

А. М. Сабанський✉, **К. К. Голобородько**

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
просп. Науки, 72, м. Дніпро, Україна, 49045*

**АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НАЙПОШИРЕНІШИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ
ДЛЯ ОЦІНКИ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ У ДЕРЕВ**

У статті розглянуто спектральні вегетаційні індекси, завдяким яким можна здійснювати оцінку вмісту хлорофілу в наземній фітомасі. Проведено аналіз характеристик індексів та їх придатності до певних умов (урахування значного фонового шуму: особливості ґрунтового та рослинного покриву; низької висоти знімання тощо). Обрано 19 вегетаційних індексів (NDVI, SAVI, MSAVI, C_{Igreen}, C_{Irededge}, CVI, WDV_I, GNDVI, GOSAVI, GSAVI, EVI₂, ARVI₂, CCCI, MSRNir/Red, TSAVI, TNDVI, TVI, TCARI/OSAVI, TCARI), які можна ефективно застосовувати в дослідженнях для моніторингу екологічних та фізіологічних параметрів розрідженої деревної рослинності. Обґрунтовано вибір індексів, таких як NDVI, SAVI, C_{Igreen}, C_{Irededge} та WDV_I, які є сумісними з найпоширенішими спектральними каналами та ефективними для моніторингу нещільного рослинного покриву. Отримані результати свідчать, що обрані спектральні індекси мають забезпечити надійну оцінку фотосинтетичній активності деревних рослин, що є ключовими для багатьох завдань екологічного моніторингу.

Ключові слова: спектральні індекси, вегетаційні індекси, хлорофіл, оцінка вмісту хлорофілу, моніторинг екологічного стану дерев.

А. М. Sabanskyy✉, **К. К. Holoborodko**

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

**ANALYSIS OF THE MAIN CHARACTERISTICS
OF THE MOST COMMON SPECTRAL VEGETATION INDICES
FOR ASSESSING CHLOROPHYLL CONTENT IN TREES**

The article considers spectral vegetation indices (SVIs) that make it possible to assess the chlorophyll content within terrestrial phytomass. The characteristics of the indices and their suitability for certain conditions (including substantial background noise arising from soil and vegetation heterogeneity, low-altitude imaging, and related factors) were systematically analyzed. Nineteen vegetation indices (NDVI, SAVI, MSAVI, C_{Igreen}, C_{Irededge}, CVI, WDV_I, GNDVI, GOSAVI, GSAVI, EVI₂, ARVI₂, CCCI, MSRNir/Red, TSAVI, TNDVI, TVI, TCARI/OSAVI, TCARI) were selected as suitable for monitoring ecological and physiological parameters of sparse woody vegetation. The analysis of the indices was performed considering the technical specifications of commonly employed multispectral sensors, such as the Parrot Sequoia+ (Parrot SA, France), which operate primarily in the Green, Red, Red Edge, and Near-Infrared (NIR) spectral wavebands. In most applications, data acquisition is conducted from low altitudes using unmanned aerial vehicles (UAVs). The presence

✉ E-mail: sabanskiy@gmail.com

DOI: 10.15421/442509

of substantial background noise (e.g., from soil surface, herbaceous cover, or extraneous elements) necessitates the use of indices incorporating background correction mechanisms. Based on an extensive review of the literature and available empirical data, vegetation indices were selected that correspond to the spectral configuration of widely used multispectral sensors, exhibit sensitivity to chlorophyll content, and demonstrate compatibility with Leaf Area Index (LAI) estimation. The evaluation was conducted by assessing spectral compatibility, robustness to background interference, and efficiency in characterizing sparse woody vegetation typical of the Steppe Zone of Ukraine. As a result of this comparative analysis, nineteen vegetation indices were determined to be the most appropriate for monitoring the physiological and ecological status of sparse tree stands. These indices are compatible with the majority of multispectral systems operating in the Green, Red, Red Edge, and NIR wave length channels. All selected vegetation indices are capable of providing a reliable assessment of the photosynthetic activity. Indices such as the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), the Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI), and the Green Chlorophyll Index (CIgreen) take into account the influence of soil background and increase sensitivity to chlorophyll. Indices that use the Red Edge waveband, such as the Red Chlorophyll Index (CIrededge), showed high efficiency in assessing photosynthetic activity. However, most studies focus on dense vegetation or agricultural crops, while young trees with small crowns remain insufficiently studied.

Keywords: spectral indices, vegetation indices, chlorophyll, chlorophyll content estimation, trees state ecological monitoring.

