

УДК: 528.8.04:633.11

Аналіз динаміки 15-ти вегетаційних індексів, обчислених за даними супутника Sentinel-2A для двох відмінних за станом тест-ділянок посівів озимої пшениці Лісостепової зони України

Г. М. Жолобак*, О. М. Сибірцева, М. В. Ваколюк, І. Ф. Романчук

ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", Київ, Україна

Проаналізовано динаміку 15-ти вегетаційних індексів, розрахованих за супутниковими знімками Sentinel-2A в межах двох тест-ділянок площею 1 га, що знаходились на виробничих посівах озимої пшениці двох сортів (Богдана і Скаген), впродовж періоду зимового спокою та весняно-літньої вегетації 2016 року. Виявлено, що падіння вмісту загального азоту в сухій речовині органів, які формували відбивну поверхню рослинного покриву від фази вихід в трубку до молочної стиглості, узгоджується з поведінкою індексу Green NDVI (740, 560) для обох досліджених тест-ділянок озимої пшениці. Аналізується динаміка інших 14-ти індексів за умови погіршення фітосанітарної ситуації посіву озимої пшениці сорту Богдана.

Ключові слова: вегетаційні індекси, Sentinel-2A, посіви озимої пшениці, вміст загального азоту

© Г. М. Жолобак, О. М. Сибірцева, М. В. Ваколюк, І. Ф. Романчук. 2018

Вступ

Після успішного запуску двох космічних апаратів серії Sentinel-2, обладнаних мультиспектральним інструментом (MSI) зі спектральною та просторовою розрізненістю, яка вважається придатною для характеристики біофізичних та біохімічних параметрів рослинності, з'явилися публікації, присвячені використанню супутникових даних Sentinel-2 в сільськогосподарських цілях. Наприклад, Clevers J. G. P. W. et al. [8] вперше повідомив, що за допомогою космічних знімків Sentinel-2 можна кількісно оцінити значення листкового індексу рослинності, вміст хлорофілу в листках та в рослинному покриві картоплі. Зростаюча просторова та часова роздільна здатність загальнодоступних супутникових зображень Sentinel-2 надає також нові можливості для створення точних наборів даних про наявні види культурних рослин на конкретних земельних ділянках у форматі готових векторних даних [8].

Наш авторський колектив вже повідомляв про результати застосування супутникових знімків Sentinel-2A для вивчення вегетації двох сортів озимої пшениці (ОП), вирощених на виробничих посівах під урожай 2016 р. Барішівської зернової компанії (БЗК) [1]. Обчислені за дистанційними даними показники досліджених трьох нормалізованих різницевого індексів виявили інверсію стану посівів, яка відбулась зразу після весняного відновлення вегетації рослин озимої пшениці і була зумовлена, найбільш віро-

гідно, інфікуванням збудниками грибних захворювань одного з посівів.

Під час виконання наземних обстежень цих угідь було отримано біологічний матеріал в якому визначено біохімічний показник — вміст загального азоту в рослинному покриві для двох окремих тест-ділянок площею 1 га кожна. Маючи в розпорядженні знімки Sentinel-2A за чотири дати першої половини 2016 р. для цих полів, постало завдання дослідити деякі інші вегетаційні індекси (ВІ) на предмет їх узгодженості зі змінами вмісту азоту в органах озимої пшениці, які створюють відбивну поверхню посіву в межах більш детально обстежених тест-ділянок.

Мета роботи

Проаналізувати хід динаміки 15-ти ВІ за даними супутника Sentinel-2A впродовж вегетаційного періоду 2016 р. на досліджених тест-ділянках двох відмінних за станом і сортами виробничих посівів ОП та зіставити їх зі змінами вмісту азоту в рослинному покриві.

Об'єкт та методи досліджень

Об'єкт досліджень — дві ділянки посівів озимої пшениці площею 1 га кожна, які були розташовані на виробничих полях БЗК поблизу м. Березань Барішівського району Київської області (координати центрів обох ділянок відповідно: першої — 50°21'02.4" пн. ш. і 31°36'12.03" сх. д. та другої — 50°19'57.83" пн. ш. і 31°33'12.97" сх. д.) (рис.1). Відстань між центрами цих тест-ділянок становить 4.06 км.

* E-mail: zhgm@casre.kiev.ua. Tel. +38 044 486 11 48



Рис. 1. Схема розташування тестових ділянок на досліджених полях ОП у Баришівському районі Київської області (2016 р.)

