

УДК 631.452

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.119.31>

ГЕОПРОСТОРОВА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ ҐРУНТОВОЇ РОДЮЧОСТІ ТА ЇХ ДИСТАНЦІЙНА ВЕРИФІКАЦІЯ

Пліско І.В. – д.с.-г.н., с.н.с., завідувачка лабораторії геоєкофізики ґрунтів,
Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського»

Трофименко П.І. – д.с.-г.н., доцент кафедри геоінформатики,
Навчально-науковий інститут «Інститут геології»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Куцова К.М. – аспірант лабораторії геоєкофізики ґрунтів,
Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О.Н. Соколовського»

Зобнів І.С. – студентка,
Навчально-науковий інститут «Інститут геології»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Трофименко Н.В. – к.е.н., асистент кафедри геоінформатики,
Навчально-науковий інститут «Інститут геології»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Ляшенко Д.О. – д.геогр.н., професор кафедри геоінформатики,
Навчально-науковий інститут «Інститут геології»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

У статті висвітлено результати наукових досліджень верифікації геопросторового поширення основних показників родючості ґрунтів Лісостепової зони України за допомогою вегетаційних індексів NDVI, NDSI й розроблених власних моделей накопичення біомаси пшениці озимої та кукурудзи на зерно в умовах виробництва у 2020 році.

У роботі на основі параметрів ДСТУ 4362:2004 «Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів» представлено алгоритм побудови картосхем експертної оцінки родючості домінуючих у цій природно-кліматичній зоні ґрунтів відносно кукурудзи на зерно та пшениці озимої в середовищі Arc GIS 10.5.

Показано геопросторову диференціацію основних показників родючості ґрунтів (у балах) і певну синхронізацію їх значень з величинами індексу NDVI (для кукурудзи на зерно) та врожайністю зерна пшениці озимої, розрахованої з використанням розробленої в попередніх дослідженнях моделі на основі індексу NDSI.

Виявлено, що запорукою успішності геопросторової верифікації параметрів родючості ґрунтів є правильний вибір вегетаційного індексу або аналітичної моделі, що дає змогу отримати наявну диференціацію вищезначених параметрів ґрунтового покриву за величинами біомаси сільськогосподарських культур.

Указано на можливість використання означеного алгоритму у вигляді вирішення зворотньої геопросторової задачі: коли локалізація на місцевості максимальних величин вегетаційного індексу може бути основою для визначення оптимальних параметрів за окремими показниками родючості для певного ґрунту або групи ґрунтів.

Зазначений підхід завдяки невеликій собівартості порівняно з традиційною закладкою стаціонарних досліджень пропонується до застосування в разі визначення оптимальних показників ґрунтової родючості на землях фермерських господарств з невеликою площею з метою покращення режиму живлення сільськогосподарських культур.

Ключові слова: верифікація, дистанційні методи, просторова диференціація, родючість, ґрунтові показники.

Plisko I.V., Trofymenko P.I., Kutsova K.M., Zobniv I.S., Trofymenko N.V., Lyashenko D.O.
Geospatial differentiation of soil fertility indicators and their remote verification

The article highlights the results of scientific research on verification of the geospatial distribution of the main soil fertility indicators of the Forest-Steppe Zone of Ukraine using vegetation indices NDVI, NDSI and our own developed models of biomass accumulation of winter wheat and corn for grain under production conditions in 2020.

On the basis of parameters of DSTU 4362: 2004 'Quality of Soil. Soil Fertility Indicators', the study presents an algorithm for constructing schematic maps of expert assessment of soil fertility of dominating soils in this natural and climatic zone of soils in regard to maize for grain and winter wheat in Arc GIS 10.5.

The geospatial differentiation of the main indicators of soil fertility (in points) and some synchronization of their values with the values of the NDVI index (for maize for grain) and grain yield of winter wheat were calculated using the model developed in previous studies based on the NDSI.

It is revealed that the key to the success of geospatial verification of soil fertility parameters is the correct choice of vegetation index or analytical model, which allows obtaining the existing differentiation of the above parameters of soil cover by crop biomass.

The possibility of using the specified algorithm in the form of solving the inverse geospatial problem is indicated: when the localization of the maximum values of the vegetation index can be the basis for determining the optimal parameters for individual fertility indicators for a particular soil or soil group.

This approach, due to the low cost compared to the traditional establishment of stationary research, is proposed for use in determining the optimal indicators of soil fertility on small farms in order to improve the nutrition of crops.

Key words: verification, remote methods, spatial differentiation, fertility, soil indicators.

Постановка проблеми. Однією з важливих проблем сучасного землеробства є встановлення оптимальних параметрів ґрунтової родючості за окремими показниками. Існує багато підходів і методів проведення цих досліджень, головними серед них є проведення стаціонарних польових досліджень із накладанням дослідів за спеціальними схемами. Однак проведення подібних досліджень вимагає значних матеріальних і фінансових витрат.