Вступ

Нагальною проблемою для моніторингу будь-якого типу екосистем є здійснення екологічної оцінки стану рослинності [15]. Екологічна оцінка має базуватися на універсальних принципах [14], які можна застосувати для значної території одночасно в даний час та в майбутньому, спираючись на ретроспективні відомості. Саме дані дистанційного зондування відповідають таким вимогам. Тому розробка інструментів, які дозволять дешифрувати дистанційну інформацію для встановлення екологічного стану рослин, є важливою та актуальною задачею [16]. Однією із головних проблем дешифрування аерофотознімків є відсутність доступних інструментів, що дозволять установити фізіологічний стан зображених рослинних об'єктів.

На сьогодні відомо понад 150 індексів рослинності, однак лише незначна частина з них має реальне практичне застосування [21]. Тому під час дистанційної оцінки рослинного покриву постає необхідність у виборі відповідного індексу, адже існує широкий спектр специфічних завдань та умов їх використання [1]. У зв'язку з цим виникає потреба у проведенні порівняльного аналізу, який би найбільш повно охоплював усі індекси рослинності, що застосовуються на практиці, для оцінки стану деревної рослинності.

Метою нашого дослідження було провести аналіз основних характеристик найпоширеніших спектральних вегетаційних індексів для оцінки вмісту хлорофілу у дерев.

Матеріали та методи досліджень

Аналіз вегетаційних індексів здійснено з урахуванням найбільш поширених технічних вимог, що забезпечуються найбільш широко вживаними мультиспектральними сенсорами, наприклад Parrot Sequoia+ (Parrot SA, Франція). Під час зйомки переважно використовуються канали Green (550 нм), Red (660 нм), Red Edge (735 нм) та NIR (790 нм). У більшості випадків моніторинг здійснюється на невеликих висотах за допомогою безпілотного літального апарату. Значний фоновий шум (грунтовий покрив, трав'янистий покрив, сторонні предмети тощо) вимагає використання індексів із корекцією фону зйомки. На основі літературного аналізу та наданих даних було відібрано вегетаційні індекси, які відповідають спектральним каналам найпопулярніших сенсорів та є чутливими до хлорофілу, сумісними із оцінкою індексу листкової поверхні (LAI). Аналіз проводився шляхом оцінки спектральної сумісності та стійкості до фонового шуму та ефективності для варіантів розрідженої деревної рослинності, що відповідає природним умовам степової зони України.

Результати та їх обговорення

Результатом здійсненого аналізу характеристик існуючих вегетаційних індексів було обрання 19 найбільш оптимальних для використання у моніторингу стану розрідженої деревної рослинності (табл. 1). Ці індекси сумісні із більшістю мультиспектральних сенсорів, які використовують канали Green (550 нм), Red (660 нм), Red Edge (735 нм) та NIR (790 нм). Усі обрані вегетаційні індекси здатні забезпечити надійну оцінку фотосинтетичної активності дерева.

Дослідження вегетаційних індексів для оцінки хлорофілу та LAI мають давню історію та починаються з розробки диференційного вегетаційного індексу (NDVI) [18]. Сучасні індекси, такі як Вегетаційний індекс ґрунту (SAVI), Модифікований індекс рослинності, скорегований по ґрунтовому покриву (MSAVI), та Індекс Зеленого Хлорофілу (CIgreen), ураховують вплив ґрунтового фону та підвищують чутливість до хлорофілу. Індекси, що використовують канал Red Edge, наприклад Індекс Червоного Хлорофілу (CIrededge), показали високу ефективність для оцінки фотосинтетичної активності. Проте більшість досліджень зосереджені на щільній рослинності або сільськогосподарських трав'янистих культурах, тоді як молоді дерева з невеликими кронами залишаються недостатньо вивченими. Використання специфічного обладнання мультиспектральних сенсорів, таких як Parrot Sequoia+, для аналізу вмісту хлорофілу в таких умовах потребує додаткового обґрунтування вибору індексів.

Висновки

У роботі здійснено аналіз технічних параметрів найбільш широко вживаних вегетаційних індексів, що використовуються для моніторингу наземної фітомаси. Обрано 19 вегетаційних індексів (NDVI, SAVI, MSAVI, CIgreen, CIrededge, CVI, WDV, GNDVI, GOSAVI, GSAVI, EVI2, ARVI2, CCCI, MSRNir/Red, TSAVI, TNDVI, TVI, TCARI/OSAVI, TCARI), які можна ефективно застосовувати у дослідженнях для моніторингу екологічних та фізіологічних параметрів розрідженої деревної рослинності. Подано опис їх особливостей, наведено формули розрахунку та основні характеристики. Розроблена порівняльна характеристика узагальнює найбільш широкоживані індекси рослинності, які використовуються на практиці для моніторингу стану деревної рослинності.

