для кожного зі сортів по досліджуваних роках. Результати моделювання вегетаційних періодів (таблиця) демонструють найвищі показники врожайності: у 2016 р. по сорту Віконт – 9,50 т/га; для Преміуму найбільш урожайним був 2018 рік – 9,59 т/га. Цього ж року сорт Україна-96 досяг найвищого значення врожайності серед інших сортів (10,12 т/га). Унаслідок більш рясних опадів 2016 року, особливо в початковій стадії вегетації, показники накопиченої біомаси та врожайності по всіх сортах рису були значно вищими за показники 2017 року, хоча рівень іригації у 2016 році (860 мм = 8600 м³/га) був нижчим за зрошувальну норму 2017 року (900=9000 м³/га) при однакових нормах поливу 200 м³/га. Це ще раз підтверджує велике значення впливу абіотичних факторів середовища на розвиток рослин.

Обговорюючи результати моделювання (таблиця), бачимо, що найбільш урожайним у нашому дослідженні виявився середньостиглий сорт Віконт. У 2018 році найвища врожайність (10,12 т/га) була накопичена по ранньостиглому сорту Україна-96. Насіння цих сортів має високі технологічні якості, масу 1000 зерен, стійкість до вилягання, що дуже ефективно сприяє підвищенню врожайності рослин.

Після моделювання в AquaCrop здійснено порівняння результатів моделювання з даними польових спостережень за

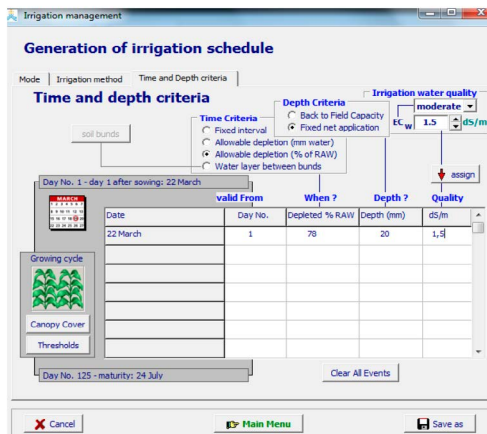


Рис. 4. Біологічно оптимальний графік зрошення для культури рису

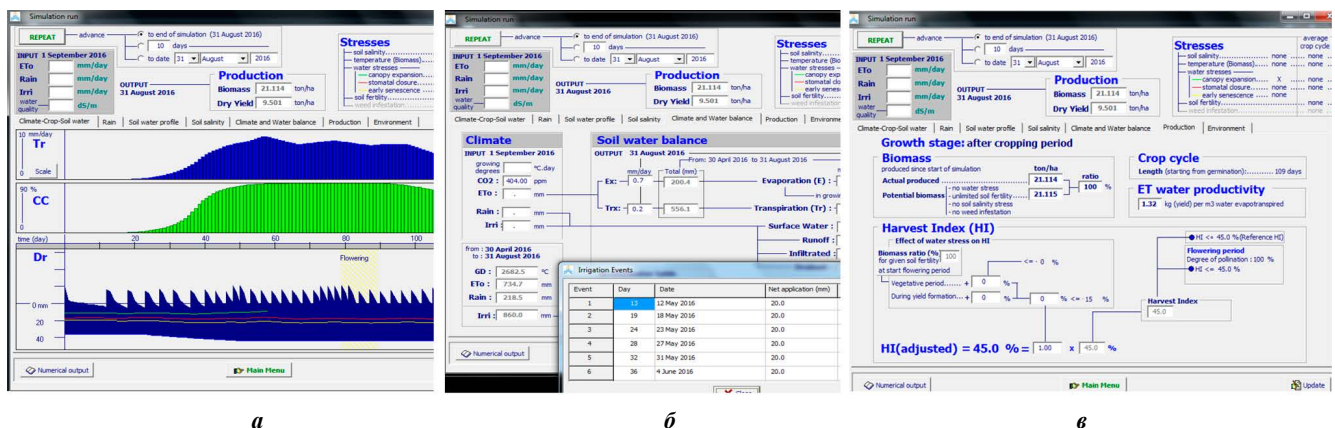


Рис. 5. Змодельовані AquaCrop діаграми, 2016 р.:

а – “Клімат–Культура–Ґрунтова волога”; б – “Кліматичний і водний баланс”; в – продуктивність системи сорту Віконт

