

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ІНДЕКСІВ РОСЛИННОСТІ

¹Вінницький національний технічний університет

Проведено аналіз літературних джерел, виділено використовувані в дослідженнях індекси контролю параметрів рослинності (індекси рослинності). До таких параметрів варто віднести наявність хлорофілу, вміст води, ефективність використання світла, наявність азоту, вуглецю та листових пігментів. Контроль наявності хлорофілу здійснюється за допомогою диференційного вегетаційного індексу, індексу глобального моніторингу довкілля, інфрачервоного вегетаційного індексу, модифікованого простого співвідношення, модифікованого ґрунтового вегетаційного індексу 2, нелінійного індексу, нормалізованого диференційного вегетаційного індексу, оптимізованого вегетаційного індексу ґрунту, перенормалізованого диференційного вегетаційного індексу, вегетаційного індексу ґрунту, простого співвідношення тощо. Контроль вмісту води здійснюється за допомогою індексу вологості, нормалізованого диференційного інфрачервоного індексу, нормалізованого диференційного індексу води, нормалізованого багатосмугового індексу посухи, індексу діапазону води. Контроль ефективності використання світла здійснюється за допомогою індексу фотохімічного відбиття, структурного інтенсивного індексу пігменту, індексу коефіцієнта червоного та зеленого спектрів. Контроль наявності азоту здійснюється за допомогою нормалізованого диференційного індексу азоту. Контроль наявності вуглецю здійснюється за допомогою індексу поглинання целюлози, індексу поглинання целюлози та лігніну, нормалізованого диференційного індексу, індексу відбиття старіння рослин. Контроль наявності листових пігментів здійснюється за допомогою індексу відбиття антоціаніну 1, індексу відбиття антоціаніну 2, індексу відбиття каротиноїду 1, індексу відбиття каротиноїду 2. Описано особливості розглянутих індексів рослинності, наведено формули їхнього обчислення та основні характеристики.

Ключові слова: вегетаційні індекси, хлорофіл, світло, азот, вуглець, вода, листові пігменти.

Вступ

На сьогодні активний розвиток в Україні агробізнесу став локомотивом національної економіки. Наша країна є найбільшим у світі експортером соняшникової олії та одним з найбільших експортерів зерна [1], що досягнуто завдяки широкому впровадженню технологій точного землеробства, використання яких є неодмінною умовою високої рентабельності рослинництва і передбачає використання спеціалізованих індексів рослинності. Такими є показники, що розраховуються в результаті операцій з різними спектральними діапазонами даних дистанційного зондування. Вони призначені для визначення різних параметрів рослинності [2].

На сьогодні існує понад 150 індексів рослинності, але лише невелика їх кількість має суттєве практичне використання [3]. Тому на практиці для кількісної оцінки рослинності виникає необхідність вибору індексу рослинності, оскільки існує широкий спектр специфічних задач їх застосування, зважаючи на умови експлуатації. Таким чином, постає потреба у порівняльній характеристиці, яка б якомога повніше відображала весь клас індексів рослинності, що використовуються на практиці. При цьому повинні бути враховані їх особливості та умови застосування.

Метою статті є аналіз індексів рослинності та їх порівняльна характеристика.

Характеристика індексів рослинності

Повноцінний моніторинг індексів рослинності передбачає проведення експертно-аналітичного контролю якості, результат якого дає уявлення про основні параметри рослинності, що контролю-

ються. До них відносяться наявність хлорофілу, вміст води, ефективність використання світла, наявність азоту, вуглецю та листових пігментів.

В таблиці наведено вживані в дослідженнях індекси контролю параметрів рослинності, формули їх обчислення та основні характеристики.

