

## МОДЕЛЮВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ ЯРИХ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ДЗЗ

**В. Кравчук**, д-р техн. наук, професор, член-кор. НААН України,  
**М. Новохацький**, канд. с.-г. наук, **Н. Сердюченко**, канд. географ. наук,  
*УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого*  
**Р. Сайдак**, *ІВПіМ НААН*

*Представлено результати моделювання середньообласного рівня врожайності ярого ячменю в центральному лісостепу України з використанням NDVI.*

**Ключові слова:** *прогноз врожайності, агрометеорологічні умови.*

Прогнози врожайності зернових культур, що складаються в період вегетації рослин (здебільшого кінцевий прогноз складається в період колосіння), ґрунтуються на стані посівів і агрометеорологічних умовах, що склалися до цього часу. Показниками стану посівів зазвичай є кількість продуктивних стебел, висота рослин, кількість колосків в колосі та інші елементи продуктивності рослин [2-4]. У разі відсутності цих показників, за основу для оцінювання стану посівів можна взяти оброблені дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1, 6-9], наприклад нормалізовано-диференційований вегетаційний індекс NDVI [10, 11].

Прогноз урожайності сільськогосподарських культур може передбачати оцінку майбутнього врожаю в окремому господарстві або в середньому по адміністративно-територіальній одиниці. Однак найчастіше розробляються прогнози середньообласних рівнів врожаїв польових культур.

*Мета* дослідження – моделювання середньообласних рівнів врожайності ярих зернових культур (на прикладі ярого ячменю) в центральному лісостепу України (на прикладі Черкаської області) з використанням даних ДЗЗ, в якості яких було взято NDVI.

Розрахунки проводили на основі вхідних даних (урожайності, агрометеорологічних показників, даних ДЗЗ) за 2000 – 2011 роки.

На першому етапі авторами проведено кореляційний аналіз відносної врожайності ярого ячменю з агрометеорологічними даними в подекадному розрізі.

Під відносною (агрометеорологічною) врожайністю розуміється її відхилення в певний період (рік) від загальної тенденції:

$$U_v = U_f / U_{tr}, \quad (1)$$

де  $U_v$  – відносна врожайність;

$U_f$  – фактична врожайність, ц/га;

$U_{tr}$  – урожайність за трендом.

Врожайність за трендом розраховували, використовуючи поліном першого порядку:

$$U_{tr} = 25,961 + 0,2881x \quad (2)$$

де  $x$  – порядковий номер року.

Динаміку фактичної врожайності ярого ячменю наведено на рисунку 1.

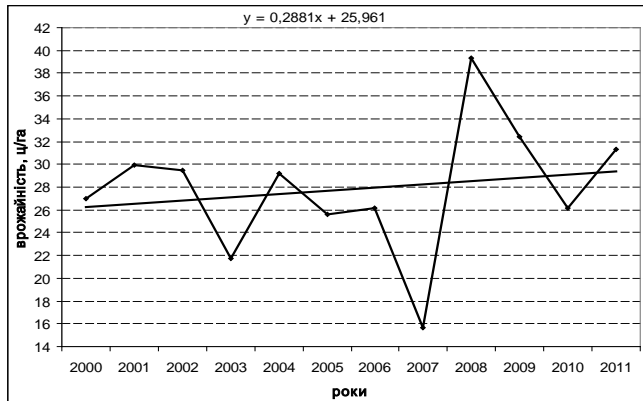


Рисунок 1 – Динаміка фактичної врожайності ярого ячменю та її тенденції на прикладі Черкаської області

За допомогою рівняння (1) нестационарний ряд урожайності ми перетворили у стаціонарний, тобто ми позбавились тренду. В результаті розрахунків за формулою 1 отримуємо відносну врожайність ярого ячменю (рис. 2).