Таблиця. Основні показники моделювання досліджуваних сортів рису по роках

Показник	Віконт			Преміум			Україна-96		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Період вегетації, дні	124	125	125	120	118	118	126	123	125
Маса 1000 зерен, шт./га	31	31	30,60	30	29,81	30,40	31,68	31,00	31,80
Густота стояння, млн рослин/га	9,00	8,99	9,78	8,87	8,20	8,35	8,49	8,55	8,42
Початковий СС, %	0,90	0,90	0,98	0,89	0,82	0,84	0,85	0,86	0,84
Накопичена біомаса, т/га	21,11	19,20	19,38	20,01	18,64	19,53	20,35	19,44	21,99
Урожайність, т/га	9,50	8,83	9,12	9,20	8,39	9,59	9,36	8,75	10,12
Кількість зрошення, мм	860	900	880	860	900	880	860	900	880

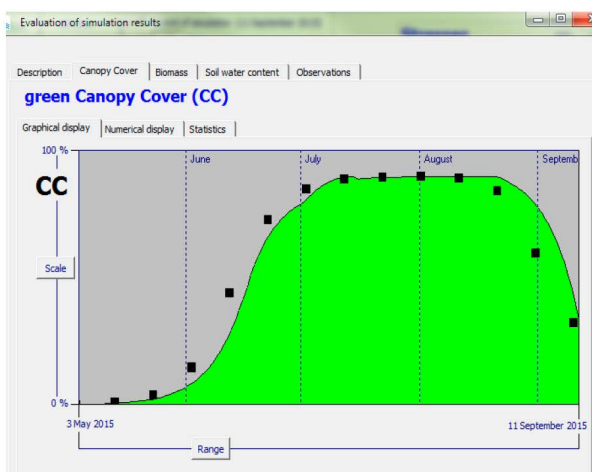
показниками “покриву культурою” для кожного з досліджуваних сортів культури. Підсумки оцінювання показують, що моделювання виконано на високому рівні, кожний сценарій по всіх сортах рису в нашому дослідженні надав добрий результат – показник RMSE (середньоквадратична помилка) становив менше 8% згідно з критеріями оцінювання статистичного аналізу (рис. 6).

Обговорення

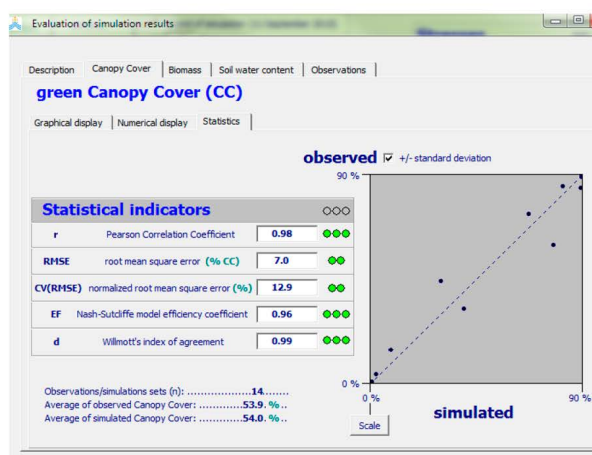
Агротехнологія FAO AquaCrop виявилася надійним інструментом для моделювання, прогнозування врожайності та водопотреби польових культур у процесі агровиробництва (Abrha et al., 2012; Abedinpour et al., 2014; Lalic et al., 2018). Великий досвід застосування стратегій зрошення багатьох країн для різних культур та результати нашого власного дослідження демонструють прогресивність цієї технології FAO і доцільність застосування її для потреб планування врожайності, в рисівництві Півдня України в тому числі. Моделювання – складна і трудомістка наукова задача, але AquaCrop надає доступний, зручний в роботі алгоритм, що дозволяє відтворити весь вегетаційний процес вирощування культури, спланувати витрати на зрошення, виявити найбільш продуктивні сорти рису. Після завантаження даних про погодні умови за досліджувані роки програмою були згенеровані діаграми опадів, еталонної евапотранспірації, максимальної та мінімальної температур, що створило можливість проаналізувати динаміку кліматичних показників і вплив їх на розвиток рослин по фазах. За порівняно невеликий проміжок часу ми здійснили калібрування інформації щодо характеристик усіх впливаючих на виробничий процес вирощування рису факторів та отримали багато сценаріїв моделювання. Аналізуючи змодельовані діаграми, виявили найбільш економічно вигідні та біологічно оптимальні стратегії зрошення, найбільш урожайні сорти рису. Використовуючи режими балансування водних, температурних стресів, відкоригували графіки іригації для отримання максимальної урожайності. У більшості випадків зміна термінів сівби культури призводила до зниження показників урожайності та біомаси, регулювання норми поливу з використанням водного балансу вологи в ґрунті та зрошувальної норми дозволило зекономити до 16% витрат на зрошення. Моделювання за допомогою інформаційної системи AquaCrop дозволило наочно проаналізувати на агрономічному, гідротехнічному, економічному рівнях весь процес виробництва рису та надати необхідні рекомендації для практичного застосування.