Індекси рослинності

Індекс рослинності	Формула	Характеристики
Хлорофіл		
Широкозмуглові індекси		
Диференційний вегетаційний індекс (DVI)	$DVI = NIR - Red$, де <i>NIR</i> — відбивальна інфрачервона область спектра; <i>Red</i> — видима червона область спектра	Розрізняє ґрунт і рослинність, але не враховує різницю між відбивною здатністю та засвітами, спричиненими атмосферними впливами або тінями [4]
Індекс глобального моніторингу довкілля (GEMI)	$GEMI = \left(\frac{2(NIR^2 - Red^2)}{NIR + Red + 0,5} + \frac{1,5NIR + 0,5Red}{NIR + Red + 0,5} \right) \times \left(1 - 0,5 \left(\frac{NIR^2 - Red^2}{NIR + Red + 0,5} + \frac{1,5NIR + 0,5Red}{NIR + Red + 0,5} \right) \right) - \frac{Red - 0,125}{1 - Red}$	Використовується для глобального моніторингу навколишнього середовища з усуненням атмосферного впливу, до яких менш чутливий. На нього впливає голий ґрунт, тому не рекомендується застосовувати в районах розрідженої рослинності [5]
Інфрачервоний вегетаційний індекс (IPVI)	$IPVI = \frac{NIR}{NIR + Red}$	Швидко обчислюється. Значення коливаються від 0 до 1 [6]
Модифіковане просте співвідношення (MSR)	$MSR = \frac{NIR/Red - 1}{\sqrt{NIR/Red} + 1}$	Підвищена чутливість до біофізичних параметрів рослинності [7]
Модифікований ґрунтовий вегетаційний індекс 2 (MSAVI2)	$MSAVI2 = \frac{2NIR + 1}{2} - \frac{\sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - Red)}}{2}$	Зменшує шум ґрунту та збільшує динамічний діапазон сигналу від рослинності [8]
Нелінійний індекс (NLI)	$NLI = \frac{NIR^2 - Red}{NIR^2 + Red}$	Лінеаризує взаємозв'язки з поверхневими параметрами, які мають тенденцію бути нелінійними [8]
Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI)	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Значення коливається від -1 до 1 за загального діапазону для зеленої рослинності від 0,2 до 0,8 [9]
Оптимізований вегетаційний індекс ґрунту (OSAVI)	$OSAVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red + 0,16}$	Використовує стандартне значення 0,16, що забезпечує більші варіації ґрунту для низького рослинного покриття, демонструючи при цьому підвищену в понад 50 % чутливість до рослинного покриття [10]
Перенормалізований диференційний вегетаційний індекс (RDVI)	$RDVI = \frac{NIR - Red}{\sqrt{NIR + Red}}$	Використовує різницю між ближньою інфрачервоною та червоною довжинами хвиль для виділення здорової рослинності. Він нечутливий до впливу ґрунту та сонця [11]
Веgetаційний індекс ґрунту (SAVI)	$SAVI = \frac{1,5(NIR - Red)}{NIR + Red + 0,5}$	Послаблює вплив пікселів, які відповідають ґрунту, і використовується в районах з відносно рідкою рослинністю, де ґрунт видно крізь рослини [8]
Просте співвідношення (SR)	$SR = \frac{NIR}{Red}$	Відношенням довжини хвилі з найбільшим відбиттям для рослинності та довжини хвилі найглибшого поглинання хлорофілу і може перенасичуватися в умовах густої рослинності, коли рівень LAI стає високим [12]
Перетворений диференційний вегетаційний індекс (TDVI)	$TDVI = 1,5 \left(\frac{NIR - Red}{\sqrt{NIR^2 + Red + 0,5}} \right)$	Використовується для моніторингу рослинного покриття в міських умовах [13]
Зелений диференційний вегетаційний індекс (GDVI)	$GDVI = NIR - Green$, де <i>Green</i> — видима зелена область спектра	Використовує кольорову інфрачервону фотографію для прогнозування браку нітрогену в рослині [14]
Веgetаційний індекс з регулюванням ґрунтової зелені (GSAVI)	$GSAVI = 1,5 \cdot \frac{NIR - Green}{NIR + Green + 0,5}$	

Продовження табл.