Опис наземних обстежень тест-ділянок озимої пшениці

Тест-ділянка 1 знаходилась на посіві німецького сорту Скаген, а тест-ділянка 2 — на полі, де вирощувався вітчизняний сорт Богдана. Під час наземного обстеження 10 травня 2016 р. на тест-ділянці 2 було виявлено плямистість листків та білий наліт на стеблах, які є симптомами грибних захворювань рослин. Крім того на цій ділянці спостерігалась чимала кількість мікрозападин рельєфу — “подів”, заповнених дощовою водою після сильних опадів, які пройшли напередодні. Докладніше стан вологості ґрунтового покриву досліджених полів в мікрозападинах та на вододілі описано в публікації [3]. Водночас, рослини тест-ділянки 1 зі сортом Скаген були практично здоровими. Впродовж весняно-літньої вегетації 2016 р. на цих ділянках здійснювали наземні вимірювання окремих параметрів продукційного процесу, в тому числі й сирової біомаси пагонів рослин ОП (детальніше про фази вегетації та особливості вирощування див. [1]). Після висушування біомаси, зібраної 10 травня і 17 червня 2016 р., в органах, які формували відбивну поверхню посіву, визначали вміст загального азоту макрометодом К'ельдаля (наважка однієї проби рослинного матеріалу становила 20 г сухої речовини) в лабораторії гідробіології та екотоксикології Інституту зоології НАН Молдови [4]. Біохімічний аналіз проводили у триразовій біологічній повторності. Тут же доцільно зазначити, що технологія та обсяги внесення азотних добрив для обох полів були однаковими, а саме: після посіву (09–13 вересня 2015 р.) по полях було розкидано суху нітроамофоску 80 кг/га та за допомогою обприскувача “Політ” внесено рідку суміш Карбамід в дозі 200 кг/га. Навесні двічі проводили азотне підживлення аміачною селітрою: спочатку по мерзлоталому ґрунту 02 березня 2016 р. в дозі 200 кг/га, а згодом — 10–19 квітня 2016 р. в дозі 100 кг/га.

Коротка характеристика вегетаційних індексів, обчислених на основі даних зйомок зі супутника Sentinel-2A

В роботі джерелом супутникових даних слугували фрагменти знімків Sentinel-2A за 18 лютого, 08 квітня, 28 квітня та 17 червня 2016 р., які відображають територію розташування обстежених полів БЗК. Ці фрагменти оброблялися за допомогою модуля Modeller програми Erdas Imagine, для обчислення 15-ти вегетаційних індексів (табл. 1) за відповідними формулами для вказаних дослідних ділянок.

Вісім з використаних нами VI є так званими двоканальними і обчислювалися за алгоритмом найбільш відомого і широко використовуваного NDVI — нормалізованого різницевого вегетаційного індексу [17], відрізняючись лише довжиною хвилі потрібного каналу, відсоток відбиття якого враховувався при розрахунку індексу. Перші три індекси цього типу з таблиці 1 обчислювалися із залученням “зеленого” каналу, інші долучали коефіцієнти відбиття з каналів, що знаходяться в області “червоного краю”. Такий вибір каналів був зумовлений аналізом публікацій, де йшлося про зв'язок відповідних індексів з вмістом хлорофілу та азоту в рослинному покриві. Слід зауважити, що при визначенні NDVI (720, 790) для отримання значень відбиття на 720 нм було вираховано середнє значення між 5 і 6 каналами Sentinel-2A з центральною довжиною хвилі відповідно 705 та 740 нм. Скорегований на ґрунт індекс SAVI — це аналог NDVI з додатком коефіцієнта яскравості ґрунту L. Величина L залежить від щільності покриття зеленою рослинністю: при щільному покритті зеленою рослинністю $L = 0$; а без неї $L = 1$; в загальному випадку $L = 0.5$. В наших розрахунках для обчислення SAVI теж брали значення: $L = 0.5$. $CI_{rededge}$ та CI_{green} — це так само двоканальні різновиди індексів простого відношення, а новий індекс ΔRE теж працює на комбінації двох вузьких каналів в області red та red edge з центрами 730 нм 780 нм і обчислюється як різниця натуральних логарифмів показників відбиття в цих областях (нами викорис-

Таблиця 1.

Використані в даній роботі вегетаційні індекси за даними знімків супутника Sentinel-2A

№	Індекс	Центральна довжина хвилі каналу Sentinel-2A, нм	Формула	Посилання
1	NDVI (560, 665)	560, 665	$NDVI(560,665) = \frac{R(560) - R(665)}{R(560) + R(665)}$	
2	Green NDVI (740, 560)	560, 740	$GreenNDVI = \frac{R(740) - R(560)}{R(740) + R(560)}$	
3	NDVI (842, 560)	560, 842	$NDVI(842,560) = \frac{R(842) - R(560)}{R(842) + R(560)}$	
4	NDVI(842,665)	665, 842	$NDVI(842,665) = \frac{R(842) - R(665)}{R(842) + R(665)}$	[17]
5	NDVI(740,665)	665, 740	$NDVI(740,665) = \frac{R(740) - R(665)}{R(740) + R(665)}$	
6	NDVI (790, 720)	720, 783	$NDVI(790,720) = \frac{R(790) - R(720)}{R(790) + R(720)}$	
7	NDVI (780, 705)	705, 783	$NDVI(780,705) = \frac{R(780) - R(705)}{R(780) + R(705)}$	
8	NDVI (780, 740)	740, 783	$NDVI(780,740) = \frac{R(780) - R(740)}{R(780) + R(740)}$	
9	SAVI Soil Adjusted Vegetation Index	665, 842	$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L)$	[15]
10	CI _{rededge} red edge chlorophyll index	705, 783	$CI_{rededge} = \left(\frac{R(783)}{R(705)} \right) - 1$	[13]
11	CI _{green} Green chlorophyll index	560, 783	$CI_{green} = \left(\frac{R(783)}{R(560)} \right) - 1$	[13]
12	ΔRE дельта Red Edge	740, 783	$\Delta RE = \ln(\rho_1) - \ln(\rho_2)$ $\rho_1 = R(783), \rho_2 = R(740)$	[18]
13	NI _{Tian} Nitrogen Index _{Tian}	490, 705, 740	$NI_{Tian} = \frac{R(740)}{R(717) + R(491)}$	[7]
14	MTCI MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	665; 705; 740	$MTCI = \frac{R(740) - R(705)}{R(705) - R(665)}$	[10]
15	REP Red Edge Position	665; 705; 740; 783	$REP = 700 + 40 \frac{(\bar{R} - R(700))}{(R(740) - R(700))}$ $\bar{R} = \frac{R(670) + R(780)}{2}$	[14]

