

УДК 528.88:631.4:631.5

**ВИКОРИСТАННЯ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ У ТОЧНОМУ ЗЕМЛЕРОБСТВІ: ПЕРЕХІД
ВІД УНІВЕРСАЛЬНИХ ПІДХОДІВ ДО СИСТЕМИ, ОРІЄНТОВАНОЇ НА ТИП
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ КУЛЬТУРИ**

**THE USE OF VEGETATION INDICES IN PRECISION AGRICULTURE: THE SHIFT FROM
GENERALISED APPROACHES TO A CROP-SPECIFIC FRAMEWORK**

Дмитро Касіячук

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Івано-Франківськ, Україна*

Вступ. Розвиток точного землеробства безпосередньо пов'язаний із впровадженням геоінформаційних систем та даних дистанційного зондування Землі, які забезпечують оперативну оцінку стану сільськогосподарських угідь. Найбільш поширеним інструментом такого оцінювання залишаються вегетаційні індекси, серед яких домінує NDVI. Водночас практика його використання часто має формальний характер і не враховує ні біологічних особливостей культур, ні фаз їх розвитку.

Аналіз сучасних досліджень показує, що застосування одного індексу не дозволяє адекватно описати складні біофізичні процеси в агроценозах, особливо в умовах високої щільності рослинного покриву, змін водного режиму чи дефіциту елементів живлення.

Метою роботи є узагальнення міжнародного досвіду використання вегетаційних індексів у точному землеробстві та формування підходу до їх вибору залежно від культури та задач моніторингу.

Основні завдання: 1) проаналізувати обмеження використання універсальних індексів; 2) визначити ефективні індекси для основних сільськогосподарських культур; 3) узагальнити комбінації індексів, підтвержені експериментальними дослідженнями; 4) сформуванню узагальнену таблицю для практичного використання.

Дослідження зосереджене на дистанційному моніторингу стану сільськогосподарських культур із використанням вегетаційних індексів та їх комбінацій для оцінки біофізичних параметрів агроценозів.

Попри значну кількість існуючих індексів, їх застосування у практиці точного землеробства часто зводиться до використання NDVI як універсального показника.

Такий підхід має низку обмежень:

- ефект насичення при високій біомасі;
- чутливість до впливу ґрунтового фону;
- обмежена здатність до виявлення стресових станів рослин.

Водночас сучасні напрацювання демонструють, що значно кращі результати досягаються при використанні комбінацій індексів, зокрема із залученням red-edge та водочутливих показників.

Проблема вибору індексів рослинності та результати дослідження. Дослідження показують, що ефективність вегетаційних індексів суттєво залежить від спектральних характеристик та умов застосування. Зокрема, індекси на основі red-edge діапазону (NDRE, MTCI) демонструють високу чутливість до вмісту хлорофілу та азоту, що підтверджено для зернових культур. Водні індекси (NDWI) дозволяють оцінювати водний стрес, тоді як індекси, адаптовані до ґрунтового фону (SAVI, MSAVI), є ефективними на ранніх стадіях розвитку.

Важливим є те, що універсальні індекси не забезпечують стабільної точності для різних культур. Наприклад, для кукурудзи та сої кращі результати демонструють комбінації NDVI та NDRE, тоді як для пшениці ефективними є поєднання MCARI та NDRE.

На основі аналізу міжнародних публікацій узагальнено використання вегетаційних індексів для основних культур, поширених в Україні (табл. 1).

Таблиця 1. Рекомендовані індекси та їх комбінації для сільськогосподарських культур

Культура	Основні задачі	Індекси / комбінації	Джерела
Кукурудза	урожай, біомаса	NDVI + GNDVI	Jin et al., 2024; Xue & Su, 2017
	азот	NDRE, MTCI	Bossung et al., 2022; Clevers & Gitelson, 2013
	висока біомаса	EVI + NDRE	Huete et al., 2002; Delegido et al., 2011
Пшениця	азот	MCARI + NDRE	Delegido et al., 2011; Bossung et al., 2022
	урожай	NDVI + EVI	Xue & Su, 2017; Huang et al., 2021
	старіння	PSRI	Merzlyak et al., 1999
Соя	урожай	NDVI + NDRE	Jin et al., 2024
	біомаса	GNDVI + SAVI	Qi et al., 1994
	водний стрес	NDWI	Gao, 1996
Соняшник	біомаса	NDVI + EVI	Huete et al., 2002
	стрес	NDWI + NDRE	Gao, 1996; Delegido et al., 2011
Ріпак	ранні стадії	SAVI, MSAVI	Qi et al., 1994
	азот	NDRE	Clevers & Gitelson, 2013
Ячмінь	урожай	NDVI + EVI	Xue & Su, 2017
	старіння	PSRI	Merzlyak et al., 1999

Висновки. Використання NDVI як універсального індексу є недостатнім для комплексної оцінки стану сільськогосподарських культур. Ефективність вегетаційних індексів визначається типом культури та умовами їх застосування. Найбільш обґрунтованим підходом є використання комбінацій індексів, що дозволяє підвищити точність оцінювання біофізичних параметрів. Узагальнена таблиця може бути використана як основа для формування стор-specific підходів у геоінформаційних системах точного землеробства.

Список використаних джерел

1. Bossung C., Schlerf M., Machwitz M. Estimation of canopy nitrogen content in winter wheat from Sentinel-2 images for operational agricultural monitoring. *Precision Agriculture*. 2022. Vol. 23. P. 2229–2252.
2. Clevers J. G. P. W., Gitelson A. A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 134. P. 234–242.
3. Delegido J., Verrelst J., Alonso L., Moreno J. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for chlorophyll content. *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. P. 1245–1256.
4. Gao B. C. NDWI-A normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58. P. 257–266.
5. Huete A. et al. Overview of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. P. 195–213.
6. Jin X. et al. High-throughput phenotyping in maize and soybean genotypes using vegetation indices. *Plant Methods*. 2024. Vol. 20.
7. Merzlyak M. N. et al. Non-destructive detection of pigment changes during leaf senescence. *Physiologia Plantarum*. 1999. Vol. 106. P. 135–141.
8. Qi J. et al. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 48. P. 119–126.
9. Xue J., Su B. Significant remote sensing vegetation indices. *Journal of Sensors*. 2017. Article ID 1353691.
10. Huang S. et al. A Commentary Review on the Use of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Era of Popular Remote Sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021. Vol. 32.