

УДК 528.8.04:504.6

## Верифікація результатів обробки спектральних даних супутника Sentinel-2A, наземного спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR і системи реєстрації мінливості параметрів середовища DJI STS-VIS

С. С. Дугін\*, О. М. Сибірцева, С. І. Голубов, Є. М. Дорофей

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

Проведено дослідження рослинного покриву за методом гіперспектрального дистанційного зондування спектрорадіометром ASD FieldSpec® 3FR та за даними системи реєстрації мінливості параметрів середовища DJI STS-VIS. Побудовано ортофотоплани тестових ділянок досліджень з розрізнявальною здатністю зйомки 2,5 см. Підтверджено суттєву коригованість одержаних результатів для наземної верифікації матеріалів космічної зйомки спектральних каналів супутника Sentinel-2A. Залучено 15 вегетаційних індексів за довжинами хвиль каналів супутника Sentinel-2A, які показали високу кореляцію за Пірсоном  $r > 0.97$  з максимальним значенням кореляційної помилки 0.07.

**Ключові слова:** спектральна зйомка, вегетаційні індекси, ортофотоплан, кореляція наземних та дистанційних вимірів  
© С. С. Дугін, О. М. Сибірцева, С. І. Голубов, Є. М. Дорофей. 2019

DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.21.147>

### Вступ

Протягом останніх років в усьому світі активно проводять роботи з експериментального визначення абсорбції  $\text{CO}_2$  рослинним покривом за даними космічних та наземних спектро- та газометричних вимірів [2–16, 18].

Вегетаційні індекси (VI) є показниками та основними параметрами, які описують обмін  $\text{CO}_2$  між рослинами та атмосферою. Це дає можливість застосовувати спектрометричні виміри (наземні та космічні) для оцінки балансу потоків  $\text{CO}_2$  над рослинним покривом та розробки відповідних методичних підходів для визначення балансу парникових газів над територією України на основі даних зйомок.

Для детального вивчення та побудови моделей оцінок потоків  $\text{CO}_2$  над рослинним покривом необхідно мати достовірні відкалібровані дані. Відомо, що спектри поглинання, відбиття та випромінювання об'єктів Землі пов'язані з їх хімічним складом і фізичними властивостями (дисперсним складом, пористістю, ступенем кристалізації і т. п.) [2]. Цей зв'язок дає можливість на підставі аналізу багато- і гіперспектральних даних оптичного дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та використання геоінформаційних технологій вирішувати різноманітні завдання природокористування.

Для оцінки достовірності і точності інтерпретації даних ДЗЗ необхідна наявність наземної еталонної інформації (бази даних) про спектральні характеристики, фізичні і хімічні властивості, просторове розміщення еталонних об'єктів та ін. Отримання такої інформації можливе за допомогою лаборатор-

них і польових спостережень та вимірювань на спеціальних тестових ділянках.

За даними високоточної системи реєстрації мінливості параметрів середовища БПЛА\* вирішуються завдання ДЗЗ, оцінюється економічна доцільність використання ДЗЗ в цьому дослідженні, проводиться геологічне картування тощо, а також калібрування спектрометричних систем, що встановлюються на літаках та супутниках.

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України” ІГН НАН України впродовж багатьох років виконує роботи з використання і розвитку методів дослідження стану природних ресурсів Землі і навколишнього середовища за допомогою методів ДЗЗ [2]. Оцінка вірогідності та якості вирішуваних завдань здійснюється на підставі проведення наземних досліджень на еталонних ділянках та аналізу геологічної, біохімічної та іншої інформації. Наземні дослідження обов'язково передбачають вимірювання спектральних характеристик досліджуваних об'єктів.

В роботі порівнюються результати обробки цифрової інформації для тестових ділянок рослинного покриву, одержаної у вигляді значень вегетаційних індексів (VI) за шкалою довжин хвиль каналів супутника Sentinel-2A спектрорадіометром ASD FieldSpec® 3FR та даних БПЛА.

Ми обмежились аналізом динаміки VI, порохованих за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR та даними БПЛА за шкалою довжин хвиль каналів супутника Sentinel-2A. Вимірювання приладами проводили синхронно. Ці експериментальні роботи, що включали зазначений комплекс сучасної вимірювальної апаратури, виконано на території України вперше.

\* E-mail: [Dstas2389333D@i.ua](mailto:Dstas2389333D@i.ua)

\* БПЛА — безпілотний літальний апарат

**Мета роботи** — проаналізувати динаміку ВІ для рослинного покриву за даними спектро-радіометра ASD FieldSpec® 3FR та даними БПЛА, зіставити одержані дані та порохувати корекцію між ними.

### Об'єкт та методи досліджень

Об'єкт досліджень — тест-ділянки на Київському полігоні з різноманітним рослинним покривом, береговою рослинністю, з невеликими болотами та водою (ветланди). Існує метод гіперспектрального дистанційного зондування забрудненого ґрунту і рослинності, що на ньому зростає, який поки що мало розроблений в Україні через відсутність як відповідних приладів, так і досвіду роботи з такими об'єктами. Цей метод ґрунтується на аналізі відповідних вуглеводневих та вегетаційних індексів, які розраховують на підставі отриманих спектрів відбиття досліджуваного покриву.

### Методика проведення досліджу

Дослідження рослинного покриву за методом гіперспектрального дистанційного зондування спектро-радіометром ASD FieldSpec® 3FR та за даними БПЛА проводили в суху безхмарну погоду в травні-червні 2019 р. Склад рослинного покриву наведено в табл. 1 та на рис. 1.

**Таблиця 1.**

Тестові ділянки рослинного покриву

| № з/п | № GPS | Назва рослин   |
|-------|-------|--|
| 1     | 115   | Осока рання ( <i>Carex praecox Schreb</i> )                            |
| 2     | 121   | Вода – болото (Water swamp)  |
| 3     | 123   | Вода (Water)   |
| 4     | 119   | Дорога (Dirt road)   |
| 5     | 150   | Осока рання ( <i>Carex praecox Schreb</i> )                            |
| 6     | 151   | Осока берегова ( <i>Carex riparia Curt.</i> )                          |
| 7     | 152   | Очерет південний ( <i>Phragmites australis (Cav) Trin. Ex Steud.</i> ) |

### Методика спектрометрування

Спектрометрування рослинного покриву ветландів здійснено спектро-радіометром FieldSpec® 3FR та за спектрометричними даними БПЛА.

