

## МОДЕЛЮВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ ЯРОГО ЯЧМЕНЮ В УКРАЇНІ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ

Розглянуто результати чисельних експериментів щодо моделювання врожайності ярого ячменю по областях України за допомогою регресійних моделей, побудованих з використанням супутникових вегетаційних індексів *NDVI* і *NDWI* та похідних від них. У моделях використано також регіональний індекс блокування атмосфери для врахування циркуляційних умов у період вегетації. Верифікація моделей показала задовільну точність прогнозування врожайності з високою завчасністю.

**Ключові слова:** вегетаційний індекс, індекс блокування атмосфери, ярий ячмінь, урожайність.

### Вступ

Ячмінь займає за посівними площами четверте місце в світі після пшениці, рису та кукурудзи. Середня світова врожайність цієї культури становить 22 ц/га, а найбільші врожаї збирають у Бельгії, Нідерландах та Франції – понад 6 тонн з гектара. В Україні ячмінь є другою зерновою культурою після пшениці, при цьому вирощують переважно ярий ячмінь. У 2013-2014 роках його посівні площі становили 2,2-3,0 млн. га, а середня по країні врожайність у рекордному для зернових культур 2014 році перевищила 27 ц/га (за середнього показника 23-24 ц/га).

Ячмінь є найбільш скоростиглою ярою зерновою культурою. Після сівби сходи зазвичай з'являються за 6-9 днів, а вегетаційний період становить 60-110 днів. Культура є невибагливою до тепла, сходи в польових умовах можуть з'являтися за +4, +5° С і витримують заморозки до -3, -4° С. Ячмінь є чутливим до надмірного зволоження ґрунту і водночас досить посухостійкий. Посуха під час кушіння знижує проективну кущистість, а нестача вологи в період від колосіння до досягання знижує виповненість зерна. Урахування впливу посушливих умов у вегетаційний період під час прогнозування врожайності є важливим аспектом удосконалення наявних та розробки нових методів прогнозу.

Розвиток космічних технологій в останні десятиліття сприяв активному впровадженню в агрометеорологічні дослідження даних супутникового зондування атмосфери та підстильної поверхні [1]. Для моніторингу стану рослинного покриву та підстильної поверхні застосовуються

так звані вегетаційні індекси, які чисельно відображають залежність між відбивною здатністю електромагнітного випромінювання та певними властивостями рослин [2]. Найуживанішим є нормалізований диференційний вегетаційний індекс *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) та створений на його базі індекс умов вегетації *VCI* (Vegetation Condition Index) [12]. Менш розповсюдженими в дослідженнях є індекси, що отримуються у вузьких спектральних діапазонах, наприклад, нормалізований диференційний водний індекс *NDWI* (Normalized Difference Water Index), який є мірою кількості молекул рідкої води, що взаємодіють з сонячною радіацією, яка надходить до рослинності [9].

Веgetаційні індекси з успіхом використовуються в емпіричних регресійних моделях прогнозування врожайності сільськогосподарських культур [3, 10-11, 13]. В Україні досвід такого моделювання є переважно для озимої пшениці [2, 4-5], тому в цій статті розглянуто результати моделювання врожайності ярого ячменю по областях України з використанням розробленої регресійної моделі, предикторами якої є регіональний індекс блокування атмосфери *ECBI* (European Continental Blocking Index) [14], індекс умов вегетації *VCI* та новий індекс вологості рослинності *WVI* (Wet Vegetation Index) [8].

### Матеріали та методи дослідження

Для оцінки стану підстильної поверхні та рослинного покриву, які склалися під впливом поточних погодних умов, використовують індекс умов вегетації *VCI*:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $NDVI$  – поточне восьмиденне (декадне, тижневе тощо) значення нормалізованого вегетаційного індексу;

$NDVI_{\max}$ ,  $NDVI_{\min}$  – абсолютний міжрічний максимум та мінімум нормалізованого вегетаційного індексу за той самий період.