Індекс рослинності	Формула	Характеристики
Зелений оптимізований вегетаційний індекс з коригуванням ґрунтів (<i>GOSAVI</i>)	$GOSAVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green + 0.16}$	Використовує кольорову інфрачервону фотографію для прогнозування браку нітрогену в рослині [14]
Зелений нормалізований диференційний вегетаційний індекс (<i>GNDVI</i>)	$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Вимірюється в діапазоні від 0,54 до 0,57 мкм [15]
Веgetаційний індекс зелених коефіцієнтів (<i>GRVI</i>)	$GRVI = \frac{NIR}{Green}$	Чутливий до рівня фотосинтезу на узліссях, оскільки зелені та червоні відбиття сильно впливають на зміни пігментів листя [14]
Індекс зеленого листя (<i>GLI</i>)	$GLI = \frac{(Green - Red)}{2 \cdot Green + Red + Blue} + \frac{(Green - Blue)}{2 \cdot Green + Red + Blue},$ де <i>Blue</i> — видима синя область спектра	Значення коливаються від -1 до +1. Негативні значення відповідають ґрунту та неживим об'єктам, тоді як позитивні значення відповідають зеленому листю та стеблу [16]
Вдосконалений вегетаційний індекс (<i>EVI</i>)	$EVI = 2,5 \frac{NIR - Red}{NIR + 6Red - 7,5Blue + 1}$	Використовує синю область відображення для корекції фонових сигналів ґрунту і зменшення атмосферних впливів, у тому числі аерозольного розсіювання. Значення в діапазоні від 0 до 1. [2]
Індекс видимої атмосферостійкості (<i>VARI</i>)	$VARI = \frac{Green - Red}{Green + Red - Blue}$	Використовується для оцінки частки рослинності в зображенні з низькою чутливістю до атмосферних впливів [17]
Атмосферостійкий вегетаційний індекс (<i>GARI</i>)	$GARI = \frac{NIR - (Green - \gamma(Blue - Red))}{NIR + (Green - \gamma(Blue - Red))},$ де γ — гамма-константа	Чутливіший до концентрацій хлорофілу і менш чутливий до атмосферних впливів [15]
Веgetаційний індекс хлорофілу (<i>GCI</i>)	$GCI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{Green}} - 1,$ де ρ_{NIR} — кількість пікселів відбивальної інфрачервоної області спектра; ρ_{Green} — кількість пікселів видимої зеленої області спектра	Використовується для оцінки вмісту хлорофілу в листках у багатьох видах рослин. Врахування широких довжин відбивальної інфрачервоної області спектра та видимої зеленої області спектра забезпечує кращий прогноз вмісту хлорофілу, одночасно забезпечуючи більшу чутливість та вище відношення сигнал/шум [15]
Модифікований нелінійний індекс (<i>MNLI</i>)	$MNLI = \frac{(NIR^2 - Red) \cdot (1 + L)}{NIR^2 + Red + L},$ де <i>L</i> — коефіцієнт коригування фону	Використовується для обліку ґрунтового фону [8]
Індекс трикутної зелені (<i>TGI</i>)	$TGI = \frac{(\lambda_{Red} - \lambda_{Blue})(\rho_{Red} - \rho_{Green})}{2} - \frac{(\lambda_{Red} - \lambda_{Green})(\rho_{Red} - \rho_{Blue})}{2},$ де λ_{Red} — центральна довжина хвилі червоної смуги; λ_{Blue} — центральна довжина хвилі синьої смуги; λ_{Green} — центральна довжина хвилі зеленої смуги; ρ_{Red} — кількість пікселів видимої червоної області спектра; ρ_{Blue} — кількість пікселів видимої синьої області спектра	Заснований на значеннях відбивної здатності на видимих довжинах хвиль. Це досить хороший показник вмісту хлорофілу в областях з високим листовим покривом [17]
Веgetаційний індекс широкого динамічного діапазону (<i>WDRVI</i>)	$WDRVI = \frac{a \cdot NIR - Red}{a \cdot NIR + Red},$ де <i>a</i> — ваговий коефіцієнт	Ефективний при середній та високій щільності рослинності та є чутливішим до широкого діапазону рослинної зеленості та до змін <i>LAI</i> [15]
Індекс листової поверхні (<i>LAI</i>)	$LAI = 3,618 \cdot EVI - 0,118$	Значення коливаються від 0 до 3,5. Однак, коли присутня хмарність чи яскраві об'єкти, які створюють насичені пікселі, значення може перевищувати 3,5 [7]

