

ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ АГРОФІТОЦЕНОЗІВ ІЗ ПЛАТФОРМИ БПЛА ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ ЖИВЛЕННЯ РОСЛИН

Н.А. Пасічник¹, О.О. Опришко¹, О.Г. Тараріко²

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)
e-mail: n.pasichnyk@nubip.edu.ua; ORCID: 0000-0002-2120-1552
e-mail: ozon.kiev@nubip.edu.ua; ORCID: 0000-0001-6433-3566

² Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: tarariko@ukr.net; ORCID: 0000-0002-5132-0157

Безпілотні (дистанційно керовані) літальні апарати (БПЛА) є інноваційним устаткуванням для моніторингу агрофітоценозів, що позбавлене низки принципових недоліків супутників щодо доступності, вартості, здатності розрізнення знімків. Однак, якість, відтвореність та придатність даних спектрального моніторингу посівів сільськогосподарських культур для процесів управління врожаєм залишаються актуальними питаннями. Оскільки в концепції управління врожаєм дистанційний моніторинг є необхідною складовою, розроблення методики оцінювання придатності спектральних даних для розрахунку агрохімічних практик стало метою роботи. Аналіз літературних даних показав, що залежність кількості пікселів від значень інтенсивності складових кольору для рослин і ґрунту описується Гауссовим (нормальним) розподілом і відхилення зумовлюється накладанням розподілів від різних зафіксованих на фотознімку об'єктів. Дослідження проводили у 2017–2020 рр., аналізуючи стресовий стан рослин, зумовлений дефіцитом елементів живлення. Для моніторингу використовували БПЛА із спеціалізованим спектральним комплексом Slantrange із штатним програмним забезпеченням Slantview та камерою видимого спектра FC200 (від БПЛА Phantom 2). Перевірку проводили на полях пшениці озимої, результат підтвердив оптимальність саме Гауссового розподілу для спектрального моніторингу посівів пшениці. Встановлено, що аналіз відповідності характеру розподілу за спектральними каналами, а саме наявність двох і більше максимумів у графічному його описі свідчить про нерівномірність входження рослин у стадію вегетації або ж наявність сторонніх об'єктів. Оцінка придатності даних може здійснюватися на базі еталонних значень ширини розподілу для спектральних каналів. Це дає змогу стверджувати про доцільність введення в набори штатних вегетаційних індексів геоінформаційних систем додаткових пакетів, що відображають саме спектральні канали.

Ключові слова: спектральний моніторинг, вегетація рослин, безпілотні літальні апарати, дистанційно керовані літальні апарати, розподіл Гаусса, вегетаційні індекси, інтенсивність кольору.

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) є інноваційним устаткуванням для моніторингу агрофітоценозів, яке позбавлене низки принципових недоліків супутників щодо доступності, вартості, здатності розрізнення знімків. Однак методичні питання інформативності й відтворюваності даних, придатності такого моніторингу для управління врожаєм залишаються актуальними.

Частіше конструктори зосереджують свою увагу саме на вдосконаленні спектрального обладнання, проте є і методологічні проблеми щодо сприйняття та інтерпретації інформації від пристроїв технічного зору. Більшість вегетаційних індексів, що на цей час пропонуються для інтерпретації даних від БПЛА, таких як NDVI, розроблялі під супутникові платформи із притаманною їм низькою здатністю розрізнення знімків, коли на кожен піксель припадає група рослин. Індекси, що розроблялись на базі