Останніми роками проведено чимало досліджень за допомогою систем AquaCrop, результати яких свідчать про ефективність та корисність моделі в плануванні виробництва сільськогосподарських культур, хоча є і свої недоліки.

У більшості випадків завдяки змодельованим стратегіям зрошення в Бельгії, Тунісі, Мозамбіку економія води в середньому становила 18–23% (Wellens et al., 2017). Результати моделювання з різними кліматичними умовами показують, з одного боку, здатність моделі прогнозувати потенційну евапотранспірацію, а з іншого боку, планувати зрошення порівняно з непрогнозованим підходом і можливим запобіганням водного та інших стресів врожаю (Tawegoum et al., 2017). Дослідження в Північній Греції довели, що вплив зрошу-



а



б

Рис. 6. Результати оцінювання моделювання “покриву культурою” рису сорту Преміум, 2017 рік

вальної технології краще оцінювати за допомогою моделі AquaCrop, а модель CROPWAT здатна характеризувати тільки зміни в стратегії зрошення (Tsakmakis et al., 2018). У Мексиці при застосуванні даної технології зміна термінів сівби була настільки ж ефективною, як і збільшення кількості мульчів в обох випадках. Кукурудза могла б отримати 1 тону/га за цю дію, тоді як ячмінь – 250 кг/га в досліджуваному місці (Arce-Romero et al., 2018). Результати досліджень в Бангладеші показали, що модель AquaCrop з більшістю параметрів по замовчуванню досить добре моделює врожайність рису за різних режимів солоності. Середньоквадратична та середня абсолютна похибка при моделюванні становили лише 0,12 т/га і 0,03 т/га, відповідно, що дозволяє вважати цю технологію корисним інструментом для оцінки потенційного впливу майбутніх змін води і солоності ґрунтів (Mondal et al., 2015). Простий польовий баланс води AquaCrop був використаний аграріями для розробки оптимальних схем зрошення в Західній Африці. Кожен інструмент застосовувався незалежно, вимагаючи лише обмежених даних; але їх спільні результати сприяли поліпшенню комплексного управління водними ресурсами (Wellens et al., 2013). У Кунанг Нам у В'єтнамі система AquaCrop була використана для моделювання впливу майбутнього клімату на вихід рису. Базуючись на отриманих даних, змінюючи терміни сівби, додаткове зрошення, правильне застосування поживних речовин та прийняття нових сортів рису може бути корисним для адаптації вирощування рису за різних сценаріїв зміни клімату (Shrestha et al., 2014). Калібровану та затверджену модель AquaCrop v4.0 використовували для прогнозування опадів клімату в М'янмі за трьома сценаріями. Виявилось, що під впливом зміни клімату спостерігається тенденція до зменшення потреби в зрошувальній воді для рису в досліджуваному районі, а малі схеми зрошення відповідають вимогам (Shrestha, 2014). Дослідження з тфом в Ефіопії, з кукурудзою, пшеницею в Непалі і з квіноа в Болівії показують, що напівкількісна модель родючості ґрунтів AquaCrop може бути застосована за різних рівнів стресу родючості ґрунту для різних умов навколишнього середовища без необхідності проведення детальних польових спостережень за вмістом поживних речовин у ґрунті (Gaalen et al., 2015). У Боснії та Герцеговині програма була застосована в моделюванні майбутніх сценаріїв вирощування з урахуванням різних режимів зрошення та коливань опадів, температури, концентрації CO₂ та термінів сівби. Результати моделювання показують, що в 2020-х роках не відбудеться значних змін у потребах зрошення й врожайності внаслідок більш ранніх термінів сівби та загального зсуву вегетаційного періоду (Stricevic et al., 2018).