тано значення з 6 та 7 каналів Sentinel-2A). Решта три індекси обчислювались із залученням коефіцієнтів відбиття з трьох (MTCI та NI_{Tian}) та чотирьох (REP) каналів супутника Sentinel-2A.

Результати та обговорення

А) вміст загального азоту в органах, які формували відбивну поверхню посіву ОП

Як засвідчує рис. 2, за вмістом азоту в листках у фазу вихід в трубку (10 травня 2016 р.) рослини обох досліджуваних сортів достовірно відрізнялись. Зокрема в сухій речовині листків сорту Скаген містилось 4.64% загального азоту, що більш, ніж на 30% вище, ніж у листках сорту Богдана, де цей показник

становив майже 3.5%. Слід зазначити, що така величина узгоджується з цим параметром, виміряним іншими авторами для багатьох традиційних та новітніх сортів і ліній озимої пшениці [5, 6]. В наступні важливі для майбутнього врожаю фази вегетації, коли в рослинах після колосіння і цвітіння з'явилися зернівки, які є потужним акцептором азотовмісних сполук, на жаль, не було технічних можливостей відібрати проби рослинного матеріалу. Тому ще одне визначення вмісту азоту нами було виконано вже для фази молочної стиглості (17 червня 2016 р.) і в інших органах, які на той час формували відбивну поверхню посіву, а точніше, в колосах з зернівками. Тут спостерігалось таке ж співвідношення між обома сортами пшениць, як і на дату 10 травня, а саме: за вмістом азоту в сухій речо-

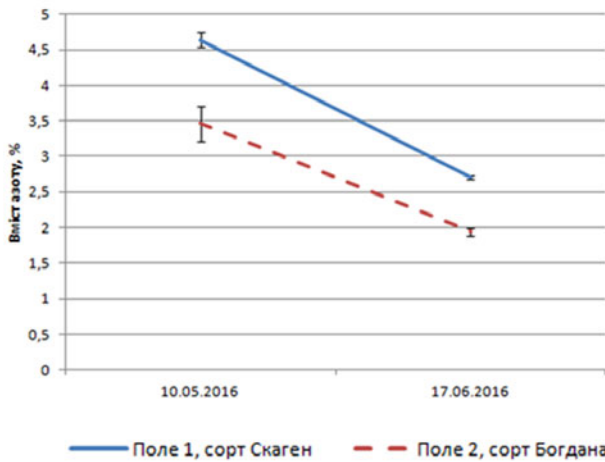


Рис. 2. Динаміка вмісту азоту в сухій речовині органів озимої пшениці, які створюють відбивну поверхню посіву (10 травня 2016 р. — листки, 17 червня 2016 р. — колос з зернівкою)

вині колосків, наповнених несформованим зерном, рослини сорту Скаген достовірно переважали сорт Богдана. Величина цього показника, виміряна через 39 днів в колосі, була майже на 40% нижча для обох сортів у порівнянні з листками. Аналогічна закономірність була описана Єрошенко В. Ф. та ін. [2], які вимірювали вміст азоту в листках, стеблах, колосі та зерні чотирьох сортів озимої пшениці впродовж вегетації, і також констатували, що концентрація азоту в органах рослин впродовж росту і розвитку знижується.

В монографії Шадчиної Т. М. [6] теж зазначається, що вміст загального азоту в листках рослин озимої пшениці впродовж вегетації весь час знижується, динаміка цього показника є складною і значною мірою залежить від особливостей технології вирощування. В нашому випадку технологія вирощування обох сортів пшениці була практично однаковою і лише сортові особливості та, можливо, дещо запізнена обробка рослин сорту Богдана засобами захисту рослин і, як наслідок, розвиток грибних хвороб листя та колосу спричинили нижчий вміст загального азоту в досліджених органах рослин цього сорту.

Б) аналіз динаміки вегетаційних індексів за даними Sentinel-2A

Для даних тест-ділянок нами були розраховані 15 VI та їх стандартні відхилення (табл. 2). Величини VI подані в умовних одиницях, а для індексу REP — у нанометрах. Якщо порівнювати їх між собою стосовно двох сортів ОП, то під час зимового спокою вищі значення всіх індексів були характерні для тест-ділянки посіву сорту Богдана, але після весняного відновлення вегетації відбулась інверсія стану посівів і на 17 червня 2016 р. ці 15 VI для тест-ділянки сорту Скаген достовірно перевищували відповідні показники сорту Богдана. Це свідчить про

дистанційно виявлений гірший стан рослинності дослідженої ділянки посіву сорту Богдана на початок літа 2016 р. і кращий — для сорту Скаген.