концепції «грунтової лінії», були призначені, насамперед, для оцінювання наявності й відносної щільності біомаси, питання ж управління врожаєм потребують інших методичних підходів щодо моніторингу агрофітоценозів. «Грунтову лінію» описали Кауз і Томас у 1976 р. [1] як лінійну залежність між яскравостями червоного та ближнього інфрачервоного спектрів, для відокремлення ґрунту у спектральних зображеннях супутникового моніторингу. Необхідно враховувати, що здійснення агрохімічних заходів, зокрема підживлення рослин, має здійснюватись лише у визначенні стадії вегетації, часто дуже вузькі періоди. Однак стан розвитку рослин у агрофітоценозі визначається багатьма чинниками, а відтак, у межах одного поля рослини нерівномірно входять у наступну стадію, тим більше мікростадію вегетації. Відтак, обчислення середнього значення для ділянки, притаманне супутниковим рішенням, є помилковим. Наразі питання оцінювання придатності результатів спектрального моніторингу фітоценозів не вирішене. Розроблення методики оцінювання придатності спектральних даних дистанційного моніторингу агрофітоценозів як необхідної складової концепції управління їх продуктивністю і стало метою нашої роботи.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Спектральні показники об'єктів критично залежать від стану освітлення, і відтворюваність даних дослідники намагаються забезпечити поєднанням комплексу технічних та організаційних заходів. У роботі Helge Aasen зі співавторами [2] розглянуто питання побудови 3D моделей рослин, у яких для забезпечення точності запропоновано методику поєднання даних від кількох прольотів. Зважаючи на цікаві та обнадійливі результати, така методика вимагатиме кількох прольотів БПЛА посліпль у різних напрямках, що непридатне для промислових масштабів. Підхід щодо визначення особливостей куполу рослин за масового фенотипування з використанням

БПЛА, на основі порівняння отриманих портретів з еталонними шаблонами показано в роботі Fusang Liu та ін. [3] (від авторів: терміном «купол рослин» у дистанційному зондуванні прийнято називати спектральну проекцію на горизонтальну поверхню). Інформація про габарити рослин є корисною для визначення стресових станів, проте на початкових стадіях вегетації для точної ідентифікації потрібна висока здатність розрізнення знімків, яку можна отримати лише з малих висот, що не сприятиме масштабуванню технології для промислових потреб. Альтернативним технічним засобом для оцінки габаритів рослин є LiDARи, описані в оглядовій статті Yue Pan та ін. [4]. Водночас, для такого інноваційного обладнання на повітряних платформах невід'ємними будуть істотні похибки для малогабаритних рослин із шириною листків у кілька міліметрів, що відображено в роботі Tai Guoa та ін. [5].

Інший підхід, заснований на використанні еталонних значень спектральних показників рослин для ідентифікації розповсюдження шкідників лісу, описаний у роботі Per-Ola Olsson та ін. [6]. Оцінку, побудовану на фіксації відхилення від сезонних змін NDVI, розраховано на різні етапи вегетації, оскільки супутникова зйомка здійснюється з високою періодичністю і можна вибрати дані для окремої стадії вегетації. Подібний підхід щодо вибору спектральних даних із наявного масиву швидко змінюваних даних показано в роботі Ameer Shakayb Arsalaan та ін. [7] на прикладі лісових пожеж. Однак за звичайних умов для управління агрофітоценозами господарства повинні мати можливість на базі єдиного вильоту прийняти рішення про потребу додаткових польотів, що передбачає наявність вільного устаткування.

Оригінальний підхід щодо ідентифікації стану рослин в умовах змін їх габаритів на прикладі буярку цукрового показано в роботі Yang Cao Liu та ін. [8]. Дослідники запропонували новий вегетаційний індекс WDRVI (wide-dynamic-range vegetation index), у який введений додатковий коефіцієнт для інфрачервоного каналу. Однак,

на виробництві досягнуто збільшення точності до 5% має ще окупити затрати на визначення динамічно змінюваних коефіцієнтів для інфрачервоного каналу. Тобто, найперспективнішим є підхід заснований на порівнянні спектральних показників із певними еталонними зразками.

Спектральні показники рослин, навіть тих, що перебувають в однаковій стадії вегетації, мають певні відмінності. Для отримання усередненого значення для рослин, за фіксації у фотознімку ґрунту, в роботі Yaokai Liu та ін. [9] запропонували використовувати комбінації Гауссового розподілу, де фіксували діапазони, що належали окремо рослинам і ґрунту. Були отримані позитивні результати, проте здатність розрізнення знімків із висоти 3 м була надвисока, що складно реалізувати в промислових масштабах. Згідно з представленими у роботі Guangjian Yan та ін. [10] даними, із зниженням здатності розрізнення знімків можливість виділення окремих діапазонів, що відповідають ґрунту і рослинам, втрачається. Вдосконалення ідентифікації за рахунок оцінювання розподілу величин інтенсивності складових кольору показано в роботі André Sou та ін. [11], де замість моделі кольороутворення RGB використали модель CIE $L^*a^*b^*$ space. Автори для визначення площі куполу запропонували порогові значення, проте цей підхід буде ефективний лише на початкових стадіях вегетації, коли, зокрема, можна нехтувати тінню на нижніх ярусах листків рослин. Метод було вдосконалено в роботі Linquan Li та ін. [12], коли ідентифікацію ґрунту та рослин намагались здійснити та базі Гауссового напіврозподілу. Такий підхід дає змогу ідентифікувати дві складові, проте, в разі наявності 3-х складових, його об'єктивність сумнівна.