Висновки

Програмне забезпечення AquaCrop використано вперше для моделювання врожайності та водоспоживання вітчизняних сортів рису Віконт, Преміум та Україна-96 в кліматичних умовах Півдня України. Генерація багатьох сценаріїв моделювання надала нам можливість розробити стратегію зрошення з мінімальними витратами води і максимальною врожайністю культури. Найбільш економічно вигідним варіантом графіка зрошення виявився біологічно оптимальний за умов допустимого виснаження 78% від RAW з фіксованою поливною нормою 20 мм. Серед багатьох сформованих сценаріїв моделювання з датами висіву 30.04.2016 р., 23.04.2017 р., 25.04.2018 р. отримали найбільш високі показники врожайності. Таким чином, була практично застосована модель AquaCrop як інструмент планування та прийняття управлінських рішень. За допомогою цієї агротехнології порівняно потенційні та фактичні врожаї на полі, вивчено вплив зміни клімату на виробництво сортів рису.

References

- Abdul-Ganiyu, S., Kyei-Baffour, N., Agyare, W. A., & Dogbe, W. (2018). Evaluating the Effect of Irrigation on Paddy Rice Yield by Applying the AquaCrop Model in Northern Ghana. In O. Saito, G. Kranjac-Berisavljevic, K. Takeuchi, & E. A. Gyasi (Eds.), *Strategies for Building Resilience against Climate and Ecosystem Changes in Sub-Saharan Africa* (pp. 93–116). Springer, Singapore. doi: [10.1007/978-981-10-4796-1_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4796-1_6)
- Abedinpour, A., Sarangi, A., Rajput, S., & Singh, M. (2014). Prediction of maize yield under future water availability scenario using the AquaCrop model. *The Journal of Agricultural Science*, 152(4), 558–574. doi: [10.1017/S0021859614000094](https://doi.org/10.1017/S0021859614000094)
- Amanullah, Fahad, S., Anwar, S., Baloch, S. K., Saud, S., Alharby, H., Alghabari, F., & Ihsan, M. Z. (2017). Rice crop responses to global warming: an overview. In Amanullah & S. Fahad (Eds.), *Rice: Technology and Production*. Intechopen. doi: [10.5772/68035](https://doi.org/10.5772/68035)
- Amini, A., Gharibreza, M., Shahmoradi, B., & Zareic, S. (2018). Land aptitude for horticultural crops and water requirement determination under unsustainable water resources condition. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(1), 11. doi: [10.1007/s10661-018-7125-1](https://doi.org/10.1007/s10661-018-7125-1)
- Arce-Romero, A. R., Monterroso-Rivas, A. I., Gomez-Diaz, J. D., & Palacios-Mendoza, M. A. (2018). Potential Yields of Maize and Barley with Climate Change Scenarios and Adaptive Actions in Two Sites in Mexico. In P. Angelov, J. Iglesias, & J. Corrales (Eds.), *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change. AACC'17 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing* (pp. 197–208). Springer, Cham. doi: [10.1007/978-3-319-70187-5_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70187-5_15)
- Abraha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., Vanuytrecht, E., Geerts, S., Garcia-Vila, M., & Deckers, S. (2012). Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) based on modelled yield response to water with Aquacrop. *Experimental agriculture*, 48(2), 252–271. doi: [10.1017/s0014479711001190](https://doi.org/10.1017/s0014479711001190)
- Bodner, G., Nakhforoosh, A., & Kaul, H.-P. (2015). Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 401–442. doi: [10.1007/s13593-015-0283-4](https://doi.org/10.1007/s13593-015-0283-4)
- Foster, T., Brozovic, N., Butler, A. P., Neale, M. C., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., & Hsiao, T. C. (2017). AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18–22. doi: [10.1016/j.agwat.2016.11.015](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015)
- Gaalen, H. V., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abraha, B., Diels, J., & Raes, D. (2015). A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the AquaCrop procedure. *The Journal of Agricultural Science*, 153(7), 1218–1233. doi: [10.1017/S0021859614000872](https://doi.org/10.1017/S0021859614000872)
- Ginigaddara, G. A. S., & Disanayake, S. P. (2018). Farmers' willingness to cultivate traditional rice in Sri Lanka: A case study in Anuradhapura district. In S. Farooq (Ed.), *Rice Crop*. Intechopen. doi: [10.5772/intechopen.73082](https://doi.org/10.5772/intechopen.73082)
- Jiang, M., Shi, C. L., Liu, Y., & Jin, Z. Q. (2017). Response of rice production to climate change based on self-adaptation in Fujian Province. *The Journal of Agricultural Science*, 155(5), 751–765. doi: [10.1017/S0021859617000016](https://doi.org/10.1017/S0021859617000016)
- 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 Y. Gordon, G. Hoogenboom, & P. K. Thornton (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development book series* (pp. 157–177). Springer, Dordrecht. doi: [10.1007/978-94-017-3624-4_8](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_8)