Нині завдяки розвитку сучасних технологій і використанню дистанційних методів досліджень земної поверхні поряд із традиційними методами польових досліджень з'являються нові підходи в параметризації показників ґрунтової родючості. Особливе значення подібні підходи мають у випадку діагностування рівня продуктивності сільськогосподарських угідь в умовах виробництва, передусім ріллі.

Досить важливою є верифікація встановлених критеріїв родючості ґрунтів, які функціонують у відповідних кліматичних умовах і використовуються для отримання врожаїв сільськогосподарських культур.

Одним із пріоритетних підходів до верифікації коректності градацій показників ґрунтової родючості є встановлення відповідності їх просторового поширення серед ґрунтового покриття з величинами дискретної оцінки накопичення біомаси сільськогосподарською культурою на основі вегетаційних індексів.

У зв'язку з вищезазначеним досить перспективним вважається застосування сучасних технологій, пов'язаних із дистанційною ідентифікацією продуктивності рослин на основі спектрональних знімків різних супутникових систем Landsat, Sentinel та інших. У цьому випадку досить важливим є дотримання максимальної часової синхронізації між установленням величин показників ґрунтової родючості й визначенням величин інвестиційних індексів. На нашу думку, така верифікація може відбуватися в межах вегетаційного періоду рослин, а для озимих культур – окремо в межах осінньої або весняної його частин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційна практика отримання інформації, її переробки та подання не відповідає вимогам оцінювання просто-

рової диференціації ґрунтових показників. Необхідні нові методи й інструменти оцінки агроекологічного стану посівів і ґрунтового середовища. Розуміння й управління просторовою мінливістю ґрунтів стало однією з основних стратегій оптимізації сільськогосподарського виробництва, заснованої на місцевих потребах у добривах, меліорантах та інших ресурсах.

У зв'язку зі збільшенням площ посівів зернових культур в Україні [1] усе більшої актуальності набуває розробка алгоритму якісного дистанційного діагностування врожайності сільськогосподарських культур. Численними дослідженнями встановлено, що властивості ґрунтів є мінливими в різних просторових масштабах, що призводить до явної необхідності визначення геопросторової диференціації показників ґрунтової родючості [2].

Останні досягнення в сенсорних технологіях і доступність безкоштовних мультиспектральних супутникових зображень із високою роздільною здатністю (просторових і часових) дають можливість опосередковано визначати якісний стан орних ґрунтів, що дає змогу картографувати просторовий розподіл у режимі, близькому до реального часу, і прогнозувати врожайність сільськогосподарських культур [3].

Дистанційне зондування Землі дає змогу скоротити витрати коштів і часу на польові дослідження, прискорити проведення робіт, а також підвищити достовірність і повноту одержуваної інформації за рахунок оптимізації термінів та умов зйомки. Разом із тим діагностування врожайності за спектральною інформацією можна проводити в різні періоди вегетації культур, забезпечуючи кращі часові та просторові покриття [4].

З метою визначення стану родючості ґрунтів і якості земельних ділянок при проведенні моніторингу земель сільськогосподарського призначення та створенні ґрунтово-агрохімічних баз даних застосовується національний стандарт України – ДСТУ 4362:2004 [5], який дає змогу здійснити класифікацію одержаних даних за показниками родючості ґрунтів. Основними серед показників є такі: загальні (потужність гумусного шару ґрунту; грубизна профілю для схилових ґрунтів; гранулометричний склад), агрофізичні (щільність ґрунту; агрегатний склад; найменша вологемність; запаси продуктивної вологи), агрохімічні показники (уміст гумусу; уміст поживних речовин; уміст мікроелементів), фізико-хімічні властивості (реакція ґрунтового розчину; склад увібраних катіонів), а також показники забруднення ґрунтів важкими металами, залишками пестицидів і радіонуклідами; ступінь засолення ґрунтів за катіонно-аніонним складом водної витяжки (для солонцевих, засолених і зрошуваних земель); ступінь солонцюватості ґрунтів за вмістом обмінного натрію та калію (для солонцевих і зрошуваних земель).

Вітчизняними дослідниками доведено, що використання багатоспектральних супутникових знімків є досить актуальним напрямом для вивчення параметрів ґрунтової родючості [6–8]. Результати вивчення багатоспектральних супутникових знімків уміщують дослідження впливу агрофітоценозів і погодних умов на якість аерокосмічних растрових зображень [9].

Використання методів дистанційного зондування в поєднанні з геоінформаційними технологіями є одним зі стратегічних напрямів розвитку наукової та інноваційної діяльності в сільськогосподарському виробництві, у тому числі для безперервного моніторингу фракційного покритву рослинності на великих територіях за умов підкріплення високоякісними польовими даними для калібрування й перевірки алгоритмів [10].

