

АНАЛІЗ ТРАНСФОРМАЦІЇ АГРОЦЕНОЗІВ УКРАЇНИ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ЗА ДОПОМОГОЮ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ NDVI

Сайдак Р., канд. с.-г. наук, <https://orcid.org/0000-0002-0213-0496>

Майданович Н., канд. геогр. наук, <https://orcid.org/0000-0002-0361-8215>

УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Книш В., PhD агрономія

<https://orcid.org/0000-0002-3220-9883>

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН

Анотація

Мета дослідження полягає у проведенні системного статистичного аналізу багаторічної динаміки формування біомаси сільськогосподарських культур в Україні за показником нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) та встановленні кількісних закономірностей впливу ключових метеорологічних чинників на стан вегетації протягом двадцятирічного періоду (2001-2020 рр.). Актуальність роботи зумовлена необхідністю адаптації агротехнологій до глобальних змін клімату та розробки точних прогностичних моделей продуктивності посівів на основі даних дистанційного зондування.

Методологія дослідження базується на використанні даних системи Global Agriculture Monitoring (GLAM), сформованих на основі 8-денних композитів NDVI супутників MODIS (Terra та Aqua). Створена ретроспективна база даних охоплює 24 адміністративні області України і містить близько 23 тисяч записів. Для оцінки багаторічних тенденцій застосовано трендовий аналіз із використанням лінійних регресійних моделей. Комплексний вплив метеоумов оцінювався шляхом розрахунку коефіцієнтів кореляції та побудови множинних регресійних залежностей між значеннями NDVI та показниками середньомісячної температури повітря, кількості опадів і кумулятивного кліматичного водного балансу (КВБ).

Результати. Установлено, що в межах річного циклу максимальні значення NDVI (0,61-0,67) досягаються у період із травня по липень, причому найбільш інтенсивне наростання біомаси (42%) відбувається у квітні-травні. Багаторічний аналіз виявив стійку позитивну тенденцію зростання індексу в холодний період року (0,42-0,55% на рік), водночас у літні місяці темпи зростання – мінімальні. Зафіксовано суттєве зниження NDVI у вересні-жовтні (на 13,9-15,6% за 20 років), що пояснюється зміщенням строків сівби озимих і прискореним дозріванням культур через потепління. Просторовий аналіз підтвердив глибоку зональну диференціацію: степова зона характеризується найнижчим потенціалом біомаси (0,47-0,66) та критично високою міжрічною варіабельністю (32-50%), що у 4-5 разів перевищує показники Полісся. Виявлено інерційний характер впливу температурного режиму: температура поточного місяця найбільш вагомо корелює зі станом рослинності у наступному періоді (r досягає 0,80 у березні-квітні).

Висновки. Дистанційний моніторинг за показником NDVI об'єктивно відображає трансформацію агроценозів України під дією кліматичних змін. Доведено, що комплексне врахування температурного режиму та кумулятивного водного балансу дає змогу прогнозувати стан посівів із високою точністю (множинний коефіцієнт кореляції $R = 0,85$). Отримані результати є науковим підґрунтям для оптимізації систем зрошення та впровадження методів кліматично орієнтованого сільського господарства в найбільш вразливих південних регіонах України.

Ключові слова: NDVI, дистанційне зондування, біомаса посівів, MODIS, кліматичний водний баланс, кореляційний аналіз, динаміка вегетації, температурний режим, опади, моніторинг посівів.



Вступ. Глобальні зміни клімату та зростання антропогенного навантаження на агросферу створюють нові виклики для забезпечення світової продовольчої безпеки [Wijerathna-Yapa & Pathirana, 2022; Toromade et al., 2024]. У таких умовах упровадження систем високоточного дистанційного моніторингу посівів стає критично важливою складовою сучасного агропромисловництва [Weiss et al., 2020]. Серед численних показників дистанційного зондування Землі найбільш поширеним і валідованим інструментом оцінки стану біомаси на глобальному рівні залишається нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) [Xue & Su, 2017; Lebrini et al., 2020]. Його ефективність у відображенні щільності та фізіологічного стану рослинного покриву підтверджена численними міжнародними дослідженнями в галузі екології та агрономії [Becker-Reshef et al., 2020; Sánchez et al., 2020; Li et al., 2023].

Такі сучасні системи моніторингу, як Global Agriculture Monitoring (GLAM) надають доступ до тривалих ретроспективних рядів даних супутників MODIS, що дає змогу аналізувати просторово-часову динаміку вегетації у взаємозв'язку з метеорологічними чинниками [Becker-Reshef et al., 2020]. Світовий досвід свідчить про стійкий тренд до використання Big Data для прогнозування врожайності [Alahmad et al., 2023; Bharadiya et al., 2023], однак для України як одного з ключових гравців на світовому ринку зерна це питання має особливе стратегічне значення. Кліматичні зміни останніх десятиліть призвели до зміщення агрокліматичних зон і трансформації гідротермічного режиму, що безпосередньо впливає на темпи накопичення біомаси сільськогосподарськими культурами.

Не зважаючи на значну кількість напрацювань у сфері дистанційного зондування, залишаються недостатньо вивченими питання регіональної інерційності відгуку рослинності на температурні аномалії та дефіцит вологи в різних природно-кліматичних зонах України. Зокрема,

потребує деталізації статистичний зв'язок між NDVI та кумулятивним кліматичним водним балансом для короткострокового прогнозування стану посівів у критичні фази розвитку.

Метою дослідження є проведення комплексного статистичного та регресійного аналізу багаторічної (2001-2020 рр.) просторово-часової динаміки формування біомаси посівів України за показником NDVI, а також кількісна оцінка інерційного впливу гідротермічних факторів (температурного режиму та кліматичного водного балансу) на стан вегетації для розробки прогностичних моделей і систем прийняття рішень щодо оптимізації вологозабезпечення агроценозів в умовах зміни клімату.

Актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю кількісної оцінки впливу метеофакторів на динаміку NDVI для розробки систем підтримки ухвалення рішень щодо адаптації агротехнологій. Практичне значення роботи полягає у встановленні закономірностей, що дають змогу оптимізувати вологозабезпечення та прогнозувати продуктивність агроценозів в умовах мінливого клімату.

Методи та матеріали. Робоча гіпотеза дослідження ґрунтується на припущенні, що динаміка вегетаційного індексу NDVI на території України значною мірою детермінована змінами гідротермічного режиму, причому вплив метеорологічних чинників (температури та опадів) має виражений регіональний та інерційний характер. Об'єктом дослідження є процеси формування біомаси сільськогосподарських культур у 24 адміністративних областях України протягом 20-річного періоду (2001-2020 рр.).

Джерела даних і методика формування вибірки. Інформаційною базою роботи стали дані дистанційного зондування Землі, отримані через систему Global Agriculture Monitoring [GIMMS, 2025]. Для аналізу використано 8-денні композиції NDVI, сформовані на основі даних спектрорадіометрів MODIS супутників Terra (спостереження з 2000 р.) та Aqua (з

2002 р.) [Oak Ridge ...,2018; Skakun et al., 2018]. Використання часових композитів дає змогу мінімізувати вплив хмарності й атмосферних завад на результати моніторингу. Ретроспективна база даних містить близько 23 тисяч записів, що охоплюють значення індексу станом на останню декаду кожного місяця. Для забезпечення релевантності вибірки застосовано динамічну маску сільськогосподарських угідь, що дало змогу виключити вплив лісової та селітебної рослинності на усереднені показники областей.

Багаторічна динаміка стану посівів оцінювалася за допомогою трендового аналізу. Для кожної часової серії побудовано лінійну регресійну модель виду:

$$y = a + bt,$$

де y – розрахункове значення NDVI;

a – середній початковий рівень ознаки;

b – середній абсолютний приріст (коєфіцієнт тренду);

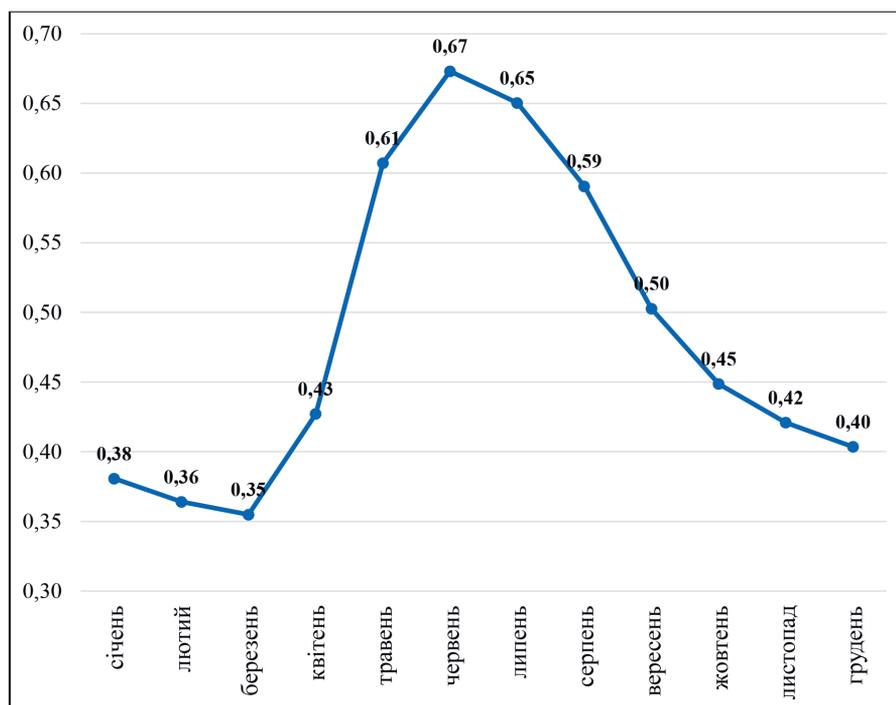
t – часовий інтервал (роки).

Окрім абсолютних змін, розраховувалися відносні показники приросту/зниження індексу у відсотках до середнього багаторічного рівня.

Кореляційний аналіз виконано для встановлення зв'язків між NDVI та метеорологічними параметрами: середньомісячною температурою повітря, сумою опадів і кліматичним водним балансом (КВБ). Особлива увага приділена розрахунку кумулятивного КВБ (наростаючим підсумком), що дає змогу оцінити накопичений дефіцит або надлишок вологи. Для комплексної оцінки впливу теплового та водного режимів застосовано метод множинної регресії, де залежною змінною виступало значення NDVI, а незалежними – температура та кумулятивний КВБ.

Результати. Результати аналізу внутрішньорічної динаміки середньомісячних значень NDVI за 2001-2020 рр. загалом по Україні свідчать, що його найбільша величина 0,61-0,67 (з урахуванням маски посівів) спостерігається у травні-липні (рис. 1). З початку весняного сезону і до кінця червня значення NDVI зростає від 0,35 до 0,67. Темпи зростання за цей період є такими: березень-квітень – 0,08 абсолютних одиниць, або 23%; квітень-травень – 0,18, або 42%; травень-червень – 0,06, або 10%. З липня і до кінця вегетації більшості польових культур – вересня середнє значення NDVI поступово знижується до 0,50, або на 25% порівняно з максимальним рівнем у червні. Стрімке зростання NDVI в квітні – травні відповідає найбільш активному періоду формування вегетативної маси більшості польових культур, що опосередковано підтверджує об'єктивність зазначеного показника як оцінки стану розвитку рослин.

