

УДК 528.8.04:633.11

Аналіз та порівняння вегетаційних індексів посівів озимої пшениці, розрахованих на основі дистанційних даних зі супутника Sentinel-2 та спектрорадіометра FieldSpec

В. І. Лялько, О. І. Сахацький, Г. М. Жолобак*, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, М. В. Ваколюк

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

Досліджено десять вегетаційних індексів (VI), обчислених одночасно як за супутниковими даними Sentinel-2, так і за результатами наземного спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR, для тотожних за географічними координатами ділянок виробничих посівів озимої пшениці двох сортів Богдана і Скаген. Виявлено, що значення більшості досліджених VI за супутниковими даними місії Sentinel-2 близькі за величиною до аналогічних індексів, обчислених за вузькими спектральними каналами ASD FieldSpec® 3FR, за винятком DRI_{CI} (Double ratio index for chlorophyll index) та CI_{green} (ratio green chlorophyll index), значення яких за супутниковими каналами значно нижчі, ніж за показниками спектрорадіометра. Продемонстровано, що розбіжності VI за Sentinel-2 та ASD FieldSpec® 3FR залежать від фази розвитку рослин озимої пшениці: впродовж вегетації коефіцієнти кореляції між ними зростають для посівів обох досліджених сортів.

Ключові слова: вегетаційні індекси, Sentinel-2, наземна спектрометрична зйомка, виробничі посіви озимої пшениці

© В. І. Лялько, О. І. Сахацький, Г. М. Жолобак, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, М. В. Ваколюк. 2017

Вступ

До середини 2015 року одними з найбільш поширених супутникових даних, котрі використовувались для дистанційної оцінки змін довкілля, в тому числі і досліджень агроландшафтів, були знімки, виконані бортовими сенсорами американських космічних апаратів (КА) програми Landsat, яка триває вже понад 40 років. Проте 23 червня 2015 року з космодрому Куру (Французька Гвіана) було виведено на орбіту супутник нового покоління Sentinel-2A Європейського космічного агентства (ЄКА). Цей запуск здійснено в рамках космічної програми моніторингу Землі Copernicus. Її метою є створення низки супутників, які збиратимуть величезний масив різних даних про стан планети. Всі ці показники після обробки і зіставлення повинні надати повну картину змін, що відбуваються на Землі. Згідно умов доступу до даних [8], різні групи користувачів мають вільний доступ до тієї інформації, яка представляє для них інтерес.

Програма Sentinel ЄКА охоплює п'ять різновидів супутників: Sentinel-1 призначений для отримання комплексних радіолокаційних даних; Sentinel-2 і Sentinel-3 забезпечують моніторинг земної поверхні і океану за допомогою мультиспектральних інструментів; Sentinel-4 і Sentinel-5 створені для метеорологічних і кліматичних досліджень, що ґрунтуються на вивченні складу атмосфери.

Вже через кілька днів після виходу на орбіту КА

Sentinel-2A було отримано перші знімки дуже високої якості. Камери супутника охоплюють смугу 290 км завширшки, що на 65 км більше, ніж у КА Landsat-8, та й просторова розрізненість більшості спектральних каналів у нього краща у порівнянні з американським КА. Згідно технічних характеристик, систематичне покриття космічними знімками Sentinel-2 території планети здійснюватиметься між 84° північної і 56° південної широти, з частотою зйомки на рівні екватора приблизно раз у п'ять днів (після запуску Sentinel-2B), в середніх широтах — раз у два–три дні. Висота орбіти супутника становить 786 кілометрів. Зйомка ведеться в 13-ти спектральних каналах з просторовим розрізненням 10, 20 або 60 м (табл. 1) [10].

Таблиця 1.

Коротка характеристика каналів супутників місії Sentinel-2 [10]

Номер каналу	Центральна довжина хвилі, нм	Ширина каналу, нм	Просторова розрізненість, м
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
8	842	115	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8a	865	20	20
11	1 610	90	20
12	2 190	180	20
1	443	20	60
9	945	20	60
10	1 375	30	60

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

Оскільки минуло лише півтора року після запуску супутника (23 червня 2015 р.), то у відкритому друці з'явилося порівняно небагато статей стосовно застосування знімків Sentinel-2A для вирішення екологічних проблем та/чи класифікаційних задач. Зокрема, цікавими є результати дослідження М. Імміцера зі співавт. [7], котрі представили попередні результати оцінки двох класифікаційних можливостей передексплуатаційних (серпень 2015 р.) знімків Sentinel-2 для розрізнення типів сільськогосподарських культур і дерев різних таксонів. У першому випадку знімок Sentinel-2 (30 серпня 2015 р.) був використаний для створення карти посівних територій шести видів ярих сільськогосподарських культур (кукурудза, соняшник, соя, цукровий буряк і овочеві — цибуля та морква) та відокремлення озимих культур від чистого ґрунту. Досліджувана територія розташована на низовині Мархфелд, яка знаходиться на схід від Відня в Нижній Австрії і є традиційним постачальником свіжої городини для жителів австрійської столиці та вважається “житницею Австрії”. Загальна точність об'єктно-орієнтованої і попиксельної класифікації перелічених вище культур становить відповідно 76.8% та 83%. У другому випадку ці ж автори здійснили картографування двох заліснених територій, розташованих поблизу міст Еберсберга та Альгеттінга на схід від Мюнхена (Баварія, Німеччина), і продемонстрували точність 66.2% для об'єктно-орієнтованої та 63.5% для попиксельної класифікації (знімок від 13 серпня 2015 р.). Результати дослідження підтвердили велике значення червоного краю та короткохвильових інфрачервоних каналів для картування рослинності. Також наголошується на важливості врахування блакитної смуги при розділенні як сільськогосподарських культур, так і видів дерев.

