

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-185>

Available at (PDF): <http://mivg.iwvim.com.ua/index.php/mivg/article/view/185>

УДК 631.67:63.001.05;63.001.57

ОПЕРАТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ ЗРОШЕННЯ: СУЧАСНІ ВИКЛИКИ, РЕАЛІЇ ТА БАЧЕННЯ

О.І. Жовтоног¹, докт. с.-г. наук, В.В. Поліщук², канд. с.-г. наук, Л.А. Філіпенко³, канд. географ. наук, А.Ф. Салюк⁴, Я.О. Бутенко⁵, М.В. Гофман⁶

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-5966-9081>; e-mail: olgazhovtonog10@gmail.com

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-0429-7406>; e-mail: vitaliyopolishchuk@ukr.net

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-6558-0462>; e-mail: filipenkolaris@gmail.com

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-3968-1125>; e-mail: allasaluk@ukr.net

⁵ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-1743-7175>; e-mail: iarynabulba@gmail.com

⁶ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-9212-9722>; e-mail: mi-hoffmamm@gmx.net

Анотація. Наведено аналіз сучасних політичних та кліматичних викликів, а також практики використання зрошення у великих господарствах Півдня України, що формують вимоги до методів управління зрошенням. Представлено результати експериментальних досліджень з удосконалення методів оперативного управління зрошенням та підтримки прийняття відповідних стратегічних рішень для досягнення ресурсоефективності у зрошуваному землеробстві в умовах реального виробництва. Обґрунтовано та продемонстровано роль наземного та космічного агромоніторингу для коригування біокліматичних коефіцієнтів водоспоживання сільськогосподарських культур із врахуванням просторово-часової мінливості фактичного стану їх біомаси. Для адаптації управління зрошенням до умов повітряної посухи запропоновано використання додаткового критерію при прийнятті рішень щодо проведення освіжаючих поливів, що визначається за максимально допустимію тривалістю перебування вегетаційної поверхні рослин при температурі вище фізіологічно допустимого рівня. Встановлено, що за умов повітряної посухи, крім уповільнення приросту біомаси відбуваються фізіологічні процеси у листках та репродуктивних органах рослин, внаслідок збільшення температури вегетаційної поверхні. За даними досліджень процесів енергопереносу у посівах у періоди атмосферної посухи встановлено зростання використання частки теплової енергії на турбулентний обмін порівняно з обсягами енергії, що йдуть на випаровування. Означено бачення майбутнього розвитку методів оперативного планування зрошення на базі створення сучасних інформаційних платформ, що дозволяють обирати той чи інший метод оперативного управління зрошенням, виходячи з можливостей кожного конкретного господарства, а також забезпечувати «on-line» консультування організацій водокористувачів та фахівців господарств.

Ключові слова: зрошувальна система, інформаційна система, ДЗЗ, агромоніторинг, база даних, оперативне планування зрошення, геоінформаційні технології, алгоритми, модельний комплекс.

Постановка проблеми. Оперативне планування зрошення сільськогосподарських культур при поливі дощуванням на великих зрошувальних системах в Україні завжди розглядалось як засіб забезпечення ефективного використання водних та енергетичних ресурсів, підвищення врожаю сільськогосподарських культур та відповідно збільшення прибутковості господарств. Сучасні методи планування поливів також враховують екологічні вимоги щодо збереження родючості ґрунтів, запобігання погіршенню еколого-меліоративного стану земель. Лідером даного наукового напрямку планування зрошення в Україні є Інститут водних проблем і мелі-

орації НААН. Тут уперше в Україні та колишньому СРСР за керівництвом проф. Остапчика В.П. було розроблено та впроваджено на площі понад 1 млн. га інформаційно-дорадчу систему оперативного планування зрошення ІДС ОПЗ «Полив», що базувалась на удосконаленому біокліматичному методі визначення сумарного випаровування. Поступово розвивалась нормативна база планування режимів зрошення для різних типів ґрунтів та сільськогосподарських культур, розроблено та постійно поновлюються районовані норми водопотреби у зрошенні, розроблено та масово впроваджувались на великих площах декілька поколінь інформаційно-

дорадчих та інформаційно-обчислювальних систем оперативного планування зрошення. Над розвитком цього наукового напрямку працювала та працює ціла плеяда відомих в Україні вчених: А.М. та С.М. Алпатєєви, В.П. Остапчик, Л.А. Філіпенко, О.І. Жовтоног, М.І. Ромащенко, П.І. Ковальчук [1–5]. Автори цієї статті, спираючись на попередні надбання, результати власних досліджень та досвід розробки та впровадження у виробництві інформаційних систем оперативного планування зрошення, пропонують основні пріоритети подальшого розвитку цього наукового напрямку, виходячи з сучасних викликів та практики ведення зрошувального землеробства.

Актуальність дослідження. Ситуація у зрошувальному землеробстві в останні десятиріччя та його подальший розвиток залежать від існуючих викликів, що формуються у водному та сільському господарстві України, відіграючи значну роль у розвитку меліоративної науки та практики. Ці виклики обумовлені змінами оточуючого соціально-економічного та природного середовища: реформами державного управління та окремих секторів економіки; зміною клімату; науковим та інноваційним розвитком; змінами умов водоземлекористування.

Сучасні виклики, що впливають на розвиток методів оперативного планування зрошення.

Політичні зміни. У сільському та водному господарстві склалась ситуація, що вимагає термінового прийняття важливих політичних рішень, які готувались у попередні роки. Ці політичні рішення пов'язані з відкриттям ринку земель сільськогосподарського використання та реформами в управлінні водними ресурсами, що передбачає передачу повноважень з експлуатації зрошувальної інфраструктури (за виключенням головних каналів та головних насосних станцій) та управління водокористуванням організаціям водокористувачів (ОВК). Реалізація цих реформ відкриває можливості для інвестицій в модернізацію систем зрошення та управління водокористуванням як з боку приватного сектора, так і держави, міжнародних організацій та компаній. За позитивними оцінками це може статись вже протягом наступних двох років. Основним документом державного рівня, що визначає напрямки реформування сектора зрошення, є Стратегія відновлення та розвитку зрошення та дренажу, що розроблена у рамках співпраці Світового банку, ФАО та Інституту водних проблем і меліорації та затверджена наказом Кабінету Міністрів України [6].

Зміна клімату. Кліматичний вплив характеризується, перш за все, зростанням дії екстремальних погодних явищ, таких як зливові опади, заморозки, а влітку посухи, які супроводжуються тривалими періодами високих денних температур повітря. Ці явища обумовлюють актуальність запровадження комплексу заходів із пом'якшення та упередження їх негативної дії на сільське господарство та адаптації технологій зрошувального землеробства до таких умов. З цією метою установами НААН виконуються фундаментальні та прикладні дослідження в різних природно-кліматичних умовах, проводяться навчання фахівців сільськогосподарських підприємств, розвивається міжнародне співробітництво.

