



УДК 631.471:631.481+528.854:528.855
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.9.2024.18>

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ҐРУНТОВОГО ДЕШИФРУВАННЯ ДАНИХ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ ЯК ІНФОРМАЦІЙНОЇ ОСНОВИ ЗБАЛАНСОВАНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

Т. Ю. Биндич¹, С. Р. Трускавецький², О. І. Шерстюк³

Необхідність інтеграції нашої країни в загальноєвропейські системи спостережень за навколишнім середовищем актуалізують розробку сучасної системи інформаційного забезпечення природо- та землекористування в Україні на основі даних космічного сканування. Метою досліджень є розроблення методологічних основ діагностування та параметризації неоднорідності локальних структур ґрунтового покриву за даними космічного сканування високого просторового розрізнення як інформаційної основи розробки сучасних систем збалансованого землеробства та раціонального управління ґрунтовими ресурсами. Використано комплекс різноманітних методів: інформаційно-бібліографічний, аналітичний, абстрактно-логічний, польовий та лабораторно-аналітичний, статистичний та математичний, а також методи багатовимірної аналізу, геоінформаційної обробки та геостатистичного аналізу даних. На прикладі досліджень на полігоні «Тишки 1», які включали сумісний аналіз результатів класифікації багатоспектральних космічних зображень та геостатистичного аналізу даних вибіркового наземних обстежень доведено ефективність розроблених методологічних основ тематичної обробки космічних знімків для визначення, параметризації та моделювання локальних структур ґрунтового покриву як основи створення сучасної системи інформаційного забезпечення точного та збалансованого землероб-

¹ доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник лабораторії охорони ґрунтів від ерозії та дистанційних методів досліджень

(Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», м. Харків)

e-mail: tanyabyndych@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9098-7694

² кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник,

старший науковий співробітник лабораторії охорони ґрунтів від ерозії та дистанційних методів досліджень

(Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», м. Харків)

e-mail: starwalkerone@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3374-2142

³ провідний інженер лабораторії охорони ґрунтів від ерозії та дистанційних методів досліджень

(Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського», м. Харків)

e-mail: sherstyukalex@gmail.com

ORCID: 0009-0002-2919-0445

ства. За геостатистичним експрес-аналізом даних точкового відбору проб в межах полігону, за індексом Морана, деталізовано умови та фактори латеральної неоднорідності чорноземних ґрунтів (чорноземи типовий, реградований та лучно-чорноземний ґрунт) на схилах різних експозицій.

Встановлено, що на схилі південно-східної експозиції, для якої характерно розвиток ерозійних процесів, латеральна неоднорідність ґрунту є характерною для показників гранулометричного складу, загального вмісту гумусу та окремих складових водного витягу. На схилах північно-західної та північної експозицій, в умовах дуже слабого прояву ерозії, латеральна неоднорідність ґрунту відзначено тільки для показників мікроагрегатного складу, що дозволило визначити вплив структурного складу поверхневого шару ґрунту на формування його оптичного образу. На основі результатів ґрунтового дешифрування даних космічної зйомки розроблено пілотний проект інформаційного сервісу для надання інформації про стан ґрунтових ресурсів широкому колу користувачів: землекористувачам, науковій спільноті, громадськості тощо.

Ключові слова: багатоспектральне космічне сканування, ґрунтовий покрив, дешифрування, класифікація зображень, геостатистичний аналіз, неоднорідність ґрунтів.

MODERN APPROACHES TO SOIL DECODING OF SPACE SURVEY DATA AS AN INFORMATION BASIS FOR BALANCED AGRICULTURE

T. Yu. Byndych, S. R. Truskavetsky, A. I. Sherstyuk

The need to integrate our country into the general European systems of environmental observation actualizes the improvement of the modern information support system for nature use and land use in Ukraine based on space scanning data. The purpose of the research is development of the fundamentals of methodology for diagnosing and parameterizing of local structures heterogeneity of soil cover based on space scanning data with high spatial resolution as an information basis to develop of modern systems of balanced agriculture and rational management of soil resources. It were used a complex of various methods: information-bibliographic, analytical, abstract-logical, field and laboratory-analytical, statistical and mathematical, as well as methods of multidimensional analysis, geo-information processing and geo-statistical data analysis. Using the example of research at the «Tyshki 1» training ground, which included a joint analysis of the results of the multispectral data classification and geostatistical analysis of data from selective ground surveys, It has been proven the effectiveness of developed methodological foundations of thematic processing of space images for the determination, parameterization and modeling of local soil cover structures as the basis to create a modern system information support for precision and balanced farming. According to the geostatistical express analysis of point sampling data within the polygon by Moran's index, conditions and factors of lateral heterogeneity of chernozems (typical chernozem, regraded and meadow-chernozem soil units) on slopes of different exposures were detailed.