Загальновідомо, що вегетаційні індекси (VI), розраховані за допомогою комбінювання коефіцієнтів відбиття різних спектральних діапазонів, особливо

в області т. зв. “червоного краю”, є надійним інструментом оцінки стану рослинного покриву. У статті Ж. Редокс зі співавторами [9] можна ознайомитись з великою кількістю проаналізованих VI, отриманих як за даними Sentinel-2, так і інших КА, та їх потенціалом для виділення окремих елементів ландшафту, розрізнення посівів кукурудзи від пасовищ чи класифікування різних типів лісів. Тому, з огляду на появу високоякісних знімків з КА Sentinel-2 надзвичайно актуально дослідити їх придатність для розв'язання різноманітних наукових та народногосподарських задач.

Метою даної роботи є зіставлення вегетаційних індексів, обчислених одночасно як за супутниковими даними космознімків Sentinel-2A, так і за результатами наземного спектрометрування посівів озимої пшениці спектро радіометром ASD FieldSpec[®]3FR.

Методика

Озима пшениця (ОП) двох сортів Скаген (поле 1) і Богдана (поле 2) вирощувалась під урожай 2016 р. на угіддях Баришівської зернової компанії поблизу м. Березань Баришівського району Київської області. На цих полях були підібрані тестові ділянки, типові за густотою стояння рослин, де здійснювали спектрометрування та визначали інші параметри, що характеризують продукційний процес. Розташування тестових ділянок на двох досліджених у 2016 р. полях ОП представлено на рис. 1.

Загальний вигляд досліджених полів зображено на рис. 2.

Під час польових досліджень рослини ОП перебували в таких фазах розвитку:

- куціння - 08 квітня 2016 р. (рис. 3, а);
- початок виходу в трубку (2-ге міжвузля) - 28 квітня 2016 р. (рис. 3, б);
- вихід в трубку — 10 травня 2016 р. (рис. 3, в);
- молочна стиглість — 17 червня 2016 р. (рис. 3, г).



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



Рис 2. Загальний вигляд виробничих посівів ОП, де виконувалося спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR (квітень, 2016 р.): а - дослідне поле 1, ОП сорт Скаген; б - дослідне поле 2, ОП сорт Богдана