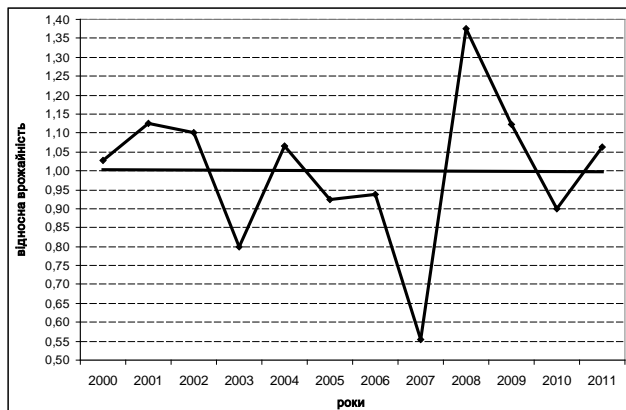


Рисунок 2 – Відносна врожайність ярого ячменю за 2000 – 2011 роки

В подальшому, для спрощення досліджень скористаємося особливостями нормального закону розподілу, пересвідчившись у тому, що гіпотеза про нього не спростовується.

Перевірку нормальності розподілу фактичного ряду врожайності ярого ячменю проводили за критерієм Шапіро-Уїлка [5]. Цей критерій, в більшості випадків, є одним з найбільш надійних.

Статистику  $W$  розраховують за формулою:

$$W = b^2 / S^2 \quad (3)$$

Звідси:

$$S^2 = (x_i - \mu)^2; \quad (4)$$

$$b = a_{n-i+1}(x_{n-i+1} - x_i) \quad (5)$$

де  $\mu$  – середнє вибірки;

$a_{n-i+1}$  – константи.

Чим ближче  $W$  до 1, тим меншою є вірогідність помилково прийняти гіпотезу про нормальність розподілу.

Розрахунки перевірки нормальності розподілу проводили за допомогою програми StatPlus 3.5.0.

Результати аналізу наведено нижче.

*Ряд - урожайність ярого ячменю, ц/га.*

*Розмір вибірки – 12 років*

<i>Критерій Шапіро-Уїлка</i>	Значення статистики(W)	Рівень значимості	Висновок (5%)
		0,95	0,709

Статистичний аналіз відносної врожайності ярого ячменю свідчить, що вона має нормальний розподіл з коефіцієнтом варіації 21 %. Показники статистики фактичної та відносної врожайності наведено в табл. 1. Кореляційний аналіз відносної врожайності ярого ячменю проводили із стандартними агрометеорологічними показниками, що зафіксовані в базі даних MARS – середньодекадна температура повітря, декадна сума опадів, подекадний кліматичний водний баланс [12].

**Таблиця 1 – Основні статистичні показники фактичної та відносної врожайності ярого ячменю за 2000 – 2011 роки**

Урожайність	Статистичні показники					
	Середнє	Станд. відхил.	Мін.	Макс.	Дисп.	Коеф. варіації
Фактична, ц/га	27,8 $\pm$ 1,7	5,8	15,7	39,3	33,6	20,8
Відносна	1,0 $\pm$ 0,06	0,2	0,56	1,38	0,04	20,2

Результати кореляційного аналізу за період вегетації ярого ячменю наведено в табл. 2. Дані кореляційного аналізу свідчать про низький зв'язок (в більшості випадків) вказаних метеорологічних параметрів з відносною

продуктивністю ярого ячменю. Лише з температурою повітря перших двох декад березня даний зв'язок виявився вище середнього рівня, що може бути використано для оцінювання можливої продуктивності культури в передпосівний період.

Таблиця 2 – Кореляційний аналіз відносної врожайності ярого ячменю з агрометеорологічними показниками

Місяць	Декада	Метеорологічні показники		
		Температура повітря	Сума опадів	Кліматичний водний баланс
Березень	I	<b>0,74</b>	-0,23	-0,19
	II	<b>0,73</b>	0,17	0,12
	III	0,45	0,29	0,36
Квітень	I	0,53	0,47	0,27
	II	0,25	0,22	0,13
	III	0,22	0,44	0,43
Травень	I	-0,43	0,20	0,38
	II	-0,50	0,38	0,52
	III	-0,49	0,15	0,33
Червень	I	-0,21	0,15	0,16
	II	0,14	0,18	0,21
	III	0,13	0,14	0,11
Липень	I	0,06	0,33	0,48
	II	0,16	0,13	0,16
	III	0,02	0,19	0,15