За період від кінця квітня до середини червня 2016 р. для тест-ділянки зі сортом Богдана чітко падіння значень демонструють всі VI, які вимірюються в умовних одиницях. Тільки індекс REP не зафіксував зміщення позиції червоного краю на цій тест-ділянці поля 2 між 28 квітня і 17 червня 2016 р. Оскільки поведінка цього індексу у порівнянні з іншими 14 VI нетипова для сорту Богдана, проаналізуємо її детальніше (рис. 3).

На дату 18 лютого 2016 р. положення червоного краю вказує на дещо кращий стан тест-ділянки на полі 2 з вітчизняним сортом, хоча ця різниця незначна (1.35 нм) і навіть не перевищує стандартного відхилення (1.55 нм). На початку квітня значення індексу REP для тест-ділянок полів практично однакові (майже 723 нм), а в подальшому до настання молочної стиглості зерна його достовірний приріст (майже на 6 нм до 729.2 нм) спостерігається лише на тест-ділянці поля 1 зі сортом ОП Скаген. Тест-ділянка поля 2 демонструє тільки незначну тенденцію до зростання цього індексу впродовж весняно-літньої вегетації, бо для сорту Богдана його різниця від 08 квітня до 17 червня 2016 р. становить всього 1.2 нм, що лише на 0.5 нм більше величини стандартного відхилення для цього поля. Така незначна зміна цього індексу на полі 2 викликана високим генетичним потенціалом вітчизняного сорту Богдана, який, на жаль, через інфікування збудниками грибних захворювань не зміг повністю реалізуватись в досліджених умовах. На загал, положення червоного краю стосовно рослинного покриву вказує на стан рослин, який може бути зумовлений різними факторами: значеннями листового індексу, особливостями мінерального живлення, вмістом води та хлорофілу в органах рослин, сезонними змінами чи загальною біомасою покриву тощо. Отже, поведінка індексу REP для досліджених тест-ділянок засвідчує, що впродовж весняно-літньої вегетації суттєво покращується стан вегетаційного покриву тільки на тест-ділянці поля 1 зі сортом ОП Скаген, в той час як інтегральна оцінка стану рослин ОП сорту Богдана з поля 2 на підставі індексу REP достовірно не змінюється.

Відомо [11], що зміщення позиції червоного краю в сторону довгих хвиль (в нашому випадку на 6 нм) вказує на вищий вміст хлорофілу в рослинному покриві. Тому цікаво, яким з обчислених нами індексів характерне зростання для рослин сорту Скаген від кінця квітня до середини червня 2016 р. Виявляється такий достовірний приріст також демонструє лише індекс ΔRE (рис. 4), який, до речі, цікавий тим, що має найнижчі, з поміж інших індексів, цифрові значення. Як видно з наведеного рисунка, до 28 квітня 2016 року відмінності між ділянками перебувають в межах помилки дослідження, але зростання ве-

Таблиця 2.

Значення вегетаційних індексів для тест-ділянок посівів озимої пшениці Баришівської зернової компанії у 2016 р. за даними Sentinel-2A