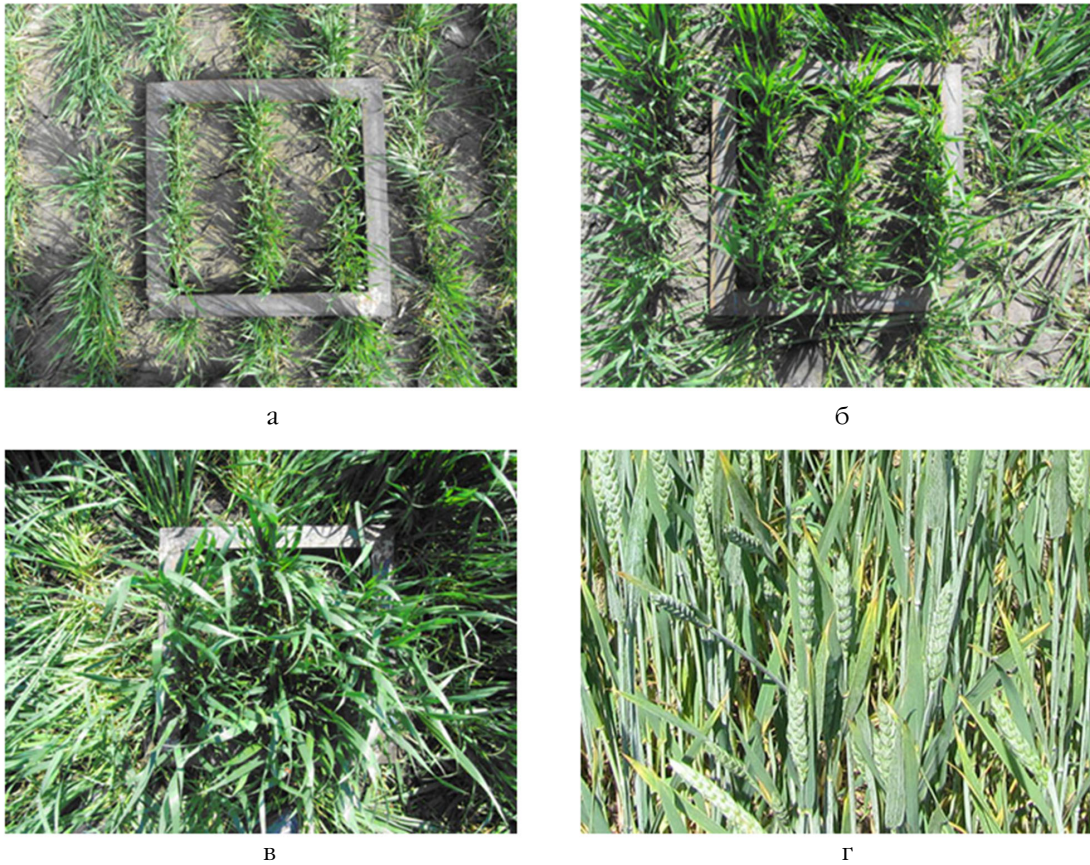


Рис 3. Фото ділянок ОП у різних фазах розвитку (весняно-літня вегетація 2016 р.): а — куціння; б — початок виходу в трубку (2-ге міжвузля); в — вихід в трубку; г — молочна стиглість

Дослідне поле 2 характеризувалося більшою неоднорідністю, ніж поле 1, що відобразилося на строкатості супутникових зображень. При обстеженні полів 10 травня 2016 р. у фазі вихід в трубку було виявлено ураження ОП фузаріозом (рис. 4). В подальшому на цьому полі проявилось почорніння колоса та зменшення біомаси рослинності.

Спектрометрування посівів ОП здійснювалося від

12 до 15 год. при яасному небі приладом ASD FieldSpec® 3FR — польовим портативним переносним спектро радіометром з робочим спектральним діапазоном від 350 до 2500 нм. Весь спектр 350-2500 нм відображається в реальному часі на дисплеї. З його іншими технічними параметрами можна ознайомитись за посиланнями: <http://www.asdirus.ru/catalog/25/> та <http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-portable-spectroradiometer>. Для отриман-



Рис 4. Фото рослин ОП сорту Богдана (дослідне поле 2, 10.05.2016 р.) з проявами фузаріозу

ня спектрів відбиття оптична насадка приладу встановлювалась скраю посіву на центральній поздовжній осі ділянки. Кут огляду використаного об'єктива — 1° , тримач пістолетного типу з оптичною насадкою закріплювався на стандартному штативі з висотою над поверхнею ґрунту — 1.2 м, віддаль від об'єктива до ділянки спектрометрування посіву — 5 м, величина площі посіву, яка потрапляє в поле зору — 80 см^2 , кут нахилу оптичної осі об'єктива до вимірюваної площі — 14° . Калібрування до білого проводилось перед кожним вимірюванням на ділянці. Дані 10 повторів спектрометрування одного місця поверхні посіву кожного сорту автоматично усереднювались програмою і отриманий результат використовувався для обчислення коефіцієнтів відбиття та вегетаційних індексів.

Нами досліджувались такі вегетаційні індекси, обчислені в області червоного краю:

- (1) — позиція червоного краю REP (Red Edge Position) [2, 6];
- (2) — Мерісівський наземний хлорофільний індекс MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) [3];
- (3) — модифікований нормалізований вегетаційний індекс червоного краю NDRE1 (Normalised Difference Index Red Edge1) [2];
- (4) — модифікований нормалізований вегетаційний індекс червоного краю NDRE2 (Normalised Difference Index Red Edge2) [2];
- (5) — хлорофільний індекс червоного краю $CI_{\text{red edge}}$ (ratio red edge chlorophyll index) [2];
- (6) — хлорофільний індекс в зеленій зоні CI_{green} (ratio green chlorophyll index) [2];
- (7) — вегетаційний індекс нормалізованої різниці NDVI (740, 665) (Normalised Difference Vegetation Index);
- (8) — хлорофільний індекс простого відношення ZM

(750, 710) (Zarco and Miller ratio chlorophyll index) [12];

(9) — індекс простого відношення SR (670, 820) (Simple ratio) [4];

(10) — хлорофільний індекс подвійного відношення DRI_{CI} (Double ratio index) [4].

Ці індекси обчислювались за наведеними формулами:

$$REP = 700 + 40 \frac{(\bar{R} - R(700))}{(R(740) - R(700))}, \bar{R} = \frac{R(670) + R(780)}{2}; \quad (1)$$

$$MTCI = \frac{R(740) - R(705)}{R(705) - R(665)}; \quad (2)$$

$$NDRE1 = \frac{R(740) - R(705)}{R(740) + R(705)}; \quad (3)$$

$$NDRE2 = \frac{R(783) - R(705)}{R(783) + R(705)}; \quad (4)$$

$$CI_{\text{red edge}} = \left(\frac{R(783)}{R(705)} \right) - 1; \quad (5)$$

$$CI_{\text{green}} = \left(\frac{R(783)}{R(560)} \right) - 1; \quad (6)$$

$$NDVI = \frac{R(740) - R(665)}{R(740) + R(665)}; \quad (7)$$

$$ZM = \frac{R(750)}{R(710)}; \quad (8)$$

$$SR = \frac{R(670)}{R(820)}; \quad (9)$$

$$DRI_{CI} = \frac{CI_{rededge}}{SR}; \quad (10)$$

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

Результати і обговорення

Для тестових ділянок досліджуваних полів в точках із заданими координатами (точка №1 — центр виділеної площадки 1-ого поля, точка №2 — центр виділеної площадки 2-ого поля, які показано на рис.1), на одну й ту ж дату були одержані дані з КА Sentinel-2A, і дані точкового наземного спектрометрування посівів ОП приладом ASD FieldSpec® 3FR, за якими були обчислені вегетаційні індекси. За даними космознімка Sentinel-2A вегетаційні індекси обчислювали не тільки в точці №1 із заданими координатами, але й вираховували середні значення вегетаційних індексів для площі 10 × 10 пікселів (що відповідає 1 га) для кожного поля з центрами в точках №1 і №2. На жаль, на дату 10.05.2016 р. знімок з КА Sentinel-2A відсутній, тому зіставлення ВІ для цього дня не виконувалось.

