

УДК 528.8.04: 551.4

Аналіз корелятивних зв'язків вегетаційних індексів червоного краю з валовою первинною продуктивністю за даними газо- та спектрометричних вимірів для виробничих посівів озимої пшениці в Баришівському районі Київської області

В. І. Лялько¹, О. І. Сахацький^{1*}, Г. М. Жолобак¹, О. М. Сибірцева¹, С. С. Дугін¹, М. В. Ваколюк¹, О. О. Халаїм²¹ ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України” (ЦАКДЗ ІГН НАНУ), Київ, Україна² Національний університет “Києво-Могилянська академія” (НаУКМА)

Наведено результати досліджень корелятивних зв'язків вегетаційних індексів червоного краю за даними наземної спектрометричної зйомки з валовою первинною продуктивністю виробничих посівів озимої пшениці в Баришівському районі Київської області у 2015 р., яка визначалась за даними газометричних вимірів потоків CO₂ над рослинним покривом. В роботі проведено обчислення та аналіз таких вегетаційних індексів червоного краю: позиції червоного краю (*REP*), Мерісівського наземного хлорофільного індексу (*TCI*), модифікованого нормалізованого вегетаційного індексу *NDVI*₇₀₅, а також хлорофільного індексу рослинного покриву (*CCI*) та індексу подвійної диференціації (*DD*). Результати досліджень показали, що для дослідженої вибірки вегетаційних індексів найкращу кореляцію з валовою первинною продуктивністю рослинного покриву показав індекс *REP* (коефіцієнт кореляції за формулою Пірсона на рівні $r = 0.68$). Для побудови більш точних статистичних моделей і обґрунтованих висновків доцільним є проведення подальшого дослідження цього питання. Результати робіт будуть використані для оцінок продуктивності агроценозів та визначення балансу потоків CO₂ над рослинним покривом на основі супутникових даних, які включають канали зйомки в області червоного краю (RapidEye, Sentinel-2 і т. п.).

Ключові слова: наземна спектрометрична зйомка, індекси червоного краю, польові газометричні виміри, валова первинна продуктивність, виробничі посіви озимої пшениці, корелятивні зв'язки

© В. І. Лялько, О. І. Сахацький, Г. М. Жолобак, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, М. В. Ваколюк, О. О. Халаїм. 2016

1. Вступ

Науковці ЦАКДЗ ІГН НАНУ та НаУКМА протягом останніх років проводили спільні наукові роботи з експериментального визначення абсорбції вуглекислого газу рослинним покривом основними сільгоспкультурами України за даними космічних та наземних спектро- та газометричних вимірів. Комплекс польових робіт включав наземне спектрометрування посівів приладом FieldSpec® 3FR (США), оцінку потоків вуглекислого газу газоаналізатором CO₂ Plant CO₂ Analysis Package (виробник Qubit Systems, Канада) та визначення низки інших параметрів рослинного покриву. Такі експериментальні роботи, що включали зазначений комплекс сучасної вимірювальної апаратури, виконувались на території України вперше.

Результати роботи важливі для визначення можливостей застосування спектрометричних вимірів (наземних та космічних) для оцінки балансу потоків CO₂ над рослинним покривом та розробки відповідних методичних підходів визначення балансу парникових газів для території України на основі даних супутникових зйомок, які містять додаткові канали зйомки, що надають інформацію про спектральне відбиття рослинного покриву в області червоного краю в хвильо-

вому діапазоні 650–760 нм. На даний час такі сенсори встановлені на супутниках RapidEye та Sentinel-2.

В статті наведено результати обробки експериментальних даних, отриманих у 2015 році на полігоні “Березань” в Баришівському районі Київської області на полях Баришівської зернової компанії (БЗК). Метою цієї роботи було встановлення корелятивних зв'язків між вегетаційними індексами червоного краю та валовою первинною продуктивністю виробничих посівів озимої пшениці (*ВПП*). Вегетаційні індекси були порашовані за результатами польових наземних спектрометричних вимірів та зіставлені з експериментально визначеною валовою первинною продуктивністю рослинного покриву озимої пшениці на основі газометричних вимірів абсорбції потоків CO₂ з атмосфери. Польові вимірювання спектрометром та газоаналізатором проводились синхронно. Це дозволило отримати певні кореляційні залежності, які описано в даній статті.

2. Джерело даних та методи

2.1. Об'єкт досліджень

Наземні спостереження за станом рослин, спектро- та газометричні вимірювання проводились на виробничих посівах двох сортів озимої пшениці –

* E-mail: sakhatyky@casre.kiev.ua



Рис. 1. Розташування тестової ділянки, в межах якої проводились синхронні газо- та спектрометричні виміри на виробничих посівах озимої пшениці Баришівської зернової компанії

сорт Богдана і сорт Скаген тестової ділянки полігону “Березань” (рис. 1).

Скаген — це зимостійкий, низькостебловий, середньопізній сорт якісної хлібної пшениці з підвищеною врожайністю (до 90 ц/га), високою стійкістю до проростання в колосі і хорошою резистентністю до хвороб листя та колоса; різновид лютесценс; оригінатор: Saaten Union GmbH; рік реєстрації — 2010 (<http://agrofarmer.net/index.php?pageitem&id=49659>).