Щодо оцінки річної динаміки NDVI за 2001-2020 рр. слід відмітити, що його загальна тенденція в більшості місяців спрямована на зростання. Однак найвищі темпи збільшення спостерігаються протя-



Рисунки 1 – Внутрішньорічна динаміка середньомісячних значень NDVI в цілому по Україні за 2001-2020 рр.

Таблиця 1 – Показники оцінки середньомісячної динаміки NDVI за 2001-2020 рр. в цілому по Україні

Період	Рівняння тренду	Середнє	Коефіцієнт варіації	Приріст до середнього, %	
				%/рік	Всього
Січень	$y = 0,0016x + 0,3575$	0,38	7,5	0,42	8,4
Лютий	$y = 0,0018x + 0,3382$	0,36	8,3	0,49	9,9
Березень	$y = 0,0019x + 0,3282$	0,35	9,0	0,54	10,7
Квітень	$y = 0,0013x + 0,4061$	0,43	10,0	0,30	6,1
Травень	$y = 0,0001x + 0,6043$	0,61	5,8	0,02	0,3
Червень	$y = 0,0004x + 0,6671$	0,67	3,3	0,06	1,2
Липень	$y = 0,0019x + 0,6254$	0,65	5,1	0,29	5,8
Серпень	$y = 0,0005x + 0,5892$	0,59	4,5	0,08	1,7
Вересень	$y = -0,0035x + 0,5518$	0,50	5,9	-0,70	-13,9
Жовтень	$y = -0,0035x + 0,4941$	0,45	7,5	-0,78	-15,6
Листопад	$y = 0,0006x + 0,4088$	0,42	8,2	0,14	2,9
Грудень	$y = 0,0022x + 0,3668$	0,40	7,6	0,55	10,9

гом холодного періоду року – грудень-березень. За вказаний період щорічні темпи зростання відносно до середньої величини становлять від 0,42% в січні до 0,55%/рік у грудні (табл. 1). Загалом за 20-річний період середньомісячне значення NDVI за вказані періоди зросло на 8,4-10,9%.

Протягом травня, червня і серпня, незважаючи на те, що річна динаміка NDVI залишається позитивною, темпи його зростання є найнижчими і становлять лише 0,02-0,08% за рік, або 0,3-1,7% загалом за останні 20 років.

Однак незважаючи на найнижчі темпи зростання NDVI у зазначений період, він характеризується найвищою сталістю з коефіцієнтом варіації 3,3-5,8%, водночас у холодний період року – 7,5-9,0%.

Протягом вересня-жовтня річна динаміка NDVI за 2001-2020 рр. має негативну загальну тенденцію з щорічними темпами зниження 0,70-0,78%, або 13,9-15,6% в цілому за останні 20 років.

Зниження тенденції величини NDVI на кінець вегетації (рис. 2) найвіро-

гідніше може пояснюватися більш ранніми строками дозрівання польових культур у зв'язку зі збільшенням теплозабезпеченості та зміщенням строків сівби озимих на пізніші терміни. Водночас найвищі темпи зростання температурного режиму в січні, лютому та березні сприяли більш ранньому періоду початку вегетації та сівби ранніх культур і відповідно – найвищим темпам підвищення тенденції NDVI в цей період.

На початку вегетаційного періоду (в середньому за березень) у південних і лісостепових областях індекс стану біомаси посівів, незважаючи на більш ранні тер-

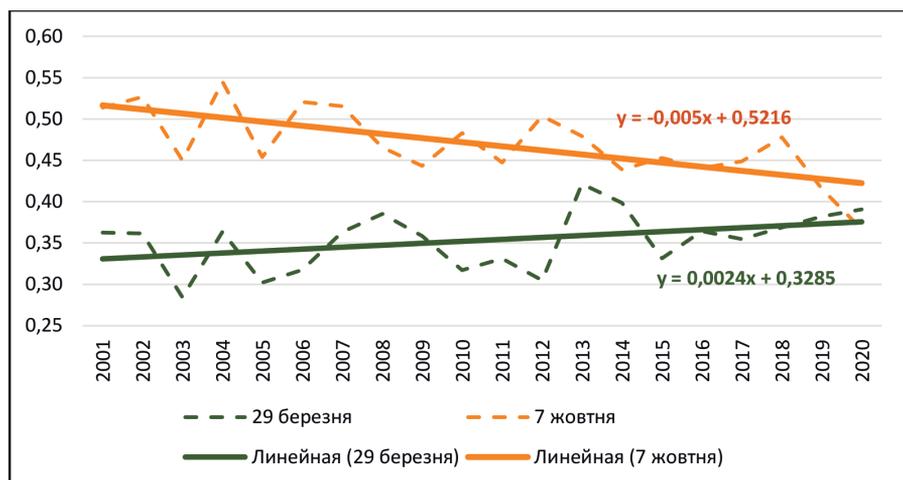


Рисунок 2 – Динаміка значень NDVI станом на кінець березня та початок жовтня загалом по Україні