Кореляційний аналіз NDVI з відносною врожайністю ярого ячменю засвідчив досить тісний статистичний зв'язок. Для цього використано значення NDVI за 2000 – 2011 роки, дані супутника TERRA MODIS, (роздільна здатність знімків 250 метрів) зі стандартною маскою посівів (Crop Mask Standard (MOD12) і Water Mask Standard (MOD12)). Дані – Database from the Global Agriculture Monitoring (GLAM), періодичність знімків – 15 днів. Результати кореляційного аналізу наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Кореляційний аналіз відносної врожайності ярого ячменю  $U_v$  з нормалізовано-диференційованим вегетаційним індексом (NDVI)

	NDVI за період:						
	21.03-5.04	6.04-21.04	22.04-7.05	8.05-23.05	24.05-8.06	9.06-24.06	25.06-10.07
$U_v$	0,94	0,96	0,74	0,61	0,64	0,35	0,20

Дані таблиці 3 свідчать про тісний зв'язок NDVI з урожайністю ячменю за період 21 березня – 21 квітня, середній – 22 квітня – 8 червня і низький – 24 червня – 10 липня.

Ретроспективні ряди даних NDVI мають практично стаціонарний характер і нормальний розподіл. Їх статистичні характеристики наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Основні статистичні показники NDVI за 2000 – 2011 роки

Період	Статистичні показники						
	Крит. Шапіро-Уїлка	Середнє	Станд. відх.	Мін.	Макс.	Дисп.	Коеф. варіац.
21.03-5.04	0,92	0,353±0,013	0,044	0,299	0,447	0,0019	12,5
6.04-21.04	0,96	0,402±0,017	0,057	0,303	0,515	0,0033	14,2
22.04-7.05	0,91	0,597±0,021	0,074	0,411	0,619	0,0054	14,5
8.05-23.05	0,98	0,609±0,012	0,043	0,535	0,692	0,0018	7,0
24.05-8.06	0,94	0,674±0,011	0,037	0,615	0,729	0,0014	5,5
9.06-24.06	0,94	0,707±0,011	0,038	0,653	0,764	0,0014	5,4
25.06-10.07	0,87	0,706±0,011	0,037	0,627	0,742	0,0014	5,2

Коефіцієнт варіації фактичної і відносної врожайності ячменю (без 2007 року) становить 15,8 – 15,5 %.

Таким чином, в процесі моделювання врожайності ярого ячменю в якості незалежної змінної (вхідної) ми використали значення NDVI. Послідовність моделювання та математичні залежності наведено нижче.

Сівба – сходи – 3 й листок.

В якості вхідної змінної використано значення NDVI за період 21 березня – 5 квітня. Залежність відносної врожайності ячменю від значень NDVI за вказаний період носить наведено на рис. 3.

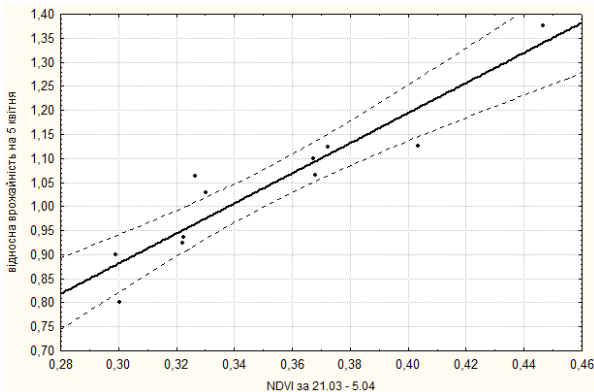


Рисунок 3 – Залежність відносної врожайності ярого ячменю від значень NDVI за період 21 березня – 5 квітня

Як видно з рис. 3, дана залежність має прямолінійний характер, тобто максимальному значенню NDVI відповідає максимальна продуктивність культури, і навпаки, мінімальному – мінімальна відносна врожайність:

$$U_{y5,04} = -0,0576 + 3,1304x_{NDVI21.03-5.04} \quad (6)$$

$$(r^2 = 0,8750; r = 0,9354, p = 0,00002)$$

де  $U_{y5,04}$  – відносна врожайність станом на 5 квітня;

$x_{NDVI21.03-5/04}$  – NDVI за період 21 березня – 5 квітня.