Інноваційний розвиток. Розповсюдження інновацій в останні роки набуває експоненціального розвитку як у частині появи нових приладів, обладнання, машин, так і в частині цифрових технологій та технологій точного землеробства, а також нового покоління інформаційних систем підтримки прийняття управлінських рішень [7–9]. Стрімкий інноваційний розвиток та цифрові технології обумовлюють зміну підходів до планування зрошення.

Практика ведення зрошувального землеробства. У зоні інтенсивного широкомасштабного зрошення на півдні України переважною практикою є полив дощувальними машинами кругової дії, а саме переоснащеними на низьконапірні ДМ «Фрегат», або новими сучасними дощувальними машинами закордонного виробництва. До того ж управлінські рішення щодо проведення поливів у більшості випадках відбуваються за технологічними картами, вимірюваннями вологості ґрунту та розрахунками сумарного випаровування за даними автоматизованих метеостанцій. Але впровадження інформаційних систем залишається дуже обмеженим. Це обумовлено неможливістю виконання рекомендацій щодо оптимальних строків та норм поливу на сівозмінах, де залишається стара поливна техніка та не проведена модернізація зрошувальної мережі і насосних станцій.

Зазначені виклики та реалії виробництва вимагають перегляду традиційних методів та критеріїв прийняття рішень для забезпечення ресурсоефективного управління зрошенням.

На цій підставі нами було проведено аналітичні та експериментальні дослідження з оцінки існуючої практики використання зрошення, розробки бачення його розвитку на наступні 20–30 років та оцінки перспектив використання тих чи інших інноваційних продуктів, що можуть бути впроваджені для

управління зрошенням в існуючих умовах господарювання та у майбутньому.

Мета досліджень. Удосконалення методів оперативного управління зрошенням та підтримки прийняття відповідних стратегічних рішень для досягнення ресурсоефективності у зрошуваному землеробстві.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

- дослідження часової та просторової мінливості природних та господарських умов використання зрошення;

- визначення основних напрямків удосконалення моделей та алгоритмів оперативного планування зрошення з врахуванням просторової та часової мінливості природних та господарських умов реального виробництва;

- оцінка перспективних напрямків розвитку методів планування зрошення для забезпечення ресурсоефективності управління в умовах сучасного аграрного виробництва.

Постановка завдань досліджень спрямована на формування нових методологічних підходів ресурсоефективного управління зрошенням, що враховують існуючу та перспективну практику використання зрошення, сучасні виклики, пов'язані зі зміною клімату та інноваційним розвитком в аграрному секторі економіки, перспективи модернізації зрошувальної інфраструктури та інституційної реформи в організації управління зрошенням.

Об'єкти та методи досліджень. Дослідження проводили протягом 2012–2019 рр. у господарствах Херсонської та Запорізької областей. У період 2012–2015 рр. у ДП «ДГ «Асканійське» АДСДС» ІЗЗ НААН на площі 2000 га була проведена апробація та виконано дослідне впровадження інформаційної системи оперативного планування зрошення ІС «ГІС Полив», що була розроблена в ІВПІМ авторами статті [9]. У наступні роки (2015–2019) інформаційна система впроваджувалась в умовах реального виробництва у чотирьох господарствах Херсонської та Запорізької областей, де досліджувались також природні та господарські умови використання зрошення та виконано оцінку якості управління поливами. Дослідження проводили на 306 полях, загальна площа яких склала 9266,09 га, основні культури – соя, соняшник, озима пшениця, люцерна та озимий ріпак.

У ході виконання досліджень сформовано базу даних, що містить інформацію по кожному полю, окремих зрошуваних масивах, що обслуговуються однією насосною станцією, та загалом по кожному окремому господарству. Методика досліджень базувалась на

результатах системного аналізу функціонування системи зрошувального землеробства, що є відкритою складною природно-технічною та соціально-економічною системою [10]. У наших дослідженнях увага приділялась факторам, що безпосередньо впливали на систему зрошувального землеробства у господарствах, які досягли високого рівня землеробства: працює сучасна сільськогосподарська техніка та застосовуються широкозахватні дощувальні машини як старої модифікації (ДМ «Фрегат»), так і нова сучасна низьконапірна техніка поливу (ДМ «Zimmatik», ДМ «Вауег» та ін.).

Оцінку стану посівів та якості управління зрошенням проводили на основі використання модельного комплексу інформаційної системи оперативного планування зрошення (ІС «ГІС Полив»), даних наземного моніторингу (автоматизовані метеостанції, контрольні вимірювання вологості ґрунту, фенологічні спостереження) та космічного агромоніторингу (визначення індикаторів стану вегетаційної поверхні та водного стресу за допомогою обробки космічних знімків Landsat 8 OLI/TIRS, Landsat 7 ETM+, Sentinel 2a). Протягом досліджень від фахівців господарств отримували оперативну інформацію про проведення фактичних поливів та інших технологій зрошувального землеробства, фактичну урожайність сільськогосподарських культур по кожному полю. У статті наводяться окремі найбільш значущі результати даних досліджень, що визначають напрямки подальшого розвитку методів оперативного планування зрошення.

Результати досліджень та їх обговорення. *Дослідження часової та просторової мінливості природних і господарських умов використання зрошення в реаліях виробництва.*

Повітряна посуха та високі денні температури повітря.

На об'єктах досліджень щороку спостерігалась атмосферна посуха різної інтенсивності та тривалості. У таблиці 1 наведено характеристики прояву атмосферної посухи у 2012–2014 рр. в ДП «ДГ «Асканійське» АДСДС» ІЗЗ НААН при вирощуванні сої. Атмосферна посуха характеризувалась кількістю днів із максимальною температурою повітря вище 30°C ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$), відносною вологістю повітря нижче 30% ($R_{\min} \leq 30\%$) та відсутністю опадів, а також тривалістю періодів безперервної дії цих умов.

Як видно з таблиці 1, найбільше днів з максимальною температурою вище 30°C спостерігалось у 2012 р. У середньому тільки 20% від усіх днів з $T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$ припадає на

1. Характеристика прояву атмосферної посухи у ДП «ДГ «Асканійське» АДСДС» ІЗЗ НААН по періодах розвитку сої в 2012–2014 рр.