Значення  $VCI > 80\%$  відповідають сприятливим умовам вегетації, а за  $VCI < 35\%$  констатують посуху різної інтенсивності [7, 11, 12, 15].

Для оцінки вмісту вологи в рослинному покриві можна застосовувати нормалізований диференційний водний індекс  $NDWI$  у чистому вигляді, або для одноманітності інтерпретації вегетаційних індексів, які використовуються під час побудови регресійних рівнянь, індекс вологості рослинності  $WVI$  [8]:

$$WVI = \frac{NDWI - NDWI_{\min}}{NDWI_{\max} - NDWI_{\min}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $NDWI$  – поточне (тижневе, декадне тощо) значення нормалізованого диференційного водного індексу;  $NDWI_{\max}$ ,  $NDWI_{\min}$  – абсолютний міжрічний максимум та мінімум індексу за той же період.

Високі значення  $WVI$  (понад 80 %) відповідають здоровій та насиченій вологою рослинності, а значення  $WVI$  менші за 50 % свідчать про зниження тургору рослин.

Урахування характеру циркуляції атмосфери у вегетаційній період здійснювалося на базі уведення до рівнянь регресії місячних значень регіонального індексу блокування  $ECBI$ , які розраховувалися за методикою, запропонованою в [14]. Європейський континентальний індекс блокування  $ECBI$  відображає стан зонального потоку на рівні 300 гПа щодо кліматичної норми. За  $ECBI > 0$  фіксується блокування зонального потоку, за  $ECBI < 0$  зональний потік інтенсивніший за норму. Оскільки блокуючі процеси пов'язані з формуванням потужних, довготривалих антициклонів, які часто супроводжуються посушливими погодними умовами, використання індексу блокування в регресіях дозволяє враховувати чинник ризику посухи в певний період вегетації та її вплив на майбутній урожай.

Як вихідну інформацію використано дані 8-ми та 16-денних композитів вегетаційних індексів MODIS/NDVI та MODIS/NDWI з просторовим розділенням 250 метрів, осереднених по областях України, з бази даних проекту GLAM (the Global Agriculture Monitoring Project, <http://deleon.edc.usda.gov/glam.htm>) за період 2000-

2013 рр. Інформація спектрорадіометра MODIS надходить до цієї бази з супутників Terra та Aqua (NASA). Вихідними даними для розрахунку регіонального індексу блокування  $ECBI$  послужили щоденні поля ре-аналізу NCEP/NCAR зональної компоненти швидкості вітру  $u$ . Дані про врожайність отримано з бюлетенів Держкомстату України.

Лінійні регресійні моделі побудовано для низки областей України, при цьому як предиктанти виступали середні по областях абсолютна ( $Y_{аб}$ ) та відносна ( $Y_{од}$ ) врожайність, які для поточного року розраховано за формулою:

$$Y_{од} = \frac{Y_{аб}}{Y_{mp}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $Y_{аб}$  – абсолютна урожайність (ц/га);  $Y_{mp}$  – урожайність зернової культури за трендом на поточний рік (ц/га), яка визначаються за методом гармонійних ваг [6].

Загальне лінійне рівняння регресії для розв'язання поставленої задачі має вигляд

$$Y = a + b \cdot ECBI + c \cdot VCI + d \cdot WVI, \quad (4)$$

де  $Y = (Y_{аб}; Y_{од})$ ;  $a, b, c, d$  – коефіцієнти регресії.

Обрання дат (періодів), в які для кожної області береться значення предикторів  $VCI$ ,  $WVI$  та  $ECBI$ , було здійснено шляхом оцінки тісноти кореляційного зв'язку між врожайністю та відповідним параметром у весняно-літній період, тобто предиктори для кожної області та сільгоспкультури бралися в ті тижні, коли коефіцієнт кореляції був максимальним.