Богдана — сорт морозостійкий, середньостебловий, інтенсивного типу, середньостиглий. Стійкість до вилягання, осипання зерна та посушливих умов висока. Толерантність до ураження борошнистою росою та бурюю листовою іржею середня. Сорт високоврожайний (75–85 ц/га); різновид лютесценс; оригінатор: Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Миронівський інститут пшениці ім. В. М. Ремесла УААН; рік реєстрації — 2006 (<http://agrokolos.com.ua/ru/products/pshenitsya-bogdana.html>).

Морфофізіологічні параметри (довжина основного пагона, площа листків та сира біомаса надземної частини однієї рослини, а також густина стояння та листовий індекс) фіксувались на три дати: 23 квітня, 25 травня та 02 червня 2015 р., коли проводились інструментальні виміри. Ці дати відповідали таким вегетаційним фазам:

- 23 квітня — рослини обох сортів перебували у фазі кущіння;
- 25 травня — рослини сорту Скаген знаходились у фазі виходу в трубку, а рослини сорту Богдана вже почали колоситись;
- 02 червня — рослини обох сортів перебували у фазі цвітіння.

2.2. Предмет досліджень

Предмет досліджень — корелятивні зв'язки між вегетаційними індексами, розрахованими за даними наземної спектрометричної зйомки, та показниками валової первинної продуктивності виробни-

чих посівів озимої пшениці, отриманими камерним (абсорбційним) методом.

В роботі порашовані і проаналізовані вегетаційні індекси для даних 11-ти точок, одержаних спектро-радіометром FieldSpec® 3FR (США), де були відомі середні дані валової первинної продуктивності рослинного покриву озимої пшениці, визначені в результаті газометричних вимірів потоків CO₂ з використанням газоаналізатора CO₂ Analysis Package (Канада).

Значення вегетаційних індексів в області червоного краю обчислювались за формулами (1)–(3), що наведені у відповідних роботах: а саме для *REP* (the Red Edge Position) і *TCI* (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) в роботах [1–3] та *NDVI*₇₀₅ (red Edge Normalised Difference Index) в роботі [3]:

$$REP = 701 + 41 \frac{(\bar{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))},$$

$$\bar{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2}, \quad (1)$$

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(708) - R(681)}, \quad (2)$$

$$NDVI_{705} = \frac{R(750) - R(705)}{R(750) + R(705)}, \quad (3)$$

де $R(\lambda)$ — значення спектрометричного коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ .

Додатком до вегетаційних індексів, наведених вище, можуть бути нові хлорофільні індекси: *CCI* (canopy chlorophyll index) — хлорофільний індекс рослинного покриву [4, 5] та *DD* (Double Difference) — індекс подвійної диференціації [6].

Математичний вираз цих індексів наступний:

$$CCI = D_{720} / D_{700}, \quad (4)$$

де D_{700} і D_{720} значення першої похідної коефіцієнтів відбиття (derivative reflectance) на довжині хвилі $\lambda = 700$ і 720 нм, ці значення довжин хвиль, згідно

досліджень [6], застосовуються для визначення перших похідних хлорофільного індексу *CCI* в зоні червоного краю;

$$DD = (R_{750} - R_{720}) - (R_{700} - R_{670}), \quad (5)$$

де, згідно статті [6], R_{670} , R_{700} , R_{720} та R_{750} — коефіцієнти відбиття на довжині хвилі $\lambda = 670, 700, 720$ і 750 нм, які використовуються для обчислення *DD* (Double Difference) індексу.

DD-індекс — вегетаційний індекс нового типу, побудований на інтегральній комбінації перших похідних коефіцієнтів відбиття, і визначається, як різниця інтегралів від першої похідної коефіцієнтів відбиття (derivative reflectance):

$$DD = \int_b^{b+\Delta} R' d\lambda - \int_a^{a+\Delta} R' d\lambda, \quad (6)$$

де a і b довжини хвиль, на яких обчислюються похідні від коефіцієнтів відбиття R , Δ — проміжок інтегрування. Згідно статті [6], $a = 670$ і $b = 720$ нм, $\Delta = 30$ нм. В результаті інтегрування одержуємо *DD*-індекс у вигляді:

$$DD = (R_{b+\Delta} - R_b) - (R_{a+\Delta} - R_a) \quad (7)$$

Підставивши значення довжини хвиль і проміжок інтегрування, із формули (7) одержуємо *DD* індекс.

Це новий тип вегетаційного індексу, він має перевагу в простоті обчислення і водночас властивості гіперспектральних індексів, які базуються на других похідних, тобто, математичній комбінації похідних від коефіцієнтів відбиття [6].

3. Результати

За даними квартального звіту Баришівської зернової компанії — Зерновий Альянс, стан посівів озимої пшениці на полях БЗК у 2015 р. визначався як добрий та відмінний (<http://www.grainalliance.com/ua/wp-content/uploads/2015-Q2.pdf>).