### Основні технічні характеристики спектро-радіометра FieldSpec® 3FR такі:

ASD FieldSpec® 3FR — польовий портативний переносний спектро-радіометр, який охоплює діапазон реєстрації від 350 до 2500 нм. Весь спектр у діапазоні хвиль 350–2500 нм відображається в реальному часі на дисплеї. Деякі інші характеристики спектро-радіометра наведено нижче: інтервал відліку — 1.4 нм у діапазоні довжин хвиль 350–1 000 нм і 2.0 нм у діапазоні довжин хвиль 1000–2500 нм; спектральна розрізненість (повна ширина на половині максимуму — ПШПМ) — 3.0 нм при 700 нм та 10 нм при

1 400 нм і 2 100 нм; яскравість, еквівалентна шуму (NeDL), для стандартного волоконно-оптичного кабеля довжиною 1.5 м становить:  $1.4 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>·нм — середнє значення при довжині хвилі 700 нм,  $2.4 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>·нм — середнє значення при 1 100 нм і  $8.8 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>·нм — середнє значення при 2 100 нм. З іншими технічними параметрами приладу можна ознайомитись на сайті: <http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-portable-spectroradiometer>.

У нашому дослідженні кут огляду застосованого об'єктива — 1°. Тримач пістолетного типу з оптичною насадкою закріплювався на стандартному штативі з висотою над поверхнею ґрунту — 1.3 м; віддаль від об'єктива до тестових ділянок спектрометрування — 2 м; величина площі, яка потрапляє в поле зору, — 5 см<sup>2</sup>; кут нахилу оптичної осі об'єктива до вимірюваної площі — 90° (в надрі).

Калібрування до білого проводили перед кожним вимірюванням. Дані 30 спектрів (повторів вимірювання одного місця кожного варіанту) зберігалися у програмі ASD FieldSpec® 3FR (RS 3), усереднювались та оброблялись програмою обробки спектрів приладу ViewSpec Pro 6.0. Отримані дані використано для обчислення ВІ.

### Основні технічні характеристики системи БПЛА:

Це — безпілотний апарат DJI Phantom 3 Std, на борту якого встановлено спектрометр Ocean Optics

STS-VIS, який охоплює діапазон реєстрації від 400 до 800 нм. Весь спектр 400–800 нм відображається в реальному часі на дисплеї. Оптичне розрізнення ПШПМ — 1.5 нм з шириною входної щілини 25 мкм. З іншими технічними параметрами приладу можна ознайомитись на сайті: <https://www.dji.com/phantom-3>, <https://oceanoptics.com/product/sts-vis-microspectrometer>.

У нашому дослідженні кут огляду сягає 25 мкм. Висота над поверхнею ґрунту — 1.3 м; віддаль від об'єктива до тестових ділянок спектрометрування — 2 м; величина площі, яка потрапляє в поле зору, — 5 см<sup>2</sup>; висота в польоті над поверхнею ґрунту — 100 м; віддаль від об'єктива до тестових ділянок спектрометрування — 100 м; величина площі, яка потрапляє в поле зору, — 250 см<sup>2</sup>; кут нахилу оптичної осі об'єктива до вимірюваної площі — 90° (в надрі).



№ 1. Осока рання  
(*Carex praecox* Schreb)



№ 2. Вода — болото  
(Water swamp)



№ 3. Вода  
(Water)



№ 4. Дорога  
(Dirt road)



№ 5. Осока рання  
(*Carex praecox* Schreb)



№ 6. Осока берегова  
(*Carex riparia* Curt.)



№ 7. Очерет південний  
(*Phragmites australis* (Cav.) Trin.  
Ex Steud.)

Рис. 1. Загальний вигляд рослинності на тестових ділянках

Калібрування до білого проводили перед кожним вимірюванням. Дані спектрів (повторів вимірювання одного місця кожного варіанту) зберігалися на жорсткому диску та усереднювалися і оброблялись програмою обробки спектрів приладу. Отримані дані використано для обчислення ВІ.

Системою БПЛА проводили синхронно з спектро-радіометром FieldSpec@3 FR вимірювання тестових об'єктів та фотографування ділянок досліджень для побудови ортофотоплану високої розрізненості.

Для побудови ортофотоплану вибрано тестові ділянки розміром приблизно 200 × 200 м. Висота польоту системи БПЛА становила 100 м, для побудови ортофотоплану було використано 80–100 знімків.

Створення ортофотоплану ділянки дослідження складається з трьох етапів:

**1. Підготовка.** Під час підготовчих робіт виконується збір та вивчення інформації про об'єкт дослідження, складання маршруту для БПЛА, визначення координат маркерів (контрольних точок) та їх закріплення на місцях із застосуванням геодезичного обладнання, а також вибір оптимальних висоти та швидкості руху з урахуванням параметрів покриття та розмірів території.

**2. Аерофотозйомка.** Процес аерофотозйомки передбачає виконання БПЛА польотного завдання

в автоматичному режимі та отримання комплексу фотографій, які згодом будуть оброблені і використані для створення ортофотоплану з прив'язкою до координат на місцевості.

**3. Обробка отриманих даних.** Обробка даних, одержаних у результаті зйомки, починається з імпорту їх в спеціальну програму, побудови системи координат і щільної хмари точок, а закінчується безпосередньо побудовою ортофотоплану.

А) Використовується програмний продукт Agisoft PhotoScan.

В) Додаються фотографії з БПЛА, зроблені для ортофотоплану. Слід додавати фото тільки з координатами на робочій висоті.

С) Наступним кроком є процедура обробки фотографій. Ассигасу — точність процедури: чим більша точність тим більше процедура займе часу (від декількох годин на сучасних комп'ютерах). Pair preselection — слід вибирати reference, для покращення результату, вкладку Advanced очищаємо — програма сама вибере найкращі показники. Процедура Mesh — побудова полігональної моделі, так як рельєф за допомогою Dense Cloud ми не будемо Source Data — Sparse Cloud.

Д) Будується ортомозаїчний зшитий план і отримуються результати.



Розрізнявальна здатність зйомки на ортофотоплані ділянки дослідження (1 піксель приблизно дорівнює  $2.5 \times 2.5$  см).

На рис. 2, 3 представлені ортофотоплани ділянок дослідження станом на 24.04.2019 р. та 03.05.2019 р.

### Результати та їх обговорення

*Коротка характеристика ВІ, обчислених на основі даних зйомок тестових ділянок рослинного покриву*

Джерелом отриманих результатів слугували дані спектрометра FieldSpec®3 FR та дані БПЛА на 24.04.2019 р. та 03.05.2019 р., які були одержані на території розташування тестових ділянок (див.рис. 1–3).

Відомо, що ВІ, розраховані за допомогою комбінування коефіцієнтів відбиття в різних спектральних діапазонах, особливо в області червоного краю, є надійним інструментом оцінки стану вегетаційного покриву Землі. У статті [16] для виділення окремих елементів ландшафту наведена велика кількість проаналізованих ВІ, отриманих як за даними Sentinel-2, так і за даними інших космічних апаратів.