№	Індекс	Поле, дата	18.02.2016	08.04.2016	28.04.2016	17.06.2016
1	NDVI (842.560)	Поле 1. сорг Скаген	0.225±0.034	0.353±0.021	0.671±0.031	0.625±0.033
		Поле 2. сорг Богдана	0.319±0.019	0.372±0.015	0.649±0.024	0.469±0.020
2	NDVI (560.665)	Поле 1. сорг Скаген	0.076±0.016	0.085±0.013	0.238±0.024	0.215±0.019
		Поле 2. сорг Богдана	0.110±0.011	0.083±0.010	0.246±0.018	0.130±0.012
3	NI_Tian	Поле 1. сорг Скаген	0.529±0.022	0.672±0.010	0.976±0.027	0.965±0.027
		Поле 2. сорг Богдана	0.604±0.010	0.682±0.008	0.953±0.023	0.792±0.012
4	NDVI (842.665)	Поле 1. сорг Скаген	0.278±0.039	0.401±0.026	0.743±0.033	0.717±0.033
		Поле 2. сорг Богдана	0.390±0.018	0.422±0.017	0.731±0.024	0.539±0.021
5	NDVI (740.665)	Поле 1. сорг Скаген	0.220±0.038	0.351±0.019	0.680±0.027	0.644±0.029
		Поле 2. сорг Богдана	0.335±0.027	0.369±0.016	0.674±0.019	0.470±0.017
6	CI _{rededge}	Поле 1. сорг Скаген	0.391±0.066	0.986±0.075	3.181±0.318	2.932±0.368
		Поле 2. сорг Богдана	0.66±0.046	1.046±0.057	2.813±0.206	1.362±0.105
7	CI _{green}	Поле 1. сорг Скаген	0.482±0.110	1.068±0.059	3.342±0.303	3.285±0.313
		Поле 2. сорг Богдана	0.798±0.090	1.168±0.052	3.005±0.218	1.683±0.084
8	NDVI (790.720)	Поле 1. сорг Скаген	0.116±0.022	0.257±0.015	0.516±0.023	0.496±0.025
		Поле 2. сорг Богдана	0.197±0.014	0.266±0.012	0.492±0.017	0.324±0.013
9	SAVI	Поле 1. сорг Скаген	0.417±0.059	0.602±0.039	1.115±0.050	1.075±0.049
		Поле 2. сорг Богдана	0.584±0.027	0.633±0.026	1.096±0.035	0.809±0.032
10	NDVI (780.705)	Поле 1. сорг Скаген	0.163±0.022	0.330±0.017	0.614±0.025	0.618±0.028
		Поле 2. сорг Богдана	0.228±0.013	0.343±0.012	0.583±0.018	0.422±0.015
11	MTCI	Поле 1. сорг Скаген	1.332±0.385	3.738±0.726	5.342±0.658	5.539±0.405
		Поле 2. сорг Богдана	1.926±0.280	3.683±0.559	4.575±0.296	3.270±0.222
12	NDVI (780.740)	Поле 1. сорг Скаген	0.049±0.012	0.086±0.008	0.142±0.015	0.158±0.018
		Поле 2. сорг Богдана	0.053±0.011	0.085±0.009	0.130±0.016	0.124±0.012
13	REP (нм)	Поле 1. сорг Скаген	715.09±3.263	722.88±1.042	726±0.887	729.24±±0.857
		Поле 2. сорг Богдана	716.44±1.545	723.28±0.786	724.48±0.768	724.06±0.642
14	ΔRE	Поле 1. сорг Скаген	0.096±0.026	0.159±0.011	0.289±0.021	0.356±0.024
		Поле 2. сорг Богдана	0.108±0.017	0.171±0.008	0.256±0.020	0.227±0.012
15	Green NDVI (740.560)	Поле 1. сорг Скаген	0.146±0.032	0.276±0.011	0.592±0.021	0.499±0.022
		Поле 2. сорг Богдана	0.234±0.026	0.292±0.010	0.511±0.016	0.363±0.011

личини цього індексу для рослинного покриття тест-ділянки 2 зі сортом Скаген за травень–першу половину червня на 0.067 умовних одиниць достовірно перевищує показник стандартного відхилення (0.021 умовних одиниць). Варто зауважити, що тенденція до такого приросту властива ще трьом ВІ — NDVI (780, 705), NDVI (780, 740) та MTCI. З них MTCI відомий як стійкий показник вмісту хлорофілу в рослинному покритті [9].

Решта дев'ять ВІ (№№ 1–9, див. табл. 2) продемонстрували фактично однакові тенденції. Для прикладу тут подано графіки динаміки двох індексів CI_{rededge} та NDVI (740, 665) (рис. 5). Як бачимо, в лютому 2016 р. вищі показники ВІ були властиві рослинному покриттю тест-ділянки поля 2, сформованому вітчизняним сортом Богдана. В період від весняного відновлення вегетації до настання фази виходу в трубку відбувається як зро-

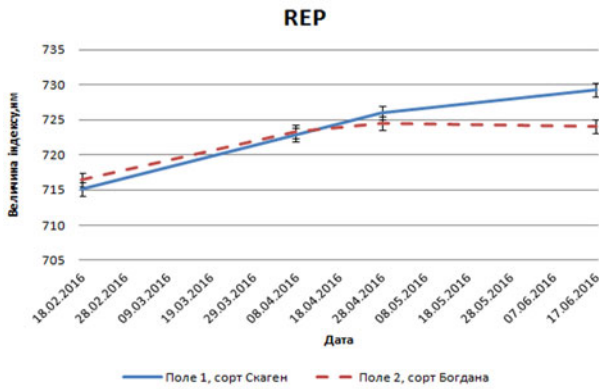


Рис. 3. Динаміка індексу REP для тест-ділянок посівів озимої пшениці Баришівської зернової компанії у 2016 р. за даними Sentinel-2. Вертикальні риси — показники стандартного відхилення

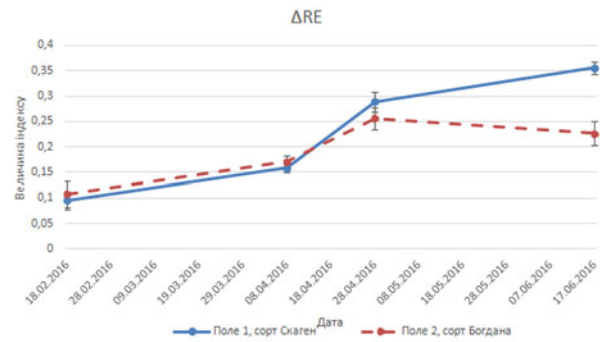


Рис. 4. Динаміка індексу ΔRE для тест-ділянок посівів озимої пшениці Баришівської зернової компанії у 2016 р. за даними Sentinel-2. Вертикальні риси — показники стандартного відхилення