В табл. 1 наведено дані біометричних вимірів озимої пшениці сортів Богдана та Скаген. З неї видно, що між цими сортами у фазі кушіння майже немає достовірних відмінностей по жодному дослідженому показнику. Через місяць рослини сорту Скаген були достовірно нижчі, ніж пшениця сорту Богдана, проте площа листків однієї рослини у Скагена була вищою, ніж у сорту Богдана. Оскільки рослини сорту Богдана сформували більше продуктивних стебел на одиницю площі, то відмінності у величині листового індексу цих сортів на 25 травня були невеликими. Проте через тиждень у фазу цвітіння рослини сорту Богдана мали майже в півтора рази меншу площу листків однієї рослини, ніж сорту Скаген і тому їх листовий індекс значно зменшився. Впродовж всієї весняно-літньої вегетації сира маса

однієї рослини озимої пшениці сорту Скаген була дещо вищою, ніж у сорту Богдана, але ці відмінності знаходяться в межах похибки досліду.

Отже, два досліджені сорти озимої пшениці належать до одного різновиду — лютеценс, майже не відрізняються за значенням сирої біомаси однієї рослини та мають морфометричні відмінності за довжиною пагона (рослини сорту Скаген нижчі) та за площею листків (рослини сорту Скаген формують більшу листову поверхню). На дослідженій ділянці рослини сорту Богдана мали дещо більшу густоту стояння, що у поєднанні з вище переліченими відмінностями зумовило певну різницю в показниках *ВПП* (табл. 2) за даними газометричних вимірів потоків CO_2 над рослинним покривом, оскільки ці вимірювання виконувались на частині посіву площею 0.2 м^2 , накритій пластиковою прозорою камерою. *ВПП* сорту Скаген була вищою, ніж у сорту Богдана у квітні й травні, в той час як у червні спостерігалось зворотне співвідношення.

Далі представимо результати проведеного зіставлення з *ВПП* індексів червоного краю *REP*, *TCI* та *NDVI*₇₀₅. В табл. 2 показано результати інструментальних газометричних вимірів та обчислень вегетаційних індексів *REP*, *TCI* та *NDVI*₇₀₅ за даними наземної спектрометричної зйомки, що виконувалась синхронно з визначенням потоків вуглекислого газу над рослинними покривом озимої пшениці.

За даними, наведеними в табл. 2, був встановлений взаємозв'язок між величинами значень вегетаційних індексів, обчислених за наведеними вище формулами (1)–(3), та середніми значеннями валової первинної продуктивності.

Аналізуючи корелятивну залежність між значеннями вегетаційних індексів і середньою валовою первинною продуктивністю, маємо найвищу кореляцію по Пірsonу між значеннями *REP* і *ВПП* $r = 0.68$. Кореляційна залежність по Пірsonу між значеннями *NDVI*₇₀₅ і *ВПП* становить 0.46, а між значеннями *TCI* і *ВПП* — 0.43.

Наведемо формулу розрахунку коефіцієнту кореляції за Пірсоном для *ВПП* та *REP*. Формула Пірсона для розрахунку коефіцієнта кореляції між *REP* і *ВПП* для 11-ти точок, представлених в табл. 2, має такий вигляд:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{11} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{11} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{11} (y_i - \bar{y})^2}} = 0.68, \quad (8)$$

де $x_i = (\text{ВПП})_i$, $y_i = \text{REP}_i$ — значення величин із табл. 2 з порядковим номером i ($i = 1, \dots, 11$); $\bar{x} = \overline{\text{ВПП}} = 9.16$ і $\bar{y} = \overline{\text{REP}} = 724.45 \text{ нм}$ — середні арифметичні значення відповідних індексів.

За наведеними даними в табл. 2 побудований графік взаємної зміни *REP* та *ВПП* в залежності від

Таблиця 1

Біометрія рослин озимої пшениці сортів Скаген та Богдана впродовж весняно-літньої вегетації (полігон "Березань", 2015 р.)

Назва сорту	Дата	Довжина основного пагона (см)	Площа листків однієї рослини (см ²)	Листовий індекс	Сира біомаса надземної частини 1 рослини (г)	Густота стояння рослин (шт./м ²)
Богдана	23 квітня	238 ± 0.6	128 ± 1.0	1.45	0.62 ± 0.14	1131 ± 146
Скаген	23 квітня	209 ± 1.2	13.5 ± 2.2	1.57	0.66 ± 0.05	1164 ± 193
Богдана	25 травня	696 ± 2.2	32.3 ± 1.9	2.3	3.62 ± 0.53	717 ± 64
Скаген	25 травня	58.5 ± 1.6	42.7 ± 2.1	2.5	4.38 ± 0.71	596 ± 58
Богдана	02 червня	83.7 ± 2.3	23.7 ± 1.7	1.7	4.17 ± 0.63	717 ± 64
Скаген	02 червня	70.1 ± 1.9	39.7 ± 2.9	2.4	4.63 ± 0.53	596 ± 58

Таблиця 2Значення вегетаційних індексів, обчислені за польовими спектрометричними даними, та середні значення валової первинної продуктивності за даними газометричних вимірів потоків CO₂ над рослинним покривом озимої пшениці для тестових ділянок (полігон "Березань", 2015 р.)

