



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.2.193>

УДК 528.8.04:551.4

## Виявлення вегетаційних індексів – раціональних спектральних індикаторів стану рослинності в умовах лабораторного досліджу

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

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

Для класів рослинності, що вкривають земну поверхню порівняно незначної площі і досліджуються наземними приладами дистанційного зондування, потрібно підібрати адекватні спектральні індикатори, які б швидко й ефективно реагували на мінливі умови навколишнього середовища, викликані дією різноманітних стресових факторів. Такими індикаторами можуть слугувати вегетаційні індекси (ВІ), обчислені на підставі математичних операцій із коефіцієнтами відбиття різних спектральних діапазонів, отриманими із застосуванням наземних приладів дистанційного зондування – спектрорадіометрів. Застосування ВІ дає змогу ідентифікувати такі зміни стану рослинності, які часто непомітні при візуальному спостереженні.

Для підбору таких ВІ проведений лабораторний дослід з культивування твердої ярої пшениці сорту Діана з різною підвищеною нормою висіву насіння, щоб по-перше, забезпечити швидке 100 % проєктивне покриття, а по-друге, створити стресові умови для рослин. Протягом досліджу проводили газо- та спектрометричні дослідження постійно зростаючого фітоматеріалу, коли практично одночасно виконували вимірювання інтенсивності поглинання та виділення CO<sub>2</sub> рослинами в процесах фотосинтезу/дихання та їх спектрометрування для подальшого обчислення ВІ.

Виявлено три ВІ – MTCI, Clrededge та Clgreen, які найбільш чутливі до змін стану рослинності, і тому можуть слугувати адекватними спектральними індикаторами її становища. Це вкрай необхідне для створення методики оцінювання показників циклу вуглецю різними екосистемами за даними супутникового спостереження та польових вимірювань, уточнення оцінювання кліматичних впливів на регіональному та локальному рівнях, а також індикаторів сталого розвитку IAEG-SDGs.

**Ключові слова:** вегетаційні індекси; тверда яра пшениця; спектро- та газометричні вимірювання; супутникові дані; цикл вуглецю; кліматичні впливи; сталий розвиток.

© В.І. Лялько, Г.М. Жолобак, С.С. Дугін, О.М. Сибірцева, Є.М. Дорофей 2021

### Вступ

Міжсекторальна агенція та експертна група по індикаторах цілей сталого розвитку (Inter-agency and Expert Group on SDG Indicators, IAEG-SDGs) розробила та впровадила Глобальне середовище індикаторів для вимірювання прогресу у досягненні цілей сталого розвитку (ЦСР). Це середовище, яке налічує 242 індикатори, було затверджене на 48-й сесії Статистичної комісії ООН у березні 2017 р. (<https://unstats.un.org/sdgs/iaeg-sdgs/>). На сайті Державної служби статистики України вже опубліковано два Моніторингові звіти (за 2019 та 2020 рр.) щодо прогресу України в досягненні ЦСР відповідно до доручення прем'єр-міністра України на виконання Указу Президента України від 30.09.2019 № 722/2019 р. “Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 р.” ([https://ukrstat.org/uk/csr\\_present/ukr/st\\_rozv/publ/publ.htm](https://ukrstat.org/uk/csr_present/ukr/st_rozv/publ/publ.htm)).

Національна система ЦСР містить 183 показники для моніторингу їх стану. Звертає на себе увагу той факт, що для досягнення цілі 13 “Пом'якшення наслідків зміни клімату” відібрано лише один показник – 13.1.1. Обсяг викидів парникових газів, % до рівня 1990 р., який кореспондується з індикатором із Глобального середовища за номером 13.2.2. Загальні викиди парникових газів на рік. Для коректного оцінювання цього показника доречно підібрати низку інших індикаторів, які могли б якісно й оперативніше засвідчувати зміни екологічного стану, зумовлені різноманітними стресовими чинниками, в тому числі змінами концентрації парникових газів у атмосфері.

З метою розробки і впровадження рекомендацій з мінімізації негативного впливу кліматичних змін на сталий розвиток довкілля та соціоекономічних процесів важливо вчасно отримувати достовірну інформацію про плинні умови навколишнього середовища та ефективно оперувати цією інформацією. Дистанційне зондування як досконалий неструктурний спосіб дослідження наземного покриву, неодноразово доводило свою перевагу в постачанні потрібних даних для виявлення змін стану лісів (Zhang et al., 2020), класифікації земельного покриття (Du, 2019) та ін. З детальним оглядом супутникових датчиків дистанційного зондування, зокрема, оптичних, радіолокаційних, лазерного сканування, тепловізорів, можна ознайомитись в статті (Zhu L. et al., 2018). Наземні прилади дистанційного зондування – спектрорадіометри – застосовуються для визначення вмісту хлорофілу в рослинах, оцінки стресів, завданих різними чинниками, зокрема, забур'яненістю, дією важких металів, засоленням ґрунтів тощо. Як правило, для цього на основі даних спектрорадіометра розраховують вегетаційні індекси (ВІ) – показники, які обчислюють на підставі математичних операцій із коефіцієнтами відбиття в різних спектральних діапазонах (Бардиш, Бурштинська, 2014).

Застосування ВІ дає змогу ідентифікувати такі зміни стану рослинності, які часто непомітні при візуальному спостереженні. Наприклад, нами продемонстровано, що час фіксації інверсії стану двох агрофітоценозів, викликаних ускладненою фітопатологічною ситуацією на одному з них, залежить від довжини хвилі, обраної для розрахунку індексу: найраніше (12 березня 2016 р.) він уловлювався NDVI (842, 665), а NDVI (740, 665) та GreenNDVI (740, 560) засвідчили цей факт майже на

\* E-mail: [Lyalko@nas.gov.ua](mailto:Lyalko@nas.gov.ua) <https://orcid.org/0000-0002-7552-5915>

2,5 тижні пізніше (28 та 31 березня 2016 р.). Під час наземних польових досліджень ураження рослин одного з посівів грибними фітопатогенами було виявлене аж 10 травня 2016 р. (Жолобак, Сибірцева, Ваколюк, Захарчук, 2017). Зазначені індекси раціонально спрацювали для рослинності (озимої пшениці), що зростала на великих площах розміром кілька десятків гектарів, і були обчислені із застосуванням космічних знімків із супутника Sentinel-2A. Проте для класів рослинності, що вкривають земну поверхню меншого розміру і досліджуються наземними приладами дистанційного зондування, відповідно, потрібен пошук інших VI. Тому, в цьому випадку важливо підібрати такі VI, які б адекватно й ефективно реагували на мінливі умови навколишнього середовища для менших площ рослинного покриву або для рослинності, вирощеної в лабораторних умовах. Для цього нами був закладений лабораторний дослід з культивування твердої ярої пшениці сорту Діана з різною нормою висіву насіння, щоб у такий спосіб, по-перше, забезпечити швидке 100 % проективне покриття, а по-друге, створити стресові умови для рослин. Під час дослідів проводили газо- та спектрометричні дослідження постійно зростаючого фітоматеріалу, коли практично одночасно виконували вимірювання інтенсивності поглинання та виділення  $\text{CO}_2$  рослинами в процесах фотосинтезу/дихання та їх спектрометрування для подальшого обчислення VI.

