

УДК 633.853.494:631.51:631.559

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.147.1.7>

АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПОЛІВ РІПАКУ ОЗИМОГО ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНОГО МОНІТОРИНГУ ТА АГРОХІМІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Бордюжа Н. П. – к. с.-г. н., доцент,

доцент кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

orcid.org/0000-0002-5482-2160

Бордюжа І. П. – к. с.-г. н.,

доцент кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

orcid.org/0000-0002-5942-5877

Носуля А. М. – ст. науковий співробітник відділу експертизи на відмінність,
однорідність та стабільність,

Український інститут експертизи сортів рослин

orcid.org/0000-0002-2026-6733

Ріпак озимий є важливою культурою у структурі світового продовольчого комплексу. В Україні ця культура є також важливою. Проте її врожайність постійно падає на тере-нах нашої країни у зв'язку із складнощами погодних умов. Причиною цього досить часто є просторова неоднорідність ґрунтового покриву. Методи прецизійного агровиробництва дають можливість дослідити і встановити цю неоднорідність та успішно керувати нею.

У цьому дослідженні вивчали просторову неоднорідність полів ріпаку озимого (*Brassica napus* L.) за поєднання методів дистанційного зондування та агрохімічної діагностики. Для створення карт NDVI на ключових етапах росту і розвитку рослин використовували супутникові зображення та зйомки безпілотників. Зразки ґрунту та рослин відбирали у зонах із різними значеннями NDVI для лабораторного аналізу. Мета нашого експерименту полягала у встановленні кореляції між спектральними індексами, параметрами розвитку сільськогосподарських культур та показниками родючості ґрунту із ціллю покращити інтерпретацію даних дистанційного зондування для застосування в точному землеробстві у виробництві ріпаку. Результати показали стійкі просторові закономірності в розрізі культури протягом вегетаційного періоду, що були підтверджені наземними вимірюваннями. Карти індексу NDVI продемонстрували високу точність у зонуваних полях за рівнем розвитку біомаси рослин. Нами виявлена стабільність цих зон впродовж сезону, а також їхня валідація із біометричними показниками та кінцевою врожайністю, що дозволяє використовувати цей індекс як надійний інструмент моніторингу фізіологічного стану рослин. Встановлено, що ключовим чинником варіативності врожайності є варіабельність агрохімічних властивостей ґрунту (вміст гумусу, рухомих форм макроелементів та бору). Ця залежність чітко візуалізується на картах NDVI.

Тож, це дослідження демонструє цінність інтеграції дистанційного зондування з цільовим відбором польових проб для розуміння та управління мінливістю на полях ріпаку озимого.

Ключові слова: ріпак озимий, точне землеробство, дистанційне зондування, NDVI, просторова неоднорідність, агрохімічна діагностика.



© Бордюжа Н. П., Бордюжа І. П., Носуля А. М., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Bordyuzha N. P., Bordyuzha I. P., Nosulya A. M., Analysis of spatial heterogeneity of winter rape fields using unmanned monitoring and agrochemical diagnostics

Winter rapeseed is an important crop in the structure of the world food market. In Ukraine, this crop is also important. However, its yield is constantly falling in our country due to difficult weather conditions. The reason for this is quite often the spatial heterogeneity of the soil cover (soil fertility). Precision agricultural methods make it possible to study and establish this heterogeneity and successfully manage it.

*This study investigated the spatial heterogeneity of winter rape (*Brassica napus* L.) fields using a combination of remote sensing and agrochemical diagnostic methods. Satellite imagery and drone surveys were used to create NDVI maps at key stages of development. Soil and plant samples were collected from zones with different NDVI values for laboratory analysis. The aim was to establish correlations between spectral indices, crop development parameters and soil fertility indicators to improve the interpretation of remote sensing data for application in precision farming in rapeseed production. The results showed stable spatial patterns in crop vigor throughout the growing season, which were confirmed by ground measurements. NDVI index maps demonstrated high accuracy in field zoning by the level of plant biomass development. We found the stability of these zones throughout the season, as well as their validation with biometric indicators and final yield. It allows using this index as a reliable tool for monitoring the physiological state of plants. It has been established that the key factor in yield variability is the variability of soil agrochemical properties (content of humus, mobile forms of macroelements and boron). This dependence is clearly visualized on NDVI maps.*

So, this study demonstrates the value of integrating remote sensing with targeted field sampling to understand and manage variability in winter rapeseed fields.