Таблиця 1

Вегетаційні індекси для оцінки вмісту хлорофілу та оцінки індексу листкової поверхні (LAI)

Назва індексу	Формула	Характеристики (переваги / недоліки)	Джерело
1	2	3	4
Диференційний вегетаційний індекс (NDVI)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Проста та чутливість до фотосинтетично активної біомаси / Чутливість до ґрунтового покриття та атмосферних ефектів, знижена чутливість при щільній рослинності	Rouse, J.W., et al. (1973) [18]
Вегетаційний індекс ґрунту (SAVI)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red + L} \times (1 + L)$	Зменшений вплив ґрунтового покриття, краща точність у посушливих регіонах / Менш ефективний при щільній рослинності, чутливий до атмосферних впливів, потребує підбір коефіцієнта L	Huete, A.R. (1988) [11]
Модифікований індекс рослинності скорегований по ґрунтовому покриттю (MSAVI)	$\frac{2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - Red)}}{2}$	Зменшує шум ґрунтового покриття, точність у напівпосушливих та степових зонах, не потребує ручного підбору коефіцієнта L / Збільшує час обробки великих зображень	Qi, J., et al. (1994) [17]

1	2	3	4
Індекс Зеленого Хлорофілу (CIgreen)	$\frac{NIR}{Green} - 1$	Чутливість до хлорофілу через лінійну залежність/ Менш стійкий до змін освітлення та атмосферних умов, насичення для цільної рослинності	Gitelson, A.A., et al. (2003) [8]
Індекс Червоного Хлорофілу (CIrededge)	$\frac{NIR}{RedEdge} - 1$	Чутливість до хлорофілу/ Менш стабільний при сильному атмосферному розсіюванні (туман, аерозолі)	Gitelson, A.A., et al. (2003) [8]
Вегетаційний індекс хлорофілу (CVI)	$NIR \times \frac{Red}{Green^2}$	Чутливість до хлорофілу, корелює з LAI / Чутливість до ґрунтового покритву, менш стабільний для контрастного освітлення та тіні	Vincini, M., et al. (2008) [22]
Зважений індекс різниці покритву рослинності (WDVI)	$NIR - a \times Red$	Зручність інтерпретації з урахуванням особливостей ґрунтового покритву / Залежить від a , тому потребує додаткових більш складних розрахунків, менша чутливість для цільної рослинності	Clevers, J.G.P.W. (1989) [5]
Зелений нормалізований диференційний вегетаційний індекс (GNDVI)	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	Чутливість до хлорофілу / Менш чутливий до змін при щільній рослинності, більш високі вимоги до калібрування сенсорів	Gitelson, A.A. (2004) [6]

1	2	3	4
Зелений оптимізований вегетаційний індекс з коригуванням на ґрунтовий покрив (GOSAVI)	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green + 0.16}$	Чутливість до хлорофілу, зменшує вплив ґрунтового покриття / Менш чутливий до змін при щільній рослинності	Sripada, R.P. (2006) [19]
Веgetаційний індекс з коригуванням на розріджений зелений покрив (GSAVI)	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green + L \times (1 + L)}$	Чутливість до змін для розрідженої рослинності та оголеного ґрунту / Низька чутливість до змін у щільній рослинності	Sripada, R.P. (2006) [19]
Вдосконалений двосмуговий вегетаційний індекс (EVI2)	$L \times \frac{NIR - Red}{NIR + a \times Red + 1}$	Чутливість до змін у щільній рослинності, стабільніший до змін умов атмосферного розсіювання/ Потребує додаткового калібрування для різних типів рослинності	Jiang, Z., et al. (2008) [12]
Вдосконалений атмосферостійкий вегетаційний індекс (ARVI)	$-0.16 + 1.17 \times \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Стійкий до атмосферного розсіювання / Менш чутливий до змін при розрідженій рослинності	Kaufman, Y.J., & Tanre, D. (1992) [13]
Індекс умісту хлорофілу в покриву рослинності (CCI)	$\frac{NIR \times Red}{Green^2} + \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	Чутливий до хлорофілу / Низька чутливість до розрідженої рослинності	Baret, F., & Guyot, G. (1991) [2]
Модифікований простий індекс співвідношення (MSR _{Nir/Red})	$\frac{\frac{NIR}{Red} - 1}{\frac{NIR}{Red} + 1}$	Чутливість для щільної рослинності / Не враховує атмосферні впливи	Chen, J.M. (1996) [4]