На основі комбінації значень яскравості в певних каналах, інформативних для виділення досліджуваного об'єкта, і розрахунку за цими значеннями «спектрального індексу» об'єкта будеться зображення, яке відповідає значенню індексу в кожному пікселі, що й дає змогу виділити досліджуваний об'єкт чи оцінити його стан [7].

Ефективність вегетаційних індексів визначається особливостями відбиття, це переважно індекси, виділені емпірично [11]. Їх застосування дає змогу чітко відділяти рослинність від інших природних об'єктів.

Найчастіше у вітчизняній і закордонній літературі спостерігається широке використання в дослідженнях ґрунтової родючості нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) [12], який указує на інтенсивність накопичення біомаси рослинністю. Коефіцієнт NDVI використовується як один із інструментів для складніших типів аналізу, результатом яких можуть бути карти фітопродуктивності сільськогосподарських земель, біологічної різноманітності тощо [6]. Відомо, що індекс NDVI добре діагностує стан рослинного покриву й за роками, і в період вегетаційного сезону. Проте його використання не дає коректних результатів щодо рослинності у фазі повної стиглості передусм зернових культур.

У такому випадку часто використовують нормалізований диференційований ґрунтовий індекс NDSI, який також придатний для оцінки стану орних земель [13]. Високі кореляційні коефіцієнти величин врожайності зі значеннями вегетаційного індексу NDSI дають змогу враховувати ґрунтові відмінності при дистанційній діагностиці. Діагностуюча здатність індексу NDSI свідчить про домінуючу роль ґрунтових параметрів і режимів у формуванні врожаю різних сільськогосподарських культур.

Постановка завдання. Завдання роботи передбачало дослідити геопросторову диференціацію показників ґрунтової родючості для встановлення їх територіальної локалізації та провести верифікацію результатів експертної оцінки показників родючості шляхом розрахунку величин біомаси сільськогосподарських культур, визначеної за допомогою вегетаційних індексів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проведено у 2020 році на двох територіальних об'єктах Лісостепової зони України, які входять до Пісочинської (с. Новий Коротич) і Південноміської (сmt. Буди) територіальних громад Харківського району Харківської області, в умовах виробництва на типових ґрунтах. Ситуаційні схеми розташування об'єктів досліджень представлено на рисунку 1.

Дослідний об'єкт № 1 «Новий Коротич» ($\varphi=49,974028$, $\lambda=36,000611$) являє собою земельну ділянку, зокрема частину поля, яка розташована на території ДП ДГ «Граківське» біля с. Новий Коротич, площею 31,7 га (рис. 1А). Ґрунтовий покрив об'єкта представлено чорноземами опідзоленими (у тому числі й нами-тими), темно-сірими опідзоленими слабкосероморфними ґрунтами в комплексі з їх еродованими аналогами. Гранулометричний склад ґрунтів – важкосуглинковий. У межах об'єкта спостерігаються неоднорідні форми рельєфу – місцями мікропідвищення та мікрзниження. Ухил поверхні становить 3–3,5 градусів, перепад висот – від 120 до 145 м. На обстеженій території зустрічаються поодинокі ознаки порушення поверхневих горизонтів, ґрунти схильні до кіркоутворення. Вирощувана сільськогосподарська культура – кукурудза на зерно.

Дослідний об'єкт № 2 «Буди» ($\varphi=49,878433$, $\lambda=36,021529$) являє собою земельну ділянку (частину поля) площею 21 га, яка розташована за межами населеного пункту Буди (рис. 1Б).



Рис. 1. Місце розташування об'єктів досліджень біля населених пунктів с. Новий Коротич (А) та смт Буди (Б) Харківського району Харківської області

Ґрунтовий покрив дослідної ділянки представлено в основному сірими й темно-сірими опідзоленими ґрунтами та їх змитими різновидами. Опідзолені ґрунти знаходяться на схилах різної крутязни. Зокрема, наявний відносно значний перепад висот, де переважають ерозійно-аккумулятивні форми рельєфу – ухил поверхні варіює від 5 до 7 градусів, перепад висот – від 135 до 173 м. У зв'язку з цим спостерігаються втрати частини вологи з поверхневим стоком і розвиток ерозійних процесів. Гранулометричний склад досліджених ґрунтів – важкосуглинковий. Вирощувана сільськогосподарська культура – пшениця озима.

Методика досліджень. Наземний етап досліджень передбачав відбір ґрунтових зразків з їх географічною прив'язкою до системи координат WGS 84 проєкції UTM з подальшим аналізом і визначенням основних показників ґрунтової родючості. У зразках ґрунтів визначено вміст рухомих сполук фосфору й калію за модифікаційним методом Чирикова – за ДСТУ 4115:2002 [14], вміст загального гумусу методом Тюріна в модифікації ЦІНАО – за ДСТУ 4289:2003 [15], вміст нітратного й амонійного азоту – за ДСТУ 4729:2007 у модифікації ННЦ ІГА ім. О.Н. Соколовського [16], показник рНвод. – за ДСТУ 8346:2015 [17].