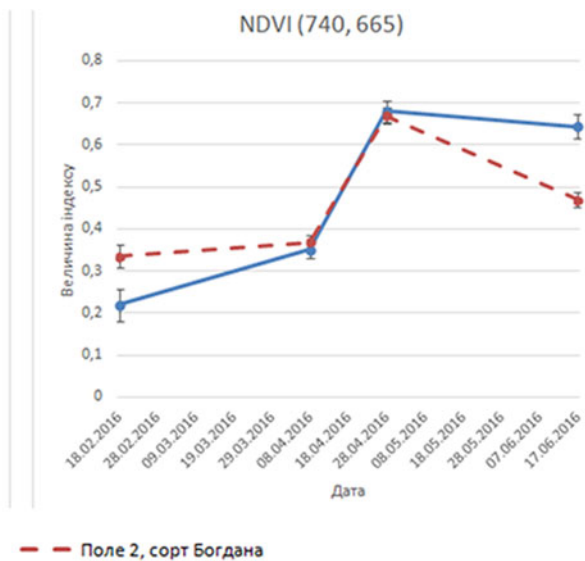
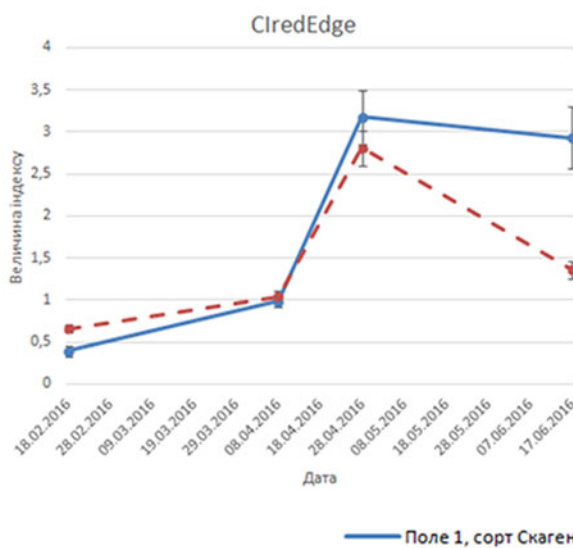


Рис. 5. Динаміка індексів Cirededge та NDVI (740,665) для тест-ділянок посівів озимої пшениці Баришівської зернової компанії у 2016 р. за даними Sentinel-2. Вертикальні риси — показники стандартного відхилення

стання показників цих VI, так і зміна стану посівів: сорт Богдана через ускладнення фітопатологічної ситуації втрачає свої домінуючі позиції, зафіксовані на початку спостережень, натомість сорт Скаген демонструє приріст значень всіх досліджених індексів. Після початку досягання зернівки фотосинтетичний потенціал рослинного покриву обох сортів знижується, про що свідчить падіння значень цих 9-ти вегетаційних індексів на дату 17 червня 2016 р. у порівнянні з кінцем квітня. Причому, як вже вказувалось вище, для тест-ділянки поля 2 (сорт Богдана) це падіння було різким і достовірним найбільш вірогідно через ураження грибними хворобами або через несприятливі умови водного режиму цього поля, в той час як для тест-ділянки поля 1 зі сортом Скаген зниження значень всіх дев'яти індексів від 28 квітня до 17 червня знаходились в межах помилки дослідження. Під час наливу зерна відбувається природне старін-

ня листків і поступове зменшення інтенсивності фотосинтезу посівів. На нашу думку, саме ці процеси відображаються в плавному зниженні значень переважної більшості VI, обчислених для тест-ділянки зі сортом Скаген.

І, нарешті, нами було виявлено лише один VI, значення якого для тест-ділянки поля 1 зі сортом Скаген за період від кінця квітня до середини червня 2016 р. достовірно знижуються (на 0.093 умовних одиниць при значенні стандартного відхилення 0.021 умовних одиниць). Мова йде про так званий зелений NDVI — Green NDVI (740, 560) (рис. 6). Цей індекс засвідчує достовірну відмінність між тест-ділянками для всіх дат вимірювання за винятком початку квітня. Найголовніше те, що хід ліній його динаміки в період між 08 травня і 17 червня 2016 року тотожний до зміни вмісту азоту в рослинному покриві обох досліджених тест-ділянок. Хоча 08 травня показник Green NDVI не обчислювався, але ціна поді-

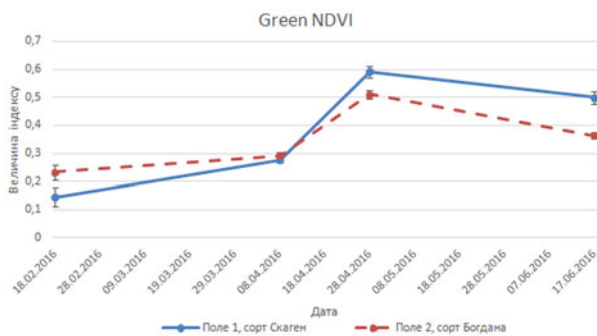


Рис. 6. Динаміка індексу Green NDVI (740, 560) для тест-ділянок посівів озимої пшениці Баришівської зернової компанії у 2016 р. за даними Sentinel-2. Вертикальні риси — показники стандартного відхилення

лок осі дат виставлена з проміжком 10 днів, що дозволяє візуально порівнювати зміни значень індексу у зіставленні зі змінами вмісту азоту у рослинному покриві.