Період	Дата	Кількість днів з температурою повітря $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ і відсутністю опадів	Тривалість безперервного періоду з температурою повітря $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$	Кількість днів з вологістю повітря $R_{\min} \leq 30\%$	Тривалість безперервного періоду з вологістю повітря $R_{\min} \leq 30\%$
Початковий	07.05–18.06.12	11	5	12	5
Критичний	19.06–12.07.12	19	11	13	7
Дозрівання	13.07–31.08.12	34	24	32	23
Всього за 2012 р.		64		57	
Початковий	05.05–30.06.13	21	8	31	7
Критичний	01.07–26.07.13	13	11	9	7
Дозрівання	27.07–31.08.13	26	20	23	8
Всього за 2013 р.		60		63	
Початковий	11.04–18.06.14	11	5	33	6
Критичний	19.06–11.07.14	8	4	5	3
Дозрівання	12.07–31.08.14	40	40	38	24
Всього за 2014 р.		59		76	

початковий та критичний періоди розвитку сої, найбільш довготривалими є посухи у період дозрівання (середина липня – серпень). У 2014 р. протягом майже всього періоду дозрівання спостерігались високі температури та низький рівень відносної вологості повітря. Днів із мінімальною відносною вологістю повітря нижче 30% було найбільше у 2014 р. На початку вегетації в 2013 та 2014 рр. вологість повітря також часто знижувалась до 30% й нижче. За умов екстремальної повітряної посухи, особливо у критичні періоди росту сільськогосподарських культур, термінові освіжаючі поливи сприяли істотному зниженню денних температур повітря.

Як видно з графіку (рис 1.), після проведення поливу температура повітря протягом світлого періоду часу знижувалась на 3°C в денний час та підвищувалась на 4°C в нічний час. Мікрокліматичний ефект зрошення добре відомий [11], але в сучасних умовах він потребує особливої уваги саме у зв'язку з більш тривалими періодами високих температур повітря протягом доби. Така тривала спека обумовлює зміну процесів енергомасообміну у посівах, що впливає на продукційний процес сільськогосподарських культур. Проведені дослідження свідчать, що під час періодів повітряної посухи за температури вище 30°C , яка спостерігалась протягом доби понад

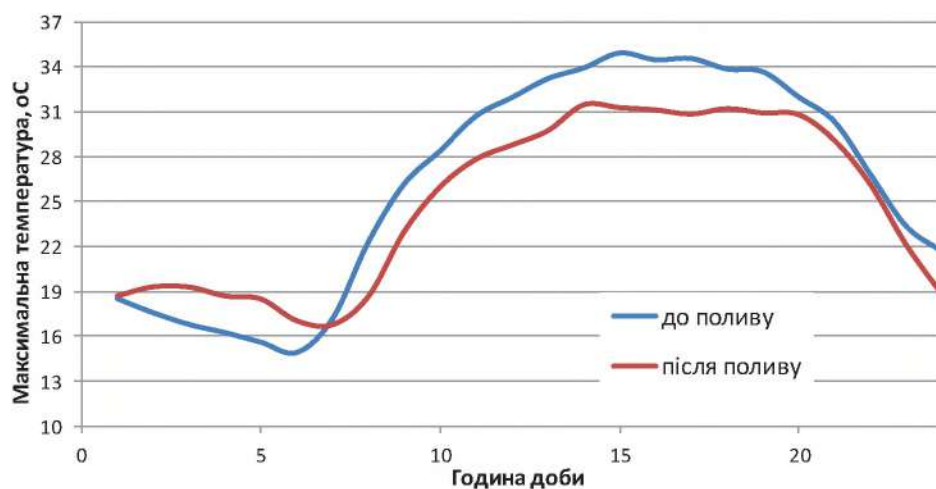


Рис. 1. Динаміка денних температур повітря на полі сої у період атмосферної посухи (до поливу-14.06.2018 та після поливу-18.06.2018)

8 годин, температура вегетаційної поверхні підвищувалась до 28°C та більше.

Вплив рельєфу та стан родючості ґрунту на нерівномірність поливу та стан посівів.

На рисунку 2 наведено приклад полів зі складним рельєфом у господарстві «Господарство 1».

У результаті поверхневого стоку підвищені ділянки втрачають частину вологи, а ґрунти у пониженних зонах одержують її додатково. З перерозподілом вологи по елементах рельєфу пов'язана міграція твердих і водорозчинних продуктів вивітрювання і ґрунтоутворення, унаслідок чого сільськогосподарські культури, що знаходяться у верхній, середній чи нижній частині балки опиняються не тільки в різних умовах зволоження та наявності елементів живлення, а й у різних мікрокліматичних умовах. Нерівномірність рельєфу впливає на стан розвитку сільськогосподарських культур. Залежно від зміни висот над рівнем моря, в межах поля відбуваються зміни показника

вегетаційного індексу NDVI, що отриманий за даними космічних знімків. На основі обробки даних наших досліджень отримано залежність між вегетаційним індексом та різницею висот у межах поля (рис. 3).

Вплив відповідності потужності насосних станцій водопотребі у зрошенні сільськогосподарських культур.

При існуючому технічному стані зрошувальних систем часто спостерігаються недополиви культур унаслідок недостатньої потужності насосних станцій при існуючій структурі посівних площ (рисунком 4). За даними наших досліджень обсяги недополивів за сезон можуть складати 400 м³/га. У таблиці 2 наведено приклади недополивів та зниження вологості активного шару ґрунту нижче оптимального рівня в таких умовах.

Для вирішення цієї проблеми господарства намагаються акумулювати кошти та провести модернізацію насосних станцій, але цей процес не може бути реалізований по

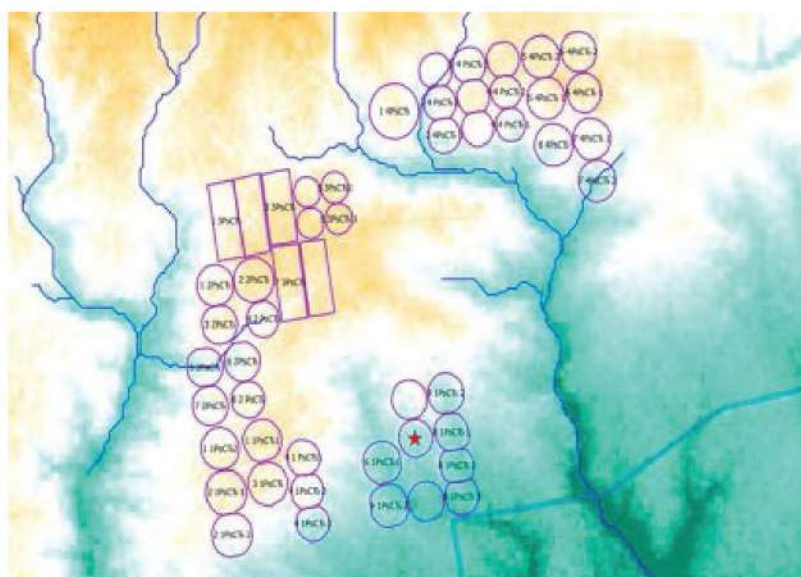


Рис. 2. Рельєф у межах господарства «Господарство 1»

