



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.4.221>

УДК 528.8.04:551.4

Газообмін рослин на прикладі осоки побережної та зіставлення з матеріалами спектрогазометричного наземного вимірювання з БпЛА та супутника Sentinel-2

В. І. Лялько, С. С. Дугін, О. М. Сибірцева, Є. М. Дорофей, С. І. Голубов,* Г. М. Жолобак

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Проводилися спектрогазометричні наземні вимірювання за період 2020–2021 рр. За їх даними визначено, що п’ять вегетаційних індексів – REP (Red Edge Position), Green NDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), NRDI (Normalized Difference Vegetation Index), Green MOD (Green Model) і Red MOD (Red edge Model) – більше реагують на різницю концентрацій CO₂, залежної від листового фотосинтезу та листового дихання осоки побережної *Carex riparia*, з високою корелятивною залежністю за Пірсоном від 0,60 до 0,72. Визначені вегетаційні індекси відображають зміни концентрації CO₂, одержаної в результаті спектрогазометричного вимірювання, які можуть бути рекомендовані для використання в побудовах моделей вуглецевого потоку для рослинного покриву.

Ключові слова: спектральне та газометричне знімання, вегетаційні індекси, кореляція наземних та дистанційних вимірювань, *Carex riparia*, концентрація CO₂, БпЛА.

© В. І. Лялько, С. С. Дугін, О. М. Сибірцева, Є. М. Дорофей, С. І. Голубов, Г. М. Жолобак

Вступ

В умовах сучасних кліматичних змін експериментальна полігонна та аерокосмічна оцінка інтенсивності вилучення CO₂ з атмосфери болотними екосистемами набуває все більшого значення. Адже зміни клімату стали незаперечним фактом, а вуглецевий пул водно-болотних угідь є одним з найбільших важливих поглиначів вуглецю в регіональних екосистемах. Як елемент такої болотної екосистеми ми розглядаємо осоку побережну (*Carex riparia*). Метою роботи було простежити корелятивний зв’язок вегетаційних індексів (ВІ) з концентрацією CO₂ (концентрація бралася в одиницях ppm – 1 молекула CO₂ на мільйон часток повітря) в точках дослідження на прикладі осоки побережної (*Carex riparia*) на приболотних територіях дослідної ділянки. Родина осокових (*Carex*) досить розповсюджена в Україні, росте переважно у вологій місцевості (на болотах та берегах річок). Через своє екологічне поширення *Carex riparia* є сприятливою для порівняльних екологічних досліджень, адаптується до заболочування, має яскраво виражену властивість поглинання CO₂ своїм покривом (Bush, 2001). Існує багато наукових робіт, що доводять вплив змін клімату на розвиток цього роду рослин (Bengt, 1994).

Матеріали і методи. Опис тестової ділянки

Здійснено шість польових виїздів (15.10.2020, 25.05.2021, 23.06.2021, 08.07.2021, 10.08.2021 та 16.09.2021) в зону полігона Вишеньки. На кожен дату польового виїзду вимірювали концентрацію CO₂ ІЧ газоаналізатором під час фотосинтезу осоки і її дихання. Зіставлено різниці цих концентрацій з вегетаційними індексами (ВІ) (Табл. 1), рекомендованими (Horler, 1983; Clevers, Kooistra, Marnix, 2017; Dash and Curran, 2004 та ін.) для картування ветландів на приболотних територіях.

За даними коефіцієнтів кореляції між значеннями різниці CO₂ та порахованими ВІ (Табл. 1), були відібрані ВІ, які можна використати як індикатори різниці концентрацій CO₂ осоки побережної. ВІ обчислювали за даними спектро радіометра ASD FieldSpec® 3FR. На жаль, мали тільки шість виїздів теплої пори року (весна, літо та початок осені) з 9:00 до 13:00 в сонячну погоду. Знімання спектро радіометром було проведено одночасно з роботою газоаналізатора Qubit System 151S (https://qubitbiology.com/products/q-s151-co2-analyzer-0-2000ppm/#159259126082_4-952f5dc4-652b) на тестових ділянках Бортницької станції аерації в зоні полігона Вишеньки (Лялько та ін., 2015, 2019, 2020; Жолобак та ін., 2020). Розраховано ВІ за матеріалами, одержаними з БпЛА DJI P4 Multispectral та Sentinel-2 від 10 травня 2021 р.

За літературними даними (Horler, 1983; Clevers, Kooistra, Marnix, 2017; Dash and Curran, 2004 та ін.), проаналізовано ВІ, які характеризують екосистеми водно-болотних угідь.

*E-mail: asdfieldspec3@gmail.com

Таблиця 1. Вегетаційні індекси за довжинами хвиль супутника Sentinel-2, рекомендовані для картування водно-болотних угідь на приболотних територіях