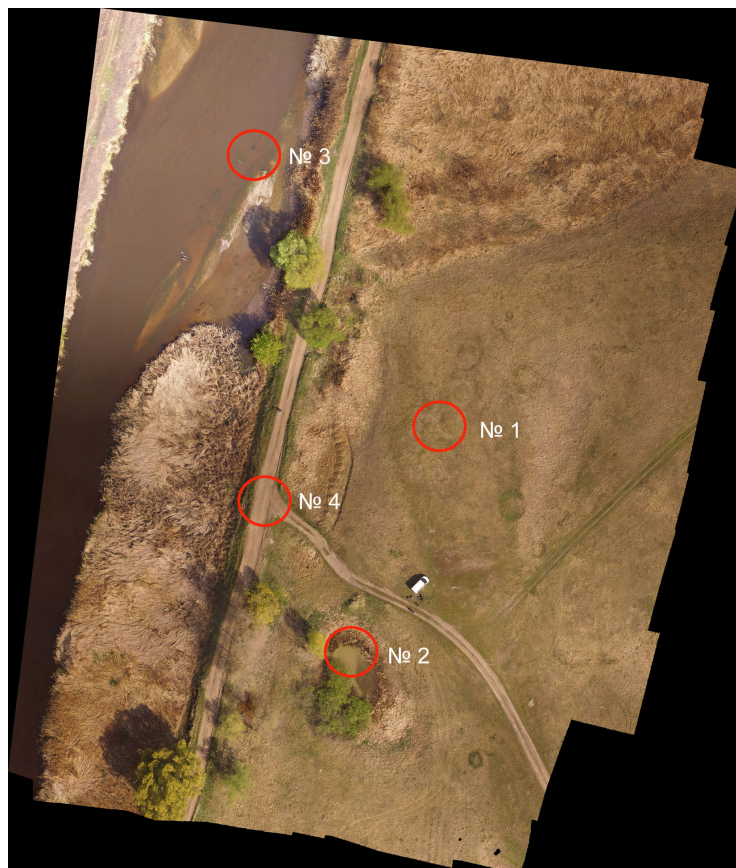
В нашій роботі прораховано 15 ВІ, запропонова-

них в роботах [4–18]. Перші сім ВІ для Sentinel-2 (табл. 2) були взяті з публікації [3].

Для проведення корекції результатів на тих же довжинах хвиль та просторових координат і для того ж часу пораховані ВІ за даними спектрометра FieldSpec® 3FR та даними БПЛА. Шкала довжин хвиль для даних БПЛА обмежена NIR діапазоном, тому для ВІ були використані довжини хвиль з 1-го по 8-й канали шкали довжин Sentinel-2. Вегетаційні індекси, наведені в табл. 2, були вибрані як індекси, спектральні характеристики котрих за даними робіт [4–18] суттєво залежать від параметрів обміну  $\text{CO}_2$  між рослинами та атмосферою.

Для підтвердження вибраних довжин хвиль, наведених в формулах ВІ (див. табл. 2), даємо характеристики каналів згідно з публікацією [4] з центріркою каналів, відстанню між каналами та просторовим розрізненням (табл. 3).

Далі наведено короткий опис ВІ, використаних у нашій роботі. Є багато наукових публікацій дослідження змін рослинного покриву з використанням позиції червоного краю 4-канального індексу REP (*Red Edge Position*), одержаного за 4-точковою лінійною інтерполяцією, який реагує на хлорофільний стан рослинного покриву Землі і залежить від стану довкілля і може слугувати індикатором забруд-



**Рис. 2.** Ортофотоплан ділянок дослідження на 24.04.2019 р.

Червоним кольором виділено тестові ділянки: № 1 — осока рання (*Carex praecox Schreb*); № 2 — вода — болото (Water swamp); № 3 — вода (Water); № 4 — дорога (Dirt road)



**Рис. 3.** Ортофотоплан ділянок дослідження на 03.05. 2019 р. Червоним кольором виділено тестові ділянки: № 5 — осока рання (*Carex praecox Schreb*); № 6 — осока берегова (*Carex riparia Curt.*); № 7 — очерет південний (*Phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steud.*)

нення води та ґрунтів. Такі зміни довкілля впливають на спектри відбиття рослинного покриву та спричиняють зміни нахилу кривої спектра в червоному краї (665–783 нм) і зсуви значень REP — довжини хвилі з максимальним значенням нахилу кривої відбиття в цій області. В публікації [5] показано, що значення зсувів REP можуть слугувати навіть індикатором забруднення рослинного покриву важкими металами.

В роботі [3] проведено дослідження REP та наземного хлорофільного індексу МТСІ (*MERIS Terrestrial Chlorophyll Index*; [6]) і встановлено взаємозв'язок між ними для рослинного покриву на підставі лінійної регресії. Це свідчить про потенційну можливість індексу МТСІ бути індикатором вегетаційного стресу з перевагою використання в зоні червоного краю тільки трьох каналів (див. табл. 2), необхідних для визначення індексу МТСІ, що спрощує його обчислення. При обрахуванні значення індексу REP для даних Sentinel-2 використані канали 4, 5, 6, 7, а для індексу МТСІ необхідні 4, 5, 6 (див. табл.3).

Індекси REP і МТСІ можуть слугувати пошуковими індексами при розвідуванні родовищ вуглеводнів та вуглеводних забруднень, оскільки вони реагують на зміни в рослинному покриві Землі, які виникають внаслідок їх просочування із родовищ газу та нафти або витікання із підземних трубопроводів. В

роботі [11] відмічено що, індекс МТСІ безпосередньо пов'язаний з вмістом хлорофілу в покриві, не має обмеження насичення при високій біомасі та менше залежить від впливу атмосфери і фону ґрунту, ніж VI типу NDVI. Тому цей індекс використовують в побудовах моделі вуглецевого потоку для різних типів рослинного покриву. Індекс МТСІ, який і індекс REP, чутливий до раннього зниження вмісту хлорофілу при старінні рослин.

Крім того, в табл. 2 наведено три різних індекси NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Обчислюються вони по типу нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI, запропонованого в роботі [17], і відрізняються тільки довжиною хвилі потрібного каналу. Індекс NDVI є одним з найбільш часто вживаних VI. Він обраховується на основі вимірів спектрального відбиття у видимій (RED) та ближній інфрачервоній (NIR) частинах спектра. Для Sentinel-2 це канали 6 та 8 (див. табл.2). Індекс NDVI, як спектральний індикатор зеленого рослинного покриву, відображає комплекс таких параметрів, як покрив, структура навісу, індекс площі листа, вміст хлорофілу листа, а також фізіологічний статус рослинності.