Далі приводимо таблиці значень ВІ, порахованих за формулами (1–10) за даними Sentinel-2A та польовими спектрометричними даними (табл. 2–8). Середні значення індексів за супутниковими даними позначено цифрами з горизонтальною рискою вгорі.

При аналізі значень ВІ рослинного покриву бралась за основу поведінка гіперспектрального індексу REP як індикатора стресу рослинності. За даними наукових досліджень [5, 11], REP є індикатором стану рослинності і може слугувати показником стійкості рослинних угруповань. Вегетаційні стреси, викликані різними чинниками, які призводять до зменшення вмісту хлорофілу, проявляються зсувами REP до коротких довжин хвиль, а зсув REP у спектрах відбиття рослинного покриву в довгохвильовому напрямі виникає із збільшенням вмісту хлорофілу в рослинах на різних фенологічних фазах їх розвитку, що і дає змогу використовувати REP для аналізу стану рослинного покриву Землі за даними гіперспектральної космозйомки. Тому поведінка ВІ оцінюється відносно індексу REP.

В табл. 2 на дату зйомки 08.04.2016 р. вегетаційні індекси REP, MTCI, NDRE1, NDRE2, $CI_{rededge}$, CI_{green} , NDVI, ZM, SR і DRI_{CI} , пораховані за даними КА Sentinel-2, демонструють однакову поведінку при зіставленні їх зі значеннями REP для ОП, окрім індексів MTCI та SR. Індекс простого відношення SR (670, 820) є допоміжним індексом для обчислення хлорофільного індексу подвійного відношення DRI_{CI} (Double ratio index), який проаналізували і запропонували німецькі вчені в 2015 р. [4]. Треба мати на увазі, що цей індекс розраховується із залученням значно ширшого каналу №8 супутника Sentinel-2 з центром 842 нм і шириною 115 нм. За приведеними даними видно, що в першу декаду квітня середні значення ВІ за Sentinel-2A для ОП сорту Скаген на 1-ому полі менші, ніж на 2-му, де зростала пшениця сорту Богдана: $\Delta REP_{середнє} = 723.28 \text{ нм} - 722.8 \text{ нм} = 0.48 \text{ нм}$, тобто у фазу куцїння сорт Богдана сформував більше зеленої маси. Теж саме характерне і для ВІ із табл.3 на цю ж дату 08.04.2016 р., де представлені ті ж самі ВІ: REP, MTCI, NDRE1, NDRE2, $CI_{rededge}$, CI_{green} , NDVI, ZM, SR і DRI_{CI} , проте вже пораховані за даними наземного спектрометрування посівів приладом ASD FieldSpec® 3FR. Тут теж для пшениці сорту Богдана значення REP більші, ніж у пшениці сорту Скаген $\Delta REP = 722.15 \text{ нм} - 720.81 \text{ нм} = 1.34 \text{ нм}$, і решта ВІ, окрім допоміжного індексу SR, на 2-му полі мають більші значення, ніж ВІ першого поля зі сортом Скаген.

Отже, на основі обробки даних космознімка Sentinel-2 і за результатами, одержаними за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR на дату 08.04.2016 р. у фазу куцїння рослини сорту Богдана демонструють кращі фотосинтетичні показники, ніж рослини сорту Скаген.

На наступну дату польових виїздів (28.04.2016 р.) спостерігаємо вже інший стан рослинного покриву (див. табл. 4, 5). ВІ за даними Sentinel-2 для озимої пшениці сорту Скаген на 1-ому полі більші як за середніми значеннями ВІ, так і за значеннями ВІ, порахованими в точці спектрометрування, ніж на 2-му полі, де зростала пшениця сорту Богдана і $\Delta REP_{середнє} = 726.0 \text{ нм} - 724.48 \text{ нм} = 1.52 \text{ нм}$. Тобто, у вегетаційну фазу початок виходу в трубку (2-ге міжвузля) пшениця сорту Скаген демонструє кращі спектральні характеристики, ніж сорт Богдана.

Таблиця 2. Значення вегетаційних індексів, обчислених за даними Sentinel-2A, для посівів ОП від 08.04.2016 р.