№ з/п	Індекс	Центральна довжина хвилі каналу Sentinel-2A, нм	Формула	Посилання
1	REP Red Edge Position	665; 705; 740; 780	$REP = 705 + 35 \frac{(\bar{R} - R(705))}{(R(740) - R(705))},$ $\bar{R} = \frac{R(665) + R(780)}{2}.$	Horler, 1983; Clevers et al., 2017
2	MTCI MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	665; 705; 740	$MTCI = \frac{R(740) - R(705)}{R(705) - R(665)}$	Dash et al., 2004
3	NDVI (RED, NIR) Normalized Difference Vegetation Index	665; 840	$NDVI = \frac{R(840) - R(665)}{R(840) + R(665)}$	Rouse et al., 1973; Mahdianpari et al., 2019
4	NRDI (780, 740) Normalized Difference Vegetation Index	740; 780	$NRDI(780,740) = \frac{R(780) - R(740)}{R(780) + R(740)}$	Yu et al., 2018
5	EVI (BLUE, RED; NIR) Enhanced Vegetation Index	490; 665; 840	$EVI = \frac{2.5 * (R(840) - R(665))}{R(840) + 6 * R(665) - 7.5 * R(490) + 1}$	Huete et al., 2002; Ling et al., 2017
6	EVI2 (RED; NIR) Enhanced Vegetation Index	665; 840	$EVI2 = \frac{2.5 * (R(840) - R(665))}{R(840) + 2.4 * R(665) + 1}$	Huete et al., 2008
7	SAVI (RED; NIR) Soil Adjusted Vegetation Index	665; 840	$SAVI = \frac{R(840) - R(665)}{(R(840) + R(665) + L)} * (1 + L)$	Huete, 1988; Jiang et al., 2008
8	NMDI (NIR, SWIR1, SWIR2) A normalized multi-band drought index	870; 1610; 2130	$NMDI = \frac{R(870) - (R(1610) - R(2130))}{R(870) + (R(1610) - R(2130))}$	Wang et al., 2007; Ali et al., 2019
9	Green NDVI (740, 560) Green Normalized Difference Vegetation Index	560; 740	$GreenNDVI = \frac{R(740) - R(560)}{R(740) + R(560)}$	Gitelson et al., 1994
10	SR2 (RED, NIR) Simple Ratio Index	665; 840	$SR2 = \frac{R(665)}{R(840)}$	Dotzler et al., 2015; Jiang, Huete et al., 2008
11	NDRE1 (740, 705) Normalized Difference Red-Edge1	705; 740	$NDRE1(740,705) = \frac{R(740) - R(705)}{R(740) + R(705)}$	Gitelson et al., 1994; Clevers et al., 2017
12	NDRE2 (780, 705) Normalized Difference Red-Edge2	705; 780	$NDRE2(780,705) = \frac{R(780) - R(705)}{R(780) + R(705)}$	Barnes, Clevers et al., 2017
13	WDRVI _{GITELSON} Wide Dynamic Range Vegetation Index	665; 840	$WRDVI = (\alpha R_{NIR} - R_{RED}) / (\alpha R_{NIR} + R_{RED})$	Gitelson, 2004; Jara et al., 2019; Gitelson et al., 2005
14	Red edge Model (REDedge, NIR)	705; 840	$RedMod = (R_{NIR} / R_{Rededge}) - 1$	Gitelson et al., 2005; Clevers et al., 2017
15	Green Model (Green, NIR)	560; 840	$GreenMod = (R_{NIR} / R_{Green}) - 1$	Gitelson et al., 2005; Clevers et al., 2017
16	DVI (RED, NIR) Difference Vegetation Index	665; 840	$DVI = R_{NIR} - R_{RED}$	Perry et al., 1983; Naji et al., 2018; Ling et al., 2017

Опис вегетаційних індексів (BI)

REP (Red Edge Position), за допомогою лінійної інтерполяції (Horler, 1983; Clevers et al., 2017):

$$REP = 705 + 35 \frac{(\bar{R} - R(705))}{(R(740) - R(705))},$$

$$\bar{R} = \frac{R(665) + R(780)}{2}.$$

Чотириканальний індекс **REP** (665, 705, 740, 783) реагує на хлорофільний стан рослинного покриву Землі і залежить від стану довкілля внаслідок

забруднення води та ґрунтів. Зміни ці 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. Значення зсувів *REP* можуть слугувати навіть індикатором забруднення важкими металами рослинного покриву та використовуються в різних **екологічних моделях** (Clevers et al 2017, Kooistra, Marnix, 2017).

MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) — індекс земного хлорофілу MERIS (Dash et al., 2004):

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

Триканальний індекс **MTCI** може бути індикатором вегетаційного стресу з перевагою використання в зоні червоного краю тільки трьох каналів (665, 705, 740).

Для обчислення значення чотириканального *REP* для даних Sentinel-2 використані канали 4, 5, 6, 7, а для **MTCI** необхідні канали 4, 5 та 6. Індекси *REP* і **MTCI** можуть слугувати пошуковими індексами при розвідуванні родовищ вуглеводнів та вуглеводневих забруднень, бо вони реагують на зміни в рослинному покриві, які виникають внаслідок їх просочування із родовищ газу та нафти або їх витікання з підземних трубопроводів. **MTCI** безпосередньо пов'язаний із вмістом хлорофілу в покриві і не має обмеження насичення при високій біомасі та менше залежить від впливу атмосфери і фону ґрунту порівняно з *VI* типу *NDVI*. Індекс **MTCI**, як і *REP*, чутливий до раннього зниження вмісту хлорофілу при старінні рослин. Цей індекс сприяє поліпшенню кількісної оцінки часової і просторової динаміки потоків вуглецю в торфовищах та використовується в побудовах **моделей вуглецевого потоку** для різних типів рослинного покриву (Harris and Dash, 2011).

NDVI (RED, NIR) – Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{R(840) - R(665)}{R(840) + R(665)}$$

Нормалізований вегетаційний індекс (*NDVI*) – це стандартизований індекс, що показує наявність і стан рослинності (відносна біомаса). У цьому індексі використано контраст характеристик двох каналів з набору мультиспектральних растрових даних – поглинання пігментом хлорофілу в червоному каналі і високу відбивну здатність рослинної сировини в інфрачервоному каналі (Rouse et al., 1973).

При роботі з космоснімками вибираються NIR-значення пікселів з ближнього інфрачервоного каналу та Red-значення пікселів з червоного каналу. Індекс, запропонований в роботі (Mahdianpari et al., 2019), використовується для досліджень водно-болотних угідь за даними Sentinel-2. Значення цього індексу лежать в межах від –1,0 і до 1,0. Пікселі зі значенням *NDVI* <0,3 являють собою невегетативні поверхні, точки зі значеннями *NDVI* вище цього **порога** є типовими для рослинного покриву.

