
СТВОРЕННЯ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ПОТРЕБ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА ЗАСОБАМИ MATHCAD

Н. А. ПАСІЧНИК, кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
ORCID 0000-0002-2120-1552,

кафедра агрохімії та якості продукції рослинництва,
електронна адреса: N.Pasichnyk@nubip.edu.ua.

В. П. ЛИСЕНКО, доктор технічних наук, професор,
ORCID:0000-0002-5659-6806,

кафедра автоматики та робототехнічних систем,
електронна адреса: Lysenko@nubip.edu.ua

О. О. ОПРИШКО, кандидат технічних наук, доцент,
ORCID: 0000-0001-6433-3566,

кафедра автоматики та робототехнічних систем,
електронна адреса: ozon.kiev@nubip.edu.ua

В. О. МІРОШНИК, кандидат технічних наук, доцент
ORCID: 0000-0001-5329-0337,

кафедра автоматики та робототехнічних систем,
електронна адреса: mir49@meta.ua

Д. С. КОМАРЧУК, кандидат технічних наук, доцент
ORCID: 0000-0003-3811-6183,

кафедра автоматики та робототехнічних систем,
електронна адреса: dmitruyk@gmail.com

Національний університет біоресурсів та природокористування України

Анотація. Більшість наявних вегетаційних індексів розробляли під супутникові платформи і водночас не розглядалася можливість їхнього використання для управління урожаєм. Розроблення методу створення вимірювальних індексів за результатами обробки даних дистанційного зондування, отриманих від БПЛА, є актуальною, що і склало мету роботи. Експериментальні дослідження проводили у 2016 – 2017 рр. на дослідних ділянках із пшеницею у тривалому польовому стаціонарі кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва НУБіП України. Для моніторингу використовувалися камери FC200 та GoPro HERO 4 із IR об'єктивом відповідно для оптичного й інфрачервоного діапазонів. Обчислення проводились у середовищі MathCad. Поряд із величинами інтенсивностей кольору, для створення вегетаційних індексів враховували площу їхньої горизонтальної проєкції, для визначення якої проводили ідентифікацію рослин і ґрунту. Ідентифікацію в оптичному діапазоні здійснювали на базі образів об'єктів, що ґрунтуються на величині різниці зеленого та синього спектральних каналів. Додатково враховували вплив затінення нижніх листків пшениці верхніми.

На основі проведених досліджень і математичної обробки результатів запропонований метод створення вимірювальних вегетаційних індексів, в основу якого покладений регресійний аналіз зв'язків між інтенсивностями складових кольорів рослин та результатом, на який ці складові впливають. За створення вегетаційних індексів, окрім лінійної регресії, доцільно розглядати й можливий вплив ефекту взаємодії факторів. Запропонований вегетаційний індекс для визначення стану азотного живлення, адаптований для диференційоване внесення добрив наземним обладнанням. Введення до рівняння регресії (вегетаційного індексу) додаткового розрахункового параметру – площі горизонтальної проекції рослин – має перспективи для підвищення точності за удосконалення методу ідентифікації рослинних насаджень.

Ключові слова: дистанційний моніторинг посівів, БПЛА, безпілотники, рослинний покрив, спектральна зйомка, програмне забезпечення

Актуальність.

Технології точного землеробства, використання яких є неодмінною умовою високої рентабельності рослинництва, потребують упровадження спеціалізованих вегетаційних індексів, адаптованих до обладнання для внесення різних засобів, зокрема, добрив. Безпілотні літальні апарати (далі БПЛА) є платформою, де розміщують цифрове фото обладнання для отримання знімків із високою здатністю розрізнення, за конкурентоспроможної вартості. Більшість наявних вегетаційних індексів розробляли саме під супутникові платформи, для оцінки вегетативної маси, можливість їхнього використання для управління врожаєм не розглядалась.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

На ринку представлено спеціалізоване програмне забезпечення Agisoft, описане в роботі (Yinuo Liu et al., 2019), що надає користувачеві можливість введення власного рівняння для вегетаційного індексу. Проте, методи-

ка створення індексів для управління врожаєм не наводиться.