Метою статті є висвітлення результатів лабораторного дослідів під час якого на вирощеному рослинному матеріалі твердої ярої пшениці сорту Діана *in situ* виконувались газо- та спектрометричні дослідження для пошуку найбільш раціональних і адекватних спектральних індикаторів стану рослинності в стресових умовах, спричинених відчутним загущенням посівів.

### Матеріали і методи досліджень

Посів зерна ярої пшениці сорту Діана було зроблено 05 лютого 2020 р. у двох ємностях внутрішнім розміром 50x50x6 см, з екструдованого пінополістиролу завтовшки 2 см. У кожен ємність було внесено по 6 кг універсального ґрунту для вирощування рослин. В одну ємність засіяли насіння пшениці в кількості 125 г на 0,25 м<sup>2</sup>, а в другу вдвічі більше – 250 г на 0,25 м<sup>2</sup> (Рис. 1).

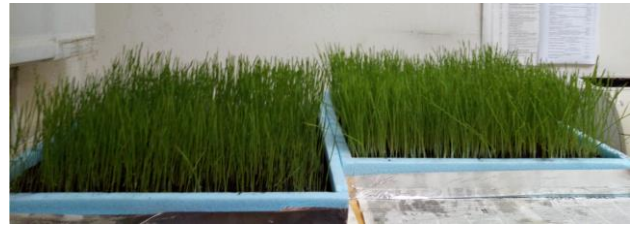


**Рис. 1.** Дві ємності з насінням твердої ярої пшениці сорту Діана: зліва – норма висіву 125 г на 0,25 м<sup>2</sup>, справа – висіяна вдвічі більша кількість зерна – 250 г на 0,25 м<sup>2</sup> (05 лютого 2020р.)

Вологість ґрунту підтримували на рівні 60 % повної вологості, поливаючи відстояною водопровідною

водою спочатку насіння, а після проростання – сформовані проростки і згодом рослини ярої пшениці.

Через два тижні після посіву станом на 19 лютого 2020 р. довжина листків рослин досягла 15–20 см, проективне покриття сягнуло 100 % (Рис. 2). Це дало змогу проводити з отриманим рослинним покривом спектро- та газометричні вимірювання.



А



Б

**Рис. 2.** Рослинний покрив твердої ярої пшениці сорту Діана через 2 тижні після посіву (19 лютого 2020 р.). Зліва – норма висіву 125 г на 0,25 м<sup>2</sup>, справа – висіяна вдвічі більша кількість зерна – 250 г на 0,25 м<sup>2</sup>. А – вигляд збоку, Б – вигляд згори

Для нормального функціонування фотосинтетичного апарату загущених посівів з 20 лютого 2020 р. впродовж 5 годин на день проводили підсвічування їх світлодіодними світильниками T8-2835-0.6FS R:B = 4:2 8W (далі – фітосвітильниками), які містили по чотири джерела червоного світла з довжиною хвилі 660 нм та два джерела синього з довжиною хвилі 445 нм (загальна кількість діодів – 48) (Рис. 3).



**Рис. 3.** Елемент світлодіодного світильника T8-2835-0.6FS R:B = 4:2 8W, який було використано у лабораторному досліді

Спектри відбиття рослинного покриву одержували за допомогою спектродіаметра FieldSpec® 3FR (США). Газометричні вимірювання виконували із залученням апаратури реєстрації вмісту  $\text{CO}_2$  в повітрі  $\text{CO}_2$  Qubit Systems s151 (Рис. 4). Ця система передбачає пропускання повітря з визначеною швидкістю через респіраційну камеру, в якій знаходяться досліджувані рослини. Зміну концентрації  $\text{CO}_2$  в цій камері вимірюють за певний проміжок часу інфрачервоним газоаналізатором.

Такі вимірювання проводили впродовж трьох тижнів, зокрема, 19 та 24 лютого і 03 та 11 березня 2020 р.



**Рис. 4.** Проведення газометричних вимірювань рослинного покриву твердої ярої пшениці сорту Діана за допомогою приладу Qubit Systems s151

Через місяць після посіву рослини в обох смонях вилягли за рахунок недотримання мінімально необхідного розосередження насіння та почали втрачати хлорофіл, візуально жовкнути (Рис. 5). Тому після 11 березня 2020 р. їх подальше культивування було припинене.



**Рис. 5.** Рослинний покрив твердої ярої пшениці сорту Діана через місяць після посіву (06 березня 2020 р.). Зліва – норма висіву 125 г на 0,25 м<sup>2</sup>, справа – висіяна вдвічі більша кількість зерна – 250 г на 0,25 м<sup>2</sup>

Перед газометричними вимірюваннями здійснювали спектрометрування рослинного покриву в обох смонях спектродіометром FieldSpec® 3FR (США). На підставі отриманих даних обчислювали ВІ за формулами, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1