Відомо, що зелена область спектру є чутливою до змін листового індексу [16]. Відбиття рослинності в зеленій області спектра використали Strong C. J. et al. [18] для обчислення п'яти різних VI і порівняння їх з найпоширенішим NDVI на матеріалі, отриманому з мультиспектральної камери безпілотного літального апарату при вивченні пасовищ південно-східної Англії. В їх дослідженні вдосконалений індекс нормованої різниці (ENDVI), який розраховується із застосуванням трьох спектральних смуг (ближньої інфрачервоної, зеленої та синьої), був найефективнішим показником при диференціації трьох типів пасовищ.

Серед обчислених нами індексів в трьох використовувався “зелений” канал Sentinel-2, але лише в поєднанні з відбиттям на довжині хвилі з області червоного краю (шостий канал з центральною довжиною хвилі 740 нм) хід ліній Green NDVI (740, 560) узгоджувався зі змінами процентного вмісту азоту в рослинному покриві. Можливо, саме заміна БІЧ-каналу в традиційному Green NDVI, запропонованому Gitelson A. A. et al. [12], на один з вузьких каналів “червоного краю” спричинила отримані нами результати, хоча це припущення потребує детальнішої перевірки.

Висновки

1. Проаналізовано динаміку 15-ти VI, розрахованих за реальними супутниковими знімками Sentinel-2A в межах двох тест-ділянок площею 1 га, що знаходились на виробничих посівах ОП двох сортів (Богдана і Скаген), впродовж періоду зимового спокою та весняно-літньої вегетації 2016 року.
2. Визначено вміст загального азоту в сухій речовині органів, які формували відбивну поверхню посіву у фазах вихід в трубку та молочна стиглість, і встановлено, що за цим показником

рослини сорту Скаген достовірно більш, ніж на 30% переважали сорт Богдана.

3. Виявлено, що на початок літа 2016 р. всі індекси для тест-ділянки сорту Скаген достовірно перевищували відповідні показники сорту Богдана. Відмінності в динаміці VI для тест-ділянки поля 1 простежуються між датами 28 квітня та 17 червня 2016 р. Дев'ять VI демонструють повільне зниження своїх значень, три мають тенденцію до певного їх зростання, але ці зміни знаходяться в межах помилки досліду. Лише три VI тест-ділянки зі сортом Скаген достовірно змінюють свої величини за період від кінця квітня до середини червня 2016 р.: індекси REP та ΔRE зростають, а індекс Green NDVI, навпаки, знижується.
4. Падіння вмісту загального азоту в сухій речовині органів, які формували відбивну поверхню рослинного покриву за період досліджень, узгоджується з поведінкою індексу Green NDVI (740, 560) для обох досліджених тест-ділянок озимої пшениці.

Література

1. Дистанційний моніторинг стану посівів озимої пшениці впродовж весняно-літньої вегетації 2016 р. за вегетаційними індексами супутника Sentinel-2A (на прикладі Лісостепової зони України) [Електронний ресурс] / Г. М. Жолобак, О. М. Сибірцева, М. В. Ваколюк, Ю. В. Захарчук // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2017. — № 15. — С. 23–30. — Режим доступу: http://ujrs.org.ua/ujrs/issue/viewIssue/15/pdf_19. — Назва з екрану.
2. Ерошенко В. Ф. Использование азота растениями озимой пшеницы / В. Ф. Ерошенко А. А. Ерошенко, Т. В. Симатин // Достижения науки и техники АПК. — 2015. — Т. 29. — № 11. — С. 58–61.
3. Романчук І. Ф. Оцінка вологості ґрунту за допомогою супутникових знімків Sentinel-2 (на прикладі Баришівського полігону Київської області) [Електронний ресурс] / І. Ф. Романчук, О. І. Сахацький, О. А. Апостолов / / Допов. Нац. акад. наук Укр. — 2018. — № 1. — С. 60–66. Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.01.060>. — Назва з екрану.
4. Спирина В. З. Агрохимические методы исследования почв, растений и удобрений: учеб. пособие / В. З. Спирина, Т. П. Соловьева. — Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. — 336 с.
5. Тарасюк О. І. Вміст у листках азоту та продуктивність ліній озимої м'якої пшениці, унікальних за хлібопекарськими властивостями / О. І. Тарасюк, В. М. Починок // Физиология растений и генетика. — 2015. — Т. 47. — № 1. — С. 66–73.
6. Шадчина Т. М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових / Т. М. Шадчина. — К.: Фітосоціоцентр, 2001. — 220 с.
7. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with