Key words: *winter rape, precision agriculture, remote sensing, NDVI, spatial heterogeneity, agrochemical diagnostics.*

Вступ. Ріпак озимий (*Brassica napus* L.) стає все більш важливою олійною культурою в Україні та інших частинах Європи, цінується як за харчову олію, так і за потенціал як сировини для біопалива [1, с. 15]. Проте врожайність ріпаку в Україні часто падає нижче потенційної, у середньому 1,5–3,5 т/га порівняно із 3,5–4,0 т/га порівняно з іншими європейськими країнами [2, с. 78]. Ця різниця в урожайності частково пояснюється просторовою мінливістю польових умов та стресових ситуаціях, що може призвести до неоптимального управління врожаєм, коли однакові методи застосовуються на неоднорідних полях [3, с. 234].

Методи прецизійного агровиробництва, включаючи дистанційне зондування, пропонують можливості ідентифікувати цю мінливість і керувати нею [4, с. 145]. Надаючи просторові дані з високою роздільною здатністю про умови посівів і ґрунту, дистанційне зондування може керувати управлінськими рішеннями, що стосуються конкретної ділянки, потенційно підвищуючи ефективність використання ресурсів і врожайність [5, с. 89]. Однак інтерпретація даних моніторингу для ріпаку може бути складною, оскільки зв'язок між спектральними індексами та параметрами культури може змінюватися залежно від стадії росту, умов навколишнього середовища та методів господарювання [6, с. 201].

Нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI) є одним із найбільш широко використовуваних спектральних індексів для оцінки витривалості культур і оцінки потенціалу врожайності [7, с. 56]. Це дослідження мало на меті зв'язати NDVI та інші дані характеристики рослин з наземними вимірюваннями врожаю і ґрунту, щоб розробити наукову основу для інтерпретації даних дистанційного зондування на полях ріпаку озимого.

Мета дослідження: оцінити просторову мінливість росту та розвитку ріпаку озимого за допомогою мультитимових карт NDVI, отриманих із супутникових знімків та зйомок безпілотників; оцінити співвідношення між значеннями NDVI та ключовими параметрами культури, включаючи індекс площі листя, біомасу

та компоненти врожайності; дослідити основні чинники родючості ґрунту, що впливають на спостережувані просторові закономірності в залежності від рівня врожаю; розробити рекомендації щодо інтеграції даних моніторингу в стратегії точного управління ріпаком озимим.

Матеріали та методи. Дослідження проводили протягом вегетаційного періоду ріпаку озимого (гібрид Фенікс CL) площею 23,7 га. на Київщині в погодно-кліматичних умовах Бориспільської громади. Поле мало історію неоднорідної продуктивності, незважаючи на попередні спроби рівномірного управління. Тип ґрунту – темно-сірий опідзолений.

Посів ріпаку озимого проводили у 4 декаді серпня після попередника ячменя ярого. Добрива вносили рівномірно по всьому полю в нормі N130P20K40 відповідно до стандартної практики господарства. Супутникові знімки були отримані за допомогою сервісів Crop Monitoring і Crop Operations, які надають доступ до мультиспектральних зображень високої роздільної здатності (3 м/пікс). Зображення були отримані на чотирьох ключових етапах росту: весняне відростання (кінець березня); бутонізація (кінець квітня); цвітіння (середина травня); розвиток стручка (початок червня) [8, с. 167].

Щоб доповнити супутникові зображення та отримати дані з вищою роздільною здатністю, були проведені зйомки безпілотниками за допомогою DJI Phantom 4 Pro, оснащеного мультиспектральною камерою. Польоти здійснювалися в ті ж дати, що й отримані супутникові знімки, якщо дозволяла погода. Дрон літав на висоті 100 м, забезпечуючи роздільну здатність землі приблизно 5 см/піксель. Знімки, отримані з дронів, були оброблені за допомогою програмного забезпечення Pix4D для створення ортомозаїчних карт і розрахунку значень NDVI [9, с. 223].

На основі карт NDVI, створених на базі супутникових і безпілотних знімків, поле було розділено на зони з різною продуктивністю. Виділено дві основні зони: зона високої продуктивності з NDVI 0,75–0,85 площею 9,22 га та зона слабкого росту з NDVI 0,65–0,75 площею 12,5 га. У кожній із двох основних зон за допомогою GPS-координат було встановлено п'ять точок відбору проб [10, с. 145].