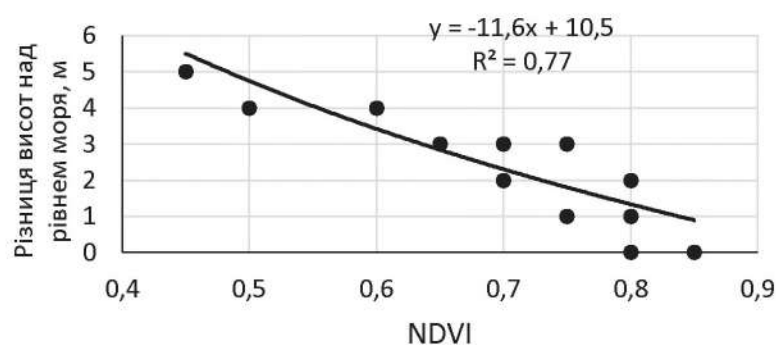


Рис. 3. Залежність вегетаційного індексу від ступеню складності рельєфу

2. Зниження вологості ґрунту нижче оптимального рівня на полях сівозміни, де потужність НС не дозволяла здійснювати одночасний полив (НС 46, Господарство 1)

НС	Поле	Культура	Кількість днів з вологістю менше оптимального рівня у критичний період /всього, діб	Обсяги недополиву, мм	Урожай, ц/га
46	27а	Соя середня	7/63	37,3	34,9
	25а	Соя середня	8/64	45,6	34,9
	24	Соняшник	20/58	126,8	31,15
	27	Соя середня	20/54	82,4	30,72
	25	Соя середня	20/52	122,0	29,7
	4	Соя середня	49/48	174,2	24,7

всіх насосних станціях одночасно внаслідок необхідності значних капітальних вкладень. Крім того, поки насосні станції не передані у довгострокове використання організаціям водокористувачів, господарства мають ризики для своїх інвестицій у їх модернізацію.

Просторова нерівномірність внесення засобів захисту рослин та добрив

Просторова нерівномірність стану посівів між окремими полями та у межах окремих полів також суттєво впливає на урожай сільськогосподарських культур та продуктивність використання поливної води при зрошенні. Цю нерівномірність, як правило, обумовлено нерівномірністю внесення засобів захисту рослин чи добрив. У таблиці 3 наведено приклад нерівномірності стану посівів сої по полях сівозміни одного з господарств протягом вегетаційного сезону 2017 р. В окремі дати діапазон зміни значень вегетаційного індексу складає 10–15%.

На рисунку 4 наведено приклад просторової нерівномірності стану посівів у межах окремих полів, що може бути обумовлений нерівномірністю поливу, різницею у густоті посіву, нерівномірністю внесення засобів захисту рослин чи добрив. Нерівномірність стану розвитку

посів внаслідок порушень у проведенні технологічних операцій зрошувального землеробства обумовлює різні умови водоспоживання сільськогосподарських культур, що потрібно враховувати при оперативному плануванні поливів.

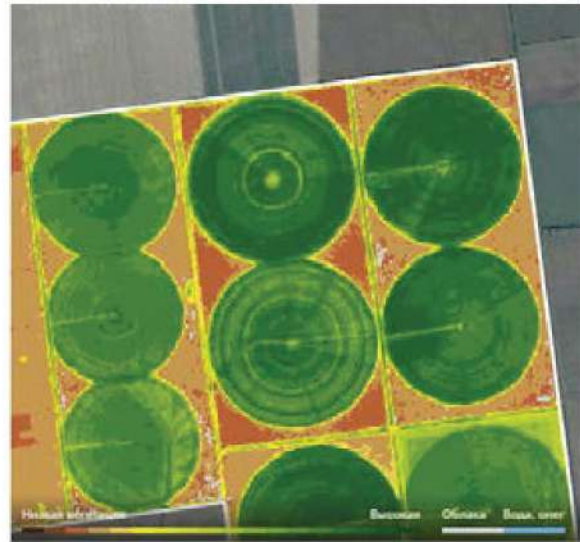


Рис. 4. Приклад нерівномірності стану посівів у межах окремих полів за даними космічного моніторингу

3. Просторова нерівномірність значень NDVI по полях сої у межах однієї сівозміни протягом 2017 р.

		Культура	Площа, га	02.06.17	16.06.17	26.06.17	03.07.17	06.07.17	11.07.17	26.07.17	27.07.17	05.08.17	12.08.17	13.08.17	20.08.17	25.08.17
2	1	Соя	41,12	0,56	0,84	0,76	0,77	0,91	0,92	0,87	0,91	0,89	0,83	0,68	0,54	
	2	Соя	38,84	0,57	0,85	0,88	0,78	0,91	0,92	0,88	0,9	0,88	0,79	0,63	0,47	
	3	Соя	39,61	0,55	0,84	0,88	0,75	0,91	0,92	0,87	0,89	0,84	0,76	0,59	0,46	
3	1	Соя	40,03	0,44	0,78	0,83	0,75	0,76	0,78	0,87	0,91	0,91	0,9	0,76	0,74	
	2	Соя	35,94	0,45	0,77	0,84	0,76	0,9	0,91	0,87	0,9	0,91	0,89	0,76	0,75	
	3	Соя	36,15	0,39	0,73	0,76	0,73	0,87	0,91	0,87	0,87	0,91	0,88	0,75	0,74	0,81
5	1	Соя	38,83		0,83	0,82	0,77	0,9	0,91	0,76	0,89	0,9	0,88	0,74	0,73	0,79
	2	Соя	37,9		0,83	0,87	0,77	0,9	0,91	0,87	0,89	0,9	0,88	0,73	0,73	0,8
7	1	Соя	36,91	0,44	0,74		0,75	0,77	0,91		0,89	0,9	0,87	0,74	0,68	0,72
	2	Соя	37,05				0,72		0,89	0,82	0,88	0,86	0,86	0,74	0,68	0,75
8	1	Соя	38,22	0,55	0,82	0,75	0,76	0,89	0,91		0,85	0,85	0,78	0,63	0,46	0,38

Удосконалення моделей та алгоритмів оперативного планування зрошення. Як показали результати наших досліджень, зростання частоти та інтенсивності повітряної посухи, а також наявність просторової нерівномірності дії природних та антропогенних факторів в умовах реального виробництва, обумовлює необхідність перегляду підходів до оперативного планування зрошення. Крім спостережень та розрахунків динаміки вологості у ґрунті, при оперативному плануванні поливів необхідне коригування параметрів існуючих моделей сумарного випаровування та алгоритмів призначення строків та норм поливу по фактичному стану розвитку біомаси сільськогосподарських культур. З цієї метою у дослідженнях використовували дані системи космічного моніторингу FieldLook [12], що дозволяє отримувати кожного тижня динаміку фактичного приросту біомаси по кожному полю сівозміни.

За даними системи FieldLook, результатами спостережень автоматизованих метеостанцій та вимірювань вологості ґрунту встановлено, що в умовах повітряної посухи незалежно від обсягів вологозапасів у ґрунті спостерігається редукція приросту біомаси, що збільшується залежно від тривалості днів з температурами вище 30°C та відсутності опадів. У таких умовах обмежується випаровуюча здатність рослин, що може бути враховано коригуванням біокліматичних коефіцієнтів водоспоживання рослин. З рис. 5 видно, що коригування параметрів моделі водоспоживання стає необхідним тоді, коли тривалість атмосферної посухи перевищує 8–10 діб.