В роботі (див. табл. 2) ми використали нормалізовані, різницеві вегетаційні індекси NDRE1 (740,705) (*Normalized Difference Red-Edge1*) та NDRE2

**Таблиця 2.**  
Вегетаційні індекси за довжинами хвиль супутника Sentinel-2A [2–17]

| №  | Індекс   | Центральна довжина хвилі каналу Sentinel-2A, <i>нм</i> | Формула  |
|----|--|--|--|
| 1  | REP<br>Red Edge Position   | 665; 705; 740; 783                                     | $REP = 705 + 35 \frac{(\bar{R} - R(705))}{(R(740) - R(705))};$ $\bar{R} = \frac{R(665) + R(783)}{2}$ |
| 2  | MTCI<br>MERIS Terrestrial Chlorophyll Index                          | 665; 705; 740  | $MTCI = \frac{R(740) - R(705)}{R(705) - R(665)}$   |
| 3  | NDVI (800,670)<br>Normalized Difference Vegetation Index             | 665; 783   | $NDVI(783,665) = \frac{R(783) - R(665)}{R(783) + R(665)}$  |
| 4  | NDRE1 (740,705)<br>Normalized Difference Red-Edge1                   | 705; 740   | $NDVI(740,705) = \frac{R(740) - R(705)}{R(740) + R(705)}$  |
| 5  | NDRE2 (783,705)<br>Normalized Difference Red-Edge2                   | 705; 783   | $NDVI(783,705) = \frac{R(783) - R(705)}{R(783) + R(705)}$  |
| 6  | CI green<br>Green chlorophyll index                                  | 560; 783   | $CI_{green} = \left( \frac{R(783)}{R(560)} \right) - 1$  |
| 7  | CI rededge<br>red edge chlorophyll index                             | 705; 783   | $CI_{rededge} = \left( \frac{R(783)}{R(705)} \right) - 1$  |
| 8  | NDVI (780,740)<br>Normalized Difference Vegetation Index             | 740; 783   | $NDVI(780,740) = \frac{R(780) - R(740)}{R(780) + R(740)}$  |
| 9  | Green NDVI (740,560)<br>Green Normalized Difference Vegetation Index | 560; 740   | $GreenNDVI = \frac{R(740) - R(560)}{R(740) + R(560)}$  |
| 10 | SAVI (800,670)<br>Soil Adjusted Vegetation Index                     | 665; 783   | $SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L)$   |
| 11 | EVI2 (800,670)<br>Soil Adjusted Vegetation Index                     | 665; 783   | $EVI2 = \frac{2.5 * (NIR - RED)}{(NIR + 2.4 * RED + 1)}$   |
| 12 | PSRI<br>Plant Senescence reflectance Index                           | 665; 490; 740  | $PRSI = \frac{R(665) - R(490)}{R(740)}$  |
| 13 | ZM<br>Simple Ratio index   | 705; 743   | $ZM = R(740) / R(705)$   |
| 14 | SR<br>Simple Ratio index   | 783; 665   | $SR = RED / NIR$   |
| 15 | IRECI (783, 665; 705,740)<br>– Inverted Red-Edge Chlorophyll Index   | 665; 783; 705,740                                      | $IRECI = \frac{NIR - RED}{(RE1 / RE2)} = \frac{R(783) - R(665)}{R(705) / R(740)}$                    |

**Таблиця 3.**  
Скорочена характеристика каналів Sentinel-2A

| Канали Sentinel-2A                  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Центри каналів ( <i>нм</i> )        | 443 | 490 | 560 | 665 | 705 | 740 | 783 | 842 |
| Відстань між каналами ( <i>нм</i> ) | 20  | 65  | 35  | 30  | 15  | 15  | 20  | 115 |
| Просторове розрізнення ( <i>м</i> ) | 60  | 10  | 10  | 10  | 20  | 20  | 20  | 10  |

(783,705) (*Normalized Difference Red-Edge2*). Ці 2-канальні індекси NDVI в зоні red-edge були рекомендовані в роботі [4] для поліпшення оцінки хлорофілу в покриві. Це індекси NDVI з 5, 6 каналами Sentinel-2 для NDRE1 і 7, 5 каналами для NDRE2.

В табл.2 наведено індекс червоного краю хлорофілу CIred-edge (*Red edge chlorophyll index*) та індекс зеленого хлорофілу CIgreen (*Green chlorophyll index*). В роботі [3] показано, що ці індекси лінійно залежать від оцінок вмісту хлорофілу в покриві.

В роботі [9] обґрунтовано і представлено індекс відношення на смузі NIR і смузі червоного краю для оцінки вмісту хлорофілу — індекс хлорофілу червоного краю Clred-edge. Ними також запропоновано зелений індекс хлорофілу Clgreen на смузі NIR і на зеленій смузі (green) спектра. Індекс Clred-edge чутливий до вологості в рослинному покриві. Автори рекомендують використовувати ці індекси в побудовах моделей вуглецевого потоку для різних типів рослинного покриву і рослинності.

В роботі [14] для посівів рису та ячменю запропоновано індекс NRDI (745,740) (*Normalized Reflectance Difference Index*), який має вигляд індексу NDVI в зоні червоного краю і, за даними досліджень авторів, призначений зменшити вплив розсіювання сигналу, що залежить від рослинного покриву, а також послаблює вплив фону ґрунту і при цьому є надійним індикатором покриву на хлорофіл та азот. Для Sentinel-2 ми взяли індекс NRDI (745,740) у вигляді NDVI (780,740) для каналів 7, 6.

Green NDVI (740, 560) (*Normalized Difference Vegetation Index*) — індекс зеленої нормалізованої різниці рослин є модифікованою версією індексу NDVI, яка більш чутлива до зміни вмісту хлорофілу в рослині [9]. При визначенні індексу використовується видимий зелений (замість видимого червоного) і ближній інфрачервоний діапазони. Цей індекс застосовується для вимірювання темпів фотосинтезу та моніторингу стресу рослин. Green NDVI є швидким засобом безпосереднього вимірювання частки зеленої рослинності з меншими помилками, ніж інші індекси, що використовуються в екологічних моделях [9].

В умовах розрідженого рослинного покриву основною проблемою є оцінка різних параметрів, пов'язаних з впливом фону ґрунту на вимірювальний сигнал [12]. Щоб мінімізувати цей ефект, представили модифікацію індексу NDVI і запропонував скоригований по ґрунту індекс SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), який коригує значення вегетаційного індексу NDVI відносно ґрунту. Індекс SAVI — аналог індексу NDVI з додатком коефіцієнта яскравості ґрунту  $L$ , використовує довжини хвиль в області NIR, RED. Величина  $L$  залежить від щільності покриття зеленою рослинністю: при щільному покритті зеленню  $L = 0$ ; без зеленої рослинності  $L = 1$ ; в загальному випадку  $L = 0.5$ . Значення  $L = 0.5$  оптимальне для дуже широкого спектра умов. Задіяння такого значення цього параметра призводить до зменшення впливу ґрунту в різних типах рослинного покриву [12].