Індекс рослинності	Формула	Характеристики
Вузькосмугові індекси		
Стійкий до атмосферного впливу вегетаційний індекс (<i>ARVI</i>)	$ARVI = \frac{\rho_{800} - (\rho_{680} - \gamma(\rho_{450} + \rho_{680}))}{\rho_{800} + (\rho_{680} - \gamma(\rho_{450} + \rho_{680}))}$ <p>де ρ_{450} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 450 нм; ρ_{680} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 680 нм; ρ_{800} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 800 нм</p>	Стійкий до атмосферних факторів (наприклад, аерозолі). Він використовує синю відбивну здатність для корекції червоної відбивної здатності атмосферного розсіювання. Найкорисніший у регіонах з високим вмістом аерозолі в атмосфері. Значення коливається від -1 до +1; при цьому вищі значення відповідають здоровішій та зеленій рослинності [19]
Модифікований показник коефіцієнта поглинання хлорофілу (<i>MCARI</i>)	$MCARI = \left((\rho_{700} - \rho_{670}) - 0,2(\rho_{700} - \rho_{550}) \left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \right) \right)$ <p>де ρ_{550} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 550 нм; ρ_{670} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 670 нм; ρ_{700} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 700 нм</p>	Вказує на відносну кількість хлорофілу з мінімальним поєднаним впливом на ґрунт та нефотосинтетичні поверхні [20]
Покращений модифікований показник коефіцієнта поглинання хлорофілу (<i>MCARI2</i>)	$MCARI2 = \frac{1,5 \cdot (2,5(\rho_{800} - \rho_{670}) - \sqrt{(2\rho_{800} + 1)^2 - (6\rho_{800} - 5\sqrt{\rho_{670}}) - 0,5} - 1,3(\rho_{800} - \rho_{550}))}{\sqrt{(2\rho_{800} + 1)^2 - (6\rho_{800} - 5\sqrt{\rho_{670}}) - 0,5}}$	Схожий на <i>MCARI</i> і включає коефіцієнт коригування ґрунту, зберігаючи чутливість до <i>LAI</i> та стійкість до впливу хлорофілу [21]
Просте співвідношення модифікованого червоного спектра (<i>MRESR</i>)	$MRESR = \frac{\rho_{750} - \rho_{445}}{\rho_{750} + \rho_{445}}$ <p>де ρ_{445} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 445 нм; ρ_{750} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 750 нм</p>	Використовує смуги в червоному спектрі і включає корекцію для дзеркального відображення листя. Значення коливається від 0 до 30 за загального діапазону для зеленої рослинності від 2 до 8 [22], [23]
Модифікований індекс трикутної рослинності (<i>MTVI</i>)	$MTVI = 1,2(1,2(\rho_{800} - \rho_{550}) - 2,5(\rho_{670} - \rho_{550}))$	Робить <i>TVI</i> придатним для оцінки <i>LAI</i> , замінюючи довжину хвилі 750 нм на 800 нм, на відбиття за якої впливають зміни структури листків [21]
Вдосконалений модифікований індекс трикутної рослинності (<i>MTVI2</i>)	$MTVI2 = \frac{1,5(2,5(\rho_{800} - \rho_{550}) - \sqrt{(2\rho_{800} + 1)^2 - (6\rho_{800} - 5\sqrt{\rho_{670}}) - 0,5} - 2,5(\rho_{670} - \rho_{550}))}{\sqrt{(2\rho_{800} + 1)^2 - (6\rho_{800} - 5\sqrt{\rho_{670}}) - 0,5}}$	Враховує фонову сигнатуру ґрунтів, зберігаючи чутливість до <i>LAI</i> та стійкість до впливу хлорофілу [21]
Індекс поглинання трансформованого хлорофілу (<i>TCARI</i>)	$TCARI = 3 \left((\rho_{700} - \rho_{670}) - 0,2(\rho_{700} - \rho_{550}) \left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \right) \right)$	Вказує на відносну кількість хлорофілу. На нього впливає відбивна здатність ґрунту, особливо у рослинності з низьким рівнем <i>LAI</i> [21]
Індекс трикутної рослинності (<i>TVI</i>)	$TVI = \frac{120(\rho_{750} - \rho_{550})}{2} - \frac{200(\rho_{670} - \rho_{550})}{2}$	Обчислюється як площа гіпотетичного трикутника в спектральному просторі, що з'єднує зелене пікове відбивання, мінімальне поглинання хлорофілу та плече відбивальної інфрачервоної області спектра [24]
Індекс Vogelmann Red Edge 1 (<i>VREI1</i>)	$VREI1 = \frac{\rho_{740}}{\rho_{720}}$ <p>де ρ_{720} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 720 нм; ρ_{740} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 740 нм</p>	Чутливий до сукупного впливу концентрації хлорофілу листя, площі листків та вмісту води. Значення коливається від 0 до 20 за загального діапазону для зеленої рослинності від 4 до 8 [25]
Індекс Vogelmann Red Edge 2 (<i>VREI2</i>)	$VREI2 = \frac{\rho_{734} - \rho_{747}}{\rho_{715} + \rho_{726}}$ <p>де ρ_{715} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 715 нм; ρ_{726} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 726 нм; ρ_{734} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 734 нм; ρ_{747} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 747 нм</p>	

Продовження табл.