У ці періоди прорости рослин закриваються та спостерігається редукція сумарного випаровування. Коригування можуть бути здійснені за рахунок введення поправочних коефіцієнтів або застосування значень

водоспоживання, що отримані безпосередньо за допомогою інформаційної системи FieldLook за моделлю SEBAL або аналогічних технологій визначення водоспоживання по радіаційному балансу та фактичному стану вегетаційної поверхні [13]. Останнє потребує оперативного доступу до космічних знімків відповідної якості та розподільної здатності та є більш витратним з економічної точки зору. Однак, у будь-якому разі, навіть при застосуванні більш простих індексів стану вегетаційної поверхні, отриманих за даними ДЗЗ, є можливість встановити просторову варіацію приросту біомаси рослин та відокремити поля з незадовільним станом посівів. У цьому випадку коригування біологічних коефіцієнтів водоспоживання здійснюється за даними контрольних вимірювань вологості у розрахунковому шарі ґрунту на полях з незадовільним станом розвитку сільськогосподарських культур. У таблиці 4 наведено результати розрахунків динаміки вологозапасів ґрунту при визначенні сумарного водоспоживання сої по методу Пенмана-Монтейта з використанням нормативних біологічних коефіцієнтів водоспоживання та скоригованих за даними контрольних вимірювань вологості ґрунту на полях, де спостерігалось суттєве зниження показників вегетаційних індексів (NDVI), та за допомогою системи космічного агромоніторингу Fieldlook.

Визначення водоспоживання з врахуванням фактичного стану біомаси рослин дозволяє суттєво покращити точність визначення вологозапасів та відповідно якість управління зрошенням та його ресурсоефективність.

За умов повітряної посухи, крім уповільнення приросту біомаси, відбуваються фізіологічні процеси у листях та репродуктивних органах рослин, унаслідок збільшення температури вегетаційної поверхні. За даними

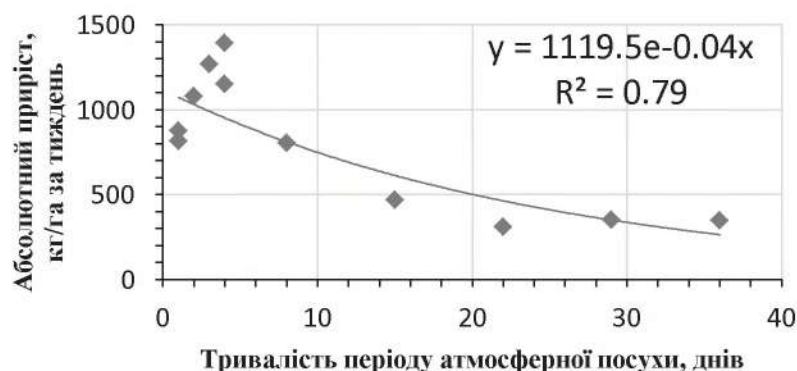


Рис. 5. Залежність між абсолютним приростом біомаси та тривалістю атмосферної посухи

4. Порівняння точності розрахунку вологозапасів у ґрунті (W, мм та %, розрахунковий шар 40 см) при визначенні водоспоживання сої з використанням нормативних біокліматичних коефіцієнтів та на основі даних ДЗЗ із врахуванням фактичного стану біомаси рослин

№ п/п	Фаза розвитку	Дата	За даними вимірювань вологості ґрунту, мм	З використанням нормативних біокліматичних коефіцієнтів, мм	На основі коригування нормативних біокліматичних коефіцієнтів водоспоживання за даними ДЗЗ	За даними фактичного стану розвитку біомаси та водоспоживання рослин по системі космічного моніторингу «FieldLook»
1	Бутонізація	11.06	118	119	119	118
2	Цвітіння	26.06	109	98	109	108
3	Налив бобів	22.07	106	83	108	96
4	Налив бобів	16.08	117	77	124	120

досліджень процесів енергопереносу в посівах у періоди атмосферної посухи встановлено зростання використання частки теплової енергії на турбулентний обмін порівняно з обсягами енергії, що йдуть на випаровування. Відношення цих складових теплового балансу, так зване число Боуена [14; 15; 16], добре корелює з індикатором температури вегетаційної поверхні (LST), що отримано за даними космічних знімків (рис. 6). Число Боуена – це математичний метод, який зазвичай використовується для обчислення тепла, втраченого (або отриманого) посівами; це відношення потоків енергії від одного стану до іншого за допомогою чутливого тепла та прихованого нагрівання відповідно.

Дослідження різних авторів свідчать, що гранична межа перебування рослин в умовах високих денних температур оцінюється тривалістю періоду (у хвилинах) протягом доби, коли температура вегетаційної поверхні рослин перевищує фізіологічно допустимий максимум. Після перевищення цього рівня нагрівання вегетаційної поверхні відбуваються незворотні фізіологічні процеси, що призводять до суттєвих втрат урожаю. Отже, виходячи з закономірностей теплового балансу веге-

таційної поверхні та фізіологічних процесів у рослинах, в умовах екстремальних денних температур повітря, необхідним стає управління мікрокліматичним ефектом зрошення, тобто планування, крім традиційних поливів, додаткових освіжаючих поливів. Терміни проведення освіжаючих поливів визначаються за критерієм тривалості перебування посівів в умовах, коли температура їх вегетаційної поверхні перевищує максимально допустимий фізіологічний рівень [17]. Для оптимального управління мікрокліматом посівів американські вчені з Техаського університету пропонують використовувати датчики температури вегетаційної поверхні, що встановлюються упродовж крила дощувальної техніки на спеціальній платформі.

Для обґрунтування зазначених критеріїв управління мікрокліматом посівів при зрошенні в умовах України необхідно продовження фундаментальних досліджень енергомасопереносу у середовище «ґрунт-рослина-атмосфера» [18].

Напрями розвитку методів оперативного планування зрошення для забезпечення ресурсоефективності управління в умовах реального виробництва. Результати тривалих

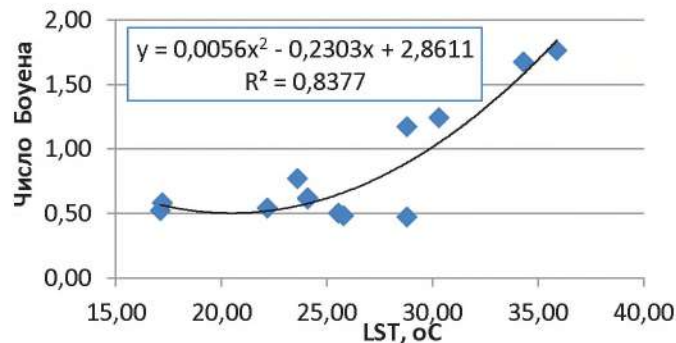


Рис. 6. Співвідношення продуктивної та непродуктивної частки теплової енергії (число Боуена) до індексу температури вегетаційної поверхні (LST), що отримано за даними ДЗЗ

фундаментальних та прикладних досліджень авторів, що виконувались на великій кількості полів у виробничих умовах, та дані інших українських та закордонних вчених свідчать, що настав час серйозного перегляду відомих традиційних методологічних підходів до оперативного планування зрошення. Більшість дослідників цієї проблеми наполягають на можливості вільного вибору того чи іншого методу оперативного планування зрошення, що залежить у конкретних умовах від багатьох факторів (технічного оснащення сучасними приладами наземного моніторингу, інформатизації та автоматизації процесу управління, застосування даних космічного зондування та удосконалення агрогідрологічних моделей, економічного стану господарств).