**Веgetаційні індекси, використані в роботі**

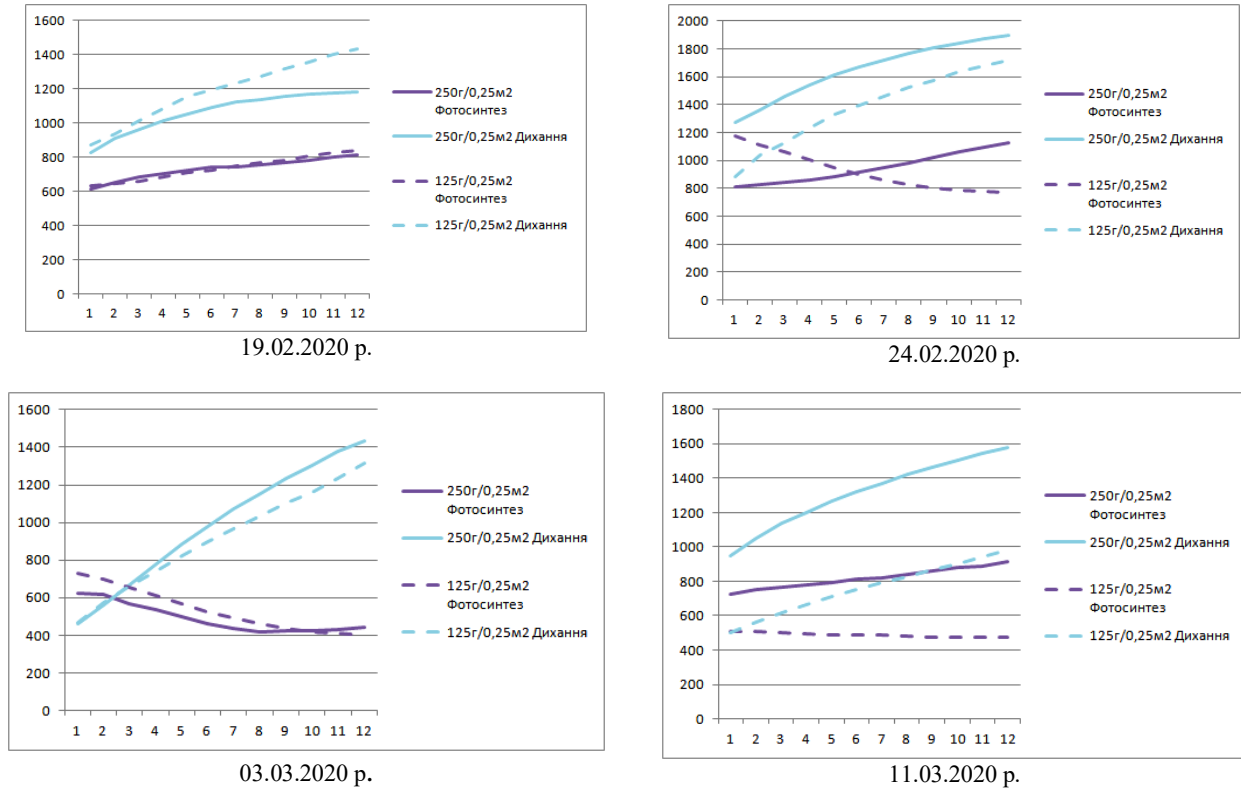
№	Веgetаційний індекс	Формула	Посилання
2	MTCI MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	$MTCI = \frac{R(740) - R(705)}{R(705) - R(665)}$	Dash, Curran, 2004
3	NDRE1(740,705) Normalized Difference Red-Edge1	$NDVI(740,705) = \frac{R(740) - R(705)}{R(740) + R(705)}$	Gitelson, Merzlyak, 1994
4	NDRE2(780,705) Normalized Difference Red-Edge2	$NDVI(783,705) = \frac{R(780) - R(705)}{R(780) + R(705)}$	Barnes et al., 2000
5	CI green Green chlorophyll index	$CI_{green} = \left( \frac{R(783)}{R(560)} \right) - 1$	Gitelson et al., 2006
6	CI reledge red edge chlorophyll index	$CI_{reledge} = \left( \frac{R(783)}{R(705)} \right) - 1$	Gitelson et al., 2006
7	NDVI1 (783, 665) Normalized Difference Vegetation Index1	$NDVI(783,665) = \frac{R(783) - R(665)}{R(783) + R(665)}$	Rouse et al., 1973
8	NDVI2 (783, 740) Normalized Difference Vegetation Index2	$NDVI(783,740) = \frac{R(783) - R(740)}{R(783) + R(740)}$	Rouse et al., 1973
9	Green NDVI(740,560) Green Normalized Difference Vegetation Index	$GreenNDVI = \frac{R(740) - R(560)}{R(740) + R(560)}$	Gitelson et al., 1996
10	SAVI(842,665) Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L)$	Huete, 1988
11	EVI2(840,665) Enhanced Vegetation Index	$EVI2 = \frac{2.5 * (NIR - RED)}{(NIR + 2.4 * RED + 1)}$	Jiang et al., 2008
12	PSRI Plant Senescence reflectance Index	$PRSI = \frac{R(665) - R(490)}{R(740)}$	Merzlyak, Gitelson et al., 1999
13	ZM Simple Ratio index	$ZM = \frac{R(740)}{R(705)}$	Zarco-Tejada et al., 2001
14	SR Simple Ratio index	$SR = \frac{RED}{NIR}$	Dotzler et al., 2015
15	IRECI Inverted Red-Edge Chlorophyll Index	$IRECI = \frac{NIR - RED}{(RE1 / RE2)} = \frac{R(783) - R(665)}{R(705) / R(740)}$	Frampton et al., 2013
16	NDVI (800, 660) Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI(800,660) = \frac{R(800) - R(660)}{R(800) + R(660)}$	Rouse et al., 1973

## Аналіз отриманих результатів

### Газометричні дослідження

Під час проведення газометричних досліджень вимірювали концентрацію  $\text{CO}_2$  в замкненій системі для твердої ярої пшениці з двома варіантами густоти стояння рослин (норма висіву 125 г та 250 г на  $0,25 \text{ м}^2$ ). При

встановленні камери на сміть вирощування всередину камери потрапляли рослини, які завдяки прозорості камери мали змогу продовжувати фотосинтезувати. Для вимірювання дихання рослин камеру накривали непрозорою тканиною для припинення асиміляції  $\text{CO}_2$ . Тривалість вимірювання кожного варіанта становила 1 год. Показники концентрації  $\text{CO}_2$  записували кожні 5 хв. з дисплея прилада. Отримані результати зображені на Рис. 6.



**Рис. 6.** Графіки зміни концентрації  $\text{CO}_2$  (ppm) в повітрі всередині куба з рослинним покривом твердої ярої пшениці сорту Діана для характеристики його фотосинтезу та дихання залежно від норми висіву насіння. По осі ординат – концентрація  $\text{CO}_2$  (ppm), по осі абсцис – порядковий номер вимірювання (тривалість між двома послідовними вимірюваннями становила 5 хв.)