Вплив ґрунту було враховано в багатьох інших ВІ, які коригують вплив яскравості ґрунту, для різної щільності рослинного покриву. Одним із таких індексів є 2-канальний вегетаційний індекс EVI2 (*Soil Adjusted Vegetation Index*) [13], який працює на тих же смугах NIR, RED, що і індекс SAVI, з іншими коефіцієнтами. В роботі [13] досліджена можливість використання 2-смугового розширеного індексу

рослинності (EVI2) з врахуванням впливу характеристик ландшафту, оптимізації сигналу рослинності з поліпшеною чутливістю в регіонах з високою біомасою і поліпшеним моніторингом рослинності за рахунок відокремлення фону покриву та зменшення впливу атмосфери. Показано, що індекс EVI2 може бути більш точним, ніж індекс NDVI, при оцінці ВПП (валова первинна продукція) для різних типів рослинності.

В табл.2 наведено 2-канальний індекс відношення PSRI (*Plant Senescence reflectance Index*) [15]. Це індекс старіння рослин, призначений для максимізації чутливості індексу до відношення об'ємних каротиноїдів (наприклад, альфа-каротину і бета-каротину) і до хлорофілу. Індекс PSRI залежить від каналів RED, BLUE, RED EDGE, які відповідають для Sentinel-2A каналам 4, 2 та 6, відповідно. Збільшення індексу PSRI вказує на підвищений стрес покриву рослинності. Значення цього індексу знаходяться в діапазоні від  $-1$  до  $1$ , а загальні значення для зеленої рослинності — в діапазоні від  $0.1$  до  $0.2$ . Використовують індекс PSRI для виявлення агрономічних проблем, пов'язаних з передчасною втратою площі зелені і виробничою потужністю.

В табл. 2 представлено два ВІ відношення (Simple ratio), які використовуються в побудовах моделі вуглецевого потоку для різних типів рослинного покриву і рослинності: індекс ZM [18] та індекс SR (Simple ratio) [7]. Це вегетаційні індекси відношення, які характеризують стан рослинного покриву; індекси відношення мають більш контрастні значення і чутливі до LAI. Зокрема, індекс SR реагує на вологість.

Індекс IRECI(783,665;705,740) — *Inverted Red-Edge Chlorophyll Index* — Обернений Red-Edge хлорофільний індекс [8]. Автори пропонують новий ВІ оцінки біофізичних змінних для каналів Sentinel-2. Це обернений Red-Edge хлорофільний індекс IRECI (див. табл. 2), який включає коефіцієнт відображення в чотирьох каналах 4, 5, 6 і 7 для визначення вмісту хлорофілу в рослинному покриві. В індексі IRECI задіяні ті ж самі канали, як і в індексі REP для Sentinel-2, з використанням лінійної інтерполяції [4, 10].

В зоні червоного краю для індексу IRECI задіяні канали з центрівкою для Sentinel-2 на довжинах 740 і 705 нм, а також використовуються канали з максимальною і мінімальною відбивною здатністю рослинності в зонах NIR і RED при 783 і 665 нм, відповідно. IRECI є індексом відношення і, за даними роботи [8], має сильний контраст, що є типовим для ВІ простого відношення SR. Основна перевага індексу IRECI в тому, що він відображає майже прямий розрахунок польового вимірюваного вмісту хлорофілу в рослинному покриві і чутливий до індексу LAI.

В табл. 4 наведено значення порохованих 15 вегетаційних індексів із табл. 2 за шкалою довжин хвиль каналів супутника Sentinel-2A спектрорадіо-

метром ASD FieldSpec® 3FR, за даними системи БПЛА, одержаними “з руки в надир”, та для усереднених тестових трьох точок (№ 5–7) ділянок полігону на 03.05.2019 р.

Аналізуючи корелятивну залежність між трьома колонками значень ВІ для Осоки ранньої (*Carex praecox Schreb*) (№ 5, табл. 4), Осоки берегової (*Carex riparia Curt.*) (№ 6), Очерету південного (*Phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steud.*) (№ 7), маємо високу кореляцію за Пірсоном  $r > 0.9$  з максимальним значенням кореляційної помилки 0.12 для 15 значень ВІ. Кореляційні матриці коефіцієнтів кореляції за Пірсоном для цих точок наведені в табл. 5.

Подаємо формулу розрахунку коефіцієнта кореляції за Пірсоном [1] для наведених даних ВІ для трьох точок (№ 5–7). Коефіцієнт кореляції може змінюватися від  $-1$  до  $1$  і характеризує лінійний зв'язок між досліджуваними величинами.

Формула Пірсона для розрахунку коефіцієнта кореляції між наборами даних для 15 індексів, представлених в табл. 2, має такий вигляд [1]:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{15} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{15} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{15} (y_i - \bar{y})^2}}$$

де  $x_i, y_i$  — значення відповідних індексів з табл. 3;  $\bar{x}$  і  $\bar{y}$  — середні арифметичні значення відповідних індексів.

З аналізу корелятивної залежності між одержаними значеннями ВІ в табл. 5, можна зробити висновок, що виміри по трьох приладах (ASD — спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR; D1 — “з руки в надир” за даними БПЛА; D2 — за даними БПЛА зро-

**Таблиця 5.**

Кореляційні матриці коефіцієнтів кореляції спектральних індексів, використаних в нашому дослідженні

|     | № 5. Осока рання      |        |        |
|-----|-----------------------|--------|--------|
|     | ASD                   | D1     | D2     |
| ASD |                       | 0.9999 | 0.9988 |
| D1  | 0.9999                |        | 0.9990 |
| D2  | 0.9988                | 0.9990 |        |
|     | № 6. Осока берегова   |        |        |
|     | ASD                   | D1     | D2     |
| ASD |                       | 0.9914 | 0.9147 |
| D1  | 0.9914                |        | 0.9589 |
| D2  | 0.9147                | 0.9589 |        |
|     | № 7. Очерет південний |        |        |
|     | ASD                   | D1     | D2     |
| ASD |                       | 0.9888 | 0.9070 |
| D1  | 0.9888                |        | 0.9303 |
| D2  | 0.9070                | 0.9303 |        |

блені досить точно і підтверджують коригованість роботи приладів та одержаних результатів.

У табл. 6 наведено зіставлення порашованих значень ВІ для даних, одержаних спектрорадіометром ASD FieldSpec® 3FR, за даними БПЛА “з руки в надир” та за даними БПЛА “з руки в надир” на 24.04.2019 р. для різного типу земної поверхні тестових ділянок.