Усі відомі методи оперативного планування зрошення мають свої переваги та недоліки щодо досягнення високої продуктивності використання поливної води. Крім того, їх застосування суттєво залежить від технології та площ використання зрошення.

Однак більшість наукових розробок у цьому напрямку спрямовані на вирішення ключового завдання збільшення продуктивності використання зрошувальної води та зменшення виносу поживних речовин при інтенсивному веденні зрошувального землеробства. До того ж, окрім традиційного технократичного погляду на цю проблему потрібні більш гнучкі системні підходи, що враховують умови реального виробництва, інноваційний розвиток у методах космічного та наземного агромоніторингу, а також найближчу перспективу створення організацій водокористувачів, які будуть визначати стратегію використання зрошення у межах площ їх діяльності, враховуючи інтереси кожного водокористувача. Загальним критерієм управління зрошенням стає критерій загальної ресурсоефективності, що забезпечує мінімізацію використання ресурсів за умов досягнення економічно та екологічно сталого рівня господарювання. У міжнародній практиці цей критерій базується на визначенні показника продуктивності використання ресурсів, що оцінюється відношенням обсягів отриманої продукції (прибутків) до обсягів води та інших матеріальних ресурсів, що використані при зрошенні [19].

Ланцюг ресурсоефективності при цьому включає такі складові: обґрунтування оптимальної довгострокової програми використання зрошення, включаючи визначення пріоритетів модернізації технічної інфраструктури; річне планування водокористування для визначення оплати послуг ОВК зі

зрошення водокористувачами; оперативне управління поливами, що враховує просторову мінливість природних та господарських умов використання зрошення (стан біомаси сільськогосподарських культур; динаміку вологості у кореневмісному шарі ґрунту та температуру вегетаційної поверхні у періоди екстремальних денних температур повітря).

Реалізація всіх названих складових ресурсоефективного планування зрошення на великих масивах зрошення при поливі дощуванням можлива лише за умов застосування сучасних засобів наземного та космічного агромоніторингу, удосконалених моделей розрахунку водоспоживання та вологопереносу у ґрунті, а також алгоритмів розрахунку строків та норм поливу.

На невеликих площах та на площах з однорідними у просторі природними та господарськими умовами перспективним є перехід до автоматизованого управління поливами за даними датчиків вологості, що встановлюють на кожному полі, та датчиками температури вегетаційної поверхні з використанням автоматизованих метеостанцій, встановлених безпосередньо у посівах сільськогосподарських культур. Такий підхід вже апробований на системах краплинного зрошення, що зазвичай розташовані на більш компактних невеликих масивах. Як свідчать дослідження, при використанні поверхневого краплинного зрошення за рахунок постійної подачі невеликих обсягів води можна також регулювати мікроклімат у посівах в умовах високих температур повітря [20].

Спостереження за вологопереносом у ґрунті та прогнозування цього процесу також є перспективним для підвищення ресурсоефективності в управлінні зрошенням. Апробацію та доопрацювання методів оперативного планування зрошення на основі прямого вимірювання параметрів вологопереносу у ґрунті сучасними тензометричними датчиками для умов зрошення дощуванням вже розпочато у 2019 р. фахівцями ІВПІМ на полях «ДПДГ Асканійське» [21]. Даний напрям вимагає більш ретельного врахування структури ґрунту, фактичного стану гідрофізичних його властивостей на кожному полі. Загалом слід відмітити, що всі наведені можливості щодо удосконалення оперативного планування зрошення можуть бути поєднані на спільній інформаційній платформі, а користувачі самі зможуть визначити той формат точності, який їм буде доступний і який буде економічно доцільним. У найближчі роки в меліоративній науці та практиці слід очікувати на подальший

стрімкий розвиток цифрових технологій та їх застосування на значних територіях (до 10 000 га та більше), що будуть обслуговуватись організаціями водокористувачів із застосуванням даних наземного та космічного моніторингу на базі потужних інтернет платформ.

Висновки. Сучасні процеси реформування та інноваційного розвитку в управлінні зрошенням формують нові вимоги та можливості для розвитку методів оперативного планування зрошення сільськогосподарських культур, що повинні враховувати просторову і часову мінливість природних та господарських факторів виробництва, а також процеси трансформації в управлінні зрошувальними системами.

В умовах змін клімату та зростання частоти та інтенсивності атмосферних посух ключовими факторами для прийняття управлінських рішень щодо планування поливів на великих площах стають дані оперативного моніторингу просторової нерівномірності стану розвитку біомаси рослин та температури вегетаційної поверхні. Оперативне коригування параметрів моделей водоспоживання

сільськогосподарських культур за даними прямих вимірювань вологості у ґрунті або за даними спостережень за фактичним станом біомаси рослин із використанням методів ДЗЗ дозволяє суттєво зменшити витрати на зрошення та запобігти втратам урожаю. Для регулювання мікроклімату посівів протягом періодів екстремальної атмосферної посухи для планування освіжаючих поливів пропонується використовувати дані наземних чи космічних спостережень за динамікою температури вегетаційної поверхні.

Різноманіття напрямків удосконалення приладів наземного агромоніторингу та спрощення доступу до даних космічної зйомки та інших методів ДЗЗ створює широкі можливості для досягнення ресурсоефективності в управлінні зрошенням. Однак для їх реалізації необхідне створення сучасних інформаційних платформ, що будуть надавати можливості для вибору того чи іншого методу оперативного управління зрошенням, виходячи з можливостей кожного господарства, а також забезпечувати «on-line» консультування організацій водокористувачів та фахівців господарств.