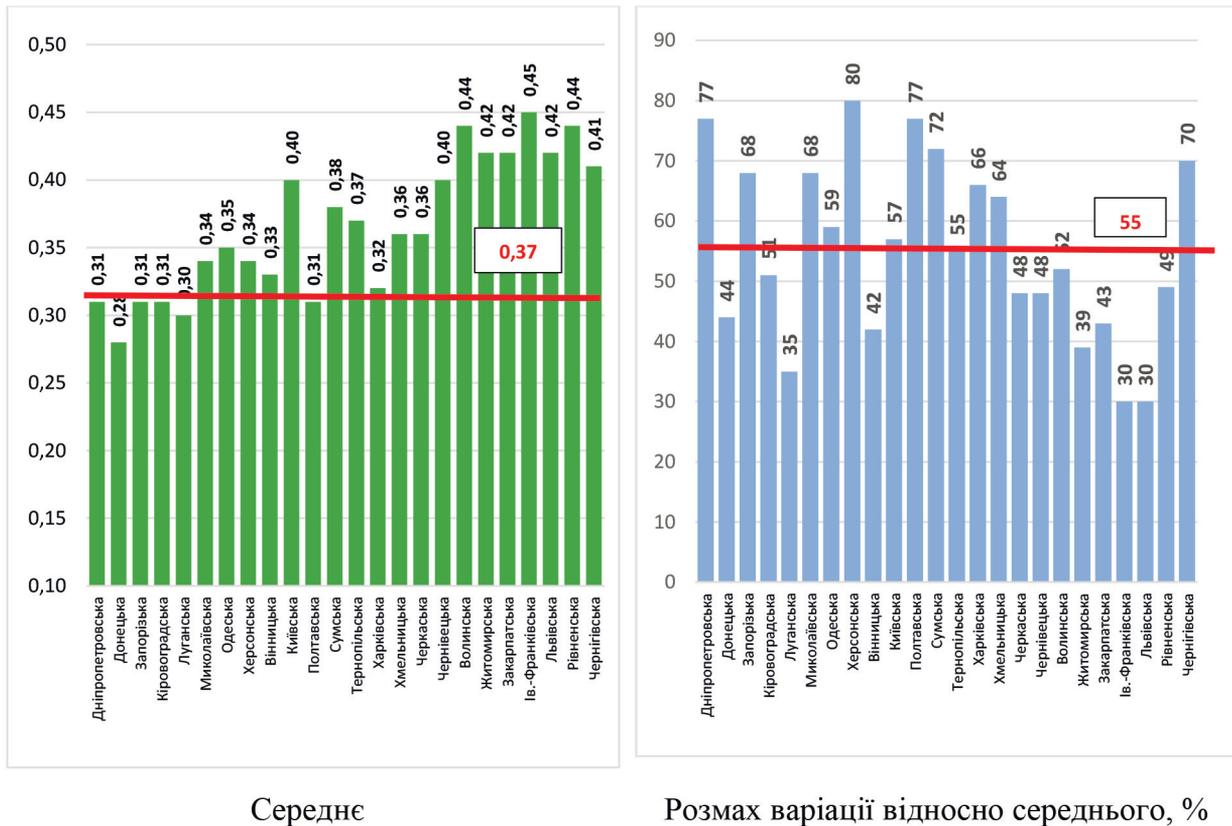


Рисунок 3 – Оцінка показників NDVI на початку вегетаційного періоду (березень) за 2001-2020 рр.

міни початку весняного періоду, є дещо нижчими порівняно з північними та особливо західними регіонами країни (рис. 3).

Відносно міжрічної сталості показників стану розвитку посівів у ранньо-весняний період слід відзначити їхню найвищу варіабельність порівняно з іншими періодами – від 30-39% до 72-80%. При цьому чітко виражених зональних закономірностей щодо розподілу зазначеного показника не виявлено. Це пояснюється, в основному, не лише гідротермічними особливостями розвитку посівів у цей період, а й коливанням термінів початку весняних робіт, розвитком озимих посівів у осінній період і відновленням весняної вегетації. У зв'язку з цим стан біомаси посівів на кінець березня важко віднести до критеріїв оцінки забезпеченості рослин природною вологою.

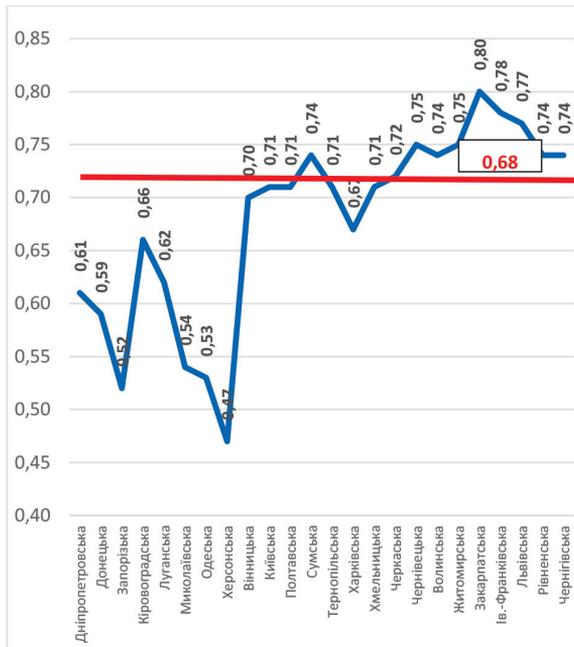
Однак уже на кінець квітня величина NDVI має чітко вражену зональну різницю, особливо за розмахом варіабельності. Так, на кінець вегетації ранніх культур у степових областях стан біомаси посівів, окрім найнижчої оцінки (0,47-0,66), харак-

теризується і найвищим розмахом варіабельності, який сягає 32-50% проти 8-11% на Поліссі та 17-25% у Лісостепу (рис. 4).