№ поля, сорт озимої пшениці	Значення ВІ (за координатами і середні значення ВІ)										
	REP нм	MTCI	NDRE1	ND RE2	$CI_{rededge}$	CI_{green}	NDVI	ZM	SR	DRI_{CI}	
1, Скаген	726.60	4.364	0.283	0.355	1.099	1.083	0.345	1.789	0.450	2.441	
	$\overline{722.80}$	$\overline{3.695}$	$\overline{0.256}$	$\overline{0.328}$	$\overline{0.986}$	$\overline{1.061}$	$\overline{0.351}$	$\overline{1.690}$	$\overline{0.428}$	$\overline{2.317}$	
2, Богдана	724.10	3.668	0.268	0.351	1.081	1.191	0.368	1.732	0.398	2.642	
	$\overline{723.28}$	$\overline{3.641}$	$\overline{0.267}$	$\overline{0.344}$	$\overline{1.046}$	$\overline{1.173}$	$\overline{0.369}$	$\overline{1.728}$	$\overline{0.407}$	$\overline{2.580}$	

Таблиця 3.

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними для посівів ОП від 08.04.2016 р.

№ поля, сорт озимої пшениці	Значення ВІ за координатами									
	REP _{HM}	MTCI	NDRE1	NDRE2	CI _{rededge}	CI _{green}	NDVI	ZM	SR	DRI _{CI}
1, Скаген	720.81	3.031	0.509	0.567	2.617	4.182	0.814	2.714	0.084	31.227
2, Богдана	722.15	3.567	0.564	0.627	3.365	5.359	0.859	3.126	0.060	55.864

Таблиця 4.

Значення вегетаційних індексів, обчислених за даними Sentinel-2A, для посівів ОП від 28.04.2016 р.

№ поля, сорт озимої пшениці	Значення ВІ (за координатами і середні значення ВІ)									
	REP _{HM}	MTCI	NDRE1	NDRE2	CI _{rededge}	CI _{green}	NDVI	ZM	SR	DRI _{CI}
1, Скаген	726.65	6.064	0.592	0.623	3.362	3.430	0.675	3.245	0.161	20.936
	$\overline{726.00}$	$\overline{5.313}$	$\overline{5.515}$	$\overline{0.613}$	$\overline{3.181}$	$\overline{3.330}$	$\overline{0.680}$	$\overline{3.132}$	$\overline{0.148}$	$\overline{22.255}$
2, Богдана	725.91	4.333	0.479	0.584	2.804	3.056	0.663	2.838	0.166	18.620
	$\overline{724.48}$	$\overline{4.575}$	$\overline{0.493}$	$\overline{0.584}$	$\overline{2.813}$	$\overline{3.011}$	$\overline{0.674}$	$\overline{2.949}$	$\overline{0.156}$	$\overline{18.271}$

Таблиця 5.

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними для посівів ОП від 28.04.2016 р.

№ поля, сорт озимої пшениці	Значення ВІ за координатами									
	REP _{HM}	MTCI	NDRE1	NDRE2	CI _{rededge}	CI _{green}	NDVI	ZM	SR	DRI _{CI}
1, Скаген	724.67	4.577	0.608	0.683	4.307	6.734	0.854	3.723	0.059	72.653
2, Богдана	722.69	3.674	0.556	0.623	3.310	5.221	0.834	3.140	0.072	46.262

Таблиця 6.

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними для посівів ОП від 10.05.2016 р.

№ поля, сорт озимої пшениці	Значення ВІ за координатами									
	REP _{HM}	MTCI	NDRE1	NDRE2	CI _{rededge}	CI _{green}	NDVI	ZM	SR	DRI _{CI}
1, Скаген	727.38	5.752	0.698	0.776	6.937	11.030	0.932	5.010	0.024	290.84
2, Богдана	724.88	4.502	0.616	0.692	4.499	6.709	0.872	3.765	0.051	88.870

Таблиця 7.

Значення вегетаційних індексів, обчислених за даними Sentinel-2A, для посівів ОП від 17.06.2016 р.

№ поля, сорт озимої пшениці	Значення ВІ (за координатами і середні значення ВІ)									
	REP _{HM}	MTCI	NDRE1	NDRE2	CI _{rededge}	CI _{green}	NDVI	ZM	SR	DRI _{CI}
1, Скаген	729.25	5.768	0.512	0.605	2.885	2.895	0.659	3.096	0.158	19.451
	$\overline{729.24}$	$\overline{5.539}$	$\overline{0.491}$	$\overline{0.592}$	$\overline{2.932}$	$\overline{2.954}$	$\overline{0.644}$	$\overline{2.981}$	$\overline{0.165}$	$\overline{18.279}$
2, Богдана	724.07	3.253	0.326	0.409	1.388	1.561	0.474	1.968	0.300	4.678
	$\overline{724.06}$	$\overline{3.270}$	$\overline{0.324}$	$\overline{0.405}$	$\overline{1.362}$	$\overline{1.576}$	$\overline{0.470}$	$\overline{1.961}$	$\overline{0.300}$	$\overline{4.582}$

Таблиця 8.

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними для посівів ОП від 17.06.2016 р.

№ поля, сорт озимої пшениці	Значення VI за координатами									
	REP _{нм}	MTCI	NDRE1	NDRE2	CI _{rededge}	CI _{green}	NDVI	ZM	SR	DRI _{CI}
1, Скаген	729.14	4.668	0.609	0.719	5.117	8.063	0.851	4.067	0.050	101.42
2, Богдана	720.54	2.182	0.407	0.486	1.894	3.338	0.728	2.248	0.117	16.190

Для VI, порохованих в точках спектрометрування для поля 1 і поля 2, маємо значення для поля 1 із сортом Скаген більші, ніж для поля 2 із сортом Богдана, $\Delta REP = 726.65 \text{ нм} - 725.91 \text{ нм} = 0.74 \text{ нм}$.