- Lalic, B., Sremac, A. F., Eitzinger, J., Stricevich, R., Thaler, S., Maksimovich, I., Danicic, M., Perisic, D., & Dekic, L. (2018). Seasonal forecasting of green water components and crop yield of summer crops in Serbia and Austria. *The Journal of Agricultural Science*, 156(5), 658–672. doi: [10.1017/S0021859618000047](https://doi.org/10.1017/S0021859618000047)
- Lamo, J., Tongoona, P., Sie, M., Mande, S., Onaga, G., & Okori, P. (2017). Upland Rice Breeding in Uganda: Initiatives and Progress. In J. Q. Li (Ed.), *Advances in International Rice Research*. IntechOpen. doi: [10.5772/66826](https://doi.org/10.5772/66826)
- Lapis, J. R., Cuevas, R. P. O., Sreenivasulu, N., & Molina, L. (2018). Measuring Head Rice Recovery in Rice. In N. Sreenivasulu (Ed.), *Rice Grain Quality. Methods in Molecular Biology* (pp. 89–98). Humana Press, New York. doi: [10.1007/978-1-4939-8914-0_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8914-0_5)
- Liu, Q., Wu, X., Ma, J., & Xin, C. (2015). Effects of Cultivars, Transplanting Patterns, Environment and Their Interactions on Grain Quality of Japonica Rice. *Cereal Chemistry*, 92(3), 284–292. doi: [10.1094/cchem-09-14-0194-r](https://doi.org/10.1094/cchem-09-14-0194-r)
- Luo, X., Xia, J., & Yang, H. (2015). Modeling water requirements of major crops and their responses to climate change in the North China Plain. *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3531–3541. doi: [10.1007/s12665-015-4400-0](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4400-0)
- Lyman, N. B., Jagadish, K. S. V., Nalley, L. L., Dixon, B. L., & Siebenmorgen, T. (2013). Neglecting Rice Milling Yield and Quality Underestimates Economic Losses from High-Temperature Stress. *Plos One*, 8(8), e72157. doi: [10.1371/journal.pone.0072157](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072157)
- Mokh, F. E., Vila-Garcia, Nagaz, K., Masmoudi, M. M., Mechlia N. B., & Fereres, E. (2017). Calibration of AquaCrop Salinity Stress Parameters for Barley Under Different Irrigation Regimes in a Dry Environment. In M. Ouassar, D. Gabriels, A. Tsunekawa, & S. Evett (Eds.), *Water and Land Security in Drylands: Response to Climate Change* (pp. 43–55). Springer, Cham. doi: [10.1007/978-3-319-54021-4_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54021-4_5)
- Mondal, M. S., Saleh, M., Akanda, M. A. R., Zofar, A., Biswas, S. K., Moslehuddin, A. Z., Zaman, S., Lazar, A. N., Clarke D., & Fazal, A. (2015). Simulating yield response of rice to salinity stress with the AquaCrop model. *Environment Science Process Impacts*, 17(6), 1118–1126. doi: [10.1039/c5em00095e](https://doi.org/10.1039/c5em00095e)
- Muluneh, A., Stroosnijder, L., Keesstra, S., & Biazin, B. (2017). Adapting to climate change for food security in the Rift Valley dry lands of Ethiopia: supplemental irrigation, plant density and sowing date. *The Journal of Agricultural Science*, 155(5), 703–724. doi: [10.1017/S0021859616000897](https://doi.org/10.1017/S0021859616000897)
- Shrestha, S., Deb, P., & Bui, T. T. T. (2014). Adaptation Strategies for Rice Cultivation Under Climate Change in Central Vietnam. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(1), 15–37. doi: [10.1007/s11027-014-9567-2](https://doi.org/10.1007/s11027-014-9567-2)