За кореляційними матрицями (див. табл. 6) коефіцієнтів кореляції спектральних індексів, одержаних в нашому дослідженні, маємо високу кореляцію за Пірсоном  $r > 0.97$  з максимальним значенням коре-

**Таблиця 4.**

Значення вегетаційних індексів, обчислених за даними (03.05.2019) спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR (ASD); за даними БПЛА “з руки в надир” (D1), за даними БПЛА (D2)

| Назва індексу | № 5. Осока рання ( <i>Carex praecox Schreb</i> ) |          |          | № 6. Осока берегова ( <i>Carex riparia Curt.</i> ) |          |          | № 7. Очерет південний ( <i>Phragmites australis (Cav.) Trin. Ex Steud.</i> ) |          |         |
|---------------|--|----------|----------|--|----------|----------|--|----------|---------|
|               | ASD  | D1       | D2       | ASD  | D1       | D2       | ASD  | D1       | D2      |
| REP           | 71.74959   | 717.0245 | 716.7232 | 720.4237   | 719.0717 | 717.2614 | 721.6179   | 719.0098 | 715.12  |
| MTCI          | 1.980412   | 1.965657 | 1.83616  | 2.907867   | 2.559561 | 1.89777  | 3.722071   | 2.539333 | 1.69685 |
| NDRE1         | 0.357778   | 0.353774 | 0.3246   | 0.524454   | 0.463777 | 0.257063 | 0.503608   | 0.478948 | 0.2148  |
| NDRE2         | 0.404442   | 0.395649 | 0.368567 | 0.574696   | 0.508205 | 0.298125 | 0.552766   | 0.523323 | 0.2421  |
| Clgreen       | 2.377776   | 2.458901 | 2.256573 | 4.327485   | 3.383616 | 1.644429 | 3.902322   | 3.72861  | 1.3851  |
| Clreledge     | 1.358197   | 1.309333 | 1.167399 | 2.702518   | 2.066739 | 0.849512 | 2.471936   | 2.195709 | 0.63875 |
| NDVI1         | 0.687082   | 0.678099 | 0.639541 | 0.877548   | 0.808793 | 0.488623 | 0.768333   | 0.840983 | 0.4150  |
| NDVI2         | 0.054559   | 0.048689 | 0.049942 | 0.071918   | 0.058129 | 0.04447  | 0.068122   | 0.059216 | 0.0288  |
| GNDVI         | 0.503509   | 0.516642 | 0.493256 | 0.643659   | 0.592002 | 0.415076 | 0.620997   | 0.615377 | 0.3849  |
| SAVI          | 0.487619   | 0.475438 | 0.364736 | 0.583297   | 0.544006 | 0.208391 | 0.49022  | 0.559149 | 0.1852  |
| EVI2          | 0.498433   | 0.483787 | 0.354307 | 0.609561   | 0.562591 | 0.191101 | 0.497092   | 0.580239 | 0.1692  |
| PSRI          | 0.049329   | 0.061465 | 0.06206  | 0.000804   | 0.012744 | 0.096407 | 0.071561   | 0.007036 | 0.1448  |
| ZM            | 2.11419  | 2.094895 | 1.96121  | 3.20569  | 2.729791 | 1.692019 | 3.029072   | 2.838392 | 1.5471  |
| SR            | 0.185479   | 0.191825 | 0.219854 | 0.065219   | 0.10571  | 0.343524 | 0.131009   | 0.086376 | 0.4135  |
| IRECI         | 0.6522   | 0.6234   | 0.384711 | 1.1193   | 0.8974   | 0.164227 | 0.8613   | 0.9502   | 0.1360  |



Таблиця 6.

Зіставлення значень ВІ на 24.04.2019 р.

| № 1. Осока рання (Carex grassох Schreb) |          |          |          | Кореляційна матриця за Пірсоном |        |        |        |
|---|----------|----------|----------|---------------------------------|--------|--------|--------|
|   | ASD      | D1       | D2       | n=15                            | ASD    | D1     | D2     |
| REP                                     | 716.2609 | 716.3564 | 711.1269 | ASD                             |        | 0.9999 | 0.9988 |
| MTCI                                    | 1.623974 | 1.409379 | 1.300722 | D1                              | 0.9999 | 0.9999 | 0.9990 |
| NDRE1                                   | 0.237455 | 0.188094 | 0.131586 | D2                              | 0.9988 | 0.9990 |        |
| NDRE2                                   | 0.281675 | 0.23938  | 0.144965 |                                 |        |        |        |
| Clgreen                                 | 1.805532 | 1.508239 | 0.844923 |                                 |        |        |        |
| Clrededge                               | 0.784257 | 0.629435 | 0.339086 |                                 |        |        |        |
| NDVI1                                   | 0.486413 | 0.416481 | 0.271626 |                                 |        |        |        |
| NDVI2                                   | 0.04739  | 0.053704 | 0.013639 |                                 |        |        |        |
| GNDVI                                   | 0.436882 | 0.385101 | 0.284507 |                                 |        |        |        |
| SAVI                                    | 0.389267 | 0.253624 | 0.178043 |                                 |        |        |        |
| EVI2                                    | 0.391235 | 0.240194 | 0.166164 |                                 |        |        |        |
| PSRI                                    | 0.149657 | 0.16669  | 0.199    |                                 |        |        |        |
| ZM                                      | 1.622796 | 1.463341 | 1.30305  |                                 |        |        |        |
| SR                                      | 0.345521 | 0.411949 | 0.572789 |                                 |        |        |        |
| IRECI                                   | 0.451397 | 0.208263 | 0.137355 |                                 |        |        |        |
| № 2. Вода болота (Water swamp)          |          |          |          | Кореляційна матриця за Пірсоном |        |        |        |
|   | ASD      | D1       | D2       | n=15                            | ASD    | D1     | D2     |
| REP                                     | 698.8584 | 703.514  | 714.011  | ASD                             |        | 0.9993 | 0.9726 |
| MTCI                                    | 0.67203  | 0.833969 | 1.470175 | D1                              | 0.9993 | 0.9993 | 0.9794 |
| NDRE1                                   | 0.167871 | 0.190723 | 0.114653 | D2                              | 0.9726 | 0.9794 |        |
| NDRE2                                   | 0.186589 | 0.20797  | 0.134025 |                                 |        |        |        |
| Clgreen                                 | 1.951691 | 1.79911  | 0.770334 |                                 |        |        |        |
| Clrededge                               | 0.458782 | 0.525156 | 0.309535 |                                 |        |        |        |
| NDVI1                                   | 0.569932 | 0.556301 | 0.227671 |                                 |        |        |        |
| NDVI2                                   | 0.019323 | 0.017959 | 0.019674 |                                 |        |        |        |
| GNDVI                                   | 0.479137 | 0.45951  | 0.259813 |                                 |        |        |        |
| SAVI                                    | 0.364305 | 0.351467 | 0.154717 |                                 |        |        |        |
| EVI2                                    | 0.35671  | 0.342636 | 0.143906 |                                 |        |        |        |
| PSRI                                    | 0.08199  | 0.086549 | 0.223927 |                                 |        |        |        |
| ZM                                      | 1.403474 | 1.471342 | 1.259002 |                                 |        |        |        |
| SR                                      | 0.273941 | 0.285099 | 0.629101 |                                 |        |        |        |
| IRECI                                   | 0.296989 | 0.297814 | 0.118711 |                                 |        |        |        |
| № 3. Вода (Water)                       |          |          |          | Кореляційна матриця за Пірсоном |        |        |        |
|   | ASD      | D2       | n=15     | ASD                             | D2     |        |        |
| REP                                     | 723.2742 | 720.6138 | ASD      |                                 | 0.669  |        |        |
| NDRE1                                   | -0.15763 | -0.0933  | D2       | 0.669                           | 0.669  |        |        |
| NDRE2                                   | -0.15527 | -0.0321  |          |                                 |        |        |        |
| Clgreen                                 | -0.31862 | 0.252291 |          |                                 |        |        |        |
| Clrededge                               | -0.2688  | -0.0622  |          |                                 |        |        |        |
| NDVI1                                   | -0.1476  | 0.015093 |          |                                 |        |        |        |
| NDVI2                                   | 0.002421 | 0.06139  |          |                                 |        |        |        |
| GNDVI                                   | -0.19183 | 0.050976 |          |                                 |        |        |        |
| SAVI                                    | -0.03139 | 0.004573 |          |                                 |        |        |        |
| EVI2                                    | -0.02652 | 0.003934 |          |                                 |        |        |        |
| PSRI                                    | -0.2712  | 0.389965 |          |                                 |        |        |        |
| ZM                                      | 0.727669 | 0.829318 |          |                                 |        |        |        |
| SR                                      | 1.346307 | 0.970263 |          |                                 |        |        |        |
| IRECI                                   | -0.00887 | 0.001584 |          |                                 |        |        |        |
| № 4. Дорога (Dirt road)                 |          |          |          | Кореляційна матриця за Пірсоном |        |        |        |
|   | ASD      | D1       | D2       | n=15                            | ASD    | D1     | D2     |
| REP                                     | 720.6812 | 727.8593 | 717.1764 | ASD                             |        | 0.9994 | 0.9913 |
| MTCI                                    | 0.958019 | 0.868767 | 1.807018 | D1                              | 0.9994 | 0.9994 | 0.9913 |
| NDRE1                                   | 0.056829 | 0.037389 | 0.136632 | D2                              | 0.9913 | 0.9900 | 0.9900 |
| NDRE2                                   | 0.104652 | 0.087129 | 0.165059 |                                 |        |        |        |
| Clgreen                                 | 0.92602  | 0.684952 | 0.791292 |                                 |        |        |        |
| Clrededge                               | 0.233769 | 0.190891 | 0.395379 |                                 |        |        |        |
| NDVI1                                   | 0.170569 | 0.133387 | 0.256971 |                                 |        |        |        |
| NDVI2                                   | 0.048109 | 0.049903 | 0.029083 |                                 |        |        |        |
| GNDVI                                   | 0.272518 | 0.207851 | 0.256517 |                                 |        |        |        |
| SAVI                                    | 0.141912 | 0.108232 | 0.168947 |                                 |        |        |        |
| EVI2                                    | 0.133825 | 0.100932 | 0.157336 |                                 |        |        |        |
| PSRI                                    | 0.347079 | 0.32795  | 0.205533 |                                 |        |        |        |
| ZM                                      | 1.120506 | 1.077683 | 1.316508 |                                 |        |        |        |
| SR                                      | 0.708571 | 0.764623 | 0.591126 |                                 |        |        |        |
| IRECI                                   | 0.11902  | 0.0847   | 0.131993 |                                 |        |        |        |