Індекс рослинності	Формула	Характеристики
Вміст води		
Індекс вологості (<i>MSI</i>)	$MSI = \frac{\rho_{1599}}{\rho_{819}},$ де ρ_{819} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 819 нм; ρ_{1599} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 1599 нм	Чутливий до збільшення вмісту води в листках. Зі збільшенням вмісту води у листках збільшується поглинання при 1599 нм. На поглинання при 819 нм майже не впливає зміна вмісту води, тому воно використовується як еталон. Значення коливається від 0 до понад 3 за загального діапазону для зеленої рослинності від 0,4 до 2 [20]
Нормалізований диференційний інфрачервоний індекс (<i>NDII</i>)	$NDII = \frac{\rho_{819} - \rho_{1649}}{\rho_{819} + \rho_{1649}},$ де ρ_{1649} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 1649 нм	Використовується при вимірюванні відбиття, яке чутливе до змін вмісту води у рослині. Значення коливається від -1 до 1 за загального діапазону для зеленої рослинності від 0,02 до 0,6 [26]
Нормалізований диференційний індекс води (<i>NDWI</i>)	$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{1241}}{\rho_{857} + \rho_{1241}},$ де ρ_{857} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 857 нм; ρ_{1241} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 1241 нм	Чутливий до змін вмісту води у рослині, оскільки відбивна здатність при 857 нм та 1241 нм має подібні, але дещо інші властивості поглинання для води. Значення коливається від -1 до 1 за загального діапазону для зеленої рослинності від -0,1 до 0,4 [27], [28]
Нормалізований багатосмуговий індекс посухи (<i>NMDI</i>)	$NMDI = \frac{\rho_{860} - (\rho_{1640} - \rho_{2130})}{\rho_{860} + (\rho_{1640} - \rho_{2130})},$ де ρ_{860} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 860 нм; ρ_{1640} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 1640 нм; ρ_{2130} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 2130 нм	Враховує вміст вологи в ґрунті для моніторингу потенційних умов посухи. Використовує різницю між двома смугами поглинання води в короткохвильовій інфрачервоній області (1640 та 2130 нм) як міру чутливості води у рослинності та ґрунті. Часто використовується для виявлення лісових пожеж. Зі збільшенням вологості ґрунту значення індексу зменшуються. Значення коливаються від 0,7 до 1 для сухого ґрунту, від 0,6 до 0,7 для ґрунту з проміжною вологістю та менше 0,6 для вологого ґрунту [29]
Індекс діапазону води (<i>WBI</i>)	$WBI = \frac{\rho_{970}}{\rho_{900}},$ де ρ_{900} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 900 нм; ρ_{970} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 970 нм	Характеризує відбиття, яке чутливе до змін стану води. Зі збільшенням вмісту води у рослині при 970 нм показник поглинання зростає порівняно з 900 нм. Загальний діапазон зеленої рослинності 0,8 ... 1,2 [30], [31]
Ефективність використання світла		
Індекс фотохімічного відбиття (<i>PRI</i>)	$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}},$ де ρ_{531} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 531 нм; ρ_{570} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 570 нм.	Чутливий до змін у каротиноїдних пігментах в листках. Каротиноїдні пігменти свідчать про ефективність використання фотосинтетичного світла або швидкість поглинання вуглекислого газу листям на одиницю енергії, що поглинається. Значення коливається від -1 до 1 за загального діапазону для зеленої рослинності від -0,2 до 0,2 [23]
Структурний інтенсивний індекс пігменту (<i>SIPi</i>)	$SIPi = \frac{\rho_{800} - \rho_{445}}{\rho_{800} - \rho_{680}}$	Значення коливається від 0 до 2 при загальному діапазоні для зеленої рослинності від 0,8 до 1,8 [10]
Індекс коефіцієнта червоного та зеленого спектрів (<i>RGRI</i>)	$RGRI = \frac{\sum_{i=600}^{699} R_i}{\sum_{j=500}^{599} R_j},$ де ρ_{500} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 500 нм; ρ_{599} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 599 нм; ρ_{600} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 600 нм; ρ_{699} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 699 нм	Вказує на відношення показника відбиття листя під впливом антоціану до показника відбиття хлорофілу. Значення коливається від 0,1 до понад 8 за загального діапазону для зеленої рослинності від 0,7 до 3 [23]
Азот		
Нормалізований диференційний індекс азоту (<i>NDNI</i>)	$NDNI = \frac{\log(1/\rho_{1510}) - \log(1/\rho_{1680})}{\log(1/\rho_{1510}) + \log(1/\rho_{1680})},$ де ρ_{1510} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 1510 нм; ρ_{1680} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 1680 нм	Призначений для оцінки відносної кількості азоту, що міститься у рослині. Відбивна здатність при 1510 нм визначається концентрацією азоту в листках, а також загальною біомасою листя. Це порівнюється з еталонною відбивною здатністю при 1680 нм. [30], [31]