Залежність дійсна за відносної врожайності від 0,80 до 1,38 та значеннях NDVI за 21.03 – 5.04 від 0,287 до 0,405 (2007 рік виключений). В 73 % випадків похибка прогнозу в цей період не перевищує 1,5 ц/га (табл. 5).

Таблиця 5 – Імовірність похибки прогнозу врожайності ярого ячменю станом на 5 квітня

Похибка, $\pm$ ц/га	Імовірність, %	Похибка $\pm$ , %	Імовірність, %
1,0	64	5	73
1,5	73	10	100
Більше 1,5 (максимум 2,9)	100	15	-

Міжрічну динаміку фактичної та розрахункової врожайності ярого ячменю станом на 5 квітня наведено на рисунку 4.

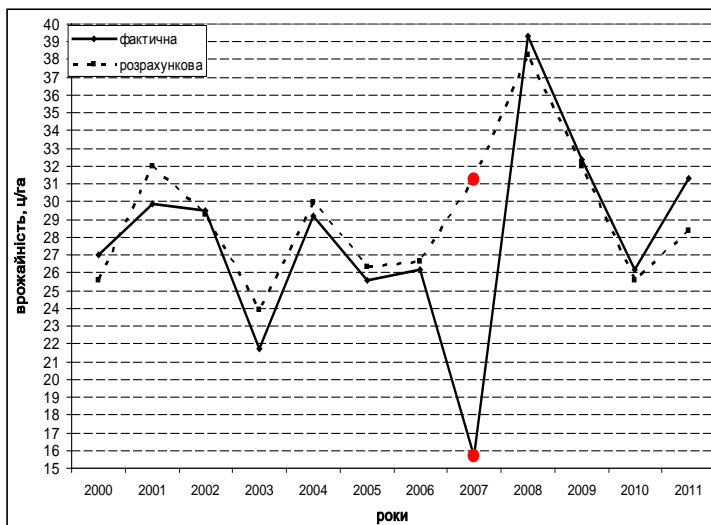


Рисунок 4 – Динаміка фактичної та розрахункової врожайності ярого ячменю станом на 5 квітня

Сходи – 3 й листок- куціння.

В якості вхідної змінної використано значення NDVI за період 6 квітня – 21 квітня. Залежність відносної врожайності ячменю від значень NDVI за вказаний період також носить прямолінійний характер (рис. 5):

$$U_{v21.04} = 0,0297 + 2,5429x_{NDVI6.04-21.04} \quad (7)$$

$$(r^2 = 0,9267; r = 0,9626, p = 0,000002)$$

де  $U_{v5.04}$  – відносна врожайність станом на 21 квітня;

$x_{NDVI21.03-5/04}$  – NDVI за період 6 квітня – 21 квітня.

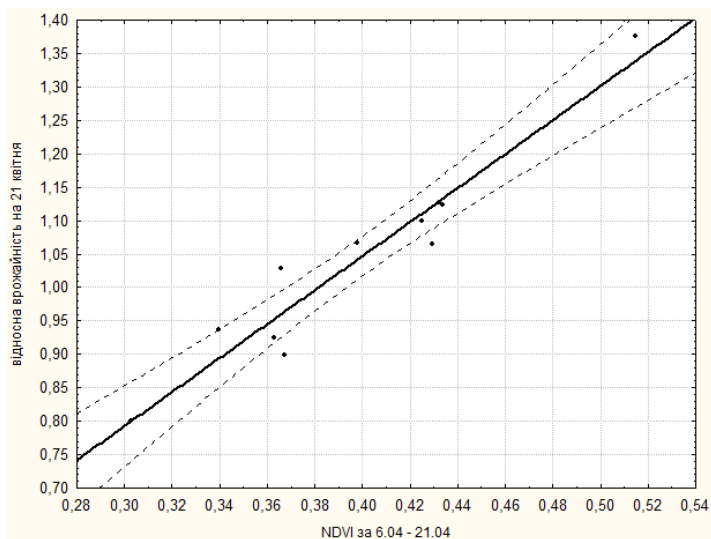


Рисунок 5 – Залежність відносної врожайності ярого ячменю від значень NDVI за період 6 квітня – 21 квітня

Залежність (7) дійсна при відносній врожайності від 0,80 до 1,38 та значеннях NDVI за 6.04 – 21.04 від 0.325 до 0.490 (2007 рік виключено). В 73% випадків похибка прогнозу в цей період не перевищує 1,5 ц/га, тобто аналогічна попередньому періоду, однак максимальна похибка знижується до 1,8 ц/га (табл. 6).