За відсутності незалежної вибірки даних для оцінки якості прогнозування врожайності ярого ячменю в дослідженні використано прийом виключення окремих років у ході побудови регресій та подальшого прогнозування для них. По розглянутих областях почергово з регресії було виключено роки з 2007 по 2013. Цей період (2007, 2010, 2012 рр.) характеризувався як дуже посушливий, а інший – сприятливий для формування високого врожаю (2008, 2013 рр.). Прогнозовані таким чином по незалежних даних середньобласні значення врожайності ярого ячменю оцінювалися за такими критеріями:

- середня абсолютна похибка  $\Delta\bar{Y}$ , яка дорівнює

$$\Delta\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|Y_{\phi} - Y_{np}|_i), \quad (5)$$

де  $Y_{\phi}$  – фактичне значення врожайності;  $Y_{np}$  –

прогнозоване значення врожайності;  $n$  – кількість випадків прогнозу;

- стандартне відхилення  $\delta$ ;
- точність прогнозу  $T_{ч_{np}}$  (визначається як різниця 100 % та середньої абсолютної похибки у відсотках);
- відносна ефективність  $E_{ф_{вд}}$ , яка показує, наскільки використання моделей з супутниковими вегетаційними індексами ефективніше за прогнозування врожайності за трендом [5]:

$$E_{ф_{вд}} = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y_{ф} - Y_{mp})_i)^2}{\sum_{i=1}^n ((Y_{mp} - Y_{ф})_i)^2} \quad (6)$$

### Результати та їх аналіз

У табл. 1 наведено результати моделювання врожайності ярого ячменю для 13 областей України, які розташовані в степовій та лісостеповій агрокліматичних зонах. Як можна бачити, найбільший вплив на формування врожайності має блокування атмосфери в більшості областей в березні, але в АР Крим цей вплив найзначніший у квітні, а в Житомирській та Сумській областях – у травні. Якщо в березні кореляційний зв'язок між значеннями  $ЕСВІ$  та врожайністю зворотній, то в квітні та травні – прямий. Коефіцієнти кореляції є вищими в березні і досягають значень 0,4-0,5, у квітні та травні тіснота зв'язку зменшується до 0,3-0,4. Тобто, раною весною позитивний вплив на формування майбутнього врожаю має зональний характер циркуляції атмосфери, без блокуючих процесів ( $ЕСВІ < 0$ ); він, вочевидь, сприяє встановленню сприятливого для початку вегетації температурного режиму та забезпечує достатнє зволоження.

Індекс умов вегетації  $VCI$  для більшості областей Степу має найкращу кореляцію з врожайністю в період з 24 травня по 16 червня. Найранніші дати спостерігаються для Запорізької області та АР Крим – 8-15 травня, а найпізніша дата припадає на Одеську область – 9-16 червня. Індекс вологості рослинності  $WVI$  найкраще корелює з врожайністю ярого ячменю в більшості областей у період з 16 травня по 8 червня. Отже, за наявності вихідних даних прогноз урожайності ярого ячменю може бути складений по АР Крим після 23 травня, по Запорізькій області після 31 травня, по Херсонській, Миколаївській, Кіровоградській, Дніпропетровській та Донецькій областях після 8 червня, по Одеській області – після 16 червня. Тобто, вже в середині червня по більшості південних областей із задовільною завчасністю

можна отримати дані щодо очікуваної врожайності ярого ячменю.

В областях Лісостепу періоди найкращої кореляції індексів  $VCI$  та  $WVI$  з урожайністю ярого ячменю коливаються в широких межах. Так, для  $VCI$  цей період починається з 16-23 травня в Житомирській області та закінчується 9-16 червня у Вінницькій області. Для  $WVI$  періоди високої кореляції починаються з 16-23 травня в Сумській області та закінчуються 1-8 червня в інших областях. Таким чином, прогноз урожайності ярого ячменю може бути складений наприкінці травня для Житомирської та Сумської областей, після 8 червня – для Черкаської та Полтавської областей, після 16 червня – для Вінницької області. Тобто, для більшості розглянутих областей завчасність прогнозування є задовільною, адже прогноз може бути складений уже в середині червня.