Те ж саме характерне й для VI, порохованих за даними наземного спектрометрування на цю ж дату 28.04.2016 р. Для пшениці сорту Богдана значення REP стають меншими, ніж у пшениці сорту Скаген $\Delta REP = 724.67 \text{ нм} - 722.69 \text{ нм} = 1.98 \text{ нм}$. Та й решта VI (окрім допоміжного індексу SR) для сорту Богдана мають менші значення у порівнянні з ОП сорту Скаген. Отже, за спектральними показниками, а точніше за вегетаційними індексами, розрахованими на дату 28.04.2016 р. у фазі початок виходу в трубку (2-ге міжвузля) за даними обробки космознімка Sentinel-2A і за результатами, одержаними зі спектрометра ASD FieldSpec® 3FR, спостерігається інверсія стану посівів двох сортів озимої пшениці: озима пшениця Богдана демонструє гірші параметри, ніж озима пшениця сорту Скаген.

Як зазначалось в розділі **Методика**, під час обстеження 10 травня 2016 р. було помічено симптоми ураження рослин сорту Богдана грибковими захворюваннями (фузаріоз, септоріоз), що проявлялось у великій кількості дрібних хлорозних плям на листках (див. рис. 4). Звісно, такий стан рослин супроводжувався зменшенням вмісту хлорофілу в рослинному покриві, що, ймовірно, і спричинило інверсію стану посівів. На жаль, ні біохімічне визначення вмісту хлорофілу, ні спеціальна оцінка фітосанітарного стану агроценозів не проводились за відсутності в ЦАКДЗ спеціального обладнання і дипломованих фітопатологів. Проте прикметно, що і наземні, і космічні прилади дистанційного зондування відреагували на цей факт ураження рослин збудниками грибкових захворювань, зафіксувавши відмінності у стані посівів ще напередодні 10 травня.

На 10.05.2016 р., фаза вегетації — вихід в трубку, здійснювалось тільки наземне спектрометрування посівів, оскільки, як зазначалось вище, знімка Sentinel-2 на цю дату не виявилось. За результатами обробки даних спектрометра ASD FieldSpec® 3FR у пшениці сорту Скаген значення REP залишаються вищими, ніж у пшениці сорту Богдана на 2-му полі $\Delta REP = 727.38 \text{ нм} - 724.88 \text{ нм} = 2.34 \text{ нм}$ і решта VI проявляють таку ж тенденцію: у сорту Скаген вони мають більші значення, ніж у сорту Богдана (табл. 6).

В табл.7 на дату 17.06.2016 р. (фаза вегетації — молочна стиглість) пороховані VI за даними космознімка Sentinel-2A для ОП сорту Скаген більші як за середніми значеннями, так і за значеннями VI, обчисленими для точки з заданими координатами, у порівнянні з другим полем, де зростала пшениця сорту Богдана. $\Delta REP_{\text{середнє}} = 729.24 \text{ нм} - 724.06 \text{ нм} = 5.18 \text{ нм}$. Тобто, у фазу молочної стиглості пшениця сорту Скаген продовжує демонструвати кращий фотосинтетичний потенціал, ніж пшениця сорту Богдана. Для VI, порохованих за супутниковими даними в заданих точках обох полів маємо значення для поля 1 з сортом Скаген більші, ніж для поля 2 зі сортом Богдана, $\Delta REP = 729.25 \text{ нм} - 724.07 \text{ нм} = 5.18 \text{ нм}$.

Подібне зберігається і для VI за даними наземного спектрометрування на цю ж дату 17.06.2016 р. (табл. 8). Зокрема, значення REP для пшениці сорту Богдана менші, ніж у пшениці сорту Скаген: $\Delta REP = 729.14 \text{ нм} - 720.54 \text{ нм} = 8.60 \text{ нм}$, і решта VI для сорту Богдана менші, ніж VI сорту Скаген. Отже у фазу молочної стиглості VI, обчислені як за даними обробки космознімка Sentinel-2, так і спектрометра ASD FieldSpec® 3FR, свідчать, що сорт Богдана має нижчі фотосинтетичні параметри, ніж сорт Скаген.

Далі приводимо на рис. 5 графіки зіставлення досліджених індексів, одержаних за супутниковими і наземними дистанційними даними для тестових ділянок полів 1 і 2 з озимою пшеницею сортів Скаген і Богдана впродовж весняно-літньої вегетації.