NRDI (Normalized Reflectance Difference Index).

Нормалізований різницевий індекс відбиття (Yu et al., 2018):

$$NRDI(780,740) = \frac{R(780) - R(740)}{R(780) + R(740)}$$

Індекс має вигляд індексу *NDVI* у зоні червоного краю і призначений зменшити вплив розсіювання сигналу залежно від рослинного покриву, ослаблює вплив фону ґрунту, що важливо для дослідження фотосинтезу рослин, і є індикатором на хлорофіл та азот у покриві. Цей індекс використовується в **екологічних моделях**. Для його отримання, за даними супутника Sentinel-2, застосовуються канали 7 та 6 (780 та 740 нм).

EVI (NIR, RED, BLUE) – Enhanced Vegetation Index (Huete et al., 2002):

$$EVI = \frac{2.5 * (R(840) - R(665))}{R(840) + 6 * R(665) - 7.5 * R(490) + 1}$$

Покращений вегетаційний індекс **EVI** може використовуватися на ділянках із щільним рослинним покривом, де індекс площі листя (*LAI*) високий. Сині довжини хвиль (Blue) у вегетаційному індексі **EVI** підвищують точність *NDVI*, оскільки **EVI** коригує фонове відбиття ґрунту та атмосферний вплив. Діапазон значень **EVI** лежить в межах від –1 до 1, для здорової рослинності, зазвичай, від 0,20 до 0,80.

У роботі (Ling et al., 2017) під час аналізу характеристик рослинних індексів у спектрах візуалізації осоки в умовах різної водності використовуються вегетаційні індекси *NDVI*, **EVI** та індекси відношення *SR* для **аналізу впливу вологи** на спектри рослинності окремих видів осоки у водно-болотній місцевості.

EVI2 (NIR, RED) – Enhanced Vegetation Index 2 (Jiang et al., 2008):

$$EVI2 = \frac{2.5 * (R(840) - R(665))}{R(840) + 2.4 * R(665) + 1}$$

Вплив ґрунту було враховано в багатьох *VI*, які коригують вплив яскравості ґрунту для різної щільності рослинного покриву. Одним із таких індексів є двоканальний покращений вегетаційний індекс **EVI2** (Enhanced Vegetation Index 2) (Jiang et al., 2008), який працює в смугах NIR, RED. Це двосмуговий розширений індекс рослинності (**EVI2**), в якому врахований вплив характеристик ландшафту, що поліпшує **класифікацію екосистеми водно-болотних угідь** за даними космоснімків. Його значення лежать в межах від –1 до +1.

SAVI (NIR, RED) – Soil Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{R(840) - R(665)}{(R(840) + R(665) + L)} * (1 + L)$$

Коригований для ґрунту вегетаційний індекс **SAVI** – модифікація індексу *NDVI*, яка скоригована за ґрунтом. Це аналог *NDVI* з додаванням коефіцієнта яскравості ґрунту *L*, в якому використані довжини хвиль в області NIR та 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 параметра *L* призводить до зменшення впливу ґрунту з різним типом рослинного покриву та рекомендується (Jiang et al., 2008) для поліпшення

класифікації водно-болотних угідь за даними космоснімків. Цей індекс має значення від $-1,0$ до $1,0$.

NMDI (NIR, SWIR1, SWIR2) – A normalized multi-band drought index (Wang et al., 2007):

$$NMDI = \frac{R(870) - (R(1610) - R(2130))}{R(870) + (R(1610) - R(2130))}$$

Нормалізований багатоканальний індекс засухи. На основі спектральних характеристик ґрунту і рослинності пропонується нормалізований триканальний індекс посухи (**NMDI**) за трьома довжинами хвиль: одна в ближньому NIR-діапазоні з центром приблизно 860 нм, а дві інші – в SWIR-діапазоні з центрами 1640 та 2130 нм, відповідно. У статті (Ali et al., 2019) цей індекс рекомендується для прогнозних статистичних **моделей водно-болотних угідь** за даними космоснімків Sentinel-2.

Green NDVI (740, 560) (Normalized Difference Vegetation Index) зелений нормалізований різницевий вегетаційний індекс є модифікованою версією **NDVI**, яка більш чутлива до зміни вмісту хлорофілу в рослині. В цьому індексі використовуються зелений (замість червоного) і ближній інфрачервоний діапазони. Індекс виявився корисним для вимірювання фотосинтезу та моніторингу стресу рослин. Цей індекс дає змогу безпосередньо вимірювати частку зеленої рослинності з меншими помилками, порівняно з іншими індексами, що **використовується в екологічних моделях** (Gitelson et al., 1994).

SR (RED, NIR) – Simple Ratio Index (Dotzler et al., 2015):

$$SR2 = R(665)/R(840)$$

Простий індекс відношення (Simple Ratio) застосовується в побудовах **моделі вуглецевого потоку** для різних типів рослинного покриву і характеризує його стан. Індекси відношення мають більш контрастні значення, ніж інші BI, чутливі до LAI. Також індекс **SR** реагує на вологість. У роботі (Ling et al., 2017) в аналізі характеристик рослинних індексів за спектрами візуалізації осоки в умовах різної водності та для аналізу **впливу вологи** на спектральні значення використовуються BI рослинності в ближньому інфрачервоному діапазоні – **NDVI**, **EVI** та індекси відношення – **SR** (RED, NIR).