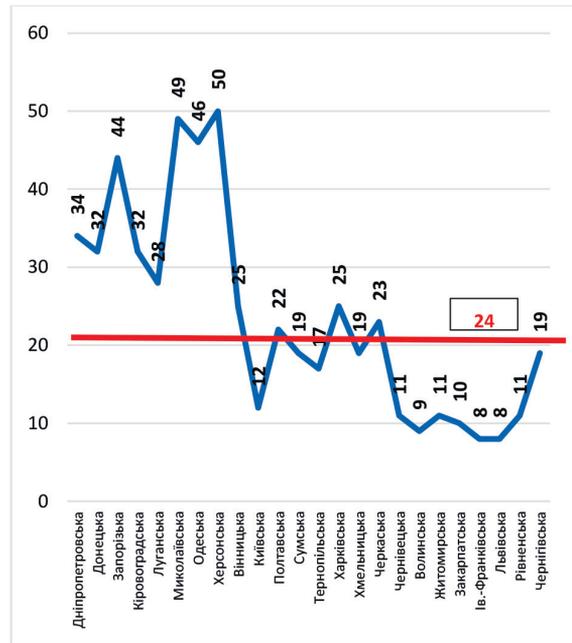
Аналогічна ситуація спостерігається на кінець вегетації пізніх культур (рис. 5).

Отже, результати попереднього аналізу стану посівів за показником дистанційного моніторингу NDVI свідчать про найнижчий потенціал біомаси посівів у зоні Степу з одночасним найвищим рівнем його коливань по роках, що зумовлено головним чином низьким і нестійким рівнем природного вологозабезпечення.

За результатами кореляційного аналізу середньомісячної температури повітря та місячної суми опадів з NDVI протягом січня-жовтня виявлено значимі високі коефіцієнти кореляції між зазначеними показниками. Так, коефіцієнт кореляції середньомісячної температури січня (t_1) з NDVI станом на кінець лютого становить 0,53. При цьому, якщо коефіцієнт кореляції середньомісячної температури лютого з NDVI за цей же період становить 0,66, то в березні він зростає до 0,80, а в квітні – до 0,78 (табл. 2).

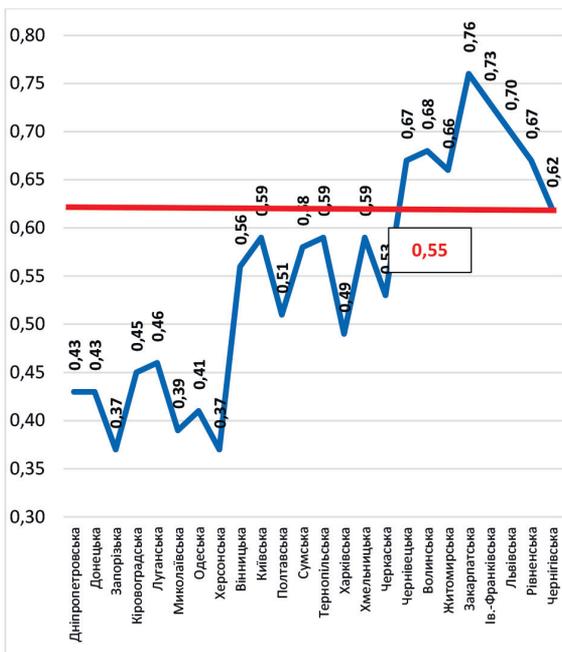


Середнє

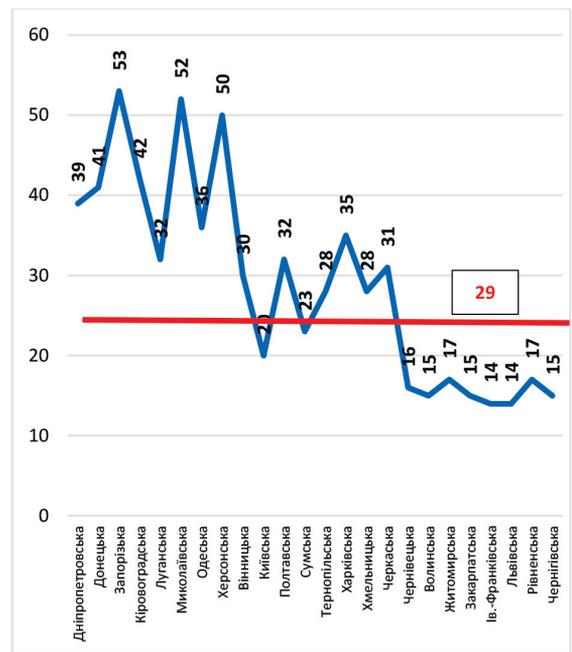


Розмах варіації відносно середнього, %

Рисунок 4 – Оцінка показників NDVI наприкінці вегетаційного періоду ранніх культур (липень) за 2001-2020 рр.



Середнє



Розмах варіації відносно середнього, %

Рисунок 5 – Оцінка показників NDVI наприкінці вегетаційного періоду пізніх культур (вересень) за 2001-2020 рр.

Таким чином, вплив температури повітря на значення NDVI у зимовий і ранньовесняний періоди проявляє певну інерційність, обумовлену більш вагомим впливом температурного режиму поточного місяця на стан біомаси рослинного

покриву у наступному місяці. Окрім того, у січні-березні спостерігається значуща позитивна кореляція між температурою повітря та NDVI, водночас у травні-серпні цей зв'язок має протилежний, негативний характер.

Таблиця 2 – Коефіцієнти кореляції місячних NDVI з середньомісячною температурою повітря

Місяць	Кореляція NDVI /температура							
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8
Січень	0,39							
Лютий	0,53	0,66						
Березень	0,28	0,80	0,76					
Квітень		0,78	0,73	0,25				
Травень			0,40	0,09	-0,70			
Червень				0,15	-0,35	-0,34		
Липень					-0,07	-0,21	-0,66	
Серпень						-0,51	-0,69	-0,40
Вересень							-0,22	-0,37
Жовтень								0,02

Таблиця 3 – Коефіцієнти кореляції NDVI з місячними сумами опадів

Місяці	Кореляція NDVI /опад							
	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8
Січень	-0,30							
Лютий	-0,36	0,20						
Бере- зень	-0,33	0,00	0,06					
Квітень		-0,10	0,12	0,39				
Травень			-0,12	0,60	0,51			
Червень				0,07	0,61	0,18		
Липень					0,17	0,14	0,70	
Серпень						0,12	0,32	0,60
Вере- сень							-0,15	0,62
Жовтень								0,15

Розрахунок коефіцієнтів кореляції між NDVI та місячними сумами опадів підтвердив відсутність значущого зв'язку у період січень-березень, що обумовлено достатніми запасами ґрунтової вологи в цей час (табл. 3). Починаючи з квітня кількість опадів починає позитивно впливати на NDVI травня з коефіцієнтом кореляції 0,60.