Наведені графіки демонструють очікувану суттєву різницю між протилежними за своєю природою процесами фотосинтезу і дихання рослинного покриву. Зокрема, для всіх чотирьох дат впродовж вимірювання інтенсивності дихання спостерігається приріст концентрації  $\text{CO}_2$  (ppm) в повітрі під кубом між початковою і кінцевою точками зняття показників для обох варіантів загущеного посіву. Наймолодші за віком двотижневі рослини з нормою висіву 125 г на  $0,25 \text{ м}^2$  дихають інтенсивніше у порівнянні з вдвічі загущеним посівом, про що свідчить приріст вмісту вуглекислого газу під кубом за час проведення вимірювань, який у них у 1,57 раза переважає відповідний показник рослин з нормою висіву 250 г на  $0,25 \text{ м}^2$  (а саме, 559 ppm проти 357 ppm). Під час старіння рослинного покриву співвідношення між варіантами поступово змінюється. Через 5 днів після першого вимірювання вдвічі загущений рослинний покрив має вищі значення вмісту  $\text{CO}_2$  в повітрі під кубом, але приріст концентрації  $\text{CO}_2$  впродовж години зняття показників більший у 1,3 раза для посіву з нормою висіву 125 г на  $0,25 \text{ м}^2$  і становить 830 ppm проти 627 ppm для вдвічі загущеного посіву. Через два тижні після першого вимірювання, навпаки, вже інтенсивніше акумулює вуглекислий газ під кубом більш загущений рослинний покрив, проте відмінності між варіантами на цю дату порівняно незначні, зокрема 972 ppm проти 850 ppm для менш загущеного посіву. І на останню дату вимірювань, коли рослини вже п'ять тижнів вирощувались в лабораторних умовах, більш загущений

посів має як вищі значення вмісту  $\text{CO}_2$  в повітрі під кубом, так і інтенсивніше нагромаджує вуглекислий газ за період зняття показників. Це вказує на те, що в більш загущеному посіві під час його старіння процеси дисиміляції, розпаду органічних речовин проходять інтенсивніше у порівнянні з менш загущеним посівом.

Під час фотосинтезу, як відомо, відбувається поглинання рослинами вуглекислого газу з повітря. Тобто, під час реєстрації значень концентрації  $\text{CO}_2$  в повітрі під кубом між початковою і кінцевою точками зняття показників для фотосинтетичного процесу очікувані є зниження вмісту вуглекислого газу. Проте наймолодші за віком двотижневі рослини, навпаки, демонструють його приріст. Причому цей приріст є меншим, ніж той, що властивий диханню цих рослин, і становить близько 200 ppm для обох варіантів загущеного посіву. Цей факт вказує, що в лабораторних умовах рослини, вирощені при освітленні лише люмінесцентними лампами, впродовж порівняно короткого зимового дня і до того ж за умов загущених посівів не здатні здійснювати процеси фотосинтезу на рівні, який забезпечував би належний приріст вегетативної маси. Тобто процес дихання в таких рослин за своєю інтенсивністю переважав процес фотосинтезу. Тому було прийняте рішення про додаткове підсвічування посівів фітосвітільниками з джерелами світла червоної та синьої ділянок спектра впродовж 5 годин на день. Таке підсвічування стимулює синтез

хлорофілу в листках, що позитивно впливає на всі фотосинтетичні процеси в рослинах.

Як бачимо, менш загущений посів відреагував на це підсвічення вже через 4 дні (24.02.2020 р.), оскільки графік кривої вмісту вуглекислого газу в повітрі під кубом за період зняття показників має похилу донизу форму, тобто впродовж часу вимірювання ми фіксуємо зниження концентрації CO<sub>2</sub> в повітрі під кубом на 405 ppm від 1177 до 772 ppm. Вдвічі загущений посів на цю дату ще не проявляє властивого фотосинтезу зниження концентрації CO<sub>2</sub> в повітрі під кубом, а навпаки, демонструє його зростання від 1270 до 1897 ppm. Аж через два тижні додаткового освітлення в процесі фотосинтезу фіксується зниження вмісту вуглекислого газу в повітрі під кубом для обох варіантів загущеного посіву, причому менш загущений рослинний покрив очікувано інтенсивніше (в 1,8 раза) поглинає вуглекислий газ у порівнянні з більш загущеним (327 ppm проти 180 ppm). На останню дату газометричних вимірювань п'ятирихтєві рослини менш загущеного посіву ще показували зменшення вмісту CO<sub>2</sub> в повітрі під кубом протягом години зняття показників, але воно було незначне (34 ppm), практично в 10 разів нижче, ніж за 8 днів до цієї дати. Рослини вдвічі загущеного посіву остаточно втратили здатність нормально фотосинтезувати, про що свідчить приріст концентрації вуглекислого газу в повітрі під кубом на 193 ppm за період зняття показників при вільному освітленні рослинного покриву.

Отже, додаткове освітлення фітосвітільниками на певний час уможливило нормальний перебіг фотосинтетичних процесів у обох варіантах загущеного посіву, але рослинний покрив вдвічі загущеного посіву в лабораторних умовах швидше втратив здатність належно фотосинтезувати. Посилене дихання у цьому варіанті вирощування прискорило поступову втрату життєздатності рослин і тому після 11 березня 2020 р. подальше культивування твердої ярої пшениці сорту Діана в умовах лабораторного дослідження було припинене.

У дисертаційній роботі (Кравченко, 2016) цілий підрозділ присвячено висвітленню питання впливу норми висіву насіння на продуктивність пшениці ярої. Тут же зазначається, що ідеальним вважається рівномірне розміщення рослин, яке дає їм змогу максимально використовувати основні чинники росту й розвитку: світло, вологу, поживні речовини. За рівномірного розміщення рослин по площі створюються умови для максимального синтезу органічної речовини на одиниці площі. Тому норму висіву пшениці ярої необхідно диференціювати відповідно до ґрунтово-кліматичних умов, способу обробітку ґрунту та інших агрозаходів, насамперед

таких, як сортові особливості, попередники, тип ґрунту, глибина залягання підґрунтових вод, вологозабезпеченість посіву, водно-фізичні властивості ґрунту та ін. Норма висіву є важливим чинником формування оптимальної густоти стебел і площі листків, що визначає інтенсивність і продуктивність фотосинтезу. Донині, незважаючи на прогресивні ідеї, які виникали впродовж тривалого періоду вирощування пшениці, проблема густоти посіву і норм висіву насіння залишається актуальною.