Наочно видно з рис. 5, що у фазу куціння серед досліджених індексів лише NDRE1 та NDRE2 майже однакові за супутниковими і за спектрометричними даними для обох сортів. Інші індекси відрізняються між собою, причому більші відмінності між фактичними значеннями індексів характерні для посіву ОП сорту Богдана (лінії графіків не суміщаються), де значення всіх індексів майже вдвічі більші, ніж для ОП сорту Скаген (звертаємо увагу на умовні одиниці вертикальної осі). На початку виходу в трубку (поява другого міжвузля) різниця між величинами VI, розрахованими за даними Sentinel-2A і ASD FieldSpec® 3FR майже зникає, лише для CI_{green} та DRI_{CI} зберігається виявлена ще у попередній фазі незбіжність їх показників. Можливою причиною цих відмінностей може бути зазначена вище різниця у ширині обраних каналів, що вико-

ристовуються при обчисленні індексів. Причому останній індекс, розрахований за даними ASD FieldSpec® 3FR, різко реагує на стан посіву: на тестових ділянках зі сортом ОП Богдана він у півтора рази нижчий, ніж у сорту Скаген. Сказане справедливе і для BI, обчислених у фазу молочної стиглості. Це пояснюється передусім зростанням проективного покриття посівів впродовж весняно-літньої вегетації, що зумовлює елімінацію негативного вкладу відбиття ґрунту міжрядь у формування спектрального сигналу відбиття посівів, зафіксованого у фазу кушіння. Водночас в процесі дозрівання посіву ОП сорту Богдана проявляється негативний вплив ураження рослин збудниками грибкових захворювань, що спричиняє значно нижчі величини їх BI у порівнянні зі сортом Скаген.

За отриманими супутниковими та спектрометричними значеннями BI були порашовані коефіцієнти кореляції між ними за формулою Пірсона [www.stat.wmich.edu/s216/book/node122/html] для всіх 10-ти індексів для тестових ділянок кожного поля з різними сортами озимої пшениці. Ці результати приведені в табл.9, де в лінійці під назвою “Джерело даних” Sentinel GPS означає обчислення супутникових BI в точці спектрометрування, а Sentinel Average — обчислення середніх значень супутникових BI для площі 10 × 10 пікселів, тобто 1 га.

Окрім того, було розраховано середні похибки коефіцієнтів кореляції для невеликої кількості даних $n = 10$, які представлені в табл. 10.

Згідно з приведеними даними в табл. 9, кореляція на дату 08.04.2016 р. (кушіння) дуже слабка, а якщо взяти до уваги середню похибку коефіцієнтів кореляції $\epsilon_{\text{ср}} \approx 0.32$ на цю дату за даними табл. 10, то кореляція

взагалі відсутня. На дату 28.04.2016 р. (початок виходу в трубку) кореляція між значеннями BI за супутниковими і спектрометричними даними для тестових ділянок поля 1 і поля 2 з озимою пшеницею сортів Скаген і Богдана висока. Середнє значення похибки коефіцієнтів кореляції на цю дату становить $\epsilon_{\text{ср}} \approx 0.08$. Тобто, маємо згідно [1] сильну кореляцію на цю дату вимірювання. У фазі молочної стиглості (17.06.2016 р.) кореляція теж висока і середнє значення похибки коефіцієнтів кореляції на цю дату $\epsilon_{\text{ср}} \approx 0.14$.

Висновки

1. Розбіжності між BI, розрахованими за даними Sentinel-2 та ASD FieldSpec® 3FR, залежать від фази розвитку рослин озимої пшениці: впродовж вегетації коефіцієнти кореляції між ними зростають для посівів обох досліджених сортів.

2. Значення більшості досліджених BI за супутниковими даними Sentinel близькі за величиною до аналогічних індексів, обчислених за вузькими спектральними каналами ASD FieldSpec® 3FR, за винятком DRI_{Cl} (Double ratio index for chlorophyll index) та CI_{green} (ratio green chlorophyll index).

3. Досліджені індекси демонструють різну поведінку в залежності від стану рослинного покриву, що дозволяє рекомендувати їх у подальшому для застосування при вивченні продуктивності виробничих посівів озимої пшениці, і, вірогідно, інших сільськогосподарських культур.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом N Ф64/25-2016.

Таблиця 9.

Коефіцієнти кореляції між значеннями BI з ASD FieldSpec® 3FR і Sentinel-2A для тестових ділянок полів 1 і 2 зі сортами ОП Скаген і Богдана впродовж весняно-літньої вегетації

Сорт озимої пшениці	Дата, фаза вегетації	08 квітня 2016 р., кушіння		28 квітня 2016 початок виходу в трубку		17 червня 2016 р., молочна стиглість	
		Джерело даних	Sentinel GPS	Sentinel Average	Sentinel GPS	Sentinel Average	Sentinel GPS
Скаген	FieldSpec	0.38	0.43	0.97	0.98	0.97	0.97
Богдана	FieldSpec	0.48	0.47	0.98	0.98	0.85	0.84

Таблиця 10.