Таблиця 6 – Імовірність похибки прогнозу врожайності ярого ячменю станом на 21 квітня

Похибка, $\pm$ ц/га	Імовірність, %	Похибка $\pm$ , %	Імовірність, %
1,0	55	5	73
1,5	73	10	100
Більше 1,5 (максимум 1,8)	100	15	-

Кущіння – початок виходу в трубку.

В якості вхідної змінної використано значення NDVI за період 22 квітня – 7 травня і їх різниця ( $NDVI_{7.05} - NDVI_{21.04}$ ). Залежність відносної врожайності ячменю від значень NDVI за вказаний період відрізняється від попередніх. Вона описується двофакторним регресійним рівнянням першого порядку (рис. 6):

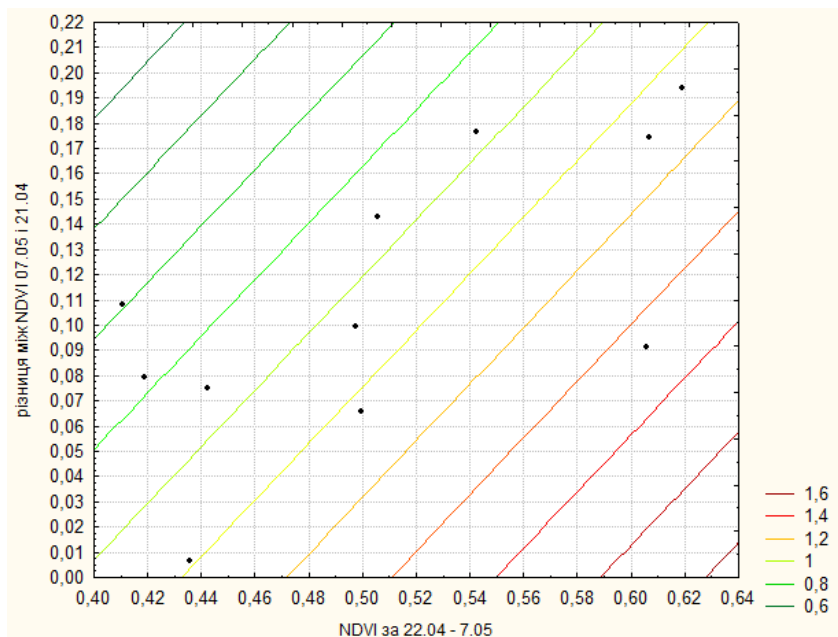


Рисунок 6 – Залежність відносної врожайності ярого ячменю від значень NDVI за період 21 квітня – 7 травня і його приросту за даний період

$$U_{7.05} = -0,0107 + 2,5666x_{NDVI_{21.04-7.05}} - 2,2851y_{NDVI_{7.05-21.04}} \quad (8)$$

$(R(z/xy) = 0,9682, p = 0,00002)$

де  $U_{7.05}$  – відносна врожайність станом на 7 травня;

$x_{NDVI_{21.04-7.05}}$  – NDVI за період 21 квітня – 6 травня;

$y_{NDVI_{7.05-21.04}}$  – різниця між NDVI станом на 7 травня і 21 квітня.

З біологічної точки зору, негативний вплив значних приростів NDVI на відносну врожайність ячменю пояснюється швидкими темпами розвитку культури, які зазвичай при цьому носять вегетативний тип, що, незважаючи на зростання біомаси, обмежує рівень закладки потенційної продуктивності.

Множинний коефіцієнт кореляції  $R(z/xy)$  даної залежності становить 0,9682. В 91 % випадків похибка прогнозу в цей період не перевищує 1,5 ц/га, а максимальна похибка знизилась до 1,6 ц/га (табл. 7).