Індекс рослинності	Формула	Характеристики
Вуглець		
Індекс поглинання целюлози (<i>CAI</i>)	$CAI = 0,5(\rho_{2000} + \rho_{2200}) - \rho_{2100}$ де ρ_{2000} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 2000 нм; ρ_{2100} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 2100 нм; ρ_{2200} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 2200 нм	Вказує на відкриті поверхні, що містять високий рослинний матеріал. Поглинання відбувається в діапазоні від 2000 нм до 2200 нм чутливого до целюлози. Значення коливається від -3 до понад 4 за загального діапазону для зеленої рослинності від -2 до 4 [20]
Індекс поглинання целюлози та лігніну (<i>LCAI</i>)	$LCAI = 100((\rho_{2185-2225} - \rho_{2145-2185}) + (\rho_{2185-2225} - \rho_{2295-2365}))$ де $\rho_{2185-2225}$ — кількість пікселів смуги в діапазоні довжин хвиль 2185...2225 нм; $\rho_{2145-2185}$ — кількість пікселів смуги в діапазоні довжин хвиль 2145...2185 нм; $\rho_{2295-2365}$ — кількість пікселів смуги в діапазоні довжин хвиль 2295...2365 нм	Сума показників поглинання целюлози та лігніну поблизу 2100 та 2300 нм. З його допомогою можна контролювати залишки врожаю [20]
Нормалізована диференційний індекс (<i>NDLI</i>)	$NDLI = \frac{\log(1/\rho_{1754}) - \log(1/\rho_{1680})}{\log(1/\rho_{1754}) + \log(1/\rho_{1680})}$ де ρ_{1754} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 1754 нм	Оцінює відносну кількість лігніну, що міститься у рослинних пологах. Відбивна здатність при 1754 нм значною мірою визначається концентрацією лігніну в листі [30], [31]
Індекс відбиття старіння рослин (<i>PSRI</i>)	$PSRI = \frac{\rho_{680} - \rho_{500}}{\rho_{750}}$	Максимізує чутливість індексу до відношення масових каротиноїдів до хлорофілу. Значення коливається від -1 до 1 за загального діапазону для зеленої рослинності від -0,1 до 0,2 [31]
Листові пігменти		
Індекс відбиття антоціаніну 1 (<i>ARI1</i>)	$ARI1 = \frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}}$	Антоціани — це водорозчинні пігменти, що містяться у новоутворених листках та тих, що зазнають старіння. Ослаблена рослинність містить вищі концентрації антоціанів. Збільшення <i>ARI1</i> вказує на зміну кількості листя внаслідок новоутворення або загибелі [15]
Індекс відбиття антоціаніну 2 (<i>ARI2</i>)	$ARI2 = \rho_{800} \left(\frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}} \right)$	Модифікація <i>ARI1</i> , яка виявляє вищі концентрації антоціанів у рослинності [15]
Індекс відбиття каротиноїду 1 (<i>CRI1</i>)	$CRI1 = \frac{1}{\rho_{510}} - \frac{1}{\rho_{550}}$ де ρ_{510} — кількість пікселів смуги довжиною хвилі 510 нм	Каротиноїди беруть участь у процесах поглинання світла в рослинах, а також у захисті рослин від шкідливого впливу занадто великої кількості світла. Значення коливається від 0 до понад 15 за загального діапазону для зеленої рослинності від 1 до 12 [15]
Індекс відбиття каротиноїду 2 (<i>CRI2</i>)	$CRI2 = \frac{1}{\rho_{510}} - \frac{1}{\rho_{700}}$	Значення коливається від 0 до понад 15 за загального діапазону для зеленої рослинності від 1 до 11 [15]

Таким чином, розроблена порівняльна характеристика висвітлює всі індекси рослинності, які використовуються на практиці для контролю параметрів рослинності.

Висновки

В роботі проведено аналіз літературних джерел, виділено використовувани в дослідженнях індекси контролю параметрів рослинності. Описано їх особливості, наведено формули їх обчислення та основні характеристики. Розроблена порівняльна характеристика висвітлює всі індекси рослинності, які використовуються на практиці для контролю параметрів рослинності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Сільське господарство в Україні*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dlf.ua/ua/silске-gospodarstvo-v-ukrayini/#main>. Дата звернення: Січень 31, 2021.
- [2] *Вегетаційні індекси NDVI, EVI, GNDVI, CVI, True color*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.soft.farm/uk/blog/vegetacijni-indeksi-ndvi-evi-gndvi-cvi-true-color-140>. Дата звернення: Січень 30, 2021.
- [3] *Vegetation Indices*. [Electronic resource]. Available: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/VegetationIndices.html>.