- Shrestha, S. (2014). Assessment of Climate Change Impacts on Irrigation Water Requirement and Rice Yield for Ngamoyeik Irrigation Project in Myanmar. In S. Shrestha (Ed.), *Climate Change Impacts and Adaptation in Water Resources and Water Use Sectors* (pp. 67–91). Springer, Cham. doi: [10.1007/978-3-319-09746-6_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09746-6_5)
- Shakuntala, G. V., Vadde, G. S., Chandrashekarayya, G., Shreedhar, R., & Hiremath, G. C. (2017). Cropwater requirement for different hydrological scenarios using Cropwat. *I-manager's Journal on Civil Engineering*, 7(4), 27–34. doi: [10.26634/jce.7.4.13800](https://doi.org/10.26634/jce.7.4.13800)
- Sreenivasulu, N., Butardo, V. M., Misra, G., Cuevas, R. P., Anacleto, R., & Kishor, P. B. K. (2015). Designing climate-resilient rice with ideal grain quality suited for high-temperature stress. *Journal of Experimental Botany*, 66(7), 1737–1748. doi: [10.1093/jxb/eru544](https://doi.org/10.1093/jxb/eru544)
- Stricevic, R. J., Stojakovic, N., Vujadinovic-Mandic, M., & Todrovic, M. (2018). Impact of climate change on yield, irrigation requirements and water productivity of maize cultivated under the moderate continental climate of Bosnia and Herzegovina. *The Journal of Agricultural Science*, 156(5), 618–627. doi: [10.1017/S0021859617000557](https://doi.org/10.1017/S0021859617000557)
- Tawegoum, R., Leroy, F., Sintes, G., & Chasseriaux, G. (2017). Predictive Irrigation Scheduling Modeling in Nurseries. In S. Kulshreshtha, & A. Elshorbagy (Eds.), *Current Perspective on Irrigation and Drainage*. IntechOpen. doi: [10.5772/67341](https://doi.org/10.5772/67341)
- Tsakmakis, I. D., Zoidou, M., Gikas, D. G., & Sylaios, G. K. (2018). Impact of Irrigation Technologies and Strategies on Cotton Water Footprint Using AquaCrop and CROPWAT Models. *Environmental Processes*, 5(S1), 181–199. doi: [10.1007/s40710-018-0289-4](https://doi.org/10.1007/s40710-018-0289-4)
- Ushkarenko, V. O., Nikishenko, V. L., Goloborodko, S. P., & Kokovikhin, S. V. (2008). Dispersiyniy i korelyatsiyniy analiz v zemlerobstvi ta roslinnitstvi [Dispersion and correlation analysis in agriculture and crop production]. Aylant, Kherson (in Ukrainian).
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., Heng, L. K., Vila Garcia, M., & Moreno, M. (2014). Aquacrop: FAO'S crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62, 351–360. doi: [10.1016/j.envsoft.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005)
- Vozhegov, S. G., Kokovikhin, S. V., & Zorina, G. G. (2016). Naukovo-praktichni aspekti modeljuvannya rezhimiv zroshennja kul'tur risovoї sivozmini za dopomogoju programno-go kompleksu CROPWAT. *Irrigated farming*, 120(65), 54–58 (in Ukrainian).
- Vozhegova, R. A. (2010). Teoretychni osnovy i rezul'taty selekcii' rysu v Ukrai'ni: monografiya. [Theoretical bases and results of rice selection in Ukraine: monograph]. Herson (in Ukrainian).
- Wellens, J., Traore, F., Diallo, M., & Tychon, B. (2013). A framework for the use of decision-support tools at various spatial scales for the management of irrigated agriculture in West-Africa. *Agricultural Sciences*, 4(8), 9–15. doi: [10.4236/as.2013.48A002](https://doi.org/10.4236/as.2013.48A002)
- Wellens, J., Raes, D., & Tychon, B. (2017). On the Use of Decision-Support Tools for Improved Irrigation Management: AquaCrop-Based Applications. In S. Kulshreshtha, & A. Elshorbagy (Eds.), *Current Perspective on Irrigation and Drainage*. IntechOpen. doi: [10.5772/67009](https://doi.org/10.5772/67009)