Під час досліджень використано відповідно скоригований багатоспектральний знімок LC08_L1TP_178025_20200703_20200708_01_T1.tif Landsat-8 у форматі GeoTIFF (WGS 84), отриманий із сайту EarthExplorer, і програмне забезпечення ESRI Arc Map 10.5. Дата знімання – 10.06.2020, час – 08:30:26.6771610. Хмарність у момент зйомки – 9%.

Побудову картосхем агрохімічних властивостей ґрунтів проведено в середовищі Arc Map 10x із використанням модуля Spatial Analyst. Розрахунок вегетаційних індексів NDVI та NDSI, а також моделі врожайності зерна пшениці озимої з побудовою відповідних картосхем – із застосуванням функції Raster calculator. Геостатистичний аналіз передбачав застосування функції кригінгу (Kriging).

Для встановлення геопросторового поширення основних показників ґрунтової родючості й побудови картографічних матеріалів використали відповідні класифікації їх величин, згідно з чинним ДСТУ 4362:2004 [5], шляхом застосування методу контрольованої класифікації значень (Manual classification).

Для розрахунку вегетаційних індексів використано загальноприйняті алгоритми:

$$\text{NDVI} = \text{float} (B5-B4) / (B5+B4), \quad (1)$$

$$\text{NDSI} = \text{float} (B7-B6) / (B7+B6), \quad (2)$$

де NDVI – нормалізований відносний індекс рослинності (Normalized Difference Vegetation Index);

NDSI – нормалізований диференційований ґрунтовий індекс (Normalized Difference Soil Index);

float – функція, яка дає змогу більш чітко встановити межі класів і мінімізувати вплив інших об'єктів.

З метою визначення врожайності пшениці озимої у фазу воскової стиглості використано розроблену раніше модель на посівах пшениці озимої у фазі повної стиглості [18]:

$$Y = -1670,9 \text{ NDSI} + 397,1, \quad (3)$$

де Y – врожайність зерна пшениці озимої, ц/га.

Експертну оцінку геопросторового поширення показників ґрунтової родючості з наданням оціночних балів за пшеницею озимою та кукурудзою на зерно з побудовою відповідних картосхем проводили відповідно до Стандарту родючості ґрунтів [5]. У таблиці 1 наведено приклад надання балів експертної оцінки за показниками родючості ґрунтів за вмістом у ґрунтах рухомого фосфору.

Таблиця 1

Надання балів експертної оцінки за вмістом фосфору

№ з/п	Градації вмісту фосфору	Діапазони градацій	Діапазони вмісту фосфору за точками відбору зразків у межах градації	Експертна оцінка, бал
1	низький	< 50	14,3–31,5	1
2	середній	50–100	57,3–88,7	2
3	підвищений	100–150	111,6–146,0	3
4	високий	150–200	151,7–183,2	4
5	дуже високий	> 200	209,0–263,4	5

У результаті статистичної обробки даних побудовано картосхеми агрохімічних показників ґрунтової родючості на досліджених об'єктах: «Новий Коротич» – на посівах кукурудзи на зерно (рис. 2) – і «Буди» – на посівах пшениці озимої (рис. 3).

Геопросторове поширення показників родючості ґрунтів на посівах кукурудзи (рис. 2) характеризується добрими параметрами, за винятком умісту мінерального азоту з низьким і середнім вмістом, який спричинив відчутне зниження накопичення біомаси.

Розроблені в результаті математичної обробки даних картосхеми агрохімічних властивостей досліджених ґрунтів на посівах пшениці озимої представлено на рис. 3. Їх аналіз дає змогу зробити висновки, що забезпеченість ґрунтів мінеральним азотом та обмінним калієм переважно відповідає середньому та підвищеному рівням на всій ділянці поля. У свою чергу, диференціація ґрунтового покриву в межах дослідженого об'єкта за вмістом рухомого фосфору має ареали з низьким і дуже високим вмістом, що є характерним для цих ґрунтів.