Як зауважують В.В. Лихочвор та В.Ф. Петриченко (Лихочвор, Петриченко, 2006), згідно з численними рекомендаціями оптимальна доза висіву для більшості сортів пшениці становить 4–5 млн схожих насінин на 1 га, або 160–250 кг/га. В перерахунку на 1 м<sup>2</sup> це відповідає 16–25 г або 4–6 г на 0,25 м<sup>2</sup>. Якщо прийняти за середнє значення 5 г на 0,25 м<sup>2</sup>, то нами в обох варіантах було висіяно значно більшу кількість насіння, яка в 25 разів при нормі висіву 125 г на 0,25 м<sup>2</sup> та в 50 разів при нормі висіву 250 г на 0,25 м<sup>2</sup> перевищує оптимальну дозу висіву для польових умов. Це було зроблене з метою швидшого досягнення 100 % проективного покриття для належного проведення спектрометрування рослинності і водночас слугувало надійним фактором відмінності між варіантами за стресових умов загущених посівів. Проте для забезпечення процесу первинного куціння оптимально відстань між рослинами має бути 3–4 см. Близьке розміщення насіння одне біля одного створює проблеми алелопатії, фітонебезпеки і надзвичайно високої конкурентної боротьби на всіх етапах росту і розвитку. Це зумовлює різке зниження польової схожості і виживання рослин.

Отже, нами було підтверджено негативний вплив збільшених норм висіву на функціонування рослинного покриву при вирощуванні в лабораторних умовах. Навіть додаткове освітлення фітосвітільниками, яке на певний час покращило стан фотосинтетичного апарату й уможливило нормальний перебіг фотосинтетичних процесів, не забезпечило достатньої життєздатності рослин твердої ярої пшениці сорту Діана в умовах лабораторного дослідження. Динаміка описаних нами процесів дихання та фотосинтезу не суперечить загальноприйнятим уявленням про їх перебіг за умов вирощування загущених посівів.

### Спектрометричні дослідження

Отримані нами значення вегетаційних індексів в умовних одиницях (ум. од.) зведені в табл. 2.

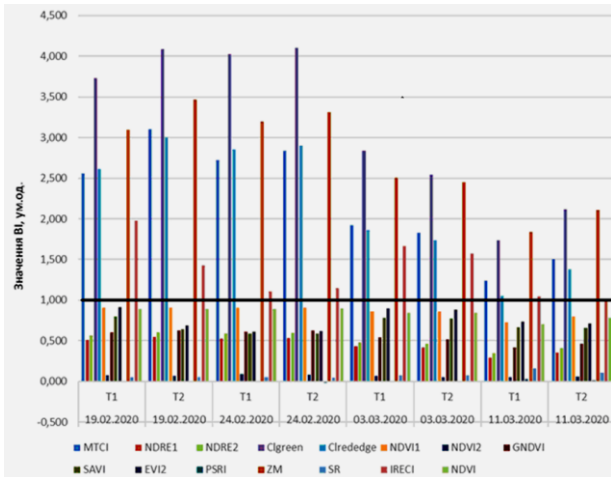
Таблиця 2

**Значення вегетаційних індексів (ум. од.) рослинного покриву твердої ярої пшениці сорту Діана залежно від норми висіву насіння в лабораторному досліді 05 лютого – 11 березня 2020 р.**

Абревіатура BI	19.02.2020		24.02.2020		3.03.2020		11.03.2020	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
MTCI	2,561	3,100	2,725	2,841	1,921	1,832	1,240	1,502
NDRE1	0,511	0,552	0,523	0,536	0,430	0,420	0,295	0,356
NDRE2	0,567	0,600	0,588	0,592	0,482	0,465	0,345	0,409
Clgreen	3,732	4,086	4,028	4,103	2,836	2,547	1,739	2,113
Clrededge	2,615	3,000	2,854	2,902	1,858	1,738	1,054	1,382
NDVII	0,904	0,903	0,904	0,909	0,860	0,858	0,726	0,801
NDVI2	0,078	0,072	0,094	0,081	0,065	0,056	0,056	0,061
GNDVI	0,604	0,630	0,613	0,625	0,542	0,521	0,420	0,467
SAVI	0,794	0,645	0,588	0,589	0,784	0,772	0,664	0,654
EVI2	0,911	0,691	0,615	0,616	0,900	0,882	0,735	0,712
PSRI	-0,001	-0,010	-0,012	-0,016	0,001	-0,006	0,030	0,011
ZM	3,093	3,466	3,195	3,314	2,508	2,448	1,835	2,108
SR	0,051	0,051	0,051	0,048	0,075	0,076	0,159	0,110
IRECI	1,978	1,425	1,106	1,146	1,669	1,577	1,043	1,009
NDVI	0,889	0,891	0,893	0,899	0,842	0,841	0,706	0,783

В колонках позначення T1 відповідає нормі висіву 250 г / 0,25 м<sup>2</sup> а T2 – 125 г / 0,25 м<sup>2</sup>.

За отриманими даними побудовано діаграму (Рис. 7), на якій чітко простежуються дві нерівновеликі групи ВІ: одна об'єднує п'ять ВІ зі значеннями вище 1 ум. од. (Cgreen, Cirededge, MTCI, ZM та IRECI), а друга налічує десять ВІ, показники яких коливаються від  $-0,012$  (PSRI, т. 1 від 24.02.2020) до  $0,911$  (EVI2, т. 1 від 19.02.2020), тобто менше 1 ум. од. На загал, ВІ мали вищі значення на початку вегетації (у лютому 2020 р.), ніж наприкінці (у березні 2020 р.). Особливо це помітно для індексів зі значеннями вище 1 ум. од.



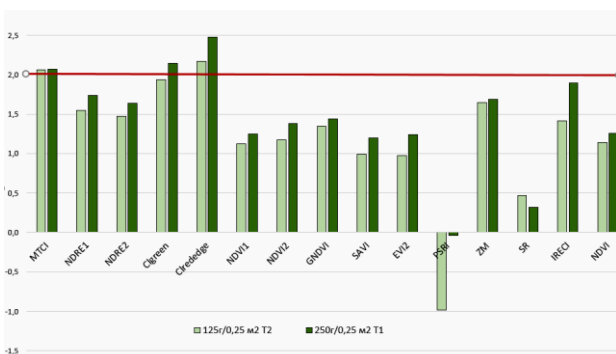
**Рис. 7.** Значення вегетаційних індексів твердої ярої пшениці сорту Діана в залежності від норми висіву насіння в лабораторному досліді (лютий-березень 2020 р.).