Середні похибки коефіцієнтів кореляції між значеннями BI з ASD FieldSpec® 3FR і Sentinel-2A для тестових ділянок полів 1 і 2 зі сортами ОП Скаген і Богдана

Сорт	Дата, фаза вегетації	08.04.2016 р. кушіння		28.04.2016 р. початок виходу в трубку		17.06.2016 р. молочна стиглість	
		Джерело даних	Sentinel GPS	Sentinel Average	Sentinel GPS	Sentinel Average	Sentinel GPS
Скаген	FieldSpec	0.33	0.32	0.09	0.07	0.09	0.09
Богдана	FieldSpec	0.31	0.31	0.07	0.07	0.19	0.19

Література

1. Иванова В. М. Математическая статистика / В. М. Иванова, В. Н. Калинина, Л. А. Нешумова. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1981. — 368 с.
2. Clevers J. G. P. W. Using the red-edge bands on Sentinel-2 for retrieving canopy chlorophyll nitrogen content. / J. G. P. W. Clevers, A. A. Gitelson // First Sentinel-2: Preparatory symposium, 23–27 April 2012, ESRIN, Frascati, Italy. — V.707. — 2012. — P. 8.
3. Dash J. The MERIS terrestrial chlorophyll index / J. Dash, P. J. Curant // International Journal of Remote Sensing. — 2005. — V.25. — P. 5403–5413.
4. Dotzler S. The Potential of EnMAP and Sentinel-2 Data for Detecting Drought Stress Phenomena in Deciduous Forest Communities / S. Dotzler, J. Hill, H. Buddenbaum [et al.] // J. Stoffels // Remote Sens. — 2015. — № 7 — P. 14227–14258.
5. Filella I. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass potential for land applications / I. Filella, J. Peñuelas // International Journal of Remote Sensing. — 1994. — V.15. — № 7. — P. 1459–1470.
6. Herrmann I. LAI assessment of wheat and potato crops by VENUS and Sentinel-2 bands / I. Herrmann, A. Pimstein, A. Karnieli [et al.] // Remote Sensing of Environment. — 2011. — V. 115. — № 8. — P. 2141–2151.
7. Immitzer M. First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe / M. Immitzer, F. Vuolo, C. Atzberger // Remote Sensing. — 2016. — V.8. — № 3. — P. 1–27 p.
8. Legal notice on the use of Copernicus Sentinel Data and Service Information [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/690755/Sentinel_Data_Legal_Notice. — Назва з екрану.
9. Radoux J. Sentinel-2's Potential for Sub-Pixel Landscape Feature Detection / J. Radoux, G. Chomé, D. Jacques [et al.] // Remote Sensing. — 2016. — Vol.8. — № 6. — P. 488–516.
10. SENTINEL-2 User Handbook [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook. — Назва з екрану.
11. Smith K. L. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leak / K. L. Smith, M. D. Steven, J. J. Colls // Remote Sensing of Environment. — 2004. — V.92. — № 2. — P. 207–217.
12. Zarco-Tejada P. J. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulating in a row-structured discontinuous canopy / P. J. Zarco-Tejada, A. Berjon, R. Lopez-Lorano [et al.] // Remote Sensing of Environment. — 2005. — V.99. — №3. — P. 271–284.

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ, РАССЧИТАННЫХ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-2 И СПЕКТРОРАДИОМЕТРА FIELDSPEC

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

Исследовано десять вегетационных индексов (ВИ), рассчитанных одновременно как по спутниковым данным Sentinel-2, так и по результатам наземного спектрометрирования прибором ASD FieldSpec® 3FR, для тождественных по географическим координатам участков производственных посевов озимой пшеницы двух сортов Богдана и Скаген. Выявлено, что значение большинства исследованных ВИ по спутниковым данным Sentinel-2 имеет величину, близкую аналогичным индексам, вычисленным по узким спектральным каналам ASD FieldSpec® 3FR, за исключением DRI_{cl} (Double ratio index for chlorophyll index) и CI_{green} (ratio green chlorophyll index), значения которых по спутниковым каналам значительно ниже, чем по показателям спектрорадиометра. Продемонстрировано, что различия ВИ по Sentinel-2 и ASD FieldSpec® 3FR зависят от фазы развития растений озимой пшеницы: в течение вегетации коэффициенты корреляции между ними возрастают для посевов двух исследованных сортов.

Ключевые слова: вегетационные индексы, Sentinel-2, наземная спектрометрическая съемка, производственные посевы озимой пшеницы

ANALYSIS AND COMPARISON OF VEGETATION INDICES OF WINTER WHEAT CROP AREAS, CALCULATED ON THE BASIS OF SENTINEL-2 AND FIELDSPEC SPECTRORADIOMETER DATA

V. I. Lyalko, O. I. Sakhatsky, G. M. Zholobak, O. M. Sybirtseva, S. S. Dugin, M. V. Vakolyuk

Ten vegetation indices (VIs) were analyzed, which were calculated simultaneously based on Sentinel-2 data and on results of ground spectrometric survey by ASD FieldSpec® 3FR for the identically geographical sites of the production crops of winter wheat of two cultivars Bohdana and Skagen. The values of the most studied VIs on Sentinel-2 satellite data are similar by quantity to the same indices, calculated on the narrow spectral channels of ASD FieldSpec® 3FR, except for DRI_{cl} (Double ratio index for chlorophyll index) and CI_{green} (ratio green chlorophyll index), the satellite values of which are much lower than those received by spectroradiometer. It was shown that the differences of VIs received by Sentinel-2 and ASD FieldSpec® 3FR depend on the growth stages of winter wheat: during vegetation season the correlation coefficients between them increase for crop areas of both studied cultivars.

Key words: vegetation indices, Sentinel-2, ground spectrometric survey, production crops of winter wheat