Обробка результатів спектрального зондування можлива на основі використання стандартних математичних програмних продуктів, котрі надають користувачеві можливості для регресійного аналізу. Прикладом таких продуктів є MATLAB (Chao Sun et al., 2018) та Mathcad (Pasicznyk N.A. et al., 2019). Mathcad, з аналізу наявних програм, є більш універсальним та розповсюдженим серед фахівців-аграріїв.

Спектральний моніторинг проводиться як із використанням мультиспектральних комплексів, таких як MicaSense RedEdge та Parrot SEQUOIA (Jyun-Ping Jhan et al., 2018), так і створених на базі стандартних Екшн камер, зі спеціалізованими об'єктивами, такими як MAPIR Survey (Hambrecht L., 2019). Дешеві Екшн камери, пристосовані для екстремальних умов експлуатації, є більш універсальними, оскільки можуть використовуватися і для інших потреб господарства.

Орієнтація вегетаційних індексів для розрахунку норм внесення агрохімічних засобів має свою специфіку. З

огляду на наявну номенклатуру обладнання, а також різноманіття сортів та гібридів рослин, аграрії потребують метод створення спеціалізованих вимірювальних вегетаційних індексів, зокрема, для раціонального використання добрив, фізіологічно активних речовин тощо. Тому розроблення такого методу створення вимірювальних індексів за результатами обробки даних дистанційного зондування, отриманих від БПЛА, є актуальною, що і склало мету нашої роботи.

Матеріали і методи дослідження.

Дистанційний моніторинг проводили, зокрема, 19.05.2017 на полях ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція», у тривалому польовому стаціонарі кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва (GPS координати: 50°4'28» N, 30°13'20» E.). Поверхня ґрунту була в повітряно-сухому стані (рис. 1).

Спектральне обладнання. Для моніторингу використовували RGB камеру

PHANTOM VISION FC200, та Екшн камеру GoPro HERO 4 з інфрачервоним (далі ІЧ) об'єктивом. Завдяки спеціалізованому ІЧ об'єктиву отримують зображення для трьох каналів у псевдокольорах, що відповідає різним комбінаціям червоного та інфрачервоного спектрів (Lysenko V., 2018).

Калібрування щодо змін освітлення здійснювали на базі даних про налагодження фотоапарату з файлів exiff, що автоматично створюються фотоапаратом у момент зйомки, зі збереженням файлу у форматі jpeg. Параметри налагодження фотоапарату: «Баланс білого» – Сонячно, експокомпенсація – 0.

Проведення обчислень. Для обчислення використовували програмне середовище MATHCAD (version 14.0.0.163), котре представляє файл зображення, що є поєднанням трьох масивів даних, кожен із яких несе інформацію про окремий компонент кольору. Вихідне зображення, де були зафіксовані всі об'єкти, попередньо розділялося на окремі дослідні ділянки засобами Microsoft Picture Manager (14.0.4750.1000).



Рис. 1. Політ БПЛА з камерою, оснащеною інфрачервоним об'єктивом



Рис. 2. Фотознімок дослідного поля стаціонару в оптичному діапазоні (RGB)