Таблиця 7 – Імовірність похибки прогнозу врожайності ярого ячменю станом на 7 травня

Похибка, $\pm$ ц/га	Імовірність, %	Похибка $\pm$ %	Імовірність, %
1,0	64	5	82
1,5	91	10	100
Більше 1,5 (максимум 1,6)	100	15	-

Вихід в трубку-початок колосіння.

В якості вхідної змінної використано значення NDVI за період 8 травня – 23 травня і їх різниця ( $NDVI_{23.05} - NDVI_{21.04}$ ). Залежність відносної врожайності ячменю від значень NDVI за вказаний період аналогічна попередній. Вона описується двофакторним регресійним рівнянням першого порядку (рис. 7):

$$U_{v23.05} = 0,0675 + 2,5666x_{NDVI8.05-23.05} - 2,5871y_{NDVI r23.05-21.04} \quad (9)$$

$(R(z/xy) = 0,9628, p = 0,00003)$

де  $U_{v23.05}$  – відносна врожайність станом на 23 травня;

$x_{NDVI8.05-23.05}$  – NDVI за період 8 травня-23 травня;

$y_{NDVI r23.05-21.04}$  – різниця між NDVI станом на 23 травня і 21 квітня.

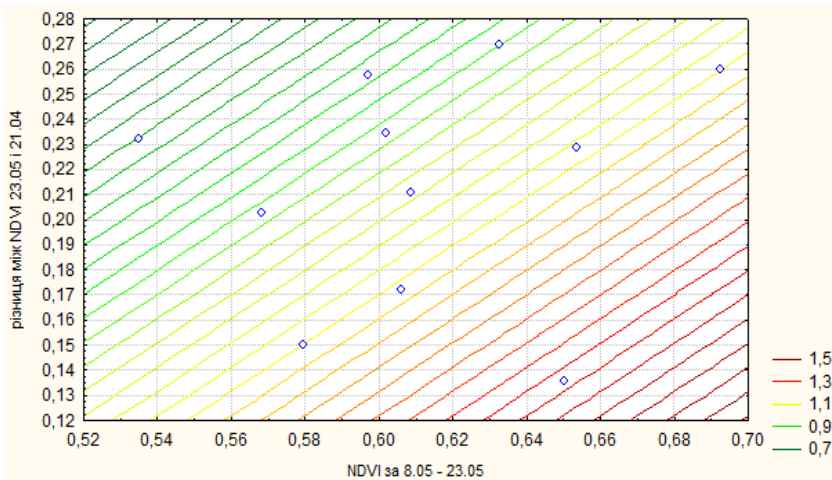


Рисунок 7 – Залежність відносної врожайності ярого ячменю від значень NDVI за період 8 травня-23 травня і його приросту за даний період

З біологічної точки зору, відемний вплив значних приростів NDVI на відносну врожайність ячменю також пояснюється швидкими темпами розвитку культури, які обмежують рівень реалізації потенційної продуктивності (зниження озерненості колоса). Множинний коефіцієнт кореляції  $R(z/xy)$  даної залежності становить 0,9628. В 73 % випадків

похибка прогнозу в цей період не перевищує 1,5 ц/га, а максимальна похибка – 1,9 ц/га (табл. 8).

Таблиця 8 – Імовірність похибки прогнозу врожайності ярого ячменю станом на 23 травня

Похибка, <u>+</u> ц/га	Імовірність, %	Похибка <u>±</u> %	Імовірність, %
1,0	64	5	73
1,5	73	10	100
Більше 1,5 (максимум 1,9)	100	15	-

### Колосіння.

В якості вхідної змінної використано значення NDVI за період 23 травня – 8 червня і їх різниця ( $NDVI_{6.06} - NDVI_{21.04}$ ). Залежність відносної врожайності ячменю від значень NDVI за вказаний період аналогічна двом попереднім (рис. 7). Вона описується двофакторним регресійним рівнянням першого порядку:

$$U_{v8.06} = -0,3855 + 3,0474x_{NDVI23.05-8.06} - 2,2759y_{NDVI r8.06-21.04} \quad (10)$$

$$(R(z/xy) = 0,9768, p = 0,000004)$$

Де  $U_{v8.06}$  – відносна врожайність станом на 8 червня;

$x_{NDVI23.05-8.06}$  – NDVI за період 23 травня-8 червня;

$y_{NDVI r8.06-21.04}$  – різниця між NDVI станом на 8 червня і 21 квітня.