Статистичні оцінки моделювання для абсолютної та відносної врожайності (табл. 1) показали, що для всіх областей коефіцієнти як множинної кореляції, так і детермінації, є високими. Перевірка побудованих регресій за  $F$ -критерієм Фішера для 5 % рівня значущості показала, що рівняння є статистично значущими, окрім Житомирської області для відносної врожайності та Сумської області для абсолютної врожайності.

Для степової зони коефіцієнти множинної кореляції в моделях абсолютної врожайності коливаються від 0,75 в АР Крим до 0,95 в Херсонській області, при цьому уведення до моделей трендової компоненти поліпшує статистичні оцінки регресій лише в двох указаних областях. Для інших областей Степу результати звичайно погіршуються.

Стандартна похибка моделювання в степових областях становить у середньому 3,30 ц/га, при цьому вона найнижча в Херсонській та Миколаївській областях (2,29 та 2,52 ц/га відповідно).

В областях Лісостепу статистичні оцінки регресій є дещо гіршими, ніж для Степу. Коефіцієнти множинної кореляції коливаються в межах 0,74-0,91, при цьому для побудованих рівнянь моделювання відносної врожайності показники є кращими, ніж для абсолютної врожайності, на відміну від областей степової зони.

Стандартна похибка моделювання становить в середньому 3,11 ц/га і є найнижчою в Полтавській області (2,52 ц/га).

Розглянемо оцінки прогнозування врожайності ярого ячменю за побудованими моделями (табл. 2). У степовій зоні середня абсолютна похибка прогнозу становить 3,44 ц/га для моделі абсолютної врожайності та 3,72 ц/га для моделі з урахуванням тренду. Найкращі показники спо-

Таблиця 1  
Вихідні параметри та статистичні оцінки моделювання абсолютної ( $Y_{аб}$ ) та відносної ( $Y_{від}$ ) врожайності ярого ячменю по областях України

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнт множинної кореляції	Стандартна похибка
Одеська	березень	9-16/06	16-23/05	0,84	3,71
				0,82	0,19
Херсонська	березень	1-8/06	24-31/05	0,95	2,29
				0,96	0,11
Миколаївська	березень	24-31/05	1-8/06	0,93	2,52
				0,92	0,14
Запорізька	березень	8-15/05	24-31/05	0,76	5,03
				0,76	0,27
Кіровоградська	березень	24-31/05	1-8/06	0,89	3,28
				0,88	0,15
Дніпропетровська	березень	1-8/06	24-31/05	0,90	3,06
				0,87	0,15
АР Крим	квітень	8-15/05	16-23/05	0,75	3,72
				0,81	0,18
Донецька	березень	1-8/06	24-31/05	0,86	2,75
				0,86	0,15
Вінницька	березень	9-16/06	1-8/06	0,74	3,96
				0,77	0,12
Черкаська	березень	24-31/05	1-8/06	0,76	3,93
				0,86	0,11
Полтавська	березень	24-31/05	1-8/06	0,87	2,52
				0,91	0,09
Житомирська	травень	16-23/05	1-8/06	0,84	2,04
				-	-
Сумська	травень	24-31/05	16-23/05	-	-
				0,80	0,12

\* Примітка: по кожній області статистичні оцінки регресії надані послідовно зверху вниз для абсолютної ( $Y_{аб}$ ) та відносної ( $Y_{від}$ ) врожайності

Таблиця 2  
Оцінки прогнозування за моделями абсолютної  $Y_{аб}$  та відносної  $Y_{від}$  врожайності озимої пшениці по областях степової зони України