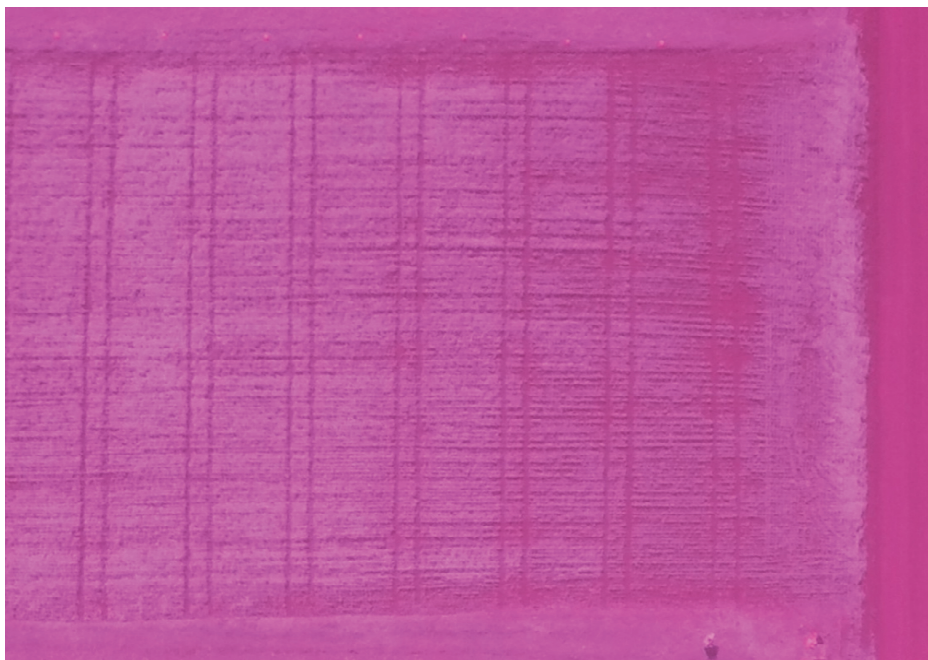


Рис. 3 Фотознімок дослідного поля стаціонару в псевдокольорах, за використання інфрачервоного об'єктиву (iR)

Організація дослідних ділянок посівів. Для досліду з пшеницею озимою, сорт Колонія, що перебувала в стадії вегетації вихід у трубку, було використано такі варіанти внесення добрив: 1) без добрив (контроль); 2) Р; 3) РК; 4) НРК (рекомендована норма); 5) НРК (1,5 рекомендовані норми). Уміст азоту в сухій масі рослин визначали фотометричним методом із реактивом Несслера.

Мінімальна кількість добрив у правій частині знімків (біля дороги), максимальна – у лівій (показано на рис. 2 та 3).

Результати дослідження та їх обговорення.

Ідентифікація об'єкту. Інтенсивність складових кольору, отриманих за допомогою ПЧ об'єктиву для ділянок, визначали з використанням каскадної фільтрації за методикою (Pasicnyk N.A. et al., 2019). Для оптичного діапазону не вдалося виявити спектральний канал для впевненої ідентифікації ґрунту, тому на базі методики, наведеної в роботі (Xiuliang Jin et al., 2017) було запропоновано власну методику ідентифікації, що ґрунтується на розпізнаванні образу об'єкту. Аналізом спектральних показників пшениці (зелений колір) та ґрунту (сірий колір) було встановлено, що для пшениці інтенсивність зеленої складової кольору більша за синю або червону на майже 20 одиниць, а для ґрунту всі складові приблизно однакові. Отже, ідентифікація рослини можлива за оцінки величини різниці між зеленою та червоною чи синьою складовими кольору. Використання саме синьої складової для оптичного діапазону зумовлене тим, що червона більш тісно залежить від стану мінерального живлення рос-

лин (Korobiichuk I. et al., 2018). Тому, піксель зображення ідентифікували як пшеницю, якщо виконувалась умова $G-B \geq \text{Wheat}$. Величину Wheat для досліджень прийняли рівною 20, проте для інших сортів чи гібридів на інших етапах вегетації можливі свої значення цієї величини. Налагодження системи фільтрації на базі образу об'єкту доцільно проводити за еталонними зразками рослин, отриманими в польовому стаціонарі або у фітокамері.

Врахування тіні. Вчені (Xiuliang Jin et al., 2017) у своїх дослідженнях розглядали лише початкові етапи вегетації і, відповідно, лише 2 можливих варіанти ідентифікації об'єкту – рослина чи ґрунт, проте на етапі вегетації «вихід у трубку» можливі й інші варіанти – рослина або ґрунт у тіні від інших рослин. Для врахування впливу фіксації рослин у тіні були проведені додаткові дослідження, де в межах єдиного кадру ділянки стаціонару перебували з різним ступенем освітлення через тіні від хмар (рис.4). Для отримання відтворюваних даних для проведення дослідів вибирали такі знімки, де величина світлового числа становила $12,7 \pm 0,1$.