ляційної помилки 0.07, для водної поверхні кореляція за Пірсоном  $r \approx 0.69$  з кореляційною помилкою 0.20 (див. табл. б).

## Висновки

Проведені нами виміри системою БПЛА та польовим спектро радіометром ASD FieldSpec® 3FR зроблені досить точно і підтверджують коригованість та одержаних результатів для наземної верифікації матеріалів космічної зйомки за шкалою довжин хвиль каналів супутника Sentinel-2A.

За даними БПЛА отримано детальні ортофотоплани, розрізнявальна здатність зйомки на ортофотоплані ділянки дослідження — 1 піксель (приблизно дорівнює  $2.5 \text{ см}^2$ ).

За кореляційними матрицями коефіцієнтів кореляції спектральних індексів, одержаних в дослідженні, маємо високу кореляцію за Пірсоном  $r > 0.97$  з максимальним значенням кореляційною помилки 0.07. Для водної поверхні кореляція за Пірсоном  $r \approx 0.69$  з кореляційною помилкою 0.20.

Одержані дані дозволяють зробити висновок, що польовий спектро радіометром ASD FieldSpec® 3FR та системою БПЛА можна використовувати при спектральній зйомці об'єктів для дослідження рослинності, ґрунтів, порід і штучних об'єктів, виявлення видових рослинних угруповань, картографування продуктивності екосистем, картографування за типом культури або врожайністю, виявлення забруднення екосистем, спричинених стресів та ін.

Дана робота виконана в рамках договору між ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України” та Інститутом ботаніки ім. М. Г. Холодного НАН України по договору №22/04 від 24 червня 2019 р.

## Література

1. Иванова В. М., Калинина В. Н., Нешумова Л. А., Решетникова О. И. Математическая статистика. М.: Высш. шк., 1981. 368 с.
2. Лялько В. І., Попов М. О. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування. К: Наук. думка, 2006. 356 с.
3. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М., Дугін С. С. Застосування гіперспектральних індексів для визначення змін трав'яного покриву за даними спектрометричної зйомки. *Доп. НАН України*. 2014. № 4. С. 105–111.
4. Clevers J., Kooistra L., Marnix V. D. B. Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sens.* 2017. Vol. 9. P. 405. doi: 10.3390/rs9050405.
5. Clevers J. G. P. W., Kooistra L., Salas E. A. L. Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge positioning in spectroscopic data. *Int. J. Remote Sens.* 2004. Vol. 25. P. 1–13.
6. Dash J., Curant P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens.* 2004. Vol. 25. P. 5403–5413.
7. Dotzler S., Hill J., Buddenbaum H., Stoffe J. The Potential of EnMAP and Sentinel-2 Data for Detecting Drought Stress Phenomena in Deciduous Forest Communities. *Remote Sens.* 2015. Vol. 7. P. 14227–14258. doi:10.3390/rs71014227.
8. Frampton W. J., Dash J., Watmough G., Milton E. J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation ISPRS. *J. Photogram. Remote Sens.* 2013. Vol. 82. P. 83–92.
9. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 1996. Vol. 58. P. 289–298.
10. Guyot, G., Baret, F. Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'etat des couverts vegetaux. In: Proceedings, 4th International Colloquium “Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing”, Aussois, 18–22 January 1988. Paris: ESA, Publ. SP-287, 1988. P. 279–286.
11. Harris A., Dash J. A new approach for estimating northern peatland gross primary productivity using a satellite-sensor-derived chlorophyll index *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, G04002. doi:10.1029/2011JG001662.
12. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 1988. Vol. 25, N 3. P. 295–309.
13. Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.* 2008. Vol. 112. P. 3833–3845.
14. Kang Yu, Martin Leon Gny, Helge Aasen, Yinkun Yao, Shanyu Huang, Yuxin Miao, China & Georg Bareth. Estimate Leaf Chlorophyll of Rice Using Reflectance Indices and Partial Least Squares. *Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, (PFG) Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation.* 2015/1, 0045–0054, Germany, Februar 2015.
15. Merzlyak M. N., Gitelson A. A., Chivkunova O. B., Rakitin V. Yu. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 1999. Vol. 106. P. 135–141.
16. Radoux J., Chomé G., Jacques D. C., Waldner F., Bellemans N., Matton N., Lamarche C., D'Andrimont R. and Defourny P. Sentinel-2's Potential for Sub-Pixel Landscape Feature Detection. *Remote Sens.* 2016. Vol. 8, N 6. P. 488–516.
17. Rouse J. W., Haas Jr. R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation *Prog. Rep. RSC.* 1978-1. 1973. 93 p.
18. Zarco-Tejada P. J., Berjon A., Loper-Lorano R. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulating in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sens. Environ.* 2005. Vol. 99. P. 271–284.