Дата зйомки	№ точки вимірів	Агро-культура, сорт	Валова первинна продуктивність (середнє знач.) $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$	Значення вегетаційних індексів <i>REP</i> (нм) <i>TCI</i> <i>NDVI</i> ₇₀₅
23.04.2015	t1	Пшениця, Скаген	8.9	724.6
	t2	Пшениця, Богдана	6.82	720.7
25.05.2015	t1	Пшениця, Скаген	10.4	725.0
	t2	Пшениця, Скаген	10.4	725.6
	t3	Пшениця, Скаген	10.4	724.5
	t4	Пшениця, Богдана	6.8	724.2
	t5	Пшениця, Богдана	6.8	724.3
02.06.2015	t1	Пшениця, Скаген	9.4	723.5
	t2	Пшениця, Скаген	9.4	724.6
	t3	Пшениця, Скаген	9.4	724.8
	t4	Пшениця, Богдана	12	724.5

точки, сорту та дати вимірювань (рис. 2). Маючи кореляцію по Пірсону між значеннями *REP* і *ВПП* $r = 0.68$, була побудована модель лінійної регресивної залежності *REP* від *ВПП* (середнє значення валової первинної продуктивності $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$). Одержане рівняння лінійної регресії між цими величинами має такий вигляд:

$$REP = 0.51 \cdot ВПП + 719.7. \quad (9)$$

Графік співвідношення величин *REP* з середніми значеннями *ВПП* за даними табл. 2 у 11-ти точках спектрометрування та кореляційна залежність між ними наведена на рис. 3.

Побудована модель (9) може слугувати для прогнозування зсувів *REP* за величинами серед-

ньої валової первинної продуктивності з області визначення.

Коефіцієнт узгодженості (Index of agreement) *d* моделі (9) із даними вимірювань обчислено за формулою Willmot'a [7, 8]:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (|y(x_i) - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} = 0.79, \quad (10)$$

де y_i — значення *REP*_{*p*}, що обчислені за формулою (1) для спектрів відбиття знятих в 11-ти точках, приведених в табл. 2; x_i — значення *ВПП* із табл. 2; $y(x_i)$ — значення *REP*_{*p*}, обчислене за формулою (9) відповідне для $x_i = ВПП_p$ ($i = 1 \dots 11$), $\bar{y} = \overline{REP}$ (середнє

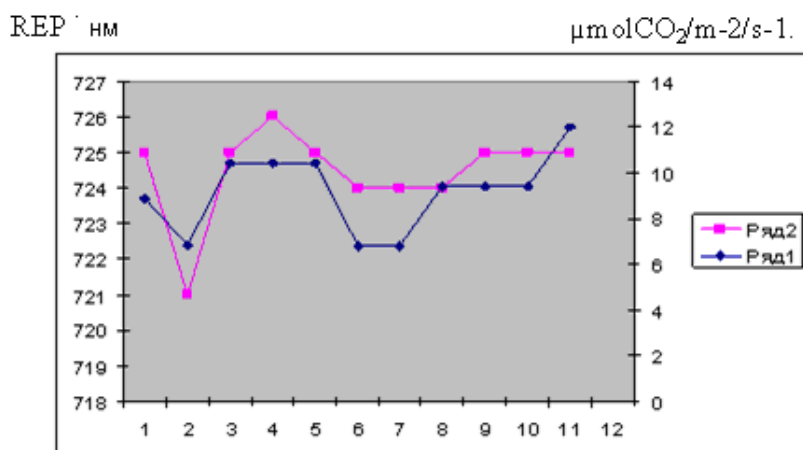


Рис. 2. Зіставлення значень REP (ряд 2) і $ВПП$ (ряд 1) посівів озимої пшениці на ділянках БЗК за період 23.04–02.06 2015 р.

значення), $n = 11$ — кількість даних вимірювань, де $x_i = ВПП_i$, $y_i = REP_i$ — значення відповідних індексів в точці з порядковим номером i ($i=1, \dots, 11$), а $\bar{y} = \overline{REP} = 724.45$ нм — середнє арифметичне значення. За даними обчислень (8) коефіцієнт кореляції між REP і $ВПП$ $r = 0.68$ і коефіцієнт узгодженості $d = 0.79$ із формули (10) для моделі (9).

Згідно рівняння (9), прогнозовані значення в моделі лінійної регресії REP ($ВПП$) змінюються від 723.2 до 725.8 нм, $ВПП$ змінюється від 6.8 до $12 \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$. Пораховані прогнозовані значення REP_{np} наведені в табл. 3. Значення коефіцієнта d близьке до 1, що свідчить про добру узгодженість прогнозованої моделі із даними вимірювань [7, 8].

Для валідації прогнозованої моделі лінійної регресії (9) використано дані спектрометрування, наведені в табл. 2, 3, які демонструють значення величин REP , одержаних за даними спектрометрування, та прогнозні значення REP (від $ВПП$), що обчислені за формулою (9).