T1 – норма висіву  $250\text{г}/0,25\text{м}^2$ ;

T2 – норма висіву  $125\text{г}/0,25\text{м}^2$ .

Чорна суцільна лінія проведена на значенні ВІ = 1 ум. од.

Обчисливши відношення між величинами ВІ початкової (19.02.2020) та кінцевої (11.03.2020) дати вимірювань, ми виявили, що більш інтенсивне падіння властиве цим індексам для рослинного покриття з густотою посіву  $250\text{г}/\text{м}^2$  у порівнянні з менш густо засіяним варіантом (Рис. 8).



**Рис. 8.** Відношення між початковими і кінцевими значеннями ВІ рослинного покриття ярої пшениці сорту Діана залежно від норми висіву насіння.

По осі ординат – показник відношення, по осі абсцис – назви вегетаційних індексів. Червоною лінією виділено значення відношення – 2 рази.

При цьому падіння більше, ніж удвічі на обох варіантах посіву продемонстрували лише два індекси – Cirededge та MTCI. Подібне зменшення властиве також індексу Cgreen за тією лише відмінністю, що у варіанті з густотою посіву  $125\text{г}/0,25\text{м}^2$  воно досягає 1,9 разів, а у вдвічі густіше засіяному посіві – 2,1 разів. Отже, саме ці три індекси проявили в нашому досліді найбільшу чутливість до негативних змін фотосинтетичної активності рослинного покриття впродовж вирощування твердої ярої пшениці

сорту Діана в загущених посівах за умов лабораторного досліду.

Цікаво зазначити, що ті ж самі Cirededge, Cgreen та MTCI максимально реагували на різницю у вмісті азоту і хлорофілу на одиницю площі рослинного покриття озимої пшениці, відібраної у фазу молочної стиглості на тест-ділянках виробничих посівів, відмінних за фітопатологічним станом і вирощених на угіддях Баришівської зернової компанії, як це нами було встановлено при зіставленні наземних та дистанційних даних (Жолобак, Дугін, Сибірцева, Казанцев, Романчук, 2020). В цьому дослідженні обчислення ВІ виконували на підставі спектрометрування рослинного покриття озимої пшениці як здорової, так і ураженої збудниками грибних захворювань, поблизу центрів однокотарних ділянок на площі приблизно  $10\text{м}^2$  в трикратній повторності приладом ASD FieldSpec®. Тому можна констатувати, що зазначені індекси проявляють високу чутливість до коливань вмісту хлорофілу в обстежуваних рослинних покриттях незалежно від стресового чинника.

Як зазначено вище, для більшості ВІ властива спадна динаміка їх значень незалежно від густоти посіву рослин, тобто спостерігається зменшення величин індексів від початкової до кінцевої дати вимірювань. Виняток становлять лише два індекси: SR, який наростив свої значення на кінцеву дату вимірювань, та IRECI, який продемонстрував коливання своїх показань (після зниження 24 лютого знову приріст 03 березня й остаточне падіння на 11.03.2020). Варто зазначити, що цей індекс SR у нашому випадку характеризується дуже низькими величинами, з якими незручно оперувати при характеристиці оптичних властивостей рослинного покриття, а IRECI попри коливання своїх значень, загалом теж показує їх зниження від початкової до кінцевої дати вимірювань. Доцільно також звернути увагу на поведінку індексу відбиття старіння рослин PSRI, який впродовж всього часу вирощування ярої пшениці вловлює різницю між варіантами за густотою стояння рослин: для кожної дати вимірювання більш густо засіяний варіант характеризується вищими показниками цього індексу, що засвідчує більший вміст каротиноїдів у листках ярої пшениці цього варіанту і на загал гірший стан цього посіву у порівнянні з менш густо засіяним. Цей індекс очікувано показує протилежний хід своєї динаміки, змінюючись впродовж часу вирощування рослин від негативних до позитивних значень. У дослідженні В. Ланг зі співроб. (Lang et al., 2019) виявили, що індекс старіння рослин найкраще являв просторовий розподіл змін рослинного покриття, що відбуваються восени наприкінці вегетації у листопадних широколистяних лісах помірного поясу в Китаї. Вчені припускають, що це може бути пов'язано з тим, що PSRI здатен фіксувати не тільки зміну структури клітин мезофілу, але й зміну відносної частки каротиноїдів та хлорофілу в листі, демонструючи більшу чутливість до старіння листя, ніж інші ВІ.

Отже, створені у лабораторному досліді стресові умови відчутного загущення посівів дали змогу виміряти зміни концентрації  $\text{CO}_2$  рослинності, зіставити їх з обчисленими ВІ за даними спектрометрування приладом ASD FieldSpec® та відібрати ВІ, найбільш чутливі до стресового навантаження. Це дає змогу застосувати вибрані ВІ для виявлення мілких параметрів довкілля у польових умовах із залученням спектральних даних космічних знімків (Дугін та ін., 2019).

## Висновки

Приріст концентрації  $\text{CO}_2$  під час визначення інтенсивності дихання твердої ярої пшениці сорту Діана в лабораторному досліді під кубом за умов загущених

посівів спостерігався впродовж всіх чотирьох дат вимірювання.

Фотосинтез досліджуваних рослин супроводжувався поглинанням CO<sub>2</sub> лише у варіанті з менш загущеним посівом після додаткового освітлення їх фітосвітільниками і був зафіксований наприкінці лютого та у березні 2020 р. У варіанті зі збільшеною нормою висіву (250 г/0,25 м<sup>2</sup>) цей процес спостерігався лише 03 березня 2020 р., а в інші дати дихання рослин цього варіанту було набагато інтенсивніше, ніж фотосинтез, тому в оточуючому їх повітрі під кубом навіть в умовах додаткового освітлення спостерігався приріст концентрації CO<sub>2</sub>.

Для більшості ВІ незважаючи на норму висіву насіння твердої ярої пшениці сорту Діана спостерігається зменшення величин індексів рослин від початкової до кінцевої дат вимірювань за винятком SR, PSRI та частково IRECI.

У проведеному лабораторному досліді три ВІ – MTCI, Clrededge та Clgreen проявили найбільшу чутливість до негативних змін фотосинтетичної активності рослинного покриву впродовж вирощування твердої ярої пшениці сорту Діана за умов загущених посівів. Очікувано ці індекси можуть слугувати в польових умовах індикаторами для виявлення змін концентрації CO<sub>2</sub>.