Аналіз опублікованих наукових даних показав, що залежність кількості пікселів від значень інтенсивності складових кольору для рослин і ґрунту описується саме Гауссовим розподілом. Відхилення від такого розподілу зумовлено накладанням розподілів від різних зафіксованих на фотознімку об'єктів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили в агрофітоценозах із пшеницею озимою впродовж 2017–2020 рр. Стресовий стан рослин, зумовлений дефіцитом елементів живлення, вивчали на дослідних ділянках багаторічного стаціонару кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва НУБіП України, де вивчаються системи застосування добрив. Спектральні дослідження в оптичному діапазоні проводили з використанням штатної фотокамери БПЛА DJI Phantom 2+. Опис методики проведення експериментальних досліджень було висвітлено в роботах Lysenko V. та ін. [13]. Мульти-спектральні дослідження з використанням інфрачервоного діапазону здійснювали за допомогою сенсорного обладнання Slanrange 3p із спеціалізованим програмним забезпеченням (ПЗ) SlantView (version 2.13.1.2304). На *рис. 1* представлені карти розподілу Green Chlorophyll індексу.

Особливістю ПЗ SlantView є можливість оперативного автономного створення карт розподілу вегетаційних індексів безпосередньо в польових умовах. ПЗ SlantView здійснює складання загального ортофотоплану зі знімків, корекцію щодо освітлення та надає користувачеві готіві карти розподілу вегетаційних індексів, серед яких різні варіанти NDVI. Штатними засобами ПЗ SlantView дані можуть експортуватися у формат geotiff.

На ортофотопланах аналізували ділянки агрофітоценозів із ознаками стресів і без них. Обробку даних проводили за окремими спектральними каналами та індексами, наданими програмою SlantView. Методику проведення досліджень описано в роботі S. Shvovov та ін. [14]. Максимальну деталізацію (GSD 0,04 м/піксель) отримували з вікна знімків ПЗ SlantView (варіанти індексу NDVI – Green, Red та RedEdge). За окремими спектральними каналами (вікно знімків) використовували монохромні зображення, які, для забезпечення повноти інформації, зберігали у формі bmp, для цього копію екрану зберігали в програмі Paint (Microsoft Windows 7.0 Sp.1).