Як свідчать дані обчислень, наведені в таблиці 3, прогнозовані за формулою (9) значення REP_{np} добре узгоджуються із даними спостережень. Найбільшу різницю в значеннях вегетаційних індексів REP маємо 23.04.2015 на ділянці t 2, всі решта мають $\Delta REP \leq 1.13$.

Отже, коефіцієнт кореляції між REP і $ВПП$ обчислено для 11-и точок, наведених в табл. 2, за формулою Пірсона (9), $r = 0.68 \approx 0.7$, що, згідно [9], відповідає нижньому обмеженню проміжку значень високої кореляції (0.7–0.9). Маючи коефіцієнт кореляції між REP і $ВПП$ $r \approx 0.7$, в роботі була побудована прогнозна модель лінійної регресії (9), де використані дані спектрометрування, які приведені в табл. 2. Середня похибка коефіцієнта кореляції між REP і $ВПП$ $\varepsilon \approx 0.2$. Корелятивний зв'язок між величинами REP і $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$ відображений на рис. 3.

Коефіцієнт кореляції між $NDVI_{705}$ і $ВПП$ для 11-и точок, наведених в табл. 2, за формулою Пірсона (8)

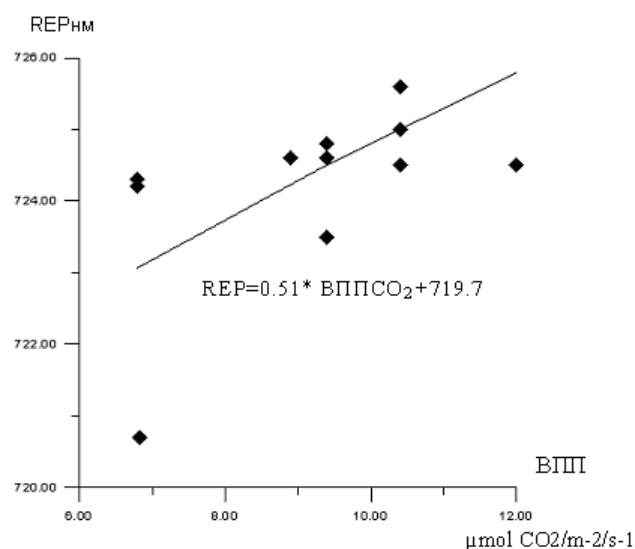


Рис. 3. Корелятивний зв'язок між величинами REP і $ВПП \mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$

становить $r = 0.46$, що відповідає проміжку значень слабкої кореляції (0.2–0.5), корелятивний зв'язок між величинами $NDVI_{705}$ і $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$ представлений на рис. 4. Середня похибка коефіцієнта кореляції між $NDVI_{705}$ і $ВПП$ $\varepsilon \approx 0.3$.

Коефіцієнт кореляції між TCL і $ВПП$ для 11-и точок, що представлені в табл. 2, за формулою Пірсона (8) має значення $r = 0.43$ і відповідає проміжку значень слабкої кореляції (0.2–0.5), корелятивний зв'язок між величинами TCL та $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$ показаний на рис. 5. Середня похибка коефіцієнта кореляції між TCL і $ВПП$ $\varepsilon \approx 0.3$.

Також представимо табл. 4, яка доповнена обчисленими вегетаційними індексами CCI (canopy chlorophyll index) і DD (Double Difference).

За даними табл. 4 побудована табл. 5, де вказані середні значення вегетаційних індексів та середні значення валової первинної продуктивності на три різні дати спостережень.

Таблиця 3

Зіставлення прогнозованих значень REP_{np} за формулою (9) і обчислених за даними спектрометрування REP_c від 23.04.2015, 25.05.2015 та 02.06.2015 р.

Дата зйомки	Точки спостережень			Прогноз		$REP =$
	№ точки вимірів	Агрокультура, сорт	Валова первинна продуктивність (середнє знач.) $\mu mol CO_2 / m^2 / s^{-1}$	REP_c (нм)	REP_{np} (нм)	$ REP_c - REP_{np} $ (нм)
23.04.2015	t1	Пшениця, Скаген	89	724.6	724.24	0.36
	t2	Пшениця, Богдана	682	720.7	723.17	3.10
25.05.2015	t1	Пшениця, Скаген	10.4	725.0	725.00	0.00
	t2	Пшениця, Скаген	10.4	725.6	725.00	0.60
	t3	Пшениця, Скаген	10.4	724.5	725.00	0.50
	t4	Пшениця, Богдана	68	724.2	723.17	1.03
	t5	Пшениця, Богдана	68	724.3	723.17	1.13
02.06.2015	t1	Пшениця, Скаген	9.4	723.5	724.49	0.99
	t2	Пшениця, Скаген	9.4	724.6	724.49	0.11
	t3	Пшениця, Скаген	9.4	724.8	724.49	0.31
	t4	Пшениця, Богдана	12	724.5	725.82	0.32

Для обчислених значень коефіцієнтів кореляції за формулою Пірсона (8) за даними спектрометрування в табл. 6 наведена матриця кореляції спектральних індексів та їх модифікованих виразів.