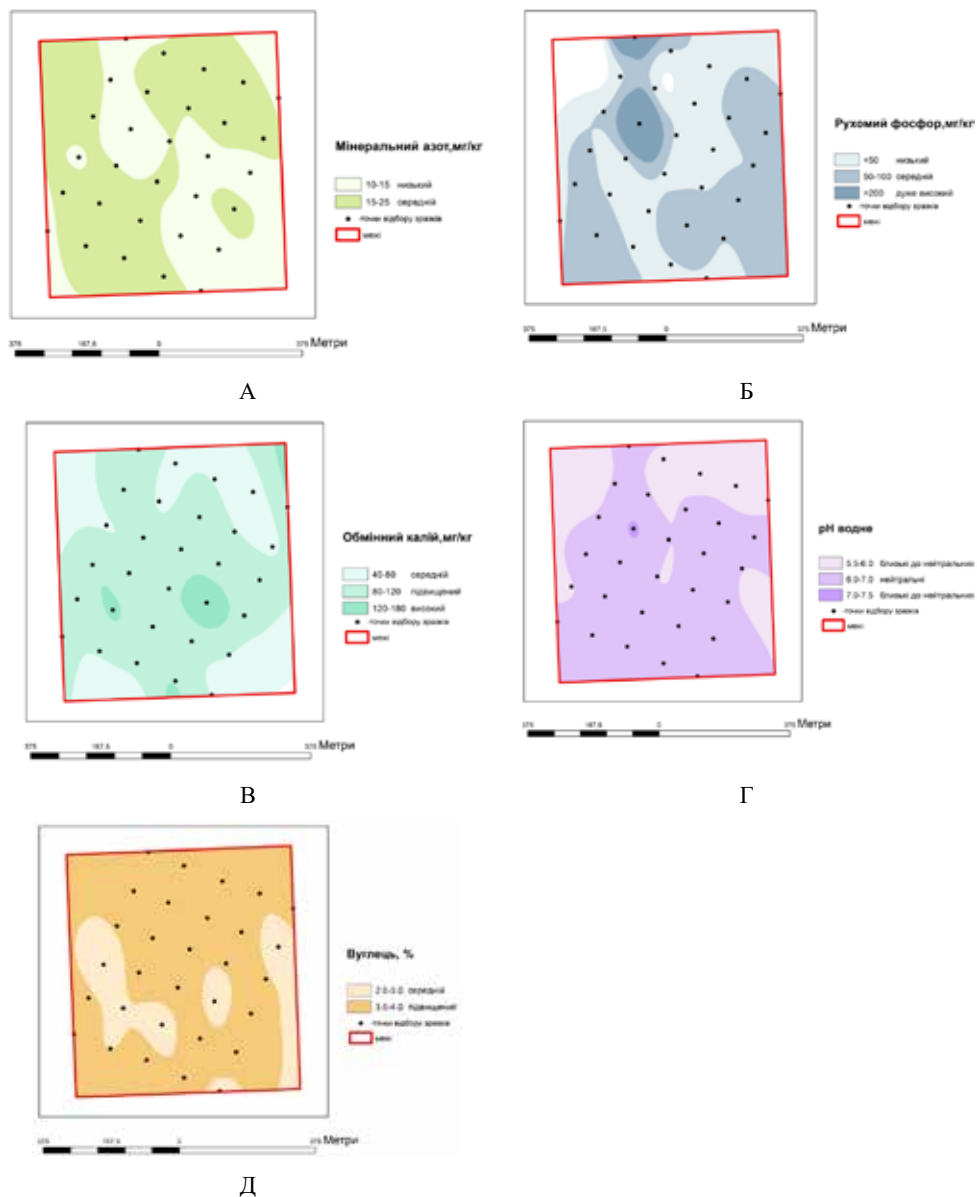


Рис. 2. Геопросторова диференціація ґрунтового покриву за показниками родючості на посівах кукурудзи на зерно (об'єкт «Новий Коротич»: А – уміст мінерального азоту, мг/кг ґрунту, Б – уміст рухомого фосфору, мг/кг ґрунту, В – уміст обмінного калію, мг/кг ґрунту, Г – показник $pH_{водн}$, одиниць, Д – уміст органічного вуглецю, %