Область	Модель $Y_{аб}$				Модель $Y_{від}$			
	$\Delta\bar{Y}$	$\delta$	$Tч_{пр}$	$Eф_{від}$	$\Delta\bar{Y}$	$\delta$	$Tч_{пр}$	$Eф_{від}$
<i>Степ</i>								
Одеська	2,13	3,60	85,83	1,88	2,64	4,06	81,49	1,62
Херсонська	2,15	2,79	85,86	7,11	2,49	2,75	83,18	7,01
Миколаївська	2,64	3,20	82,97	3,60	2,58	3,50	81,91	3,08
Запорізька	6,31	8,59	52,15	0,77	6,72	8,13	48,16	0,75
Кіровоградська	4,84	5,33	63,42	0,92	4,97	6,22	63,00	0,95
Дніпропетровська	3,56	4,62	75,81	1,45	3,58	4,74	74,41	1,42
АР Крим	2,36	3,61	85,09	1,20	3,33	5,09	80,61	1,02
Донецька	3,51	2,35	77,03	1,13	3,43	2,32	77,44	1,22
Середнє	3,44	4,26	76,02	2,31	3,72	4,60	73,77	2,13
<i>Лісостеп</i>								
Вінницька	2,55	5,33	90,93	0,13	2,70	4,76	89,72	0,13
Черкаська	4,93	6,91	79,04	0,71	4,31	5,60	80,96	0,85
Полтавська	3,36	3,58	85,60	2,80	2,66	3,20	87,74	2,45
Житомирська	1,83	2,23	92,19	2,50	-	-	-	-
Сумська	-	-	-	-	2,27	3,48	88,79	0,83
Середнє	3,17	4,51	86,94	1,54	2,99	4,26	86,80	1,07

стережено в Одеській, Херсонській, Миколаївській областях та АР Крим (у межах 2,13-2,64 ц/га для абсолютної врожайності), найгірші результати – в Запорізькій та Кіровоградській областях.

Стандартне відхилення для абсолютної врожайності в більшості областей Степу коливається в межах від 2,35 до 3,60 ц/га, для відносної врожайності показники дещо вищі, але середнє значення перевищує 4 ц/га в обох моделях переважно завдяки Запорізькій та Кіровоградській областям. Середня точність прогнозування за моделлю абсолютної врожайності вища, ніж за моделлю відносної врожайності, – 76 та 74 % відповідно. При цьому в Одеській, Херсонській, Миколаївській областях та АР Крим точність перевищує 85% (для  $Y_{аб}$ ). Ефективність моделювання є високою в більшості південних областей, окрім Запорізької та Кіровоградської, що свідчить про доцільність використання розроблених моделей. При цьому ефективнішими є моделі для абсолютної врожайності, що вказує на переважний вплив поточних погодних умов на формування врожаю ярого ячменю, тоді як трендова компонента може його згладжувати.

В областях лісостепової зони в моделях абсолютної врожайності абсолютна похибка коливається в межах від 1,83 до 4,93 ц/га і є трохи вищою, ніж для моделей відносної врожайності. Стандартне відхилення для обох варіантів моделей в середньому перевищує 4 ц/га. Точність обох варіантів моделей в середньому близька до 87 %, а ефективність вища для моделей абсолютної врожайності, які можна рекомендувати використовувати в усіх областях, окрім Сумської, де найкращі результати дає модель відносної врожайності ярого ячменю.

Найбільші похибки прогнозу траплялися в роки з посухою в першій половині літа, адже в більшості областей дати прогнозу припадають на початок червня, що не дозволяє врахувати наступне погіршення погодних умов.

### Висновки

Аналіз моделювання врожайності ярого ячменю для областей степової та лісостепової зон України з використанням супутникових вегетаційних індексів та індексу блокування атмосфери показав високу прогностичну ефективність побудованих регресійних моделей, що робить їх перспективними для подальшого вдосконалення та розповсюдження на інші області України. Залучений набір предикторів дозволив обґрунтувати основні чинники, які впливають на формування врожаю, а саме: характер циркуляційних процесів атмосфери та ступінь посушливості в

період вегетації. Для прогнозування ярого ячменю можна рекомендувати використання моделей абсолютної врожайності, які є чутливішими до поточних погодних умов. Але в роки, коли спостерігається тенденція до виникнення або посилення посушливих явищ після дат складання прогнозу, доречним буде додатковий розрахунок за рівняннями відносної врожайності з урахуванням тренду, який допоможе скорегувати результати прогнозування.