Сукупна кількість опадів у травні виявляє достовірний позитивний вплив на величину індексу NDVI як у цьому ж місяці, так і в наступному, що підтверджується значеннями коефіцієнтів кореляції 0,51 та 0,61 відповідно. Найвищу силу

позитивного зв'язку між кількістю опадів і значеннями NDVI зафіксовано в липні ($r = 0,70$) та серпні ($r = 0,60$ і $0,62$), що свідчить про істотну залежність інтенсивності вегетаційних процесів від вологозабезпечення в середині літнього періоду.

У результаті кореляційного аналізу NDVI з місячними значеннями кліматичного водного балансу (КВБ) встановлено середній зв'язок у травні та липні — 0,64-0,78 (табл. 4). Щодо впливу КВБ на величину NDVI також відзначається певна інерційність у квітні і травні та в липні й серпні.

Кумулятивне значення КВБ (розра-

Таблиця 4 – Коефіцієнти кореляції NDVI з місячним КВБ

Місяці	Кореляція NDVI /КВБ							
	квб1	квб2	квб3	квб4	квб5	квб6	квб7	квб8
Січень	-0,32							
Лютий	-0,39	0,03						
Березень	-0,35	-0,20	-0,20					
Квітень		-0,28	-1,13	0,35				
Травень			-0,24	0,58	0,64			
Червень				0,04	0,58	0,32		
Липень					0,15	0,08	0,78	
Серпень						0,45	0,50	0,59
Вересень							0,19	0,59
Жовтень								0,09

Таблиця 5 – Коефіцієнти кореляції NDVI з кумулятивним місячним КВБ

Місяці	Кореляція NDVI /КВБ кумулятивний							
	квб1	квб2	квб3	квб4	квб5	квб6	квб7	квб8
Січень	-0,32							
Лютий	-0,39	-0,23						
Березень	-0,35	-0,36	-0,43					
Квітень		-0,35	-0,39	-0,08				
Травень			-0,05	0,43	0,70			
Червень				0,52	0,72	0,71		
Липень				0,73	0,52	0,51	0,71	
Серпень					0,53	0,62	0,71	0,82
Вересень						0,30	0,22	0,61
Жовтень								0,37

ховане наростаючим підсумком із початку року) свідчить про його більш значимий вплив на величину NDVI. Якщо між травневим значенням КВБ і NDVI за цей же період коефіцієнт кореляції становить 0,64, то з кумулятивним КВБ – 0,70 (табл. 5).

Загалом середня залежність NDVI від кумулятивного КВБ починає спостерігатися у квітні з інерційним впливом на травень, а до кінця серпня коефіцієнт кореляції досягає 0,82.

Враховуючи вагомий вплив на величину NDVI і температурного режиму, критерієм оцінки формування біомаси доцільно визначити і цей показник. За цього підходу множинний коефіцієнт кореляції

підвищується до 0,85 проти 0,70 з урахуванням лише КВБ травня (рис. 6).

Цей комплексний підхід дає змогу визначити потребу в додатковому зволоженні для досягнення оптимального значення КВБ при певному температурному режимі визначеного періоду.

Обговорення. Отримані результати моніторингу внутрішньорічної динаміки NDVI на території України узгоджуються із загальноприйнятими у світовій практиці закономірностями розвитку рослинного покриву помірних широт, описаними в роботах [Loidi Arregui & Marcent, 2022; Du et al., 2022]. Виявлений нами пік вегетаційної активності у травні-липні (0,61-

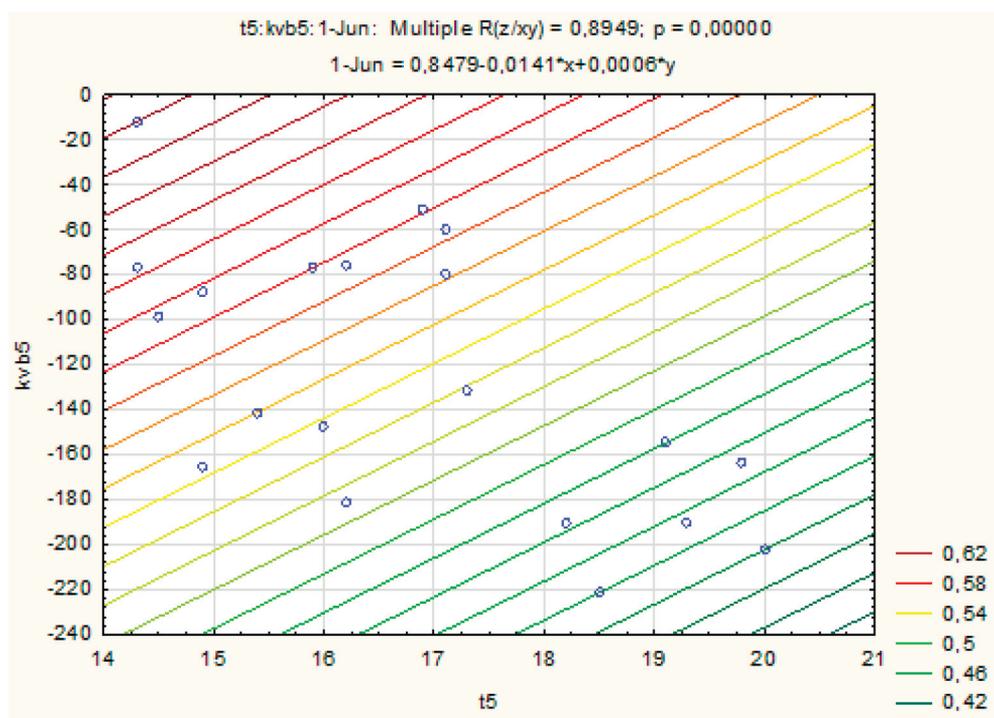


Рисунок 6 – Залежність NDVI станом на 1 червня від середньомісячної температури травня та кумулятивного КВБ