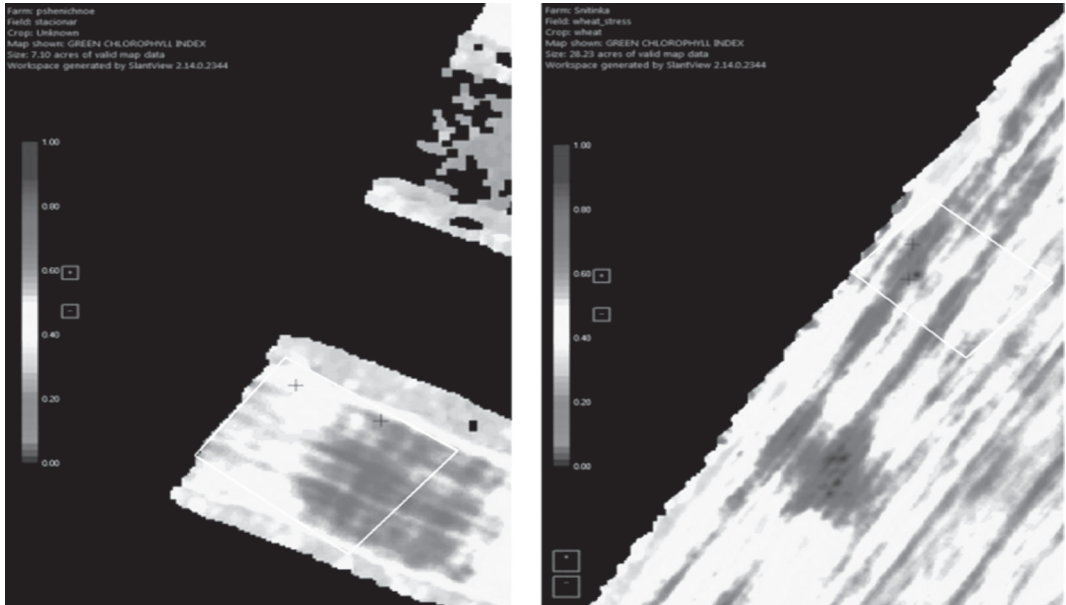


Рис. 1. Карти розподілу Green Chlorophyll індексу на фрагментах ортофотопланів дослідних ділянок стаціонару (ліворуч) і виробничих полів (праворуч), створені ПЗ SlantView

Примітка: синіми хрестиками виділені контрольні точки для точного позиціонування пікселів різних спектральних каналів та карт розподілу індексів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Спектральні дослідження в оптичному діапазоні. На *рис. 2* наведено результати обчислень червоної складової для експериментальних даних, отриманих 2017.05.05 у дослідженнях спектральних характеристик

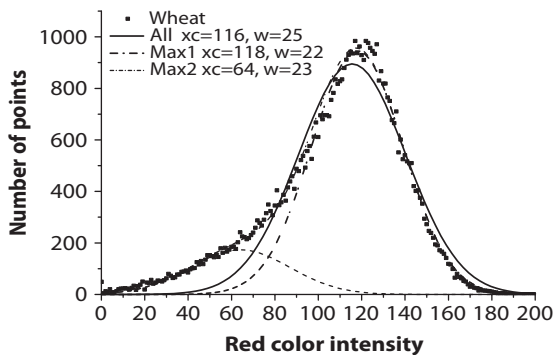


Рис. 2. Результати апроксимації залежності кількості пікселів від величини інтенсивності червоної складової кольору (2017.05.05)

рослин залежно від рівня живлення, із використанням універсальної камери FC200 (штатне сенсорне обладнання для БПЛА DJI Phantom 2).

Використання запропонованої методики аналізу показало, що значення максимум розподілу змістилося на дві одиниці, зі зменшенням ширини w на три одиниці. Розподіл $Max2$, за нашими припущеннями, може зумовлюватися як наявністю тіні на нижніх листках рослин, так і фіксацією ґрунту.

Запропонований підхід щодо обробки експериментальних результатів буде ефективним, якщо виконується умова $Max1 \gg Max2$ (*рис. 3*). У агрофітоценозах, природно, рослини однієї культури одного сорту перебувають одночасно на різних етапах вегетації чи в принципово різному фізіологічному стані. Індикативним етапом такої нерівномірності стану рослин у фітоценозах пшениці озимої є формування

прапорцевого листка, що було зафіксовано нами 2018.06.08. За отриманими даними (див. рис. 3), $\text{Max1} \cong \text{Max2}$, тому було використано підхід, коли на першому етапі окремо визначали два піки Гауссового розподілу.

Виявлення наявності кількох окремих максимумів можна здійснити, з огляду на величини розподілу за використання для апроксимації експериментальних даних рівняння 1 (All). Для представлених даних величина становила 28, тоді як для решти ділянок x_c становила 18...23. Відтак, апроксимація усіх даних єдиною Гауссовою залежністю (All) є некоректною, оскільки не відповідає жодному максимуму розподілу. Тобто, зйомку було здійснено, коли рослини перебували в різних стадіях розвитку, тому для виробничих фітоценозів їй необхідно провести повторно через кілька діб, коли потрібна стадія розвитку встановиться, тобто більшість рослин набудуть характерних ознак. Для автоматичної обробки результатів моніторингу еталонні значення для параметрів розподілу можна отримати на стаціонарних дослідках тощо.

Для універсальних цифрових камер оптичного діапазону, таких як FC200, точне дотримання вибіркості світлофільтрів не вимагається, тому для перевірки отриманих результатів проведено дослідження з використанням спеціалізованого спектрального комплексу Slanrange 3 (рис. 4).