\* \*

1. Антоненко В.С. Метеорологический мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в Украине с применением аэрокосмических методов. – К.: АртЭК, 2002. – 308 с.
2. Гребень А.С., Красовская И.Г. Анализ основных методик прогнозирования урожайности с помощью данных космического мониторинга, применительно к зерновым культурам степной зоны Украины // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 2 (54). – С. 170-180.
3. Клещенко А.Д., Найдина Т.А. Динамическая модель продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации и методы прогноза урожайности // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 12. – С. 88-98.
4. Коган Ф., Куссиль Н.Н., Адаменко Т.И. та ін. Сравнительный анализ результатов регрессионных и биофизических моделей в задаче прогнозирования урожайности озимой пшеницы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – № 1. – С. 215-227.
5. Колотий А.В. Регрессионные модели прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Украине // Индуктивне моделювання складних систем. – 2012. – Вип. 4. – С. 92-101.
6. Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 175 с.
7. Семенова І.Г. Використання вегетаційних індексів для моніторингу посух в Україні // Укр. гідрометеорологічний журнал. – 2014. – Вип. 14. – С. 43-52.
8. Семенова І.Г. Моделювання врожайності озимої пшениці в степовій зоні України з використанням вегетаційних індексів // Укр. гідрометеорологічний журнал. – 2014. – Вип. 15.
9. Gao B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58. – P. 257-266.
10. Dąbrowska-Zielińska K., Kogan F., Ciołkosz A., Gruszczynska M., Kowalik W. Modelling of crop growth conditions and crop yield in Poland using AVHRR-based indices // Int. J. Remote Sensing. – 2002. – Vol. 23, № 6. – P. 1109-1123.
11. Dąbrowska-Zielińska K., Ciołkosz A., Malińska A., Bartold M. Monitoring of agricultural drought in Poland using data derived from environmental satellite images // Geoinformation Issues. – 2011. – Vol. 3, № 1 (3). – P. 87-97.
12. Kogan F.N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar orbiting satellite

- data // Bull. Amer. Met. Soc. – 1995. – Vol. 76, № 5. – P. 655-668.
13. Kogan F., Adamenko T., Kulbida M. Satellite-based crop production monitoring in Ukraine and regional food security // Use of satellite and in-situ data to improve sustainability. NATO science for peace and security, series C: Environmental Security. – Springer Science+Business Media B.V, 2011. – P. 99-104.
  14. Semenova I.G. Regional atmospheric blocking in the drought periods in Ukraine // Journal of Earth Science and Engineering. – V. 3 (5). – 2013. – P. 341-348.
  15. Singh R.P., Roy S., Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India // Int. J. Remote Sensing. – 2003. – Vol. 24, № 22. – P. 4393-4402.

Одеський державний екологічний університет

**Семёнова И.Г.**

**Моделирование урожайности ярового ячменя в Украине с использованием спутниковых вегетационных индексов**

*Рассмотрены результаты численных экспериментов по моделированию урожайности ярового ячменя по областям Украины с помощью регрессионных моделей, построенных с использованием спутниковых вегетационных индексов NDVI и NDWI, а также производных от них. В моделях использовался региональный индекс блокирования атмосферы для учета циркуляционных условий в период вегетации. Верификация моделей показала удовлетворительную точность прогнозирования урожайности с высокой заблаговременностью.*

**Ключевые слова:** вегетационный индекс, индекс блокирования атмосферы, яровой ячмень, урожайность.

**Semenova I.G.**

**Modelling of spring barley yields in Ukraine using satellite-based vegetation indices**

*The results of numerical experiments for modelling of spring barley yields over areas of Ukraine using satellite-based vegetation indices NDVI and NDWI as well as derived indexes, were considered. In models used the regional blocking index, which considers the atmospheric circulation conditions during the growing season. Verification of the models showed satisfactory prediction accuracy with the high lead time.*

**Keywords:** vegetation index, atmospheric blocking index, spring barley, yields.