NDRE1 (740, 705) — Normalized Difference Red-Edge1 (Gitelson et al., 1994), **NDRE2** (780, 705) — Normalized Difference Red-Edge2 (Barnes et al., 2000):

$$NDRE1(740, 705) = \frac{R(740) - R(705)}{R(740) + R(705)},$$

$$NDRE2(780, 705) = \frac{R(780) - R(705)}{R(780) + R(705)}$$

Нормалізований індекс червоного краю **NDRE1** було запропоновано А. Gitelson і М. Merzlyak в 1994 р. Цей індекс дає змогу точніше оцінити кількість хлорофілу в рослинному покриві в зоні червоного краю. В роботі (Barnes et al., 2000) розширено зону використання індексу **NDRE** і визначено ширший діапазон значення довжин хвиль в червоному краї для свого індексу **NDRE2**, який було застосовано також для дослідження наявності хлорофілу. Автори праці (Clevers et al., 2017) визнали індекси

NDRE1 (740,705) та **NDRE2** (780,705) одними з кращих, які дають змогу оцінити вміст хлорофілу в рослинному покриві, що важливо при дослідженні фотосинтезу рослин і може бути застосовано в **екологічних моделях** (Gitelson et al., 1994).

WDRVI – Wide Dynamic Range Vegetation Index (Gitelson, 2004):

$$WRDVI = (\alpha R_{NIR} - R_{RED}) / (\alpha R_{NIR} + R_{RED})$$

WDRVI (Gitelson, 2004) поданий як рослинний індекс розширення динамічного діапазону **NDVI** за рахунок застосування вагового параметра α до коефіцієнта відбиття в ближній інфрачервоній області. Якщо $\alpha = 1$, то значення індексу **WDRVI** еквівалентне **NDVI**. Якщо $\alpha = (RED / NIR)$, то значення **WDRVI** дорівнює нулю. Зменшення відбиття в ближній інфрачервоній області може збільшити динамічний діапазон **WDRVI** порівняно з **NDVI**: $\alpha = 0,20$ дає збільшення динамічного діапазону більш ніж на 30 % (Gitelson, 2004). Значення коефіцієнта 0,20 для α є ефективним у разі відсутності атмосферної корекції.

У роботі (Jara et al., 2019) під час дослідження водно-болотних угідь шляхом порівняння зображень Landsat-8 та Sentinel-2 використовувався індекс **WDRVI** як рослинний індекс широкого динамічного діапазону разом зі спектральними індексами рослинності **NDVI**, **SAVI**, **EVI2** та **RED EDGE** (Gitelson et al., 2005). Відмічається, що значення цих BI, отриманих за даними супутника Sentinel-2, дають кращі результати **класифікації екосистеми водно-болотних угідь** із збереження таких угідь (Ling, 2017; Ali, 2019; Jara, 2019; Kaplan, 2019).

Green Mod, Red Mod:

$$GreenMod = \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Green}} \right) - 1,$$

$$RedMod = \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Rededge}} \right) - 1$$

Red edge Model, Green Model – це моделі (Gitelson et al., 2005) на основі індексів відношення за коефіцієнтами відбиття в спектральних діапазонах Green, Red Edge і NIR, наведених в Табл. 1. Для Sentinel-2 (Clevers, Kooistra et al., 2017) застосовують ці індекси відношення як **CI rededge** – Red edge chlorophyll index, **CI green** – Green chlorophyll index:

$$CI_{green} = \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Green}} \right) - 1, CI_{rededge} = \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Rededge}} \right) - 1$$

Індекс зеленого хлорофілу **CI green** та **CI rededge** лінійно залежать від оцінок вмісту хлорофілу в рослинному покриві. Індекс **CI rededge** чутливий до вологості в рослинному покриві (Clevers, Kooistra, Marnix, 2017). У роботі (Gitelson, 1996) обґрунтовано і подано індекс відношення в смузі NIR і смузі червоного краю для оцінювання вмісту хлорофілу, так званий індекс хлорофілу червоного краю **CI rededge**, а також запропоновано зелений індекс хлорофілу **CI green** в зеленій смузі (green) і в смузі NIR. Ці індекси сезонно фіксують зміни в моделях фотосинтезу і використовуються для побудови **моделей вуглецевого потоку** для різних типів рослинного покриву і рослинності.

DVI – Difference Vegetation Index (Perry et al., 1983):

$$DVI = R_{NIR} - R_{RED}$$

Індекс різниці (**DVI**) – найпростіший вегетаційний індекс. **DVI** чутливий до кількості рослинності, розрізняє ґрунт і рослинність, не реагує на різницю між відбиттям і освітленістю, викликаними атмосферою або тінню в методиках сегментації рослин. Індекс **DVI** було отримано шляхом віднімання коефіцієнта відбиття **RED** від коефіцієнта відбиття в ближній інфрачервоній області **NIR**. Він простіший за **NDVI**-індекс, однак дає більшу похибку у вимірюваннях. Діапазон цього індексу необмежений, він задається як різниця коефіцієнтів відбиття двох каналів **NIR** і **RED**. У роботі (Naji, 2018) цей **VI** використовується для визначення складу рослинного покриву в методиках сегментації рослин. Індекс **DVI**, поряд з іншими **VI**

(**NDVI**, **EVI**, **SR**), застосовується і в роботі (Ling et al., 2017) в аналізі характеристик **VI** для візуалізації осоки на заболочених землях за різних умов вологості.

Результати обробки вимірювань

Значення вегетаційних індексів, наведених у Табл. 1, та різниця концентрацій **CO₂** обчислені за вимірюваннями, які були отримані під час польових знімачів за шість виїздів (15.10.2020, 25.05.2021, 23.06.2021, 08.07.2021, 10.08.2021 та 16.09.2021) на тестовій ділянці з осокою побережною, подані в Табл. 2. Кожної дати виїзду проводились вимірювання на трьох точках на тестовій ділянці з осокою побережною.

Таблиця 2. Середні значення різниці концентрацій **CO₂** (Δ **CO₂**) та **VI** для шести виїздів на тестову ділянку в зоні полігона Вишеньки у 2020–2021 рр.