- [4] C. Tucker, "Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation," *Remote Sensing of Environment*, no. 8, pp. 127-150, 1979.
- [5] B. Pinty, and M. Verstraete, "GEMI: a Non-Linear Index to Monitor Global Vegetation From Satellites," *Vegetation*, no. 101, pp. 15-20, 1992.
- [6] R. Crippen, "Calculating the Vegetation Index Faster" *Remote Sensing of Environment*, no. 34, pp. 71-73, 1990.
- [7] J. Chen, "Evaluation of Vegetation Indices and Modified Simple Ratio for Boreal Applications," *Canadian Journal of Remote Sensing*, no. 22, pp. 229-242, 1996.
- [8] J. Qi, A. Chehbouni, A. Huete, Y. Kerr, and S. Sorooshian, "A Modified Soil Adjusted Vegetation Index," *Remote Sensing of Environment*, no. 48, pp. 119-126, 1994.
- [9] J. Rouse, R. Haas, J. Schell, and D. Deering, "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS," *Third ERTS Symposium, NASA*, pp. 309-317, 1973.
- [10] G. Rondeaux, M. Steven, and F. Baret, "Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices," *Remote Sensing of Environment*, no. 55, pp. 95-107, 1996.
- [11] J. Roujean, and F. Breon, "Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements," *Remote Sensing of Environment*, no. 51, pp. 375-384, 1995.
- [12] E. Boegh, et. al, "Airborne Multi-spectral Data for Quantifying Leaf Area Index, Nitrogen Concentration and Photosynthetic Efficiency in Agriculture," *Remote Sensing of Environment*, no. 81, pp. 179-193, 2002.
- [13] A. Bannari, H. Asalhi, and P. Teillet, "Transformed Difference Vegetation Index (TDVI) for Vegetation Cover Mapping," in *Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '02, IEEE International*, no. 5, pp. 24-29, 2002.
- [14] R. Sripada, "Aerial Color Infrared Photography for Determining Early In-season Nitrogen Requirements in Corn," *Agronomy Journal*, no. 98, pp. 968-977, 2006.
- [15] A. Gitelson, "Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation," *Journal of Plant Physiology*, no. 2, pp. 165-173, 2004.
- [16] M. Louhaichi, M. Borman, and D. Johnson, "Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat," *Geocarto International*, no. 1, pp. 65-70, 2001.
- [17] *Індекси розвитку рослин*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.agroone.info/publication/indeksi-rozvitku-roslin>. Дата звернення: Січень 30, 2021.
- [18] Y. Kaufman, and D. Tanre, "Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, no. 2, pp. 261-270, 1992.
- [19] C. Daughtry, E. Hunt, Jr., P. Doraiswamy, and J. McMurtrey III, "Remote Sensing the Spatial Distribution of Crop Residues," *Agronomy Journal*, no. 97, pp. 864-871, 2005.
- [20] D. Haboudane, "Hyperspectral Vegetation Indices and Novel Algorithms for Predicting Green LAI of Crop Canopies: Modeling and Validation in the Context of Precision Agriculture," *Remote Sensing of Environment*, no. 90, pp. 337-352, 2004.
- [21] B. Datt, "A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves," *Journal of Plant Physiology*, no. 154, pp. 30-36, 1999.
- [22] P. Curran, W. Windham, and H. Gholz, "Exploring the Relationship Between Reflectance Red Edge and Chlorophyll Concentration in Slash Pine Leaves," *Tree Physiology*, no. 15, pp. 203-206, 1995.
- [23] J. Vogelmann, B. Rock, and D. Moss, "Red Edge Spectral Measurements from Sugar Maple Leaves," *International Journal of Remote Sensing*, no. 14, pp. 1563-1575, 1993.
- [24] M. Hardisky, V. Klemas, and R. Smart, "The Influences of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of Spartina Alterniflora Canopies," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, no. 49, pp. 77-83, 1983.
- [25] B. Gao, "Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space," *Proceedings of SPIE*, no. 2480, pp. 225-236, 1995.
- [26] T. Jackson, "Vegetation Water Content Mapping Using Landsat Data Derived Normalized Difference Water Index for Corn and Soybeans," *Remote Sensing of Environment*, no. 92, pp. 475-482, 2004.
- [27] L. Wang, and J. Qu, "Forest Fire Detection using the Normalized Multi-band Drought Index (NMDI) with Satellite Measurements," *Agricultural and Forest Meteorology*, no. 11, pp. 1767-1776, 2008.
- [28] L. Serrano, J. Penuelas, and S. Ustin, "Remote Sensing of Nitrogen and Lignin in Mediterranean Vegetation from AVIRIS Data: Decomposing Biochemical from Structural Signals," *Remote Sensing of Environment*, no. 81, pp. 355-364, 2002.
- [29] T. Fourty, "Leaf Optical Properties with Explicit Description of Its Biochemical Composition: Direct and Inverse Problems," *Remote Sensing of Environment*, no. 56, pp. 104-117, 1996.
- [30] J. Melillo, J. Aber, and J. Muratore, "Nitrogen and Lignin Control of Hardwood Leaf Litter Decomposition Dynamics," *Ecology*, no. 63, pp. 621-626, 1982.
- [31] J. Merzlyak, "Non-destructive Optical Detection of Pigment Changes During Leaf Senescence and Fruit Ripening," *Physiologia Plantarum*, no. 106, pp. 135-141, 1999.