Було встановлено, що за наявності тіні величина інтенсивності складових кольору зменшується, проте величина різниці між зеленою та синьою чи червоною складовими залишається практично незмінною. Отже, фіксація рослин у тіні впливатиме на результати спектрального моніторингу, особливо за низької щільності посівів. Тому, для подальших досліджень обирали ділянки, де значення інтенсивності складової кольору перевищувало 80 одиниць.

Окрім спектральних показників відфільтрованих даних, додатково обчислювали, яка частина від загаль-



Рис.4. Фото в оптичному діапазоні дослідних ділянок за наявності тіні хідмар, де w1-3 та f1-3 – ділянки щільних посівів пшениці та рілля за різних ступенів затінення відповідно

ної площі ділянки припадає на горизонтальну проекцію (купол) рослин. Результати спектрального моніторингу представлені в таблиці 1.

Аналіз даних таблиці дає змогу зробити висновок, що для всіх спектральних вимірювальних каналів інтенсивність складових кольору рослин і величин ідентифікованої горизонтальної площі проекції рослин (%) спостерігається певна залежність від вмісту азоту. Бажаним для аналізу є лінійний характер залежності. Апроксимація результатів експерименту саме такої залежності дає коефіцієнт детермінації (R^2) для оптичного об'єктиву (0.6 – 0.8), а для ПЧ – (0.9 – 0.93). Апроксимації даних лінійної залежності щодо ідентифікованої площі горизонтальної проекції дали коефіцієнт детермінації (R^2) для

оптичного й ПЧ об'єктивів 0.77, і 0.46 відповідно. Слід зазначити, що навіть за найбільшого значення R^2 , що було зафіксоване для каналу iR1, середньоквадратична похибка становила 11.2.

Типовим рішенням для диференційованого внесення агрохімічних засобів є управління швидкістю пересування наземного обладнання, для якого оптимальним є лінійний характер залежності між швидкістю та нормою внесення. Оскільки для наведених у таблиці даних проявляється кореляційний зв'язок між умістом азоту, інтенсивностями складових кольору й розрахованою на цій основі площею горизонтальної проекції, доцільно розглянути варіант врахування у вегетаційному індексі кількох факторів-показників. Для цього може використовуватися як лінійна регре-

1. Інтенсивність складових кольору рослин для оптичного та ІЧ об'єктивів (відповідно R, G, B; iR1, iR2, iR3) та ідентифікована площа горизонтальної проєкції рослин для ділянок s

| № ділянки | Вміст азоту | Оптичний об'єктив | | | | ІЧ об'єктив | | | |
|-----------|-------------|-------------------|-----|-----|-------|-------------|-----|-----|-------|
| | | R | G | B | s, % | iR1 | iR2 | iR3 | s, % |
| 0 | 2,1 | 103 | 120 | 106 | 0,774 | 195 | 75 | 158 | 0,734 |
| 1 | 2,4 | 99 | 121 | 105 | 0,831 | 199 | 80 | 166 | 0,917 |
| 2 | 2,8 | 89 | 117 | 94 | 0,832 | 204 | 87 | 175 | 0,993 |
| 3 | 3,7 | 87 | 116 | 91 | 0,872 | 207 | 90 | 179 | 1,000 |
| 4 | 3,7 | 81 | 113 | 89 | 0,898 | 207 | 90 | 179 | 0,998 |
| 5 | 4,6 | 78 | 112 | 86 | 0,92 | 212 | 96 | 186 | 1,000 |
| 6 | 3,7 | 78 | 109 | 84 | 0,935 | 207 | 91 | 180 | 1,000 |

сія, так і лінійна регресія з ефектом взаємодії факторів, коли окремі показники представлені в рівнянні у вигляді добутку (рис. 5).

У розрахунках розглядали такі комбінації вимірювальних каналів: RGB, RsB, RGBs, та R1R2R3, R1sR3, R1R2R3s. Для багатofакторної лінійної регресійної моделі бути отримані такі результати для середньоквадратичної похибки: 0.328, 0.339, 0.328

та 0.284, 0.176, 0.179 відповідно. Для лінійної регресії з ефектом взаємодії середньоквадратична похибка становила відповідно 0.342, 0.346, 0.448 та 0.235, 0.415, 0.168.