№ з/п	Вегетаційні індекси	Дата					
		15.10.2020	25.05.2021	23.06.2021	8.07.2021	10.08.2021	16.09.2021
	Δ CO₂	242,67	508	713,67	427	263	338,33
1	REP	719,63	725,2	723,68	722,07	722,13	722,45
2	MTCI	2,2485	4,1965	3,4894	3,0532	3,3494	3,1968
3	NDVI	0,7085	0,9315	0,879	0,8432	0,8812	0,876
4	NRDI	0,0726	0,1305	0,1142	0,0937	0,0956	0,098
5	EVI	0,5635	0,6822	0,7573	0,5362	0,8537	0,5821
6	EVI2	0,5178	0,6672	0,7094	0,5164	0,7878	0,5465
7	SAVI	0,5013	0,6263	0,6564	0,5080	0,7085	0,5386
8	NMDI	0,4949	0,6369	0,5592	0,5235	0,5343	0,5288
9	Gr NDVI	0,5882	0,7607	0,7344	0,7156	0,6478	0,7351
10	SR2	0,1757	0,4253	0,0845	0,0854	0,1874	0,0715
11	NDRE1	0,3758	0,6284	0,5469	0,5015	0,5412	0,5264
12	NDRE2	0,4355	0,6972	0,6209	0,5680	0,6039	0,5932
13	WDRVI	0,1132	0,6986	0,5145	0,4079	0,5264	0,4778
14	RedMod	1,8312	4,9264	3,8835	2,9195	3,4938	3,2909
15	GreenMod	4,7901	5,0626	6,4364	5,5387	4,107	6,1831
16	DVI	0,3172	0,3871	0,439	0,2843	0,535	0,302

Для кореляційного аналізу між значеннями різниці концентрацій **CO₂** і значеннями **VI** з Табл. 1 використовували середні значення різниці концентрацій **CO₂**, одержаних за даними фотосинтезу та листового дихання осоки побережною, і середніми значеннями **VI**, наведених у Табл. 2 для шести виїздів на тестові ділянки.

Значення коефіцієнтів кореляції між значеннями різниці концентрації **CO₂** та вегетаційними індексами з Табл. 2, які показані у Табл. 3. У Табл. 3 включено 12 з 16 вегетаційних індексів Табл. 1, для яких значення коефіцієнта кореляції зі значеннями різниці концентрацій **CO₂** $\geq 0,5$.

Кореляційні коефіцієнти обраховано за середніми значеннями (Табл. 2) для кожної дати, де число значень $n = 6$ із середньою похибкою коефіцієнтів кореляції 0,3. Дванадцять вегетаційних індексів, поданих у Табл. 3 для осоки побережною, мають кореляційні коефіцієнти зі значеннями різниці концентрацій **CO₂** $\geq 0,5$, решта п'ять мають коефіцієнт кореляції з різницею концентрацій **CO₂** $< 0,5$ і в Табл. 3 не включені.

Таблиця 3. Кореляційна залежність за Пірсоном вегетаційних індексів, рекомендованих для картування приболотної зони ветландів, зі значеннями різниці концентрацій **CO₂** для осоки побережною в зоні полігона Вишеньки (шість виїздів у 2020–2021 рр.)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
VI	GrNDVI	NRDI	REP	GrMOD	RedMOD	NDVI	MTCI	NDRE1	NDRE2	NMDI	NDWI	WDRVI_{git}
Коефіцієнт кореляції з CO₂	0,70	0,72	0,70	0,67	0,60	0,51	0,57	0,53	0,57	0,55	0,54	0,50

Веgetативні індекси **REP**, **Green NDVI**, **NRDI**, **Green MOD** і **Red MOD** більше реагують на наявність різниці концентрацій **CO₂** залежно від листового фотосинтезу та листового дихання осоки побережною і мають досить високу корелятивну залежність з коефіцієнтами кореляції від 0,60 до 0,72.

Ці індекси можна рекомендувати для використання в побудовах моделей вуглецевого потоку для

рослинного покриву приболотних територій, де переважає осока побережна (*Carex riparia*).

Знімання з БПЛА та супутника Sentinel-2

Знімання з БПЛА та супутника Sentinel-2 виконувалась з 9:00 до 13:00 в сонячну погоду та було проведено з газоаналізатором Qubit System 151S на тестових ділянках Бортницької станції аерації в зоні полігона Вишеньки (Лялько та ін., 2015, 2019, 2020; Жолобак та ін., 2020). Було розраховано ВІ за матеріалами, одержаними з БПЛА DJI P4 Multispectral та Sentinel-2 від 10 травня 2021 р. (Рис. 1). DJI Phantom 4 Multispectral реєструє спектр у таких довжинах, Синій (B): 450 нм ± 16 нм; Зелений (G): 560 нм ± 16 нм; Червоний (R): 650 нм ± 16 нм; Червоний край (RE): 730 нм ± 16 нм; Близьке інфрачервоне (NIR): 840 нм ± 26 нм і видимий діапазон для звичайних RGB зображень. (<https://www.dji.com/p4-multispectral>).



Рис. 1. Знімання з БПЛА DJI P4 Multispectral, загальний вигляд тестової ділянки, 25 05 2021 р.

За допомогою БПЛА DJI P4 Multispectral на тестовій ділянці 25.05.2021 р. створено ортофотоплани із залученням ВІ його каналів (Рис. 2).