Рекомендована кафедрою електроніки та наносистем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.02.2021

Білинський Йосип Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електроніки та наносистем, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Книш Богдан Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедри електроніки та наносистем, e-mail: tutmos-3@i.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yo. Yo. Bilynskiy¹
B. P. Knysh¹

Analysis of Characteristics and Justification of Vegetation Indices

¹Vinnitsia National Technical University

In this article there has been given the analyzing of non-fiction sources in order to find out the popular indexes of the vegetable control parameters. There are such parameters as chlorophyll presence, water containing, the efficiency of a light use, nitrogen and carbon presence, foliage pigmentation. The chlorophyll presence control is conducted by such indexes as the difference vegetation index, the global environmental monitoring index, the infrared percentage vegetation index, the modified simple ratio, the modified Soil adjusted vegetation index 2, the non-linear index, the normalized difference vegetation index, the optimized soil adjusted vegetation index, the renormalized difference vegetation index, the soil adjusted vegetation index, the simple ratio etc. The control of water content can be based on the moisture stress index, the normalized difference infrared index, the normalized difference water index, the normalized multi-band drought index, the water band index. There is the photochemical reflectance index, the structure insensitive pigment index, the red green ratio index for the efficiency control of the light use. The nitrogen presence is controlled by the normalized differential nitrogen index. The carbon presence can be detected by the implementing of cellulose absorption index, the lignin cellulose absorption index, the normalized difference lignin index, the plant senescence reflectance index. The foliage pigmentations can be controlled by the means of the anthocyanin reflectance index 1, the anthocyanin reflectance index 2, the carotenoid reflectance index 1, and the carotenoid reflectance index 2. The specificity of the presented indexes is described; the calculation formulas and its main straits are proposed.

Keywords: vegetation indices, chlorophyll, light, nitrogen, carbon, water, leaf pigments.

Bilynskiy Yosyp Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Knysh Bohdan P. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electronics and Nanosystems, e-mail: tutmos-3@i.ua

И. И. Билинский¹
Б. П. Кныш¹

Анализ характеристик и обоснование индексов растительности

¹Винницкий национальный технический университет

Проведен анализ литературных источников, выделены применяемые в исследованиях индексы контроля параметров растительности. К таким параметрам следует отнести наличие хлорофилла, содержание воды, эффективность использования света, наличие азота, углерода и листовых пигментов. Контроль наличия хлорофилла осуществляется с помощью дифференциального вегетационного индекса, индекса глобального мониторинга окружающей среды, инфракрасного вегетационного индекса, модифицированного простого соотношения, модифицированного почвенного вегетационного индекса 2, нелинейного индекса, нормализованного дифференциального вегетационного индекса, оптимизированного вегетационного индекса почвы, перенормализованного дифференциального вегетационного индекса, вегетационного индекса почвы, простого соотношения и тому подобное. Контроль содержания воды осуществляется с помощью индекса влажности, нормализованного дифференциального инфракрасного индекса, нормализованного дифференциального индекса воды, нормализованного многополосного индекса засухи, индекса диапазона воды. Контроль эффективности использования света осуществляется с помощью индекса фотохимического отражения, структурного интенсивного индекса пигмента, индекса коэффициента красного и зеленого спектров. Контроль наличия азота осуществляется с помощью нормализованного дифференциального индекса азота. Контроль наличия углерода осуществляется с помощью индекса поглощения целлюлозы, индекса поглощения целлюлозы и лигнина, нормализованного дифференциального индекса, индекса отражения старения растений. Контроль наличия листовых пигментов осуществляется с помощью индекса отражения антоцианина 1, индекса отражения антоцианина 2, индекса отражения каротиноида 1, индекса отражения каротиноида 2. Описаны особенности рассмотренных индексов растительности, приведены формулы для их вычисления и основные характеристики.

Ключевые слова: вегетационные индексы, хлорофилл, свет, азот, углерод, вода, листовые пигменты.

Билинский Иосиф Иосифович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и наносистем, e-mail: yosyp.bilynsky@gmail.com ;

Кныш Богдан Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и наносистем, e-mail: tutmos-3@i.ua