1	2	3	4
Перетворений індекс рослинності з корекцією по ґрунтовому покриву (TSAVI)	$\frac{B \times (NIR - B \times Red - A)}{Red + B \times (NIR - A) + X \times (1 + B^2)}$	Зменшує вплив ґрунтового покриву / Складна формула та процес калібрування	Baret, F., & Guyot, G. (1991) [2]
Трансформований нормалізований диференційний вегетаційний індекс (TNDVI)	$\sqrt{\frac{NIR - Red}{NIR + Red} + 0.5}$	Збільшує контраст між розрідженим і щільним рослинним покривом / Менш універсальний для глобальних порівнянь без нормалізації	Tucker, C.J. (1979) [20]
Індекс поглинання трансформованого хлорофілу (TCARI)	$3 \times \left(\frac{RedEdge - Red}{RedEdge - Green} - 0.2 \times \frac{RedEdge - Red}{Red} \right)$	Чутливість до хлорофілу, мінімізує вплив ґрунтового покриву / Складна формула	Nabouandane, D. (2004) [9]
Комбінований індекс поглинання хлорофілу з корекцією на ґрунтовий покрив (TCARI/OSAVI)	$3 \times \left(\frac{RedEdge - Red}{RedEdge - Green} - 0.2 \times \frac{RedEdge - Red}{Red} \right) \times \frac{NIR - Red}{NIR + RED + 0.16}$	Чутливість до хлорофілу, зменшує вплив ґрунтового покриву / Чутливий до атмосферних умов, менш чутливий для розрідженої рослинності	Nabouandane, D., et al. (2002) [10]
Трикутний вегетаційний індекс (TVI)	$0.5 \times (120 \times (NIR - Green) - 200 \times (RED - Green))$	Чутливість до хлорофілу та щільності листяного покриву / Менш ефективний при розрідженому покриві або дуже сухих ґрунтах	Broge, N.H., & Leblanc, E. (2001) [3]

Бібліографічні посилання

1. [Білінський Й. Й., Книш Б. П.](#) Аналіз характеристик та обґрунтування індексів рослинності. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. 2. 7–14.
2. [Baret F., Guyot G.](#) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 1991. 35(2–3): 161–173.
3. [Broge N. H., Leblanc E.](#) Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*. 2001. 76(2): 156–165.
4. [Chen J. M.](#) Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for Boreal Applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1996. 22(3): 229–242.
5. [Clevers J. G. P. W.](#) Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf Area Index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment*. 1989. 29(1): 25–37.
6. [Gitelson A. A.](#) Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology*. 2004. 161(2): 165–173.
7. [Gitelson A. A., Andrés V., Ciganda V. S., Rundquist D. C., Arkebauer T. J.](#) Remote sensing of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*. 2005. 32(8): L08403.
8. [Gitelson A. A., Gritz Y., Merzlyak M. N.](#) Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*. 2003. 160(3): 271–282.
9. [Haboudane D., Miller J. R., Pattey E., Zarco-Tejada P. J., Strachan I. B.](#) 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*. 2004. 90(3): 337–352.
10. [Haboudane D., Miller J. R., Tremblay N., Zarco-Tejada P. J., Dextraze L.](#) Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 2002. 81(2–3): 416–426.
11. [Huete A. R.](#) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988. 25(3): 295–309.
12. [Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T.](#) Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*. 2008. 112(10): 3833–3845.
13. [Kaufman Y. J., Tanre D.](#) Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992. 30(2): 261–270.
14. [Kunakh O. M., Ivanko I. A., Holoborodko K. K., Lisovets O. I., Volkova A. M., Nikolaieva V. V., Zhukov O. V.](#) Modeling the spatial variation of urban park ecological properties using remote sensing data. *Biosystems Diversity*. 2022. 30(3): 213–225.
15. [Lovynska V., Stankevich S., Sytnyk S., Montzka C., Holoborodko K., Heilmeier H., Wiche O.](#) Estimating biomass of woody plants that grow in the different As-contaminated technosoils in the ore-bearing provinces of East Germany. *Biosystems Diversity*. 2023. 31(4): 91–97.

16. [Ocho V., Urbina-Cardona N. Tools for spatially modeling ecosystem services: Publication trends, conceptual reflections and future challenges. Ecosystem Services. 2017. 26\(A\): 155–169.](#)
17. [Oi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment. 1994. 48\(2\): 119–126.](#)
18. *Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium (NASA SP-351). 309–317.
19. [Sripada R. P., Heiniger R. W., White J. G., Meijer A. D. Aerial Color Infrared Photography for Determining Early In-Season Nitrogen Requirements in Corn. Agronomy Journal. 2006. 98\(4\): 968–977.](#)
20. [Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment. 1979. 8\(2\): 127–150.](#)
21. **Vegetation Indices.** [Electronic resource]. Available: <https://www.13harrisgeospatial.com/docs/VegetationIndices.html>
22. [Vincini M., Ermes F. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. Precision Agriculture. 2008. 9\(5\): 303–319.](#)

Надійшла до редколегії 06.11.2025 р.