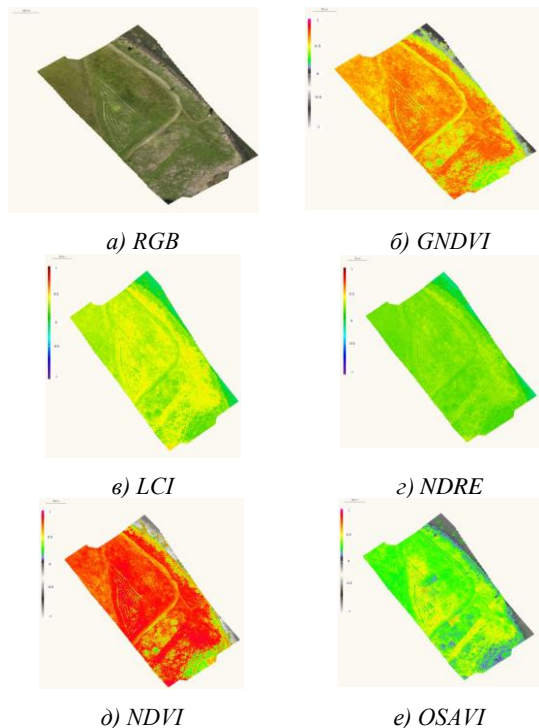


Рис. 2. Побудова ортофотопланів ділянки дослідження за різними каналами від 25.05.2021 р.: а) видимий діапазон – RGB, б) GreenNDVI, в) LCI (ВІ характеризує вміст хлорофілу в рослинному покриві), г) NDRE, д) NDVI, е) OSAVI (оптимізований ВІ з поправкою на ґрунт)

Температурне знімання з БПЛА

За допомогою БПЛА Parrot Bebop Pro Thermal на тестовій ділянці 25.05.2021 р. визначено температуру рослинних угруповань (Рис. 3). На БПЛА встановлено теплову камеру з розрізненістю 160x120 пікселів, розмір кожного пікселя 12 мкм, спектральний діапазон 8–14 мкм. (https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/bd_bebop-pro-thermal_products_sheet_a4_en_2017-11-28.pdf).

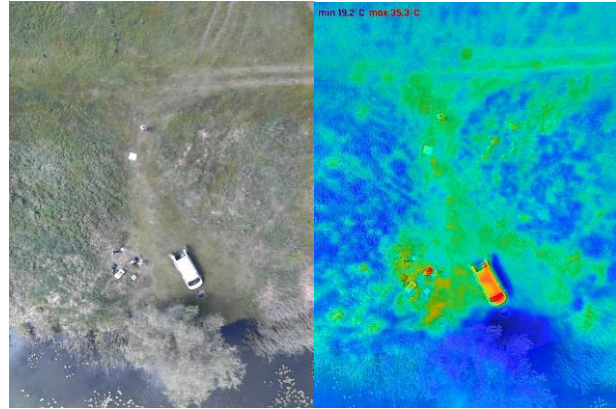


Рис. 3. Температура рослинних угруповань, визначена за допомогою БПЛА Parrot Bebop Pro Thermal, на тестовій ділянці – видимий та тепловий знімки (25.05.2021 р.)

Вегетаційні індекси, одержані із зображення з Sentinel-2

Було обчислено 5 рекомендованих ВІ за даними наземних спостережень для супутника Sentinel-2 від 10 травня 2021 р. (знімок S2B_MSIL2A_20210510T090549_N0300_R050_T36UUA_20210510T115615).

При картуванні приболотної зони водно-болотних угідь із значеннями концентрації CO₂ для осоки побережної в зоні полігона Вишеньки червоним прямокутником зазначена ділянка, для якої зроблено ортофотоплани з використанням БПЛА DJI P4 Multispectral.

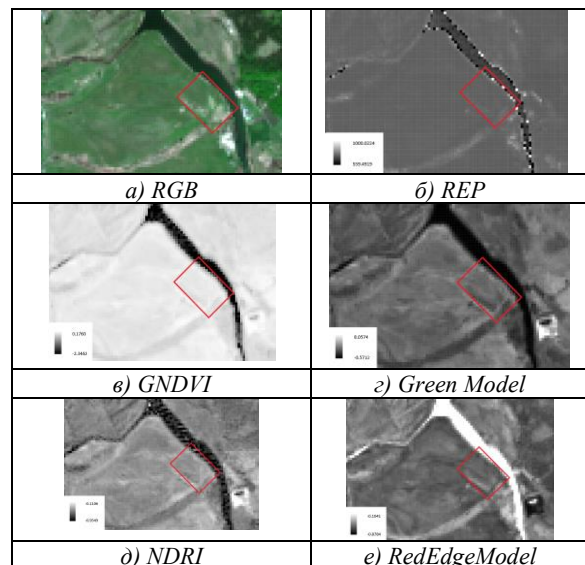


Рис. 4. Вегетаційні індекси із зображення з Sentinel-2 за (10 травня 2021 р.): а) RGB, б) REP, в) GNDVI, г) Green Model, д) NDRI, е) RedEdgeModel

Матеріали, отримані з БПЛА DJI P4 Multispectral, Parrot Bebop Pro Thermal та супутника Sentinel-2 10 травня 2021 р зібрані з даними, що одержані спектродіаметром FieldSpec®3 FR та наземними вимірюваннями вуглецевого потоку для рослинного покриву 25 травня 2021 р., що видно при визначенні BI *GreenNDVI*, *NDVI* (Рис. 2) та його значеннями з Табл. 2.

Висновки

На підставі опрацьованих матеріалів спектрогазо-метричного наземного вимірювання за 2020–2021 рр. та даних космознімків БПЛА і супутника Sentinel-2 можна стверджувати наступне. Вегетаційні індекси

REP (Red Edge Position), *Green NDVI* (Green Normalized Difference Vegetation Index), *NRDI* (Normalized Difference Vegetation Index), *Green MOD* (Green Model) і *Red MOD* (Red edge Model) більше реагують на наявність різниці концентрацій CO₂ залежно від листового фотосинтезу та листового дихання осоки побережної. Мають досить високу корелятивну залежність з різницею концентрації CO₂ з коефіцієнтами кореляції за Пірсоном від 0,60 до 0,72.