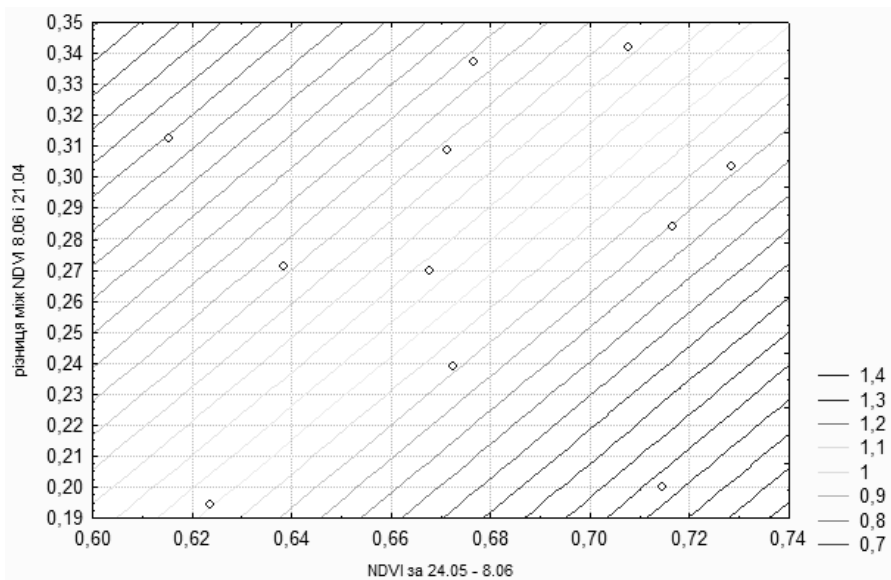


Рисунок 8 – Залежність відносної врожайності ярого ячменю від значень NDVI за період 23 травня-8 червня і його приросту за даний період

Множинний коефіцієнт кореляції  $R(z/xy)$  даної залежності становить 0,9768. Точність прогнозу врожайності ячменю на вказаний період є найвищою і не перевищує 1,5 ц/га, або 5 % (табл. 9).

Таблиця 9 – Імовірність похибки прогнозу врожайності ярого ячменю станом на 8 червня

Похибка, $\pm$ ц/га	Імовірність, %	Похибка $\pm$ %	Імовірність, %
1,0	73	5	100
1,5	100	10	-
Більше 1,5 (максимум 1,3)	-	15	-

Динаміку фактичної і розрахункової врожайності ярого ячменю для Черкаської області станом на 8 червня наведено на рис. 8.

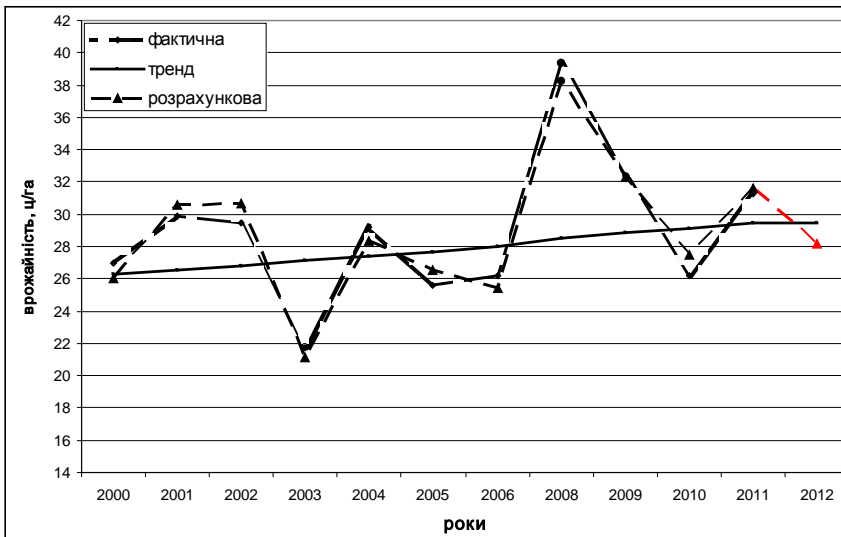


Рисунок 9 – Динаміка фактичної та розрахункової врожайності ярого ячменю станом на 8 червня

Вхідні значення NDVI за періодами вегетації культури наведено в таблиці 10.