## References

1. Ivanova, V. M., Kalinina, V. N., Neshumova, L. A., Reshetnikova, O. I. (1981). *Mathematical statistics*. Moskva: Vyssh. shk. (Russian).
2. Lyalko, V. I., Popov, M. O. (2006). *Multispectral methods of*

- remote sensing of the Earth in the problems of nature use* *Mathematical statistics*. Kyiv: Nauk. dumka. (Ukrainian).
3. Lyalko, V. I., Shportiuk, Z. M., Sybirtseva, O. M., Duhin, S. S. (2014). Application of hyperspectral indices for determination of changes in grass cover by spectrometric data. *Dop. NAN Ukrainy*. 4, 105–111. (Ukrainian).
  4. Clevers, J., Kooistra, L., Marnix, V. D. B. (2017). Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sens.* 9, 405. doi: 10.3390/rs9050405.
  5. Clevers, J. G. P. W., Kooistra, L., Salas, E. A. L. (2004). Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge positioning in spectroscopic data. *Int. J. Remote Sens.* 25, 1–13.
  6. Dash, J., Curant, P. J. (2004). The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens.* 25, 5403–5413.
  7. Dotzler, S., Hill, J., Buddenbaum, H., Stoffe, J. (2015). The Potential of EnMAP and Sentinel-2 Data for Detecting Drought Stress Phenomena in Deciduous Forest Communities. *Remote Sens.* 7, 14227–14258. doi:10.3390/rs71014227.
  8. Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G., Milton, E. J. (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 82, 83–92.
  9. Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 58, 289–298.
  10. Guyot, G., Baret, F. (1988). Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'état des couverts végétaux. In: Proceedings, 4th International Colloquium "Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing", Aussois, 18–22 January 1988. Paris: ESA, Publ. SP-287, 279–286.
  11. Harris, A., Dash, J. (2011). A new approach for estimating northern peatland gross primary productivity using a satellite-sensor-derived chlorophyll index. *J. Geophys. Research.* 116, G04002. doi:10.1029/2011JG001662.
  12. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25 (3), 295–309.
  13. Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.* 112, 3833–3845.
  14. Kang, Yu. Martin, Leon Gnyp, Helge, Aasen, Yinkun, Yao, Shanyu, Huang, Yuxin, Miao, China & Georg, Bareth. (2015). Estimate Leaf Chlorophyll of Rice Using Reflectance Indices and Partial Least Squares. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, (PFG) Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation. 1, 0045–0054, Germany, Februar 2015.
  15. Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., Rakitin, V. Yu. (1999). Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum.* 106, 135–141.
  16. Radoux, J., Chomé, G., Jacques, D. C., Waldner, F., Bellemans, N., Matton, N., Lamarche, C., D'Andrimont, R. and Defourny, P. (2016). Sentinel-2's Potential for Sub-Pixel Landscape Feature Detection. *Remote Sens.* 8 (6), 488–516.
  17. Rouse, J. W., Haas, Jr. R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC.* 1978-1.
  18. Zarco-Tejada, P. J., Berjon, A., Loper-Lorano, R. (2005). Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulating in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sens. Environ.* 99, 271–284.

#### ВЕРИФИКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ОБРОБКИ СПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ СПУТНИКА SENTINEL-2А, НАЗЕМНОГО СПЕКТРОРАДИОМЕТРА ASD FIELDSPEC® 3FR І СИСТЕМИ РЕГИСТРАЦІЇ ІЗМЕНЧИВОСТІ ПАРАМЕТРІВ СРЕДИ DJI STS-VIS

C. С. Дугін, О. Н. Сибирцева, С. І. Голубов, Е. Н. Дорофєй

Проведено дослідження рослинного покриву методом гіперспектрального дистанційного зондування спектрометричним ASD FieldSpec® 3FR і по даним системи реєстрації изменчивості параметрів середі DJI STS-VIS. Побудовано ортофотоплани тестових ділянок досліджень з дозволяючою здатністю зйомки 2,5 см. Підтверджено суттєва корелюваність отриманих результатів для наземної верифікації матеріалів космічної зйомки спектральних каналів спутника Sentinel-2A. Привлечено 15 вегетационних індексів по довжинам хвиль каналів спутника Sentinel-2A, які показали високу кореляцію по Пірсону  $r > 0.97$  з максимальним значенням кореляційної помилки 0.07.

**Ключеві слова:** спектральна зйомка, вегетационні індекси, ортофотоплан, кореляція наземних і дистанційних вимірювань

#### VERIFICATION OF MULTISPECTRAL DATA PROCESSING FOR THE SENTINEL-2A BANDS, FIELD ASD FIELDSPEC® 3FR AND UAV WITH THE DJI STS-VIS

S. S. Dugin, O. M. Sybirtseva, S. I. Golubov, Ye. M. Dorofey

The study of plant cover have been performed by the hyperspectral remote sensing method using ASD FieldSpec® 3FR and DJI STS-VIS measurements. The orthophotoplans are compiled for the test plots of interest at the spatial resolution of 2.5 cm. The substantial correlation for the results of terrestrial verification for the satellite image data in the range of Sentinel-2A bands are confirmed. 15 vegetation indices for the Sentinel-2A wavelength bands were drawn at the Pearson correlation coefficient  $r > 0.97$ , with a maximum value of the correlation error of 0.07.

**Keywords:** spectral imaging, vegetation indices, orthophotoplane, correlation between the terrestrial and remote sensing measurements