В табл. 6 додатково до вегетаційних індексів (1)–(3) використані хлорофільні вегетаційні індекси (4) і (5), це CCI (canopy chlorophyll index) і DD (Double Difference) індекс і приведені пораховані значення коефіцієнтів кореляції для модифікованого індекса $mCCI$ (modified canopy chlorophyll index) [4, 10].

Математичний вираз індексу $mCCI$:

$$mCCI = (R_{730} - R_{710}) / (R_{710} - R_{690}), \quad (11)$$

де R_{690} , R_{710} , R_{730} — коефіцієнти відбиття на довжині хвилі $\lambda = 690, 710, 730$ нм. Формулу (11) можна вважати відношенням перших похідних на довжинах хвиль $\lambda = 700$ і $\lambda = 720$ нм, $\lambda = 20$ нм, ці значення довжин хвиль рекомендують А.Д. Сімс зі співроб. [4]. Згідно табл. 6, кореляція модифікованого індекса $mCCI$ з вегетаційними індексами, в основному, більша ніж кореляція хлорофільного індекса CCI .

Підсумком роботи дослідження корелятивних зв'язків вегетаційних індексів з ВПП на посівах озимої пшениці в різні фази її вегетації є табл. 7, де приведені рівняння лінійної регресії та статистичні параметри: r — коефіцієнт кореляції; ϵ — середня похибка коефіцієнта кореляції.

В табл. 7 приведені регресивні рівняння залеж-

ності ВПП від вегетаційних індексів в області червоного краю. Для встановлення точніших взаємозв'язків між величинами вегетаційних індексів та ВПП і побудови надійніших прогнозних статистичних моделей та обґрунтованих висновків доцільно проведення подальшого вивчення цих питань.

4. Висновки

За допомогою сучасної вимірювальної апаратури вперше здійснено синхронні спектро- та газометричні дослідження ділянок виробничих посівів озимої пшениці сортів Скаген та Богдана впродовж весняно-літньої вегетації 2015 р. на угіддях Баришівської зернової компанії.

За даними спектрометрування обчислено такі вегетаційні індекси червоного краю, як позиція червоного краю (REP), Мерісівський наземний хлорофільний індекс (TCI), модифікований нормалізований вегетаційний індекс $NDVI_{705}$, а також хлорофільний індекс рослинного покриву (CCI) й індекс подвійної диференціації (DD).

Проаналізовано корелятивну залежність між значеннями вегетаційних індексів і середньою валовою первинною продуктивністю посівів озимої пшениці, отриманою камерним (абсорбційним) методом, зокрема, обчислено значення коефіцієнтів кореляції між цими параметрами за формулою Пірсона, побудовано матрицю кореляції

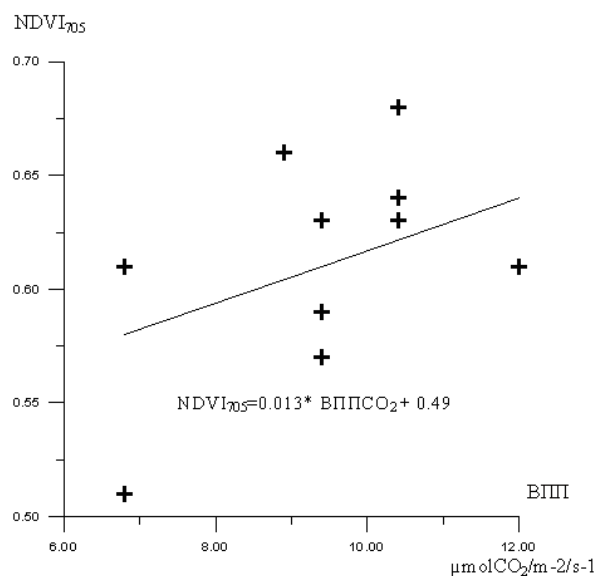


Рис. 4. Корелятивний зв'язок між величинами $NDVI_{705}$ і $ВПП \mu molCO_2/m-2/s-1$

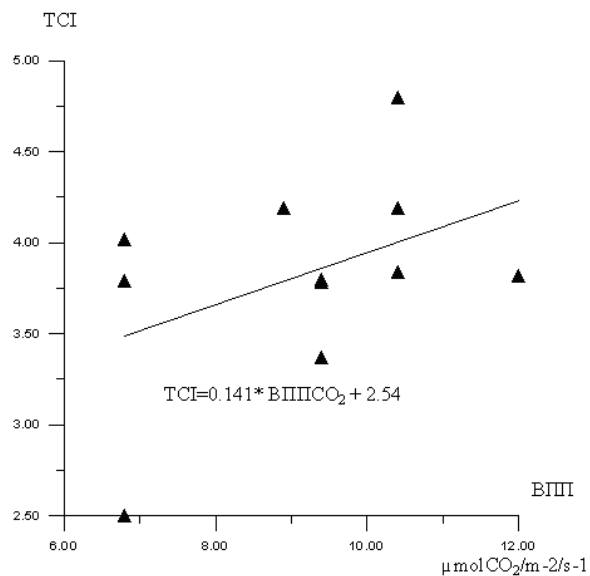


Рис. 5. Корелятивний зв'язок між величинами TCI і $ВПП \mu molCO_2/m-2/s-1$

Таблиця 4

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними, та середні значення валової первинної продуктивності посівів озимої пшениці (полігон Березань, БЗК, 2015 рік)