Таблиця 10 – Вхідні значення NDVI за календарні періоди  
вегетації ярого ячменю

Роки	Періоди				
	21.03-5.04	6.04-21.04	22.04-7.05	8.05-23.05	24.05-8.06
2000	0,330	0,366	0,542	0,568	0,708
2001	0,403	0,433	0,607	0,692	0,716
2002	0,367	0,425	0,619	0,654	0,729
2003	0,300	0,303	0,411	0,535	0,615
2004	0,368	0,398	0,497	0,609	0,668
2005	0,322	0,363	0,506	0,633	0,671
2006	0,323	0,340	0,419	0,597	0,677
2007	0,372	0,448	0,505	0,585	0,658
2008	0,447	0,515	0,606	0,650	0,715
2009	0,372	0,434	0,499	0,606	0,673
2010	0,299	0,367	0,442	0,602	0,638
2011	0,327	0,430	0,436	0,580	0,624
2012	0,321	0,365	0,538	0,619	0,665

**Висновки.** Таким чином, NDVI може використовуватись для моделювання і прогнозування врожайності польових культур, що підтверджується високою точністю прогнозів на основі їх авторської перевірки. Окрім цього, NDVI неопосередковано може характеризувати агрометеорологічні умови за певними періодами вегетації рослин. Коефіцієнт кореляції значень NDVI з температурою повітря, опадами сягає у деякі періоди до 0,60 – 0,85.

### Література

1. Антоненко В.С., Гаценко Р.В. Оценка состояния посевов и прогноз урожайности озимой пшеницы в Украине по данным многоспектральной космической съемки // Наук. праці УкрНДГМІ, 2005. - Вип. 254. – С. 55–71.
2. Бондаренко С.Г. Моделирование динамики накопления биомассы при программировании урожаяев. Научные основы программирования урожаяев с.-х. культур. – М.: Колос, 1978. – С. 22–29.
3. Волкова Е. И. К вопросу прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур <http://nuwm.rv.ua/metods/asp/vd/v40127.doc>
4. Гуляев Б.И. Вопросы количественного описания ростовых функций растений // Физиология и биохимия культурных растений. – 1981. – т. 13. – №3. – С. 227–238.
5. Дубнер П.Н. Справочник по статистическим распределениям, 2000 <http://www.infoscope.forth.ru>
6. Кравчук В.І., Сердюченко Н.М. та ін. Основи методології моніторингу агроресурсів та прогнозування врожайності

сільськогосподарських культур за проектом MARS // Збірник наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. Вип. 13(27). – Кн. 2. – С. 3–14.

7. Куссуль Н., Ильин Н., Скакун С., Лавренюк А. Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности озимых культур Украины по спутниковым данным // International Book Series "Information Science and Computing" – С 103–109. [http://www.foibg.com/ibs\\_isc/ibs-03/IBS-03-p16.pdf](http://www.foibg.com/ibs_isc/ibs-03/IBS-03-p16.pdf)

8. Лялько В.І., Попов М.О. Стан та перспективи розвитку дистанційних методів дослідження Землі в Україні // Геологічний журнал. – 2011. – № 1. – С. 50–58.

9. Лялько В.І., Попов М.О., Федоровський О.Д. та ін. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування. К.: Наукова думка, 2006. – 357 с.

10. <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>

11. Huete, A., Justice C., and van Leeuwen W. Modis vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document. Version 3, 1999, 129 p. [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod13.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf)

12. MARS project, <http://www.marsop.info>

### ***Аннотация***

*Представлены результаты моделирования среднеобластного уровня урожайности ярового ячменя в центральной лесостепи Украины с использованием NDVI.*

### ***Summary***

*The results of simulation of the average regional level of the spring barley yield in the central steppe of Ukraine with NDVI using are presented.*