У кожній точці відбору було проведено наступні вимірювання та взяті зразки на чотирьох ключових стадіях росту. Зразки ґрунту відібрані з глибини 0–20 см і 20–40 см для агрохімічного аналізу. Зразки цілих рослин були зібрані для визначення біомаси та аналізу поживних речовин. Індекс площі листя (LAI) виміряно за допомогою аналізатора рослинного покриття LAI-2200C.

Зразки ґрунту аналізували за такими параметрами: рН (KCl), рухомий фосфор (P) і калій (K), мінеральний азот (NH_4^+ і NO_3^-), обмінний кальцій (Ca) і магній (Mg), мікроелементи (B). Усі аналізи проводили за стандартними методиками в агрохімії [11, с. 89].

Результати. Карти NDVI виявили чіткі просторові закономірності, які зберігалися протягом вегетаційного періоду, хоча з деякими змінами в інтенсивності та розподілі. Під час весняного відростання значення NDVI були відносно однорідними по всьому полю (середній NDVI = $0,45 \pm 0,05$), що вказує на досить рівномірне виживання взимку та початкове відростання (рис. 1, 2).

На стадії бутонізації були виявлені дві чіткі зони: зона вищої продуктивності (NDVI 0,75–0,85), що охоплює 9,22 га, і зона нижчої продуктивності (NDVI 0,65–0,75), яка охоплює 12,5 га (рис. 3). У фазу цвітіння отримали також розподіл поля по зонах, хоча не такий чіткий і в іншому спектрі, ймовірно, у результаті впливу квітів (рис. 4).



Рис. 1. Карта NDVI ріпаку озимого за відновлення весняної вегетації рослин



Рис. 2. Обстеження посівів ріпаку озимого гібриду Фінікс КЛ за допомогою БПЛА за весняного відновлення вегетації рослин



Рис. 3. Визначення зон з відмінною вегетацією рослин ріпаку озимого гібриду Фінікс КЛ на основі індексу NDVI у фазу бутонізації



Рис. 4. Визначення зон з відмінною вегетацією рослин ріпаку озимого гібриду Фінікс КЛ на основі індексу NDVI у фазу цвітіння



Рис. 8. Визначення зон з відмінною вегетацією рослин ріпаку озимого гібриду Фінікс КЛ на основі індексу NDVI у фазу стручкування

У фазу стручкування знову отримали чіткий розподіл вегетативної маси рослин ріпаку на дві характерні зони (рис. 4). Зона вищої продуктивності охопила 44 % площі поля, де індекс NDVI склав 0,76–0,83. У зоні нижчої продуктивності він становив 0,70–0,76. Ця зона зайняла більшу площу поля 54 %.

Індекс площі листя (LAI) продемонстрував сильну позитивну кореляцію з NDVI на всіх стадіях росту ріпаку озимого ($r = 0,78$ до $0,92$). Зв'язок був найсильнішим на стадії бутонізації ($r = 0,92$) і найслабшим під час цвітіння ($r = 0,78$), ймовірно, через вплив квітів на спектральний коефіцієнт відбиття.

Надземна біомаса також позитивно корелювала із індексом NDVI, причому сила зв'язку зростала з плином сезону (із $r = 0,65$ при весняному відростанні до $r = 0,88$ при розвитку стручків) [12, с. 234].

Ми провели агрохімічну діагностику ґрунту і встановили наступну залежність (табл. 1). Зона високої продуктивності характеризувалася значно вищим вмістом органічної речовини, мінерального азоту, доступного фосфору та калію, а також

мікроелементів, зокрема бору. Ця закономірність була постійною як для зразків глибиною 0–20 см, так і для 20–40 см, хоча величина різниці була, як правило, меншою в глибшому шарі [13, с. 178].

Таблиця 1
Середні показники родючості ґрунту в зонах високої та низької продуктивності (глибина 0–20 см)

Параметр	Зона високої продуктивності	Зона низької продуктивності	p-значення
pH (вода)	6,8	6,5	0,032
Органічна речовина (%)	3,2	2,7	0,007
Мінеральний N (мг/кг)	28	22	0,012
Рухомий P (мг/кг)	45	32	<0,001
Обмінний K (мг/кг)	180	145	0,003
Обмінний Ca (смоль/кг)	12,5	10,8	0,018
Обмінний Mg (смоль/кг)	2,8	2,3	0,024
Бор (мг/кг)	0,8	0,6	0,002

Урожайність насіння ріпаку озимого, відображена на відповідній карті, показала сильну просторову кореляцію з моделями NDVI, які спостерігалися протягом сезону (I Морана = 0,68, $p < 0,001$). Зона високої потужності дала середній урожай 4,2 т/га, тоді як зона низької сили становила в середньому 3,1 т/га, з різницею у 35 %. Тож, стійкість просторових моделей у NDVI протягом вегетаційного періоду свідчить про те, що основні фактори, які впливають на енергію врожаю, були відносно стабільними та встановлені на початку сезону [14, с. 201].