Дата	Номер точки вимірів	$ВПП$	CCI	DD	REP (нм)	TCI	$NDVI_{705}$
23.04.15	t1	89	1.8244	0.1692	7246	4.187	0.661
	t2	682	1.2621	0.1501	720.7	2.503	0.512
25.05.15	t1	10.4	1.749	0.2402	725.0	4.193	0.629
	t2	10.4	1.9878	0.2107	725.6	4.799	0.684
	t3	10.4	1.7174	0.1952	724.5	3.843	0.639
	t4	6.8	1.7331	0.1684	724.2	3.788	0.607
	t5	6.8	1.8031	0.1829	724.3	4.019	0.612
02.06.15	t1	9.4	1.4938	0.1828	723.5	3.366	0.568
	t2	9.4	1.6329	0.1584	724.6	3.802	0.629
	t3	9.4	1.6729	0.1700	724.8	3.782	0.590
	t4	12	1.6776	0.1764	724.5	3.816	0.613

Таблиця 5

Середні значення вегетаційних індексів і $ВПП$ посівів озимої пшениці на три дати спостережень

Середні значення вегетаційних індексів							
Дата	Номер точки вимірів	$\overline{ВПП}$	\overline{CCI}	\overline{DD}	$\overline{NDVI_{705}}$	\overline{TCI}	\overline{REP} (нм)
23.04.15	t ₁ –t ₂	7.86	1.5433	0.1597	0.5865	3.345	722.65
25.05.15	t ₁ –t ₅	8.96	1.7981	0.1995	0.6342	4.1284	724.72
02.06.15	t ₁ –t ₄	10.5	1.6193	0.1719	0.6000	3.6915	724.35

Таблиця 6

Кореляційна матриця коефіцієнтів кореляції спектральних індексів, використаних в нашому дослідженні.

	<i>REP</i>	<i>TCI</i>	<i>NDVI</i> ₇₀₅	<i>CCI</i>	<i>mCCI</i>	<i>DD</i>
<i>REP</i>	÷	0.935	0.876	0.896	0.89	0.546
<i>TCI</i>	0.935	÷	0.946	0.978	0.985	0.612
<i>NDVI</i> ₇₀₅	0.876	0.946	÷	0.926	0.939	0.497
<i>CCI</i>	0.896	0.978	0.926	÷	0.975	0.530
<i>mCCI</i>	0.89	0.985	0.94	0.957	÷	0.612
<i>ВППСО</i> ₂	0.68	0.43	0.46	0.303	0.424	0.473

Таблиця 7Корелятивний зв'язок вегетаційних індексів з *ВПП*, обчислений за даними спектрометрування посівів озимої пшениці (полігон "Безань", 2015 р.)

№	Веgetаційні індекси (<i>BI</i>)	Регресивне рівняння <i>BI</i> залежне від <i>ВПП</i> $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}^{-1}$	<i>r</i>	ε
1	<i>REP</i> (нм)	$y = 0.51x + 719.7$	0.68	0.20
2	<i>TCI</i>	$y = 0.141x + 2.54$	0.43	0.30
3	<i>NDVI</i> ₇₀₅	$y = 0.013x + 0.49$	0.46	0.30
4	<i>CCI</i>	$y = 0.033x + 1.38$	0.30	0.32
5	<i>mCCI</i>	$y = 0.042x + 1.35$	0.42	0.30
6	<i>DD</i>	$y = 0.007x + 0.10$	0.47	0.29

спектральних індексів та їх модифікованих виразів з *ВПП* та складено рівняння лінійної регресії залежності *ВПП* та цих вегетаційних індексів. Встановлено, що для дослідженої вибірки вегетаційних індексів найкращу кореляцію з валовою первинною продуктивністю рослинного покриву показав індекс *REP* (коефіцієнт кореляції на рівні $r = 0.68$). Результати роботи будуть використані для оцінок продуктивності агроценозів та визначення балансу потоків CO_2 над рослинним покривом на основі даних супутникових зйомок, які надають інформацію про спектральне відбиття рослинного покриву в області червоного краю в хвильовому діапазоні 650–760 нм. На даний час такі канали зйомки забезпечують сенсори, встановлені на супутниках RapidEye та Sentinel-2.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом (Конкурс Ф64, Лот 5, І. 1 05, 2015 р.).