- ground- and space-based hyperspectral reflectance / Y. C. Tian, X. Yao, J. Yang, W. X. Cao, D. B. Hannaway, Y. Zhu // *Field Crops Res.* — 2011. — V. 120. — P. 299–310.
8. Belgiu M. Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based timeweighted dynamic time warping analysis / M. Belgiu, O. Csillik // *Remote Sensing of Environment.* — 2018. — V. 204. — N 1. — P. 509–523.
 9. Clevers J. G. P. W. Using Sentinel-2 Data for Retrieving LAI and Leaf and Canopy Chlorophyll Content of a Potato Crop [Електронний ресурс] / J. G. P. W. Clevers, L. Kooistra, M. M. M. van den Brande // *Remote Sens.* — 2017. — V. 9. — N 5. — P. 405–420. — Режим доступу: <http://www.mdpi.com/2072-4292/9/5/405/htm>. — Назва з екрану.
 10. Dash J. The MERIS terrestrial chlorophyll index / J. Dash, P. J. Curran // *Int. Journal of Remote Sensing.* — 2004. — V. 25. — N 23. — P. 5403–5413.
 11. Dawson T. P. A new technique for interpolating the reflectance red edge position / T. P. Dawson, P. J. Curran // *International Journal of Remote Sensing.* — 1998. — V. 19. — № 11. — P. 2133–2139.
 12. Gitelson A. A. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS / A. A. Gitelson, Y. J. Kaufman, M. N. Merzlyak // *Remote Sensing of Environment.* — 1996. — V. 58. — № 3. — P. 289–298.
 13. Gitelson A. A. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves / A. A. Gitelson, G. P. Keydan, M. N. Merzlyak // *Geophysical Research.* — 2006. — Letters 33, L 11402.
 14. Horler D. N. H. The red edge of plant leaf reflectance / D. N. H. Horler, M. Dockray, J. Barber // *Int. Journal of Remote Sensing.* — 1983. — V. 4. — N 2. — P. 273–288.
 15. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) / A. R. Huete // *Remote Sensing of Environment.* — 1988. — V. 25. — N 3. — P. 295–309.
 16. LAI assessment of wheat and potato crops by VENUS and Sentinel-2 bands / I. Herrmann, A. Pimstein, A. Karnieli, Y. Cohen, V. Alchanatis, D. J. Bonfil // *Remote Sensing of Environment.* — 2011. — V. 115. — № 8. — P. 2141–2151.
 17. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation / J. W. Rouse, Jr. R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering // *Prog. Rep. RSC* 1978-1, 1973. — 93 p.
 18. Producing nitrogen (N) uptake maps in winter wheat by combining proximal crop measurements with Sentinel-2 and DMC satellite images in a decision support system for farmers / M. Söderström, K. Piikki, M. Stenberg, H. Stadig, J. Martinsson // *Acta agriculturae scandinavica, section B — soil and plant science.* — 2017. — V. 67. — N 7. — P. 637–650.
 19. Strong C. J. The potential of small-Unmanned Aircraft Systems for the rapid detection of threatened unimproved grassland communities using an Enhanced Normalized Difference Vegetation Index [Електронний ресурс] / C. J. Strong, N. G. Burnside, D. Llewellyn // *PLoS ONE.* — 2017. — № 12 (10). — P. 1–16. Режим доступу: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186193>. — Назва з екрану.

АНАЛИЗ 15-ТИ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ, РАССЧИТАННЫХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-2А ДЛЯ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ ПО СОСТОЯНИЮ ТЕСТ - УЧАСТКОВ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ УКРАИНЫ

Г. М. Жолобак, О. Н. Сибирцева, М. В. Ваколюк, И. Ф. Романчук

Проанализирована динамика 15-ти вегетационных индексов, рассчитанных по спутниковым снимкам Sentinel-2А для двух тест-участков площадью 1 га, расположенных на производственных посевах озимой пшеницы двух сортов (Богдана и Скаген), в течение периода зимнего покоя и весенне-летней вегетации 2016 года. Обнаружено, что снижение содержания общего азота в сухом веществе органов, которые формировали отражающую поверхность растительного покрова от фазы выход в трубку до молочной спелости, согласуется с поведением индекса Green NDVI (740, 560) для обоих проанализированных тест - участков озимой пшеницы. Обсуждается динамика других 14-ти индексов в условиях ухудшения фитосанитарной ситуации посева озимой пшеницы сорта Богдана.

Ключевые слова: вегетационные индексы, Sentinel-2А, посевы озимой пшеницы, содержание общего азота

ANALYSIS OF DYNAMICS FOR 15 VEGETATION INDICES BASED ON SENTINEL-2A IMAGE DATA FOR THE TEST SITES OF WINTER WHEAT CROP DIFFERENT ON THE STATE FROM EACH OTHER WITHIN THE FOREST-STEEP ZONE IN UKRAINE

G. M. Zholobak, O. M. Sibirtseva, M. V. Vakolyuk, I. F. Romanciuc

Dynamics of 15 vegetation indices estimated from the Sentinel-2A images within two test sites with the area of 1 ha for the production crops of two winter wheat cultivars (Bohdana and Skagen) are analyzed for winter dormancy and spring - early summer in 2016. The decrease of total nitrogen content in dry matter of the plant organs, which are formed the reflecting surface of the vegetation cover from the booting stage to milk one is consistent with the behavior of the Green NDVI (740, 560) for the both test sites of winter wheat cover. Dynamics of the other 14 indices have been analyzed under the conditions of the deterioration of phytosanitary situation for the winter wheat crop of Bohdana cultivar.

Key words: vegetation indices, Sentinel-2A, winter wheat crop, total nitrogen content