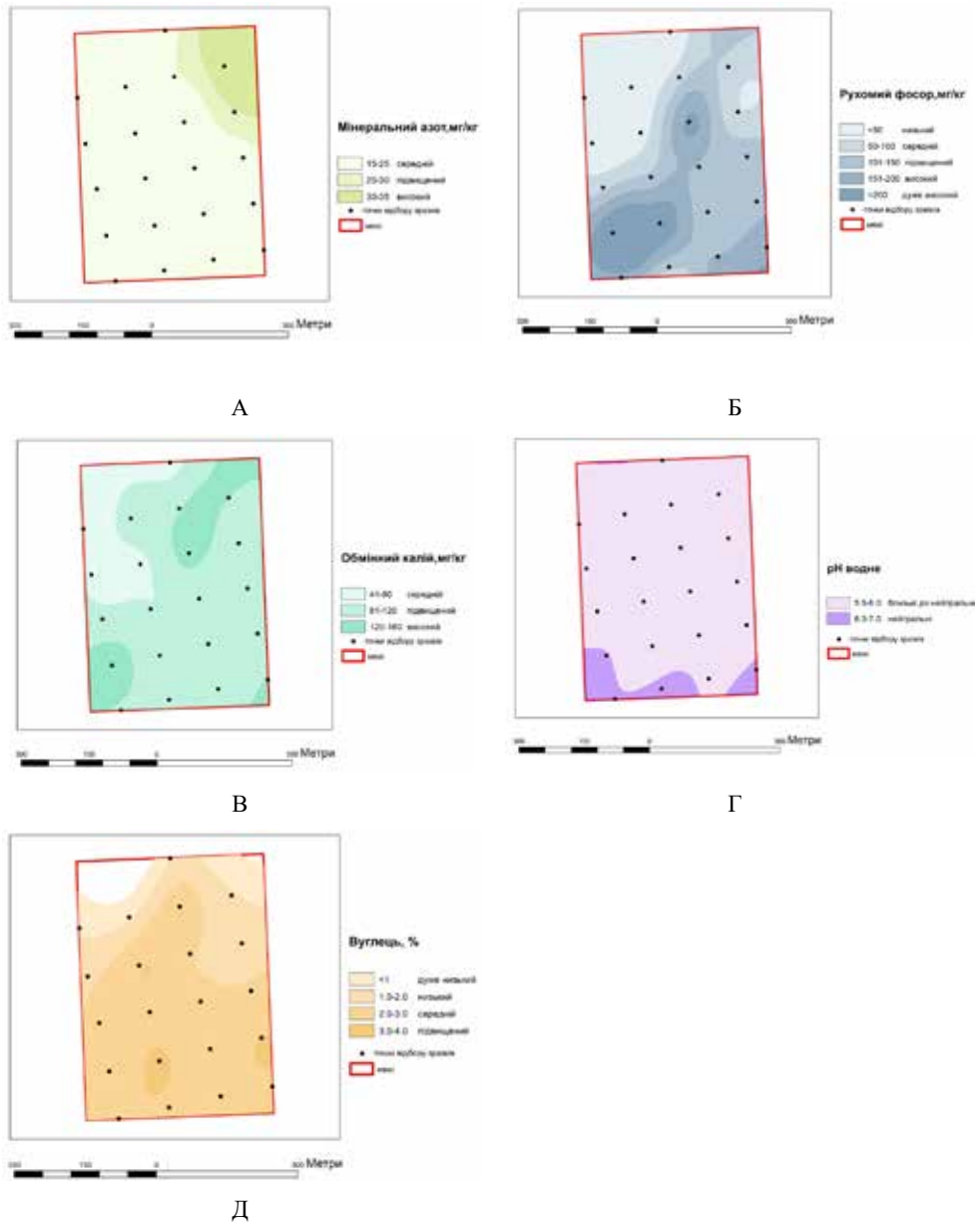


Рис. 3. Гепросторова диференціація ґрунтового покриву за показниками родючості на посівах пшениці озимої (об'єкт «Буди»): А – уміст мінерального азоту, мг/кг ґрунту, Б – уміст рухомого фосфору, мг/кг ґрунту, В – уміст обмінного калію, мг/кг ґрунту, Г – показник $pH_{водн.}$, одиниць, Д – уміст органічного вуглецю, %

Кислотність ґрунтів відносно вирощування пшениці озимої характеризується найбільш сприятливими значеннями, переважно близькими до нейтральних. Уміст вуглецю органічної речовини ґрунтів, відповідно до прийнятої класифікації, в основному є дуже низьким, низьким і середнім, за винятком невеликих ділянок поля з підвищеним його вмістом (див. рис. 3Д).

Як й очікувалося, використання на пізніх фазах пшениці озимої індексу NDVI для означеної мети через відсутність диференціації за врожайністю зерна виявилось неможливим (рис. 4). Як свідчать розраховані на основі знімку значення індексу NDVI в межах досліджуваної ділянки, диференціація посівів за цією величиною відсутня. Тому використання індексу NDVI з метою встановлення продуктивності сільськогосподарських культур доцільно лише у фазах їх активної вегетації, коли відбувається накопичення біомаси, що підтверджують дослідження інших науковців [12].