Отже, поклавши за основу величину середньоквадратичної похибки, визначення кількості азоту (A) для зазначеного сорту пшениці у фазу виходу в трубку пропонуємо використовувати вегетаційний індекс, адаптова-

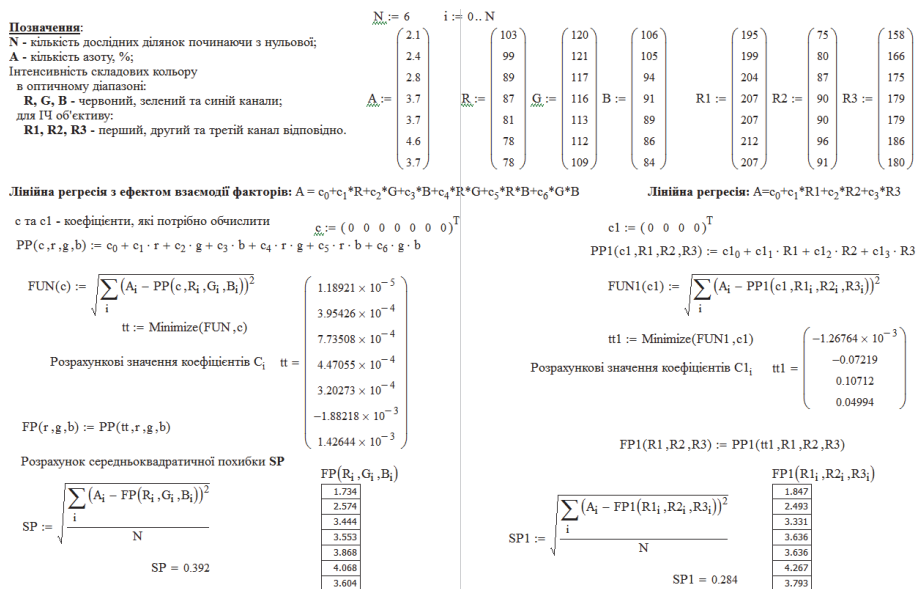


Рис. 5. Програма обчислення коефіцієнтів вегетаційного індексу

ний для диференційованого внесення добрив (враховується не лише площа горизонтальної проєкції рослин, але й ефект взаємодії факторів):

$$A = 3.5 \cdot 10^{-5} \cdot R1 - 1.7 \times 10^{-5} \cdot R2 - 6.1 \cdot 10^{-5} \cdot R3 + 3.4 \cdot 10^{-3} \cdot R1 \cdot R2 - R1 \cdot R3 \cdot 10^{-3} - 1.4 \cdot 10^{-3} \cdot R2 \cdot R3 - 9.8 \cdot 10^{-4} \cdot R1 \cdot s - 4 \cdot 10^{-4} \cdot R2 \cdot s - 8.8 \cdot 10^{-4} \cdot R3 \cdot s$$

За використання ІЧ об'єктиву кращі результати були отримані застосуванням лінійної регресії з ефектом взаємодії лише спектральних показників.

Для оптичного діапазону введення додаткового параметру, а саме площі горизонтальної проєкції s , що є похідною від величин інтенсивності складових кольору, не призвело до зменшення середньоквадратичної похибки.

Введення площі поверхні горизонтальної проєкції рослин у вегетаційні індекси є перспективним, вплив цього фактора буде зростати з удосконаленням ідентифікації рослин. Це забезпечується як вищою здатністю розрізнення знімків, так і використанням альтернативних форматів збереження даних, із фіксацією величин кожного пікселю, а не певної їхньої кількості, як передбачено в стандартному для побутових камер форматі jpeg.

Висновки і перспективи.

Запропоновано метод створення вимірювальних вегетаційних індексів, в основу якого покладено регресійний аналіз зв'язків між інтенсивностями складових кольорів рослин та результатом, на який ці складові впливають. Для його реалізації рекомендується до використання математичне програмне забезпечення MATHCAD.

У створенні вегетаційних індексів, окрім лінійної регресії, доцільно

розглядати й можливий вплив ефекту взаємодії факторів.