## Література

Бардиш Б., Бурштинська Х. Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, випуск II. (28), 2014. с. 82–88

Дугін С. С., Сибірцева О. М., Голубов С. І., Дорофей Є. М. Верифікація результатів обробки спектральних даних супутника Sentinel-2 A, наземного спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR і системи реєстрації мінливості параметрів середовища DJI STS-VIS. Український журнал дистанційного зондування Землі. 2019. № 21. С. 29–39. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/147/170>

Жолобак Г. М., Сибірцева О. М., Ваколюк М. В., Захарчук Ю. В. Дистанційний моніторинг стану посівів озимої пшениці впродовж весняно-літньої вегетації 2016 р. за вегетаційними індексами супутника Sentinel-2A (на прикладі Лісостепової зони України) // Український журнал дистанційного зондування Землі. 2017. № 15. С. 23–30. URL: [http://ujrs.org.ua/ujrs/issue/viewIssue/15/pdf\\_19](http://ujrs.org.ua/ujrs/issue/viewIssue/15/pdf_19).

Жолобак Г. М., Дугін С. С., Сибірцева О. М., Казанцев Т. А., Романчук І. Ф. Визначення вмісту азоту і хлорофілу в рослинах озимої пшениці двох сортів за даними наземного і повітряного спектрометрування // Український журнал дистанційного зондування Землі. 2020, № 25. С. 4–13. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/178/193>.

Лиховор В. В., Петриченко В. Ф. Рослинництво. Сучасні інтенсивні технології вирощування основних польових культур. Львів : НВФ “Українські технології”, 2006. 730 с.

Кравченко В. С. Оптимізація елементів технології вирощування пшениці ярої у південній частині правобережного Лісостепу України: дис. ... канд. с/г наук, Умань, 2016.– 188 с.

Barnes, E.M., Clarke, T.R., Richards, S.E., Colaizzi, P.D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R.J., Li, H., Moran, M.S. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, 16-19 July 2000, 1–15. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.8007&rep=rep1&type=pdf>.

Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. Journal of Remote Sensing*. 2004. 25. P. 5403–5413.

Dotzler S., Hill J., Buddenbaum H., Stoffe J. The Potential of EnMAP and Sentinel2 Data for Detecting Drought Stress Phenomena in Deciduous Forest Communities. *Remote Sens.* 2015. Vol. 7. P. 14227–14258. doi:10.3390/rs71014227.

Du S., Du S. Land cover classification using remote sensing images and LiDAR data // IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019, P. 2479-2482. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8899840.

Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G., Milton, E. J. Evaluating the capabilities of Sentinel2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 2013. Vol. 82, 83–92.

Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Merzlyak, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment.* – 1996. – V. 58, № 3. – P. 289–298.

Gitelson, A. A., Keydan, G. P., Merzlyak, M. N. Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research Letters.* 2006. Vol. 33 L11402. doi:10.1029/2006GL026457

Gitelson, A., Merzlyak, M.N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology* 1994. Vol. 143, P. 286–292.

Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment.* 1988. Vol. 25, N 3. P. 295–309.

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 doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006

Lang, W.; Chen, X.; Liang, L.; Ren, S.; Qian, S. Geographic and Climatic Attributions of Autumn Land Surface Phenology Spatial Patterns in the Temperate Deciduous Broadleaf Forest of China. *Remote Sens.* 2019. Vol. 11, 1546. <https://doi.org/10.3390/rs11131546>.

Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., Rakitin, V.Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiol. Plant.* 1999. Vol.106, No.1. P. 135–141. URL:<http://dx.doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x>.

Rouse J. W., Jr., Haas 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*, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 1973. 93 p. (NTIS No. E73-106393).

Zarco-Tejada P. J., Miller J. R., Noland T. L., Mohammed G. H., Sampson P. H. Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001. Vol. 39, No. 7. P. 1491–1507.

Zhang X., Long T., He G., Guo Y., Yin R., Zhang Zh., Xiao H., Li M., Cheng B. Rapid generation of global forest cover map using Landsat based on the forest ecological zones // *J. of Applied Remote Sensing.* 2020. Vol. 14. No. 2, P.022211. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.022211>.

Zhu L., Suomalainen J., Liu J., Hyypä J., Kaartinen H., Haggren H. A Review: Remote Sensing Sensors // *Multi-purposeful Application of Geospatial Data*: R. Rustamov (Ed.): InTechOpen, 2018. doi: 10.5772/intechopen.71049.