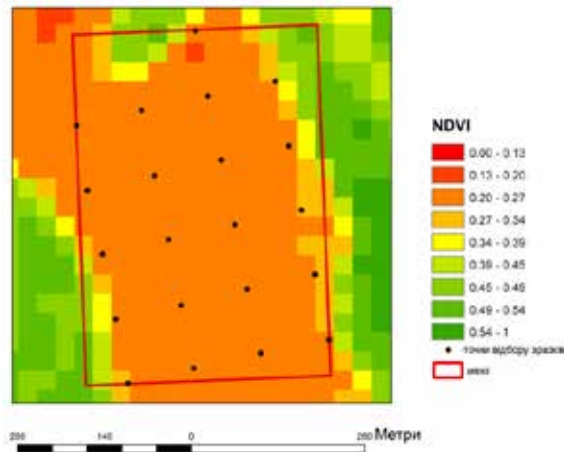


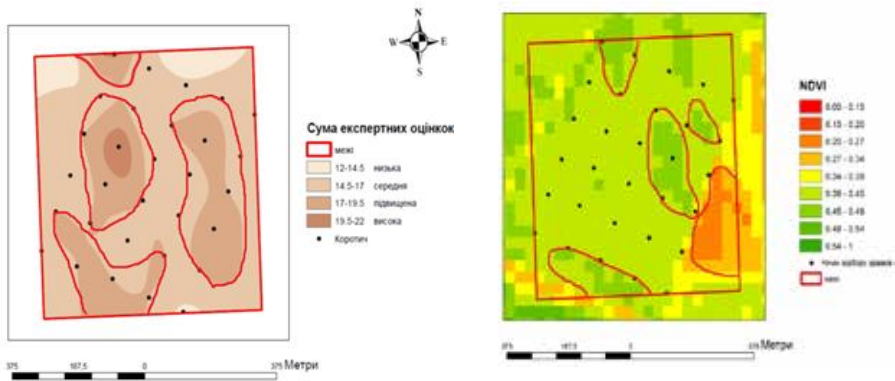
Рис. 4. Диференціація значень NDVI на посівах пшениці озимої у фазі воскової стиглості

У ході досліджень проведено узагальнення показників родючості ґрунтів дослідних об'єктів на основі використання ДСТУ 4362:2004 [5]. Результати верифікації геопросторового поширення ґрунтової родючості відносно кукурудзи на зерно та пшениці озимої, отримані за балами експертної оцінки, представлено на рис. 5.

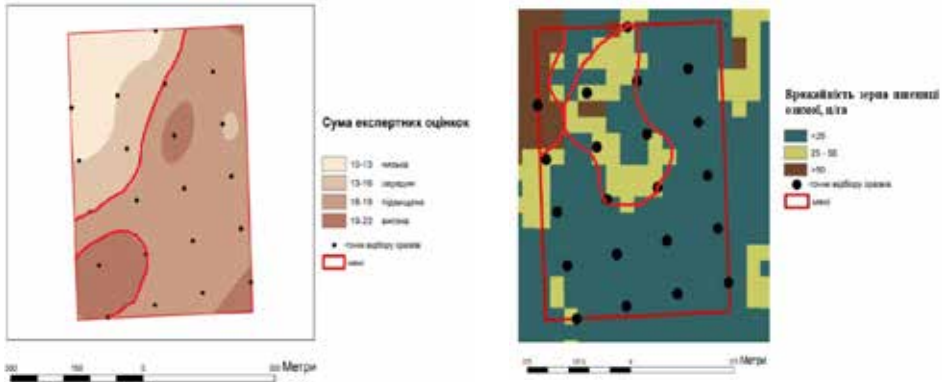
У зв'язку з вищезначеним для верифікації даних щодо озимої пшениці застосовано раніше розроблену модель на основі індексу NDSI (див. формулу 3).

Навіть дискретна в часі й просторі двох означених величин дає змогу опосередковано засвідчити коректність розроблених градацій показників родючості ґрунтів, наведених у чинному ДСТУ [5].

У ході досліджень встановлено, що найбільш інформативним верифікаційним показником просторового поширення величини ґрунтової родючості є значення індексу NDVI біомаси кукурудзи у фазу 8–11 листків, які локалізовані зі значеннями її бальної оцінки (див. рис. 4).



А



Б

Примітка: червоним кольором відмічено зони з найвищою оцінкою ґрунтової родючості й найвищою продуктивністю сільськогосподарських культур.

Рис. 5. Результати геопросторової верифікації показників ґрунтової родючості на посівах кукурудзи на зерно та пшениці озимої: А – картосхема експертної оцінки показників ґрунтової родючості (бали) (ліворуч) і величини індексу NDVI на посівах кукурудзи на зерно у фазі 8–11 листків (праворуч) (об'єкт «Новий Коротич»), Б – картосхема експертної оцінки показників ґрунтової родючості (бали) (ліворуч) і врожайності зерна пшениці озимої (ц/га) на основі індексу NDSI (формула 3) на посівах у фазі воскової стиглості (праворуч) (об'єкт «Буди»)

Однак геопросторова локалізація показників величини ґрунтової родючості в балах і значень оцінки врожайності зерна пшениці озимої у фазі воскової стиглості на основі розробленої раніше моделі з використанням індексу NDSI є менш показовою (див. рис. 4). Останнє може свідчити про вплив на формування протягом вегетації величини врожайності зерна пшениці озимої інших показників, зокрема умов рельєфу, вологості ґрунту тощо.

Висновки і пропозиції. Таким чином, завдяки розвитку сучасних дистанційних технологій стала можливою дискретна верифікація наявної класифікації показників ґрунтової родючості. Досить перспективною є можливість використання означеного алгоритму у вигляді вирішення зворотної геопросторової задачі: коли

локалізація на місцевості максимальних величин вегетаційного індексу може бути основою для визначення оптимальних параметрів за окремими показниками родючості для певного ґрунту або групи ґрунтів.