0,67) та інтенсивне зростання біомаси у квітні-травні (42%) об'єктивно відображають фази активного росту більшості польових культур. Однак, на відміну від усереднених глобальних моделей, наше дослідження виявило значну регіональну диференціацію всередині країни.

Зокрема критично низькі значення NDVI (0,47-0,66) та надзвичайно висока міжрічна варіабельність (32-50%) у степовій зоні свідчать про нестабільність агровиробництва в цьому регіоні, що зумовлено дефіцитом природного вологозабезпечення. Порівняння цих даних із показниками Полісся (варіабельність 8-11%) підтверджує тезу про те, що вологозабезпечення залишається головним обмежувальним фактором продуктивності посівів у південних регіонах, що корелює з висновками Lyalko та ін. (2020).

Важливим аспектом дискусії є виявлена негативна багаторічна тенденція NDVI у вересні-жовтні (зниження на 13,9-15,6% за 20 років). Ми погоджуємося з думкою, що це явище не обов'язково свідчить про деградацію посівів, а скоріше є наслідком адаптації агротехнологій до змін клімату: зміщенням строків сівби озимих на пі-

зніші дати та прискореним дозріванням культур через підвищення теплозабезпеченості. Це підтверджує складність інтерпретації індексів вегетації без урахування технологічних факторів, про що зазначали Skakun та ін. (2018) при аналізі переходу від MODIS до VIIRS.

Особливий науковий інтерес має встановлений нами інерційний характер впливу температурного режиму. Висока кореляція температури поточного місяця зі станом рослинності у наступному періоді ($r = 0,80$ у березні-квітні) свідчить про накопичувальний ефект теплової енергії, який запускає фізіологічні процеси росту. Цей факт дає змогу підвищити точність прогнозних моделей. Наше дослідження продемонструвало, що використання комплексного показника – кумулятивного кліматичного водного балансу в поєднанні з температурою – підвищує множинний коефіцієнт кореляції до 0,85. Це перевищує результати моделей, що базуються лише на сумах опадів, і підкреслює переваги використання інтегрованих метеорологічних показників аналогічно до підходів, описаних Becker-Reshef та ін. (2022) у проекті GLAM.

Таким чином, результати дослідження не лише підтверджують об'єктивність NDVI як інструменту моніторингу, а й розширюють розуміння механізмів відгуку агроценозів на гідротермічні виклики в умовах специфічного клімату України.

Висновки. Дослідженням встановлено, що внутрішньорічна динаміка NDVI об'єктивно відображає етапи формування біомаси сільськогосподарських культур із досягненням максимуму (0,61-0,67) у травні-липні та найвищими темпами зростання у квітні-травні (42%). Багаторічний аналіз виявив стійку позитивну тенденцію вегетації в холодний період року (0,42-0,55% на рік), однак зафіксовано суттєве зниження показників у вересні-жовтні на 13,9-15,6% за останні 20 років. Просторовий аналіз підтвердив глибоку зональну диференціацію: степова зона України характеризується найнижчими значеннями NDVI та критично високою міжрічною варіабельністю (32-50%), що підтверджує її залежність від нестабільного природного вологозабезпечення.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні інерційного характеру впливу температурного режиму на стан посівів, де максимальна кореляція індексу вегетації (r до 0,80) проявляється у наступному місяці після температурного впливу. Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці комплексного підходу до оцінки стану агроценозів на основі кумулятивного кліматичного водного балансу та температури, що забезпечує високу точність прогнозування (множинний коефіцієнт кореляції $R = 0,85$).

Результати дослідження можуть бути впроваджені в роботу агрохолдингів і державних моніторингових центрів для оперативного контролю стану посівів і прогнозування врожайності. Отримані моделі є основою для систем ухвалення рішень щодо оптимізації зрошення в найбільш уразливих південних регіонах. Перспективи подальших досліджень полягають в автоматизації розроблених прогностичних алгоритмів та їхній інтеграції в цифрові платформи точного землеробства для

адаптивного управління продуктивністю сільськогосподарських культур в умовах мінливого клімату.

Перелік літератури/References

1. Alahmad, T., Neményi, M., & Nyíki, A. (2023). Applying IoT sensors and big data to improve precision crop production: a review. *Agronomy*, 13(10), 2603. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102603>
2. Becker-Reshef, I., Bandaru, V., Barker, B., Coutu, S., Deines, J. M., Doorn, B., ... & Justice, C. (2022). The GEOGLAM crop monitor for AMIS: Assessing crop conditions in the context of global markets. *Global Food Security*, Vol. 23, December 2019 (pp. 173-181). <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.04.010>
3. Bharadiya, J. P., Tzenios, N. T., & Reddy, M. (2023). Forecasting of crop yield using remote sensing data, agrarian factors and machine learning approaches. *Journal of Engineering Research and Reports*, 24(12), 29-44.
4. Du, H., Wang, M., Liu, Y., Guo, M., Peng, C., & Li, P. (2022). Responses of autumn vegetation phenology to climate change and urbanization at northern middle and high latitudes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115, 103086. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103086>
5. GIMMS Global Agricultural Monitoring (2025). Database: <https://glam1.gsfc.nasa.gov/>
6. Lebrini, Y., Boudhar, A., Htitiou, A., Hadria, R., Lionboui, H., Bounoua, L., & Benabdelouahab, T. (2020). Remote monitoring of agricultural systems using NDVI time series and machine learning methods: a tool for an adaptive agricultural policy. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(16), 796.
7. Li, L., Xin, X., Zhao, J., Yang, A., Wu, S., Zhang, H., & Yu, S. (2023). Remote sensing monitoring and assessment of global vegetation status and changes during 2016–2020. *Sensors*, 23(20), 8452. <https://doi.org/10.3390/s23208452>
8. Loidi Arregui, J. J., & Marcent, C.