It was established that on the slope of the south-eastern exposition, which is characterized by the development of erosion processes, lateral soil heterogeneity is characteristic for granulometric composition indicators, total humus content and separate components of water extraction. Lateral soil heterogeneity was noted only for indicators of microaggregate composition on the slopes of the north-western and northern expositions, in conditions of very weak manifestation of erosion, which has allowed to determine the influence of the structural composition of the soil surface layer on the formation its optical characteristics. A pilot project of an information service was developed based on the soil decoding results of space survey data to provide information about the state of soil resources to a wide range of users: land users, the scientific community, the general public.

Key words: multispectral space scanning, soil cover, decoding, image classification, geostatistical analysis, soil heterogeneity.

Вступ

Збалансоване землеробство складає основу раціонального природокористування, що спрямовано на комплексне вирішення завдань охорони та збереження земельних ресурсів планети шляхом застосування екологічних принципів у процесі прийняття рішень щодо їх використання (Dale et al., 2000). Найбільш розвинуті та

прогресивні підходи щодо сталого та раціонального управління земельними ресурсами, що існують у практиці землеробства у світі, ставлять у пріоритет збереження продуктивності сільськогосподарських земель, родючості ґрунту й, в цілому, сільських ландшафтів для нинішніх та майбутніх поколінь (Applying..., 2001). Ці підходи передбачають використання сільсько-

господарських земель у стані, близькому до природного, що потребує оптимізації агровиробництва та досягається шляхом вибору найкращого типу використання земель, що встановлюється за математичним моделюванням на основі точних даних про якісний стан ґрунтів та детальному врахуванні просторового розподілу їх основних агроекологічних властивостей. Зрозуміло, що сучасні підходи до розробки збалансованих систем землеробства потребують актуальних даних про стан земельних та ґрунтових ресурсів як складової їх екологічного менеджменту, що отримано за регулярними та системними їх спостереженнями (FAO. Report..., 2014; IPBES, 2018). За рішеннями 13-ої конференції сторін Конвенції ООН по боротьбі з опустелюванням, підкреслено важливість залучення даних багатоспектрального космічного сканування (БСКС), як новітнього джерела об'єктивної інформації про стан земної поверхні, в існуючі системи спостережень за станом навколишнього середовища та раціонального природокористування (Report..., 2017), що актуалізує наукові дослідження щодо розробки методології їх використання для створення сучасних систем спостережень довкілля Україні та, зокрема, для досліджень ґрунтового покриву (ҐП) на землях сільськогосподарського призначення.

Раніше співробітниками сектору дистанційного зондування ҐП ННЦ «ІА імені О.Н. Соколовського» проведено узагальнення сучасних підходів створення систем природо- та землекористування на основі даних БСКС та відзначено, що розробка повної організаційної структури процесу використання цих даних для виявлення змін стану ґрунтів та ҐП, що дозволяють визначити їх функціональні зміни, ступінь деградації, а також дозволяють своєчасно проводити коригувальні заходи, потребує системної науково-дослідної роботи, що має міждисциплінарний характер та значний рівень високотехнологічних підходів до аналізу різноформатних даних (Трускавецький та ін., 2018; Биндич, 2022). У цілому ж, аналіз досвіду створення та функціонування сучасних систем інформаційного забезпечення використання та моніторингу сільськогосподарських земель на основі даних БСКС показав, що спільним для них є застосування вибіркового методу збору даних по мережі наземних об'єктів спостереження для здійснення ідентифікації та моніто-

рингу стану сільськогосподарських об'єктів та, зокрема, ґрунтів, можливість визначати динаміку стану сільськогосподарських об'єктів за різночасовими даними космічного знімання, активно розробляти та залучати опорну наземну тематичну інформацію про стан ґрунтів для автоматизованої обробки та дешифрування даних БСКС (Ґрунтови..., 2020).