За апроксимації експериментальних даних залежністю GaussAmp, ширина розподілу для зеленого каналу становила: для рослин неудобрених ділянок 7,1, для удобрених – 3,6, $0,98 \leq R^2$. Для червоної складової, незалежно від стану живлення, зафіксовано накладання 2-х максимумів, які були більше виражені для рослин із недостатнім забезпеченням елементами. Обчислено ширину розподілу, аналогічно зеленому каналу, становила 18 і 9,8 відповідно. Коефіцієнт детермінації для варіанта підвищеної норми мінераль-

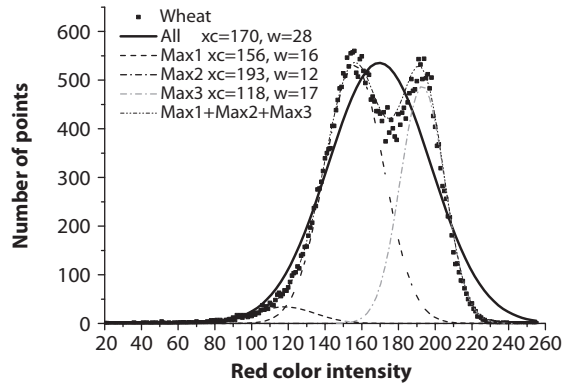


Рис. 3. Результати апроксимації залежності кількості пікселів від величини інтенсивності червоної складової кольору для пшениці озимої (дата зйомки 2018.06.08, у рослин окремих варіантів стаціонару сформований прапорцевий листок)

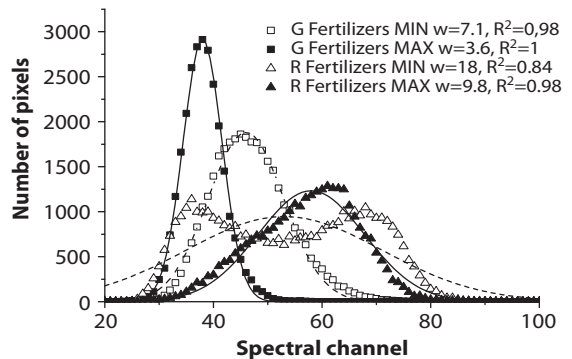


Рис. 4. Залежність кількості пікселів від величини інтенсивності зеленої (G) та червоної (R) складових кольору та стану мінерального живлення: внесення підвищеної норми добрив (Fertilizers MAX) і без добрив (Fertilizers MIN); дата моніторингу 2020.04.27

них добрив становив 0,98, а для рослин із дефіцитом живлення – 0,84.

ВИСНОВКИ

Розподіл інтенсивності складових кольору у видимому діапазоні описується Гауссовою залежністю, що підтверджується експериментально; оцінка придатності даних може здійснюватись на базі еталонних

значень ширини розподілу за зеленим і червоним спектральними каналами; наявність двох і більше максимумів у графічному