(2022). The temperate deciduous forests of the northern hemisphere. A review. *Mediterranean Botany*, 43. <https://dx.doi.org/10.5209/mbot.75527>

9. Lyalko V., Romanciuc I., Elistratova L., Apostolov A., Chekhniy V. (2020). Detection of Changes in Terrestrial Ecosystems of Ukraine Using Remote Sensing Data. *Journal of Geology, Geography and Geocology*, Vol. 29 (1). C. 102-110. <https://doi.org/10.15421/112010>

10. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC). (2018). MODIS and VIIRS land products global subsetting and visualization tool [Data set]. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1379>

11. Sánchez, N., Plaza, J., Criado, M., Páez-Sánchez, R., Gómez-Sánchez, M. B., Morales-Corts, M. R., & Palacios, C. (2023). The second derivative of the NDVI time series as an estimator of fresh biomass: A case study of eight forage associations monitored via UAS. *Drones*, 7(6), 347. <https://doi.org/10.3390/drones7060347>

12. Skakun, S., Justice, C. O., Vermote, E., & Roger, J. C. (2018). Transitioning from MODIS to VIIRS: an analysis of inter-consistency of NDVI data sets for agricultural monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 39(4), 971–992. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1395970>

13. Toromade, A. S., Soyombo, D. A., Kupa, E., & Ijomah, T. I. (2024). Reviewing the impact of climate change on glob-

al food security: Challenges and solutions. *International journal of applied research in social sciences*, 6(7), 1403-1416. <https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i7.1300>

14. Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402.

15. Wijerathna-Yapa, A., & Pathirana, R. (2022). Sustainable agro-food systems for addressing climate change and food security. *Agriculture*, 12(10), 1554. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101554>

16. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017.

*Надійшла до редакції 26.09.2025 р.;
переглянуто 24.10.2025 р.;
прийнято до друку 24.11.2025 р.;
опубліковано 29.12.2025 р.*

*Received September 26, 2025;
revised October 24, 2025;
accepted November 24, 2025;
published December 29, 2025*

UDC 631.421

ANALYSIS OF UKRAINE'S AGROCENOSSES TRANSFORMATION UNDER CLIMATE CHANGE USING NDVI REMOTE MONITORING

Saidak R., PhD (Agronomy), <https://orcid.org/0000-0002-0213-0496>

Maidanovych N., PhD (Geography), <https://orcid.org/0009-0007-2972-6461>

L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Knysh V., PhD (Agronomy), <https://orcid.org/0000-0002-3220-9883>

Institute of Climate-Smart Agriculture of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

Summary

The aim of the research is to conduct a systematic statistical analysis of the long-term dynamics of crop biomass formation in Ukraine based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and to establish quantitative patterns of the influence of key meteorological factors on the state of vegetation over twenty years (2001–2020). The relevance of the work is driven by the need to adapt agricultural technologies to global climate change and to develop accurate predictive models of crop productivity based on remote sensing data.

Research Methodology. The study is based on data from the Global Agriculture Monitoring (GLAM) system, derived from 8-day NDVI composites of MODIS satellites (Terra and Aqua). A retrospective database covering 24 administrative regions of Ukraine was created, containing approximately 23,000 records. Trend analysis using linear regression models was applied to assess long-term tendencies. The complex impact of meteorological conditions was evaluated by calculating correlation coefficients and constructing multiple regression dependencies between NDVI values and indicators of average monthly air temperature, precipitation, and cumulative climatic water balance (CWB).

Results. It was established that within the annual cycle, maximum NDVI values (0.61–0.67) are achieved from May to July, with the most intensive biomass growth (42%) occurring in April–May. Long-term analysis revealed a stable positive trend of index growth during the cold period of the year (0.42–0.55% per year), while growth rates are minimal in the summer months. A significant decrease in NDVI was recorded in September–October (by 13.9–15.6% over 20 years), which is explained by the shift in winter crop sowing dates and accelerated crop maturation due to warming. Spatial analysis confirmed profound zonal differentiation: the steppe zone is characterized by the lowest biomass potential (0.47–0.66) and critically high interannual variability (32–50%), which is 4–5 times higher than in Polissya. An inertial character of the temperature regime's influence was identified: the temperature of the current month correlates most significantly with the state of vegetation in the subsequent period (r reaches 0.80 in March–April).

Conclusions. Remote monitoring using the NDVI indicator objectively reflects the transformation of Ukraine's agrocenoses under the influence of climate change. It has been proven that comprehensive consideration of the temperature regime and cumulative water balance allows for predicting crop status with high accuracy (multiple correlation coefficient $R = 0.85$). The results obtained provide a scientific basis for optimizing irrigation systems and implementing climate-smart agriculture methods in the most vulnerable southern regions of Ukraine.

Keywords: NDVI, remote sensing, crop biomass, MODIS, climatic water balance, correlation analysis, vegetation dynamics, temperature regime, precipitation, crop monitoring.