Запропоновано вегетаційний індекс для визначення стану азотного живлення, адаптований для диференційованого внесення добрив наземним обладнанням.

Введення до рівняння регресії (вегетаційного індексу) додаткового розрахункового параметру – площі горизонтальної проєкції рослин – має перспективи для підвищення точності за умови вдосконалення методу ідентифікації рослинних насаджень.

References

1. Yinuo Liu, Shishi Liu, Jing Li, Xinyi Guo, Shanqin Wang, Jianwei Lu (2019) Estimating biomass of winter oilseed rape using vegetation indices and texture metrics derived from UAV multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105026. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105026>.
2. Chao Sun, Sergio Fagherazzi, Yongxue Liu (2018) Classification mapping of salt marsh vegetation by flexible monthly NDVI time-series using Landsat imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 213, 61-80. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.08.007>.
3. N.A.Pasichnyk, O.O.Opryshko, D.S.Komarchuk, V.O.Miroshnyk (2019) Experience in using mathcad to analyze data from UAVS for remote sensing of crops. *Roslynnytstvo ta gruntoznavstvo*, 286, 244-250;
4. Jyun-Ping Jhan, Jiann-Yeou Rau, Norbert Haala (2018) Robust and adaptive band-to-band image transform of UAS miniature multi-lens multispectral camera. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 47-60, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.12.009>.
5. L.Hambrecht, R.P.Brown, A.K.Piel, S.A.Wich (2019) Detecting 'poachers' with drones: Factors influencing the probability of

- detection with TIR and RGB imaging in miombo woodlands, Tanzania. *Biological Conservation.*, 233, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.02.017>.
6. V.Lysenko, S.Shvorov, O.Opryshko, N.Pasichnyk, D.Komarchuk (2018) Information support of Some automated systems of remote monitoring of planted areas state. *Control Systems: Theory and Applications*, 285.
 7. Xiuliang Jin, Shouyang Liu, Frédéric Baret, Matthieu Hemerlé, Alexis Comar (2017) Estimates of plant density of wheat crops at emergence from very low altitude UAV imagery. *Remote Sensing of Environment.* 198, 105-114, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.007>.
 8. Igor Korobiichuk, Vitaliy Lysenko, Oleksiy Opryshko, Dmyriy Komarchyk, Natalya Pasichnyk, AndrzejJuś (2018) Crop monitoring for nitrogen nutrition level by digital camera / *Automation 2018. AUTOMATION 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing.* Springer, 43, 595-603.

N. A. Pasichnyk, V. P. Lysenko, O. O. Opryshko, V. O. Miroshnyk, D. S. Komarchuk (2020). THE CREATION OF VEGETATION INDICES FOR THE NEEDS OF PRECISION AGRICULTURE BY MEANS OF MATHCAD. PLANT AND SOIL SCIENCE, 11(2): 50–58. <https://doi.org/10.31548/agr2020.02.050>

Abstract. Most of the existing vegetation indices were developed for the satellite platforms and, at the same time, didn't consider their use for crop management. The development of a method of creating measurement indices based on the results of the processing of remote sensing data obtained from UAVs is relevant, which is the purpose of the work. Experimental studies were carried out in 2017 in a long-term field stationary of the Department of the Agrochemical and Agricultural products of NULES of Ukraine. For monitoring, the FC200 and GoPro HERO 4 iZ IR-cameras were used for optical and infrared bandwidths. The calculation was carried out in the environment of MathCad. The method of developing the measuring vegetation indices was suggested, which is based on the regression link analysis between the intensity of the color components and the result, which these components affect. When creating vegetation indices besides linear regression, we can consider and possible impact of the interaction factor. The vegetation index was suggested for state determination of the condition of the nitrogen nutrition, adapted for differential fertilizing application with the use of ground equipment. The introduction to the regression (vegetation index) additional design parameter - the area of the horizontal projection of the plants has the prospect for increased accuracy provided improvement of the method of identification of plantations.

Keywords: remote monitoring of crops, UAV, unmanned aerial vehicles, vegetation cover, spectral shooting, MathCAD software.