описі розподілу свідчить про нерівномірність входження рослин у стадію вегетації або ж наявність сторонніх об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kauth R.J. and Thomas G.S. The tasselled capgraphic description of the spectral–temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings, symposium on machine processing of remotely sensed data* (29 June–1 July, 1976). Purdue University. West Lafayette. IN. P. 41–51.
2. Aasen H., Burkart A., Bolten A. and Bareth G. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: from camera calibration to quality assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. Vol. 108. P. 245–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002>
3. Liu F. et al. A field–based high–throughput method for acquiring canopy architecture using unmanned aerial vehicle images. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2021. Vol. 296. P. 108–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108231>
4. Pan Y. et al. Reconstruction of Ground Crops Based on Airborne LiDAR Technology. *IFAC–PapersOnLine*. 2019. Vol. 52 (24). P. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.376>
5. Guoa T. et al. Detection of wheat height using optimized multi–scan mode of LiDAR during the entire growth stages. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 165. P. 104–959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104959>
6. Olsson Per–Ola, Lindström J. and Eklundh L. Near real–time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 181. P. 42–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.040>
7. Shakayb A.A., Nguyen H., Coyle A. and Fida M. Quality of information with minimum requirements for emergency communications. *Ad Hoc Networks*. 2021. Vol. 111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102331>
8. Cao Y. et al. Monitoring of sugar beet growth indicators using wide–dynamic–range vegetation index (WDRVI) derived from UAV multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 171. P. 105–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105331>
9. Liu Y., Mu X., Wang H. and Yan G. A novel method for extracting green fractional vegetation cover from digital images. *Journal of Vegetation Science*. 2012. Vol. 23. P. 406–418. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654–1103.2011.01373.x>
10. Yan G. et al. Improving the estimation of fractional vegetation cover from UAV RGB imagery by colour unmixing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. Vol. 158. P. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.017>
11. Coy A. et al. Increasing the Accuracy and Automation of Fractional Vegetation Cover Estimation from Digital Photographs. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. P. 474. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8070474>
12. Li L. et al. A half–Gaussian fitting method for estimating fractional vegetation cover of corn crops using unmanned aerial vehicle images. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. Vol. 262. P. 379–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.028>
13. Lysenko V. et al. Determination of the not uniformity of illumination in process monitoring of wheat crops by UAVs. In: *Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T: 4th International Scientific–Practical Conference* (October 10–13, 2017). Kharkiv. Ukraine. P. 265–267. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246394>
14. Shvovor S. et al. The method of determining the amount of yield based on the results of remote sensing obtained using UAV on the example of wheat. In: *IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (February 25–29, 2020). Slavske. Ukraine. P. 245–248. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061238>

REFERENCES

1. Kauth, R.J. & Thomas, G.S. (1976). The tasselled capgraphic description of the spectral–temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings, symposium on machine processing of remotely sensed data* (pp. 41–51). Purdue University. West Lafayette. IN [in English].
2. Aasen, H., Burkart, A., Bolten, A. & Bareth, G. (2015). Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: from camera calibration to quality assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 245–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002> [in English].
3. Liu, F. et al. (2021). A field–based high–throughput method for acquiring canopy architecture using unmanned aerial vehicle images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 296, 108–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108231> [in English].
4. Pan, Y. et al. (2019). Reconstruction of Ground Crops Based on Airborne LiDAR Technology. *IFAC–PapersOnLine*, 52 (24), 35–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.376> [in English].
5. Guoa, T. et al. (2019). Detection of wheat height using optimized multi–scan mode of LiDAR during the entire growth stages. *Computers and Electronics*

- in Agriculture*, 165, 104–959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104959> [in English].
6. Olsson, Per-Ola, Lindström, J. & Eklundh, L. (2016). Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 181, 42–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.040> [in English].
 7. Shakayb, A.A., Nguyen, H., Coyle, A. & Fida, M. (2021). Quality of information with minimum requirements for emergency communications. *Ad Hoc Networks*, 111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102331> [in English].
 8. Cao, Y. et al. (2020). Monitoring of sugar beet growth indicators using wide-dynamic-range vegetation index (WDRVI) derived from UAV multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105–331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105331> [in English].
 9. Liu, Y., Mu, X., Wang, H. & Yan, G. (2012). A novel method for extracting green fractional vegetation cover from digital images. *Journal of Vegetation Science*, 23, 406–418. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01373.x> [in English].
 10. Yan, G. et al. (2019). Improving the estimation of fractional vegetation cover from UAV RGB imagery by colour unmixing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158, 23–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.017> [in English].
 11. Coy, A. et al. (2016). Increasing the Accuracy and Automation of Fractional Vegetation Cover Estimation from Digital Photographs. *Remote Sensing*, 8, 474. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8070474> [in English].
 12. Li, L. et al. (2018). A half-Gaussian fitting method for estimating fractional vegetation cover of corn crops using unmanned aerial vehicle images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 379–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.028> [in English].
 13. Lysenko, V. et al. (2017). Determination of the not uniformity of illumination in process monitoring of wheat crops by UAVs. *Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T: 4th International Scientific-Practical Conference* (pp. 265–267). Kharkiv, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246394> [in English].
 14. Shvorov, S. et al. (2020). The method of determining the amount of yield based on the results of remote sensing obtained using UAV on the example of wheat. *IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 245–248). Slavske, Ukraine. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061238> [in English].

Стаття надійшла до редакції журналу 24.09.2021