Визначені індекси фіксують зміни в процесах фотосинтезу та дихання і їх можна рекомендувати для побудови моделей вуглецевого потоку для рослинного покриву.

Література

- Bush, J. (2001). Characteristic values of key ecophysiological parameters in the genus *Carex*. *Flora*, 196, 405–430. [https://doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)30084-1](https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)30084-1).
- Carlsson, B. A., Callaghan, T. V. (1994). Impact of climate factors on the clonal sedge. *Carex bigelowii*: Implications for population growth and vegetative spread. *Ecography*, 17, 321–330.
- Horler, D. N. H., Dockray, M., Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 4(2), 273–288.
- 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.
- Dash, J., Curran, P. J. (2004). The MERIS Terrestrial Chlorophyll Index. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 5003–5013. <https://doi.org/10.1080/0143116042000274015>.
- Harris, A., Dash, J. (2011). A new approach for estimating northern peatland gross primary productivity using a satellite-sensor-derived chlorophyll index. *Journal of Geophysical Research*, 116, G04002. <https://doi.org/10.1029/2011JG001662>.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, Greenbelt, 10–14 December. SP-351, 309–317.
- Yu, K., Anderegg, J., Mikaberidze, A., Karisto, P. et al. (2018). Hyperspectral Canopy Sensing of Wheat Septoria Tritici Blotch Disease. *Frontiers in Plant Sci.*, 17 August. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01195>.
- Mahdianpari, M. et al. (2019). The First Wetland Inventory Map of Newfoundland at a Spatial Resolution of 10 m Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data on the Google Earth Engine Cloud Computing Platform. *Remote Sens.*, 11, 43. doi:10.3390/rs11010043.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 83(1-2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- Ling, C. et al. (2017). A Study on Spectral Signature Analysis of Wetland Vegetation Based on Ground Imaging Spectrum Data. *Journal of Physics: Conf. Series*, 910. doi:10.1088/1742-6596/9.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25, No. 3., 295–309.
- Wang, L., Qu, J. J. (2007). NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L20405. doi:10.1029/2007GL031021.
- Ali, A. M. et al. (2019). Validating the Predictive Power of Statistical Models in Retrieving Leaf Dry Matter Content of a Coastal Wetland from a Sentinel-2 Image. *Remote Sens.*, 11, 1936. doi:10.3390/rs11161936.
- Gitelson, A., Merzlyak, M. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.*, 22, 247–252.
- 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 Sensing*, 7, 14227–14258. doi:10.3390/rs71014227.
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J. et al. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. *Proc. of the Fifth Int. Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, MN, USA.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, iss. 7, 1425–1432.
- Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, iss. 14, 3025–3033.
- Kaplan, G., Avdan, Z. Y., Avdan, U. (2019). Mapping and Monitoring Wetland Dynamics Using Thermal, Optical, and SAR Remote Sensing Data. *Wetland Management*. doi: 10.5772/intechopen.80264.
- Gitelson, A. A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *J. Plant Physiol.*, 161(2), 165–173. doi: 10.1078/0176-1617-0117.
- Jara, C., Delegido, J., Ayala, J., Lozano, P., Armas, A., Flores, V. (2019). Study of wetlands in the Ecuadorian Andes through the comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 images. *Revista de Teledeteccion*, 53, 45–57. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11715>.
- Gitelson, A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D., (2005). Arkebauer T. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geoph. Res. Lett.*, 32(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>.

- Perry, C. R., JR., Lautenschlager, L. E. F., (1983). Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices. *U.S. D. A./S.R.S. Johnson Space Center SC2*, Houston, Texas.
- Naji, T. A. H. (2018). Study of vegetation cover distribution using DVI, PVI, WDI indices with 2D-space plot. *Journal of Physics: Conf. Series* 1003. 012083. doi:10.1088/1742-6596/1003/1/012083.
- Лялько, В. І., Халаїм, О. О., Сахацький, О. І., Жолобак, Г. М., Ваколюк, М. В., Дугін, С. С. (2015). Експериментальне визначення стоку (абсорбції рослинами CO₂) для основних агрокультур України. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 4, 46–74. <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/38>.
- Лялько, В. І., Дугін, С. С., Сибірцева, О. М., Голубов, С. І., Дорофей, Є. М. (2019). Верифікація результатів обробки спектральних даних супутника Sentinel-2A, наземного спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR і системи реєстрації мінливості параметрів середовища ДІІ STS-VIS. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 21, 29–39. <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/147/170>.
- Лялько, В. І., Жолобак, Г. М., Дугін, С. С., Сибірцева, О. М., Голубов, С. І., Дорофей, Є. М., Поліщук, О. В. (2020). Експериментальні дослідження особливостей кругообігу вуглецю в системі “атмосфера–рослинність” на території водно-болотних угідь лісостепової зони України із залученням дистанційних спектро- та газометричних зйомок за сучасних кліматичних змін. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 24, 15–23. <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/166/187>.
- Жолобак, Г. М., Дугін, С. С., Сибірцева, О. М., Казанцев, Т. А., Романчук, І. Ф. (2020). Визначення вмісту азоту і хлорофілу в рослинах озимої пшениці двох сортів за даними наземного і повітряного спектрометрування. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 26, 4–13. <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/178/193>.
- Лялько, В. І., Жолобак, Г. М., Дугін, С. С., Сибірцева, О. М., Дорофей, Є. М. (2021). Виявлення вегетаційних індексів – раціональних спектральних індикаторів стану рослинності в умовах лабораторного дослідю. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 8(2), 12–20. <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/193/211>.
- with ERTS. *Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, Greenbelt, 10–14 December. SP-351, 309–317.
- Yu, K., Anderegg, J., Mikaberidze, A., Karisto, P. et al. (2018). Hyperspectral Canopy Sensing of Wheat Septoria Tritici Blotch Disease. *Frontiers in Plant Sci.*, 17 August. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01195>.
- Mahdianpari, M. et al. (2019). The First Wetland Inventory Map of Newfoundland at a Spatial Resolution of 10 m Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data on the Google Earth Engine Cloud Computing Platform. *Remote Sens.*, 11, 43. doi:10.3390/rs11010043.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 83(1-2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- Ling, C. et al. (2017). A Study on Spectral Signature Analysis of Wetland Vegetation Based on Ground Imaging Spectrum Data. *Journal of Physics: Conf. Series*, 910. doi:10.1088/1742-6596/9.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25, No. 3., 295–309.
- Wang, L., Qu, J. J. (2007). NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophys. Res. Lett.*, 34. L20405. doi:10.1029/2007GL031021.
- Ali, A. M. et al. (2019). Validating the Predictive Power of Statistical Models in Retrieving Leaf Dry Matter Content of a Coastal Wetland from a Sentinel-2 Image. *Remote Sens.*, 11, 1936. doi:10.3390/rs11161936.
- Gitelson, A., Merzlyak, M. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.*, 22, 247–252.
- 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 Sensing*, 7, 14227–14258. doi:10.3390/rs71014227.
- Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J. et al. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. *Proc. of the Fifth Int. Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, MN, USA.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17, iss. 7, 1425–1432.
- Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, iss. 14, 3025–3033.
- Kaplan, G., Avdan, Z. Y., Avdan, U. (2019). Mapping and Monitoring Wetland Dynamics Using Thermal, Optical, and SAR Remote Sensing Data. *Wetland Management*. doi: 10.5772/intechopen.80264.
- Gitelson, A. A. (2004). Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *J. Plant Physiol.*, 161(2), 165–173. doi: 10.1078/0176-1617-0117.
- Jara, C., Delegido, J., Ayala, J., Lozano, P., Armas, A., Flores, V. (2019). Study of wetlands in the Ecuadorian Andes through the comparison of Landsat-8 and Sentinel-2