Бібліографія

1. Алпатьев С.М., Остапчик В.П. Опыт исследования биологического метода расчета испарения при формировании эксплуатационного режима орошения / Биологические основы орошаемого земледелия. Москва: Наука, 1974. С. 127–135.
2. Информационно-советующая система управления орошением / Остапчик В.П. и др. Киев: Урожай, 1989. 245 с.
3. Жовтоног О.І. Принципи та методи планування адаптивного зрошення: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. с.-г. наук: спец.06.01.02 «Сільськогосподарські меліорації». Київ, ІВПіМ, 2001. 35 с.
4. Інформаційне забезпечення зрошувального землеробства. Концепція, структура, методологія організації / М.І. Ромащенко та ін. Київ: Аграрна наука, 2005. 196 с.
5. Еколого-економічне обґрунтування поливних та зрошувальних норм на основі інформаційних технологій / Ковальчук П.І. та ін. // Меліорація і водне господарство. 1999. Вип. 86. С. 21–27.
6. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року. Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 14 серпня 2019 р. № 688-р. Київ. – 13с.
7. Theory and application of Agricultural Innovation Platforms for improved irrigation scheme management in Southern Africa International // Journal of Water Resources Development, 2017 Vol. 33, No. 5, 804–823 <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1321530>.
8. Innovation and Water Management for Sustainable Development in Agriculture: Document to be presented by the General Directorate of PCA to the Inter-American Board of Agriculture (IABA). September 2015 / PCA -- San José: C.R.: PCA, 2015. 104 p. ISBN: 978-92-9248-583-2.
9. «Комп'ютерна програма «Інформаційна система оперативного планування зрошення ІС «ГІС Полив», автори: Жовтоног О.І., Філіпенко Л.А., Деменкова Т.Ф., Бабич В.А., Поліщук В.В. (Свідоцтво про реєстрацію авторських прав на твір № 54650 від 07.05.2014).
10. O. Zhovtonog, M. Hoffmann, V. Polishchuk and A. Dubel. New planning technique to master the future of water on local and regional level in Ukraine // Journal of Water and Climate Change Vol. 2 No. 2-3, 2011. 189–200.
11. J.L. Steiner, E.T. Kanemasu, D. Hasza (1983) Microclimatic and crop responses to center pivot sprinkler and to surface irrigation //, Irrigation Science, Vol. 4, issue 3, 201–214.
12. Fieldlook. eleaf.com. Retrieved from: https://eleaf.com/?page_id=3174.

13. Bastiaanssen, W.G.M.; Noordman, E.J.M.; Pelgrum, H.; David, G.; Thoreson, B.P.; Allen, R.G. (2005) SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. *ASCE J. Irrig. Drain. Eng.* 131, 85–93.
14. Tanner, B.D. (1988). Use requirement for Bowen ratio and eddy correlation determination of evaporation,” In: De Lynn, R Hay (editor), *Planning Now for Irrigation and Drainage in the 21 Century*. Irrig. And Drain. Div., Am. Soc. Civil Eng., NY, 605–616.
15. Todd R.W., Evett S.R., Howell T.A. (2000). The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 335–348.
16. Levent Şaylan, Yunus Özkoca, Barış Çaldağ, Fatih Bakanoğulları (2018). Comparison of Micrometeorological Methods used for the Determination of Actual Evapotranspiration // *International Journal of Crop Science and Technology*. pp. 13–22. ISSN: 2458-7540
17. Begüm Tekelioğlu, Dursun Büyüktaş, Ruhi Baştuğ, Cihan Karacal, Köksal Aydınşakir and Nazmi Dinç. (2007). Use of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling of Soybean in Mediterranean Conditions // *Journal of Experimental Agriculture International*, 1-8. ISSN: 2231-0606.
18. Закономірності енергомасообміну в середовищі «грунт-рослина-атмосфера» в сучасних кліматичних та господарських умовах використання зрошення // Жовтоног О.І. та ін. // *Меліорація і водне господарство*. 2018. Вип. 2(108). С. 19–28.
19. Irmak, Suat; Odhiambo, Lameck O.; Kranz, William L.; and Eisenhauer, Dean E., “Irrigation Efficiency and Uniformity, and Crop Water Use Efficiency” (2011). *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/451>.
20. А.П. Шатковський Наукові основи інтенсивних технологій краплинного зрошення просапних культур в умовах Степу України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. с.-г. наук: спец.06.01.02 «Сільськогосподарські меліорації». Київ: ІВПіМ, 2016. 35 с.
21. Ya. Gadzalo, M. Romashchenko, V. Kovalchuk, T. Matiash, O. Voitovich Using smart technologies in irrigation management 3th World Irrigation Forum (WIF3) 1-7 September 2019, Bali, Indonesia, Full Paper of WIF3 and International Workshop, Development for Water, Food and Nutrition Security in a Competitive Environment, pp. 954–960.

References

1. Alpatov, S.M., & Ostapchuk, V.P. (1974). Opyt yssledovanyia byolohycheskoho metoda rascheta usparennyia pry formirovannyi ekspluatatsyonnoho rezhyma oroshenyia [The experience of the biological method for calculating evaporation in the formation of the irrigation operational regime]. *Byolohycheskye osnovy oroshaemoho zemledelyia*. Moskva: Nauka, 127–135. [in Russian].
2. Ostapchuk, V.P., Kostromyn, V.A., & Koval, A.M. (1989). Ynformatsyonno-sovetuiushchaia systema upravlenyia oroshenyem [Information Advisory Irrigation Management System]. Kiev: Urozhai. [in Ukrainian].
3. Zhovtonoh, O.I. (2001). Pryntsypy ta metody planuvannia adaptivnoho zroshennia [Adaptive irrigation planning principles and methods]. Extended abstract of Doctor’s thesis. Kyiv: IWPiM. [in Ukrainian].
4. Romashchenko, M.I., Drachynska, E.S., & Shevchenko, A.M. (2005). Informatsiine zabezpechennia zroshuvanoho zemlerobstva. Kontseptsiiia, struktura, metodolohiia orhanizatsii [Information support for irrigated agriculture. The concept, structure, methodology of the organization]. Kyiv: Ahrarna nauka. [in Ukrainian].
5. Kovalchuk, P.I., Mykhalska, T.O., Kovalchuk, V.P., & Pysarenko, P.V. (1999). Ekoloho-ekonomichne obhruntuvannia polyvnykh ta zroshuvannykh norm na osnovi informatsiinykh tekhnolohii [Ecological and economic substantiation of irrigation norms on the basis of information technologies]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 86, 21–27. [in Ukrainian].
6. Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku. (2019). Kabinet Ministriv Ukrainy. Rozporiadzhennia vid 14 serpnia 2019. № 688-r. Kyiv. [in Ukrainian].
7. Theory and application of Agricultural Innovation Platforms for improved irrigation scheme management in Southern Africa International. (2017). *Journal of Water Resources Development*, Vol. 33, N. 5, 804–823. Retrieved from: <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1321530>.
8. Innovation and Water Management for Sustainable Development in Agriculture. (2015). General Directorate of IICA. ISBN: 978-92-9248-583-2.