Такий підхід можливий у випадку визначення оптимальних градацій показників ґрунтової родючості під час оптимізації режиму живлення сільськогосподарських культур для фермерських господарств з невеликою площею передусім завдяки невеликій вартості порівняно з традиційним закладанням стаціонарних досліджень. Як свідчать результати досліджень, у випадку застосування зазначеного алгоритму досить важливим є зважений підбір вегетаційних індексів.

Інтегрування розроблених моделей дистанційного зондування ґрунтів різних супутникових систем повинно відбуватися за принципом від більш деталізованих спектрональних знімків до більш узагальнених, а не навпаки. У цьому випадку раніше розроблену модель на цих знімку Sentinel 2a з розрізненістю використаних каналів 10 і 20 м (на 1 піксель) використано для каналів Landsat 8 із розрізненістю 30 м (на 1 піксель).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Чернявський І.Ю. Прогнозування експортного потенціалу підприємств зернової галузі України з урахуванням рівня розвитку вітчизняної селекції. *Український журнал прикладної економіки*. 2019. Том 4. № 4. С. 199–208.
2. Hoptmans J.W., Nielson D.R., Bristow K.L. How useful are small scale soil hydraulic property measurements for large-scale vadose zone modeling? *Environmental Mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in the Biosphere*, 2002. Geophes. Momogr. Ser. Vol. 129. P. 247–258.
3. Chivasa W., Mutanga O., Biradar C. Application of remote sensing in estimating maize grain yield in heterogeneous African agricultural landscapes: a review. *Int. J. Remote Sens.* 2017. № 38 (23). P. 6816–6845.
4. Bryant R., Thoma D., Moran S. Holifield. Evaluation of Hyperspectral, Infrared Temperature and Radar Measurements for Monitoring Surface Soil Moisture. *In Proceedings of the First Interagency Conference on Research in the Watersheds*. Benson, Arizona, 2003. P. 528–533.
5. ДСТУ 4362:2004 Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів. [Чинний від. 2006-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 18 с.
6. Стыценко Е.А. Разработка методики автоматизированного дешифрирования растительного покрова с комплексным использованием разносезонных зональных космических изображений : дисс. ... канд. техн. наук : 25.00.34 / Моск. гос. университет геодезии и картографии. Москва, 2018. 213 с.
7. Гебрин-Байди Л.В. Застосування аерокосмічних методів для оцінювання родючості земель сільськогосподарського призначення ландшафтних зон Закарпаття : дис. ... канд. тех. наук. Львів, 2018. 227 с.
8. Трускавецький С.Р. Використання багатоспектрального космічного сканування та геоінформаційних систем у дослідженні ґрунтового покриву Полісся України : дис. ... канд. біол. наук : 03.00.18 / Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського» УААН. Харків, 2006. С. 260.
9. Шатохин А.В., Ачасов А.Б. Использование современных технологий при картографировании почвенного покрова Северной Донецкой Степи. *Почвоведение*. 2005. № 7. С. 790–798.
10. Guerschman J., Scarth P., Mcvicar T. et al. Assessing the effects of site heterogeneity and soil properties when unmixing photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil fractions from landsat and modis data. *Remote Sensing of Environment*, 2015. № 161. P. 12–26.

11. Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis / M.K. Griffin, S.M. Hsu, H.K. Burke, S.M. Orloff, C.A. Upham. *Lincoln Laboratory y journal*. 2005. Vol. 15. № 2. P. 271–298.
 12. Jorgen L. Olsen, Ceccato P., Proud S. and ather. Proud Relation between Seasonally Detrended Shortwave Infrared Reflectance Data and Land Surface Moisture in Semi-Arid Sahel. *Remote Sens*. 2013. № 5. P. 2898–2927.
 13. The Information Content of Spectral Vegetation Indices in the Interpretation of Satellite Images of Cultivated Fields / T.I. Pisman, A.P. Shevyrnogov, A.A. Larko, I.Y. Botvich, D.V. Emelyanov, A.A. Shpedt, Y.N. Trubnikov. *Biophysics*. 2019. № 64 (4). P. 588–592.
 14. ДСТУ 4115-2002. Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова. [Чинний від 2003-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2002. 9 с.
 15. Якість ґрунту. Методи визначення органічної речовини: ДСТУ 4289:2004. [Чинний від 2005-07-01]. Київ : Держстандарт України, 2005. 18 с.
 16. Якість ґрунту. Визначення нітратного і амонійного азоту в модифікації ННЦ ПА ім. О.Н. Соколовського : ДСТУ 4729:2007. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 9 с.
 17. ДСТУ 8346:2015. Якість ґрунту. Методи визначення питомої електропровідності, рН і щільного залишку водної витяжки. [Чинний від 2017-07-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 10 с.
 18. Использование данных дистанционного зондирования для оценки продуктивности озимой пшеницы в условиях Житомирского Полесья / П.И. Трофименко, В.И. Зацерковный, Е.В. Зубова, Н.В. Трофименко, Т.Н. Мысльва. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018. № 2. С. 161–168.
-