Висновки. Це дослідження продемонструвало цінність інтеграції методів дистанційного зондування з цільовим відбором польових проб для розуміння та управління просторовою мінливістю на полях ріпаку озимого:

1. Карти NDVI ефективно визначили зони різного розвитку рослин, які зберігалися протягом вегетаційного періоду та тісно корелювали з врожайністю цієї культури.

2. Між індексом NDVI і важливими параметрами культури, такими як LAI і біомаса, спостерігалися тісні кореляційні зв'язки, що підтверджує ефективність використання цього індексу для оцінки росту та розвитку рослин.

3. Родючість ґрунту, зокрема вміст органічної речовини, рухомих сполук фосфору, калію та бору, корелювала із розвитком рослин, що відобразили на карті NDVI, і була головною рушійною силою просторової мінливості врожайності.

Тож, часова стабільність просторових моделей свідчить про те, що дані дистанційного зондування раннього сезону можуть керувати різними управлінськими рішеннями протягом вегетаційного періоду. Застосування точного землеробства у виробництві ріпаку та створення основи для розробки вдосконалених стратегій інтерпретації і використання даних дистанційного зондування для цієї важливої культури для АПК України і світу є необхідними. Вони забезпечать більш цілеспрямовані та ефективні методи управління з метою підвищення як продуктивності, так і стійкості вирощування цієї культури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Sishodia R. P., Ray R. L., Singh S. K. Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 19. P. 3136. DOI: 10.3390/rs12193136
2. USDA Foreign Agricultural Service. Oilseeds: World Markets and Trade. December 2024. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 2024.
3. Maes W. H., Stepe K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science*. 2019. Vol. 24. No. 2. P. 152–164. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.11.007
4. Sulik J. J., Long D. S. Spectral indices for canola flower detection. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 18. P. 2938. DOI: 10.3390/rs12182938
5. Sieling K., Kage H. Nitrogen use efficiency of winter oilseed rape. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2021. Vol. 41. No. 3. P. 44. DOI: 10.1007/s13593-021-00722-x
6. Sulik J. J., Long D. S. Spectral considerations for modeling yield of canola. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 184. P. 161–174. DOI: 10.1016/j.rse.2016.06.016
7. Горобець А. В., Дудник А. В., Павленко Д. Г. Використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу посівів озимого ріпаку. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 9. С. 12–18. DOI: 10.31073/agrovisnyk202109-02
8. Лебедь Є. М., Чернищенко І. А., Павленко В. П. Застосування геоінформаційних систем у сільському господарстві України. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 2. С. 45–53.
9. Bramley R. G. V., Ouzman J. Farmer attitudes to the use of sensors and automation in fertilizer decision-making: nitrogen fertilization in the Australian grains sector. *Precision Agriculture*. 2019. Vol. 20. No. 1. P. 157–175.
10. Вожегова Р. А., Лавриненко Ю. О., Коваленко О. А., Малярчук А. С. Точне землеробство: стан, проблеми та перспективи розвитку в Україні. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2020. Вип. 4. С. 5–14. DOI: 10.31521/2313-092X/2020-4(108)-1
11. Sulik J. J., Long D. S. Spectral indices for yellow canola flowers. *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36. No. 10. P. 2751–2765. DOI: 10.1080/01431161.2015.1047994
12. Maresma A., Ariza M., Martínez E., Lloveras J., Martínez-Casasnovas J. A. Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays* L.) from a standard UAV service. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. No. 12. P. 973.
13. Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 236. P. 111402. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402
14. Xie Q., Dash J., Huang W., Peng D., Qin Q., Mortimer H., Casa R., Pignatti S., Laneve G., Pascucci S., Dong Y., Ye H. Vegetation indices combining the red and red-edge spectral information for leaf area index retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. Vol. 11. No. 5. P. 1482–1493.
15. Дудник А. В., Жуковський А. Г., Семенда Д. К. Системи підтримки прийняття рішень у точному землеробстві. *Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства НААН»*. 2020. Вип. 4. С. 89–102.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026