9. Zhovtonoh, O.I., Filipenko, L.A., Demenkova, T.F., Babych, V.A., & Polishchuk, V.V. (2014). Komp'yuterna prohrama. Informatsiyna systema operatyvnoho planuvannya zroshennya IS GIS Polyv [Computer program Informational system of irrigation planning] Svidotstvo pro reyestratsiyu avtors'kykh prav na tvir № 54650 vid 07.05.2014. [in Ukrainian].
10. Zhovtonog, O., Hoffmann, M., Polishchuk, V., & Dubel, A. (2011). New planning technique to master the future of water on local and regional level in Ukraine. *Journal of Water and Climate Change*, 2, 2-3, 189–200.
11. Steiner, J.L., Kanemasu, E.T., & Hasza D. (1983). Microclimatic and crop responses to center pivot sprinkler and to surface irrigation. *Irrigation Science*, 4, 3, 201–214.
12. Fieldlook (n.d.). eleaf.com. Retrieved from: https://eleaf.com/?page_id=3174.
13. Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., David, G., Thoreson, B.P., & Allen, R.G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions, *Irrig. Drain. Eng.*, 131, 85–93.
14. Tanner, B.D. (1988). Use requirement for Bowen ratio and eddy correlation determination of evaporation, *Planning Now for Irrigation and Drainage in the 21 Century*, *Irrig. And Drain. Div., Am. Soc. Civil Eng., NY*, 605–616.
15. Todd R.W., Evett S.R., & Howell, T.A. (2000). The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment, *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 335–348.
16. Levent Şaylan, Yunus Özkoca, Barış Çaldağ, Fatih Bakanoğulları (2018). Comparison of Micrometeorological Methods used for the Determination of Actual Evapotranspiration. *International Journal of Crop Science and Technology*, 13–22.
17. Tekelioğlu, B., Büyüktaş, D., Baştuğ, R., Karaca, C., Aydınşakir, K., & Dinç, N. (2017). Use of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling of Soybean in Mediterranean Conditions. *Journal of Experimental Agriculture International*, 18(6), 1-8. Retrieved from: <https://doi.org/10.9734/JEAI/2017/37058>.
18. Zhovtonoh, O.I., Filipenko, L.A., Polishchuk, V.V., Saliuk, A.F., & Khomenko, A.V. (2018). Zakonomirnosti enerhomassoobminu v seredovyshchi «hrunt-roslyna-atmosfera» v suchasnykh klimatychnykh ta hospodarskykh umovakh vykorystannia zroshennia. [Patterns of energy-mass exchange in soil-plant-atmosphere environment under current climatic and economic conditions for irrigation]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo*, 2, 19–28. [in Ukrainian].
19. Irmak, S., Odhiambo, L.O., Kranz, W.L., & Eisenhauer, D. E. (2011). Irrigation Efficiency and Uniformity, and Crop Water Use Efficiency. *Biological Systems Engineering*. Retrieved from <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/451>.
20. Shatkovskiy, A.P. (2016). Naukovi osnovy intensyvnykh tekhnolohii kraplynnoho zroshennia prosapnykh kultur v umovakh Stepu Ukrainy [Scientific bases of intensive technologies of drip irrigation of cultivated crops under the conditions of the Steppe of Ukraine]. Extended abstract of Doctor's thesis. Kyiv: IWPIМ. [in Ukrainian].
21. Gadzalo, Ya., Romashchenko, M., Kovalchuk, V., Matiash, T., & Voitovich O. (2019). Using smart technologies in irrigation management 3th World Irrigation Forum (WIF3) 1-7 September 2019, Bali, Indonesia, Full Paper of WIF3 and International Workshop, Development for Water, Food and Nutrition Security in a Competitive Environment, 954–960.

О.И. Жовтоног, В.В. Полищук, Л.А. Филиппенко, А.Ф. Салюк, Я.О. Бутенко, М.В. Гофман
Оперативное планирование орошения: современные вызовы, реалии и видение

Аннотация. Приведен анализ современных политических и климатических вызовов, а также практики использования орошения в крупных хозяйствах Юга Украины, которые формируют требования к методам управления орошением. Представлены результаты экспериментальных исследований по совершенствованию методов оперативного управления орошением и поддержки принятия соответствующих стратегических решений для достижения ресурсоэффективности в орошаемом земледелии в условиях реального производства. Обоснована и продемонстрирована роль наземного и космического агромониторинга для корректировки биоклиматических коэффициентов водопотребления сельскохозяйственных культур с учетом пространственно-временной изменчивости фактического состояния биомассы. Для адаптации управления орошением к условиям воздушной засухи предложено использование дополнительного критерия при принятии решений о проведении освежающих поливов, что определяется максимально допустимой продолжительностью пребывания вегетационной поверхности растений при температуре выше физиологически допустимого уровня. Установлено, что в условиях воздушной засухи, кроме замедления

прироста биомассы происходят физиологические процессы в листьях и репродуктивных органах растений, вследствие увеличения температуры вегетационной поверхности. По данным исследований процессов энергопереноса в посевах в периоды атмосферной засухи увеличивается использования доли тепловой энергии на турбулентный обмен по сравнению с объемами энергии, идущими на испарение. Отмечено видение будущего развития методов оперативного планирования орошения на базе создания современных информационных платформ, позволяющих выбирать тот или иной метод оперативного управления орошением, исходя из возможностей каждого конкретного хозяйства, а также обеспечивать «on-line» консультирование организаций водопользователей и специалистов хозяйств.

Ключевые слова: оросительная система, информационная система, ДЗЗ, агромониторинг, база данных, оперативное планирование орошения, геоинформационные технологии, алгоритмы, модельный комплекс.

O.I. Zhovtonog, V.V. Polishchuk, L.A. Filipenko, A.F. Saliuk, Ya.O. Butenko, M.W. Hoffmann
Operational irrigation management: modern challenges, realities and visions

Abstract. The analysis of current political and climatic challenges, as well as the practice of irrigation performance on large farms of Southern Ukraine, which are the cause of requirements for irrigation management methods, is presented. The results of experimental studies on improving the methods of operational irrigation management and supporting appropriate strategic decisions to achieve resource efficiency in irrigated agriculture are presented under the conditions of real production. The role of on-site and space agro-monitoring for the correction of bioclimatic coefficients of crop water consumption taking into account the space-time variability of the actual biomass has been substantiated and demonstrated. For adaptation of irrigation management to the conditions of air drought, it is proposed to use an additional criterion for making decisions on crop cooling, which is determined by the maximally permissible temperature duration at the vegetation surface above the physiologically acceptable level. It is established that under conditions of air drought, in addition to slowing the growth of biomass, physiological processes occur in the leaves and reproductive organs of plants, due to the increase in the temperature of the vegetation surface. According to studies of energy transfer processes in crops during periods of atmospheric drought, an increase in the use of a share of thermal energy for turbulent exchange has been found compared to the volumes of energy that is evaporated. The vision of the future development of methods of operational irrigation planning based on the modern agricultural information platforms has been presented. It will allow to choose a method of operational irrigation management, based on the capabilities of each farm economy and to provide “on-line” consulting for water user organizations or farm personnel.

Key words: irrigation system, information system, remote sensing, agromonitoring, database, operational planning of irrigation, GIS technologies, algorithms, model complex.