Література

- Лялько В. І. Зіставлення супутникових та наземних гіпер-спектральних даних при визначенні позиції червоного краю спектрів відбиття / В. І. Лялько [та ін.] // Космічна наука і технологія. — 2010. — В. 16. — № 3. — С. 39–45.
- Шпортюк З. М. Вплив просочування природного газу на наземний хлорофільний індекс та позицію червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем / З. М. Шпортюк, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін // Доповіді НАН України. — 2011. — № 11. — С. 115–119.
- Gitelson A. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation / A. Gitelson, M. N. Merzlyak // Journal of Plant Physiology. — 1994. — 143. — P. 286–292.
- Sims D. A. Use of Hyperspectral Reflectance Indices for Estimation of Gross Carbon Flux and Light Use Efficiency Across Diverse Vegetation Types / D. A. Sims, Abdullah F. Rahman [et al.] // International Journal of Geoinformatics. — Vol. 2. — No. 1, 15–30, March 2006.
- Sims D. A. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO_2 exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem / D. A. Sims, H. Luo [et al.] // Remote Sensing of Environment. — 2006. — v. 103. — P. 289–303.
- Maire G. Le. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements / G. Le Maire [et al.] // Remote Sensing of Environment. — 2004. — 89. — P. 1–28.
- Willmot C. J. On the validation of models / C. J. Willmot // Phyal Geography. — 1981. — v. 2. — № 2. — P. 184–194.
- Krause P. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment / P. Krause, D. P. Boyle, F. Base // Advances in Geosciences. — 2005. — 5. — P. 89–97.
- Математическая статистика. Издание 2-ое, переработанное и дополненное. — М.: Высшая школа, 1981. — 361 с.
- Rahman A. F. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS Imagery / A. F. Rahman, J. A. Gamon, D. A. Fuentes [et al.] // Journal of Geophysical Research. — 2001. — v. 106. — № D24. — P. 33, 579–591.

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯТИВНЫХ СВЯЗЕЙ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ КРАСНОГО КРАЯ С ВАЛОВОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ ПО ДАННЫМ ГАЗО- И СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В БАРЫШЕВСКОМ РАЙОНЕ КИЕВСКОЙ ОБЛАСТИ

В. И. Лялько, А. И. Сахацкий, Г. М. Жолобак, О. Н. Сибирцева, С. С. Дугин, М. В. Ваколюк, А. О. Халаим

Приведены результаты исследований коррелятивных связей вегетационных индексов красного края по данным наземной спектрометрической съемки с валовой первичной продуктивностью производственных посевов озимой пшеницы в Барышевском районе Киевской области в 2015 г., которая определялась по данным газометрических измерений потоков CO_2 над растительным покровом. В работе проведены вычисления и анализ таких вегетационных индексов красного края: позиции красного края (*REP*), Мерисовского наземного хлорофильного индекса (*TCI*), модифицированного нормализованного вегетационного индекса $NDVI_{705}$, а также хлорофильных индексов растительного покрова (*CCI*) и индекса двойной дифференциации (*DD*). Результаты исследований показали, что для исследуемой выборки вегетационных индексов лучшую корреляцию с валовой первичной продуктивностью растительного покрова показал индекс *REP* (коэффициент корреляции по формуле Пирсона на уровне $r = 0.68$). Для построения более точных статистических моделей и обоснованных выводов целесообразно проведение дальнейшего исследования этого вопроса. Результаты работ будут использованы для оценок продуктивности агроценозов и определения баланса потоков CO_2 над растительным покровом на основе спутниковых данных, которые включают каналы съемки в области красного края (RapidEye, Sentinel-2 и т. п.).

Ключевые слова: наземная спектрометрическая съемка, индексы красного края, полевые газометрические измерения потоков CO_2 , валовая первичная продуктивность, посевы озимой пшеницы, коррелятивные связи

ANALYSIS OF THE CORRELATION BETWEEN THE RED EDGE VEGETATION INDICES AND THE GROSS PRIMARY PRODUCTIVITY OF WINTER WHEAT CROP ACCORDING TO GAS AND SPECTROMETRIC MEASUREMENTS IN BARYSHEVSKY DISTRICT OF KIEV REGION

V. I. Lyalko, A. I. Sakhaty, G. M. Zholobak, O. N. Sibirtseva, S. S. Dugin, M. V. Vakoljuk, A. O. Khalaim

The results of studies of the correlation between the red edge vegetation indices, defined from the ground spectrometric survey, and gross primary productivity of winter wheat crops in Baryshevsky district of Kiev region in 2015, which was determined using gasometric measurements of CO_2 fluxes over vegetation cover are presented. In this work the calculations and analysis of following vegetation indices of red edge were carried out: the red edge position (*REP*), MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (*TCI*), a modified red Edge Normalised Difference Index $NDVI_{705}$, as well as canopy chlorophyll index (*CCI*) and the index of Double Difference (*DD*). According the results of the research the index *REP* showed the better correlation with gross primary productivity of vegetation cover for the studied sample of vegetation indices (correlation coefficient using the formula Pearson at $r = 0.68$). To build a more accurate statistical models and valid conclusions it is advisable to carry out further research of this issue. The results will be used for evaluation of the cropland productivity and for determining of the balance of CO_2 fluxes over vegetation cover based on satellite data, which include the red edge bands (RapidEye, Sentinel-2 and so on).

Keywords: ground-based spectrometry, red edge indices field, CO_2 fluxes measurements, gross primary productivity, winter wheat crops, correlation