Загалом, отримання узгоджених даних про стан ҐП на основі даних космічного знімання має особливу актуальність для України не тільки у зв'язку з необхідністю вирішення різноманітних проблем землекористування та збереження ґрунтів, але й для розвитку спільної сільськогосподарської політики України як країни-кандидата на вступ до ЄС, що потребує вдосконалення системи інформаційного забезпечення землекористування точною інформацією про якість ґрунтів та просторовий розподіл їх властивостей. У зв'язку з цим, питання розвитку інформаційної бази землекористування та спостережень за станом ґрунтів в межах сільськогосподарських угідь складають основу численних програм наукових досліджень в ЄС (King et al, 1995a, 1995b; The thematic..., 2006; Varuth et al., 2008), а також сумісних проєктів, що здійснено за участю українських фахівців (Станкевич і Козлова, 2007; Загальська, 2014).

Таким чином, метою проведених досліджень є розроблення методологічних основ діагностування та параметризації неоднорідності локальних структур ҐП на основі даних БСКС високого просторового розрізнення як інформаційної основи розробки сучасних систем збалансованого землеробства, моніторингу ґрунтів та раціонального управління ґрунтовими ресурсами. Для досягнення поставленої мети, в основному, вирішували завдання оцінювання інформативності даних БСКС високого просторового розрізнення в якості джерела первинної інформації дослідження неоднорідності локальних структур ҐП та розроблення методологічних основ визначення неоднорідності локальних структур ҐП за сумісним, геостатистичним аналізом даних БСКС та даних вибіркового дослідження ґрунтів як інформаційної основи дешифрування даних БСКС для всебічного моделювання та точного опису локальних структур ҐП. Об'єкт дослідження – локальні структури ҐП. Предмет дослідження – латеральна неоднорідність показників властивостей ґрунтів.

Матеріал і методи

Для досягнення мети та вирішення поставлених завдань використано методи: інформаційно-бібліографічний та аналітичний – для аналізу існуючих підходів щодо визначення латеральної неоднорідності ґрунтів та характеристики даних БСКС як базової інформації ґрунтознавчих досліджень; абстрактно-логічний – для теоретичного узагальнення та формування висновків щодо дослідження неоднорідності ҐП на основі даних космічної зйомки; польовий та лабораторно-аналітичний – для визначення комплексу ґрунтових показників і генезису ґрунтів як основи тематичного дешифрування даних БСКС та верифікації його результатів; багатовимірний аналіз та методи геоінформаційної обробки та геостатистичного аналізу даних – для просторової диференціації ҐП за даними БСКС та створення похідних картографічних матеріалів; статистичний – для виявлення достовірності здобутих результатів; математичний (дисперсійний, регресійний, кореляційний, факторний) – для встановлення залежностей і зв'язків між властивостями та оптичними характеристиками поверхневого шару ґрунту як основи моделювання неоднорідності ҐП за даними БСКС.

Прикладом найбільш повних та комплексних досліджень щодо розробки основ такої методології є дослідження на полігоні «Тишки 1» (197 га) впродовж 2005–2020 рр., який розташований у лісостеповій зоні країни та представляє типову для регіону елементарну ландшафтну структуру – перехід вододільної хвилястої місцевості в балочну западину. Згідно чинній в Україні схеми фізико-географічного районування (Маринич і Шищенко, 2005), цей полігон відносяться до Золочівсько-Чугуївського фізико-географічного району Харківської височинної області Східноукраїнського краю, для якого характерні ерозійно-деревоподібні сполучення чорноземів типових глибоких середньо та малогумусних та висотно-впорядковані сполучення чорноземів опідзолених та вилугуваних. Ґрунотворною породою в межах цієї території є лесоподібний суглинок, висококарбонатний, важко-суглинковий та легкоглинистий.

Дослідження передбачали аналіз різноманітних матеріалів для полігону, а саме: даних космічного апарату Landsat 8 (дата зйомки 05.05.2017 року), архівних матеріалів (топографічні карти та плани землевпорядкування масштабу від 1:10000 до 1:25000,

ґрунтові карти у масштабі від 1:25000 до 1:50000, фондові матеріали ННЦ «ІА імені О.Н. Соколовського»). Основний принцип вибору даних БСКС полягав у пріоритетності використання зображень відкритої ґрунтової поверхні (орні землі в умовах передпосівної обробки та зяблевої оранки, повітряно-сухого стану поверхні ґрунту), що дозволяє дешифрувати локальні структури ҐП за прямими дешифрувальними ознаками – їх оптичними характеристиками.