## References

- Bardys B., Burshtynska Kh. (2014). Application of the vegetation indices for identification of the objects of the earth's surface. *Modern achievements in geodesic science and production*. Iss. II (28), p. 82-88 (in Ukrainian).
- Dugin S., Sybirtseva O., Golubov S., Dorofey Ye. (2019) Verification of multispectral data processing for the Sentinel-2A bands, field ASD FieldSpec@3FR and UAV with the DJI STS-VIS. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*. 21, p. 29-39. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/147/170> (in Ukrainian).
- Zholobak G., Sybirtseva O., Vakolyuk M., Zakharchuk Yu. (2017) Remote monitoring of the state of winter wheat during the spring-summer vegetation of 2016 year, by using vegetation indices of Sentinel-2A satellite (case study of forest steppe area of Ukraine). *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*. 15, p. 23-30. URL: [http://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/Issue/15/pdf\\_19](http://ujrs.org.ua/ujrs/issue/view/Issue/15/pdf_19) (in Ukrainian).
- Zholobak G., Dugin S., Sybirtseva O., Kazantsev N., Romanchuk I. (2020) Determination of nitrogen and chlorophyll content in two varieties of winter wheat plants means of ground and airborne spectrometry. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*. 25, p. 4-13/ URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/178/193> (in Ukrainian).
- Lykhochvor V., Petrychenko V. (2006). Horticulture. Modern intensive technologies for the cultivation of the main field crops. Lviv: NVF "Ukrainski tekhnologii". – 730 p. (in Ukrainian).
- Kravchenko V.S. (2016) Optimization for the technology elements of spring wheat cultivation in the south of the Right-Bank Forest Steppe Ukraine. *Thesis for a Candidate Degree in Agricultural Science*, Uman, - 188 ps. (in Ukrainian).
- Barnes, E.M., Clarke, T.R., Richards, S.E., Colaizzi, P.D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R.J., Li, H., Moran, M.S. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, 16-19 July 2000, 1-15. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.8007&rep=rep1&type=pdf>
- Dash J., Curran P.J. (2004) The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. Journal of Remote Sensing*. 2004. 25. P. 5403-5413
- Dotzler S., Hill J., Buddenbaum H., Stoffe J. The Potential of EnMAP and Sentinel2 Data for Detecting Drought Stress Phenomena in Deciduous Forest Communities. *Remote Sens*. 2015. Vol. 7. P. 14227–14258. doi:10.3390/rs71014227.
- Du S., Du S. Land cover classification using remote sensing images and LiDAR data // IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019, pp. 2479-2482, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8899840
- Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G., Milton, E. J. (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 82, 83–92.
- 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 Sensing of Environment*. – 1996. – V. 58, № 3. – P. 289-298.
- Gitelson, A. A., Keydan, G. P., Merzlyak, M. N. (2006) Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research Letters* 33, L11402.
- Gitelson, A., Merzlyak, M.N. (1994) Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology* 143, 286–292.
- Huete A. R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – V.25, N 3. – P.295-309.
- 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.* 2008. V. 112. P. 3833–3845
- Lang, W.; Chen, X.; Liang, L.; Ren, S.; Qian, S. Geographic and Climatic Attributions of Autumn Land Surface Phenology Spatial Patterns in the Temperate Deciduous Broadleaf Forest of China. *Remote Sens.* 2019, 11, 1546. <https://doi.org/10.3390/rs11131546>
- Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., Rakitin, V.Y. (1999) Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiol. Plant.* 106 (1) : 135-141 <http://dx.doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x>
- Rouse J.W., Jr., Haas 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. 1973. 93 p.
- Zarco-Tejada P. J., Miller J. R., Noland T. L., Mohammed G. H., Sampson P. H. Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001. Vol. 39, No. 7. P. 1491–1507.
- Zhang X., Long T., He G., Guo Y., Yin R., Zhang Zh., Xiao H., Li M., Cheng B. Rapid generation of global forest cover map using Landsat based on the forest ecological zones // *J. of Applied Remote Sensing*, 14(2), 022211 (2020). <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.022211>
- Zhu L., Suomalainen J., Liu J., Hyypä J., Kaartinen H., Haggren H. A Review: Remote Sensing Sensors // *Multi-purposeful Application of Geospatial Data* : IntechOpen, 2018. – DOI: 10.5772/intechopen.71049.

## ВЫЯВЛЕНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ - РАЦИОНАЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДИКАТОРОВ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО ОПЫТА

В. И. Лялько, Г. М. Жолобак, С. С. Дугин, О. М. Сибирцева, Е. М. Дорофей  
 ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”. 01054, г. Киев, ул. О. Гончара, 55-б, Украина

Для классов растительности, покрывающей земную поверхность сравнительно небольшой площади и исследуемой наземными приборами дистанционного зондирования, необходимо подобрать адекватные спектральные индикаторы, которые быстро и эффективно реагировали бы на меняющиеся условия окружающей среды, вызванные действием различных стрессовых факторов. Такими индикаторами могут служить вегетационные индексы (ВИ), вычисленные на основании математических операций с коэффициентами отражения различных спектральных диапазонов, полученными с применением наземных приборов дистанционного зондирования – спектрорадиометров. Применение ВИ позволяет идентифицировать такие изменения состояния растительности, которые часто незаметны при визуальном наблюдении. Для подбора таких ВИ был заложен лабораторный опыт по культивированию твердой яровой пшеницы сорта Диана с разной повышенной нормой высева семян, чтобы во-первых, обеспечить быстрое 100 % проективное покрытие, а во-вторых,



создать стрессовые условия для растений. Во время проведения опыта выполнялись газо- и спектрометрические исследования постоянно растущего фитоматериала, когда практически одновременно проводили измерения интенсивности поглощения и выделения CO<sub>2</sub> растениями в процессах фотосинтеза / дыхания и их спектрометрирования для дальнейшего вычисления ВИ.

Выявлено три ВИ – MTCl, Clrededge и Clgreen, наиболее чувствительных к изменениям состояния растительности и поэтому они могут служить адекватными спектральными индикаторами ее состояния, что крайне необходимо для создания методики оценки показателей цикла углерода для различных экосистем по данным спутникового наблюдения и полевых измерений, уточнения оценки климатических воздействий на региональном и локальном уровнях и оценки индикаторов устойчивого развития IAEG-SDGs.

**Ключевые слова:** вегетационные индексы; твёрдая яровая пшеница; спектрометрические и газометрические измерения; спутниковые данные; цикл углерода; климатические воздействия; устойчивое развитие

#### IDENTIFYING VEGETATION INDICES AS THE RATIONAL SPECTRAL INDICATORS OF VEGETATION STATE UNDER CONDITIONS OF LABORATORY EXPERIMENT

V. I. Lyalko, H. M. Zholobak, S. S. Duhin, O. M. Sybirtseva, Ye. M. Dorofey

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, National Academy of Sciences of Ukraine, 01054, Oles Honchar str., 55-B, Kyiv, Ukraine

For the vegetation classes, which cover the ground surface with a rather small area and studied by means of the ground-based remote sensors it's necessary to select the suitable spectral indices, which cloud responded in a fast and effective way to dynamic environmental conditions induced by the different stress factors. The vegetation indices (VIs) can be such indicators calculated by the mathematical operations using reflectances in the different spectral ranges measured by the field remote sensors, i.e. spectroradiometers. Application of VIs allows identifying these changes of vegetation state, which aren't visible at the visual observation. In order to select these VIs we have conducted the laboratory experiment with the cultivation of durum spring wheat variety "Diana" at the different higher seeding rates to provide by this way, first, the fast 100% plant cover, and, second, establish the stressed conditions for the plants. During this experiment the gasometric and spectrometric observation of the constantly growing phytomass carried out, when the measurements of intensity of CO<sub>2</sub> absorption and release by the plants in process of photosynthesis/respiration and spectrometric ones have been performed practically simultaneously that allowed further calculation of VIs.

Three vegetation indices such as MTCl, Clrededge and Clgreen were identified as the most sensitive to the changes of vegetation state and, thus, they can serve as the proper spectral indicators of vegetation condition, which are extremely necessary to develop the technique of estimating the variables of carbon cycle in the different ecosystems using satellite data and field measurements, improve of assessment for the climatic effects at the regional and local levels and estimating the IAEG-SDGs indicators of sustainable development.

**Key words:** vegetation indices; durum spring wheat; spectrometric and gasometric measurements; satellite data; carbon cycle; climatic effects; sustainable development.

*Рукопис статті отримано 23.03.2021*