- images. *Revista de Teledeteccion*, 53, 45–57. doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2019.11715>.
- Gitelson, A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D., (2005). Arkebauer T. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geoph. Res. Lett.*, 32(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>.
- Perry, C. R., JR., Lautenschlager, L. E. F., (1983). Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices. *U.S. D. A./S.R.S. Johnson Space Center SC2*, Houston, Texas.
- Naji, T. A. H. (2018). Study of vegetation cover distribution using DVI, PVI, WdVI indices with 2D-space plot. *Journal of Physics: Conf. Series* 1003. 012083. doi:10.1088/1742-6596/1003/1/012083.
- Lyalko, V. I., Khalaim, O. O., Zholobak, G. M., Vakoliuk, M. V., Dugin, S. S. (2015). Experimental measurement of carbon sink (CO₂ absorption by plants) for the main agricultural crops of Ukraine. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 4, 46–74. <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/38>.
- Dugin, S. S., Sybirtseva, O. M., Golubov, S. I., Dorofey, Ye. M. (2019). Verification of multispectral data processing for the Sentinel-2A bands, Field ASD FieldSpec@3FR and UAV with the DJI STS-VIS. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 21, 29–39. <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/147/170>.
- Lyalko, V. I., Zholobak, G. M., Dugin, S. S., Sybirtseva, O. M., Golubov, S. I., Dorofey, Ye. M. (2020). Experimental research of the carbon circle features in “atmosphere – vegetation” system over the wetland area within the forest-steppe zone in Ukraine using the remote spectro- and gasometry surveys under the global climate changes. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 24, 15–23. <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/166/187>.
- Zholobak, G. M., Dugin, S. S., Sybirtseva, O. M., Kazantsev, T. A., Romanchuk, I. F. (2020). Determination of nitrogen and chlorophyll content in two varieties of winter wheat plants by means of ground and airborne spectrometry. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 26, 4–13. <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/166/187>.
- Lyalko, V. I., Zholobak, G. M., Dugin, S. S., Sybirtseva, O. M., Dorofey, Ye. M. (2021). Identifying vegetation indices as the rational spectral indicators of vegetation state under conditions of laboratory experiment. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 12–20. <http://www.ujrs.org.ua/ujrs/article/view/193/211>.

GAS EXCHANGE FOR THE PLANTS ON THE EXAMPLE OF COASTAL SEDGE AND COMPARISON WITH THE MATERIALS OF SPECTRO-GASOMETRIC GROUND-BASED MEASUREMENTS FROM THE UAV AND THE SENTINEL-2 SATELLITE

V. I. Lyalko, S. S. Dugin, O. M. Sybirtseva, Ye. M. Dorofey, S. I. Golubov, G. M. Zholobak

State Institution Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of IGS of NAS of Ukraine, 55-B, O. Gonchar st., Kyiv 01054, Ukraine

Spectrogasometric ground-based measurements were carried out during 2020–2021. It was determined that five vegetation indices – REP (Red Edge Position), Green NRD (Green Normalized Difference Vegetation Index), NRD (Normalized Difference Vegetation Index), Green MOD (Green Model) and Red MOD (Red edge Model) are more responsive to the presence of CO₂ concentration depending on leaf photosynthesis and leaf respiration of the coastal sedge (*Carex riparia*) with high correlation under Pearson from 0.60 to 0.72. Certain vegetation indices capture changes in CO₂ concentration and can be recommended for use in carbon flux models for vegetation canopy. Data from DJI P4 Multispectral UAV, Parrot Bebop Pro Thermal and Sentinel-2 satellite compared to ground measurements on May 25, 2021.

Key words: spectral and gasometric surveys, vegetation indices, correlation of ground and remote measurements, *Carex riparia*, CO₂ concentration, UAV.

Рукопис статті отримано 14.12.2022