Методика досліджень включала побудову та аналіз цифрової моделі рельєфу (ЦМР), розрахунок вегетаційних індексів, зокрема NDVI, а також польове обстеження території відповідно до чинних в країні стандартів: ДСТУ 4287:2004, ДСТУ ISO 10381-1:2004, ДСТУ ISO 10381-2:2004, ДСТУ ISO 10381-3:2004, ДСТУ ISO 10381-4:2005. Польові дослідження ҐП передбачали точну географічну прив'язку ґрунтових розрізів та місць відбирання проб ґрунту за допомогою приладів глобальної системи позиціонування (GPS). Обсяг наземних спостережень на полігоні «Тишки 1» загалом склав 24 розрізи, 78 проб за регулярною мережею (100 м) та 272 проби за інформаційною сіткою геосистемної оцінки ерозійної небезпеки земель (Куценко, 2008), яка деталізує геоморфологічні особливості дослідної території.

Аналітичні методи включали визначення: гранулометричного та мікроагрегатного складу ґрунту за методом піпетки в модифікації Н.А. Качинського згідно з ДСТУ 4730:2007 та ДСТУ 4728:2007, загального вмісту гумусу за методом І.В. Тюріна, за титрометричним варіантом згідно з ДСТУ 4289:2004, рН ґрунту за інструментальним методом із застосуванням скляного електроду в суспензії ґрунту в воді та в розчині KCl – ДСТУ ISO 10390:2007, катіонно-аніонного складу водної витяжки за комплексометричним, аргентометричним та полум'яно-фотометричними методами згідно з ДСТУ 7908, ДСТУ 7909, ДСТУ 7944 та ДСТУ 7945, складу обмінних катіонів за методом Шоленберга (титрометричний варіант).

Математико-статистична обробка даних БСКС та результатів аналітичних вимірювань проводилася за методами дисперсійного, кореляційного, регресійного аналізів в програмі Statistica. Створення ЦМР та обробка даних БСКС, розрахунок вегетаційних індексів, а також їх перетворення, геостатистичний аналіз та числову таксономію за кластерним аналізом, проведено

за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) TNT та ENVI.

Результати

Під час досліджень розроблено та опрацьовано методи ґрунтового дешифрування, які включають на початковому етапі крім процедур попередньої обробки та загально-статистичного аналізу зображення, також його класифікацію за методами неконтрольованої класифікації. При цьому, під час аналізу результатів класифікації використано метод просторового аналізу та співставлення результатів дискретизації зображення, що отримано при послідовному підвищенні кількості класів. Встановлення взаємної обумовленості ознакової та територіальної диференціації ҐП на основі даних космічного сканування здійснено за статистико-картографічним аналізом, який передбачає перевірку коректності визначених виділів ґрунту на основі статистичного аналізу даних польового обстеження та картографічного контролю в реальному географічному просторі, а також аналізу зв'язків елементів структури ҐП з факторами його диференціації (перш за все, з ЦМР).

Для оцінювання якості просторової диференціації ҐП за даними БСКС та визначення закономірного характеру варіювання ґрунтових властивостей у просторі здійснено геостатистичний експрес-аналіз даних точкового відбору проб з поверхневого шару

ґрунту за допомогою глобального індексу Морана (I_M) та його супутніх оцінок (Z -оцінки та p -значення), що дозволяє оцінити результати відбирання проб у контексті нульової гіпотези, яка стверджує, що проаналізовані атрибути дослідного просторового об'єкту розподілені випадково, що рівнозначно його однорідності (Moran, 1950; Li et al., 2007).

За результатами дешифрування даних Ландсат 8 для полігону «Тишки 1», встановлено пріоритетність використання методу ISODATA для визначення виділів ґрунту незначної площі, що імовірно представляють розподіл елементарних ґрунтових ареалів. Оптимальну картографічну модель обрано шляхом аналізу автокореляційних функцій оптичної яскравості поверхні ґрунту за напрямками, які характеризувалися значними варіаціями цієї ознаки та перетинали ділянки полігону, які є відмінними за ЦМР (рис. 1). Розгляд карт, які отримано при поступовому збільшенні ступеня дискретизації зображення (від 2 до 12 класів) показав, що на рівні 8 класів досягається таке взаємне розташування контурів, яке в цілому, простежується й для більшого ступеня, що вважається ознакою якісної класифікації (рис. 2).

Співставлення результатів класифікації з ЦМР показало певну приуроченість побудованих за даними БСКС контурів до окремих елементів рельєфу, що в цілому відповідає

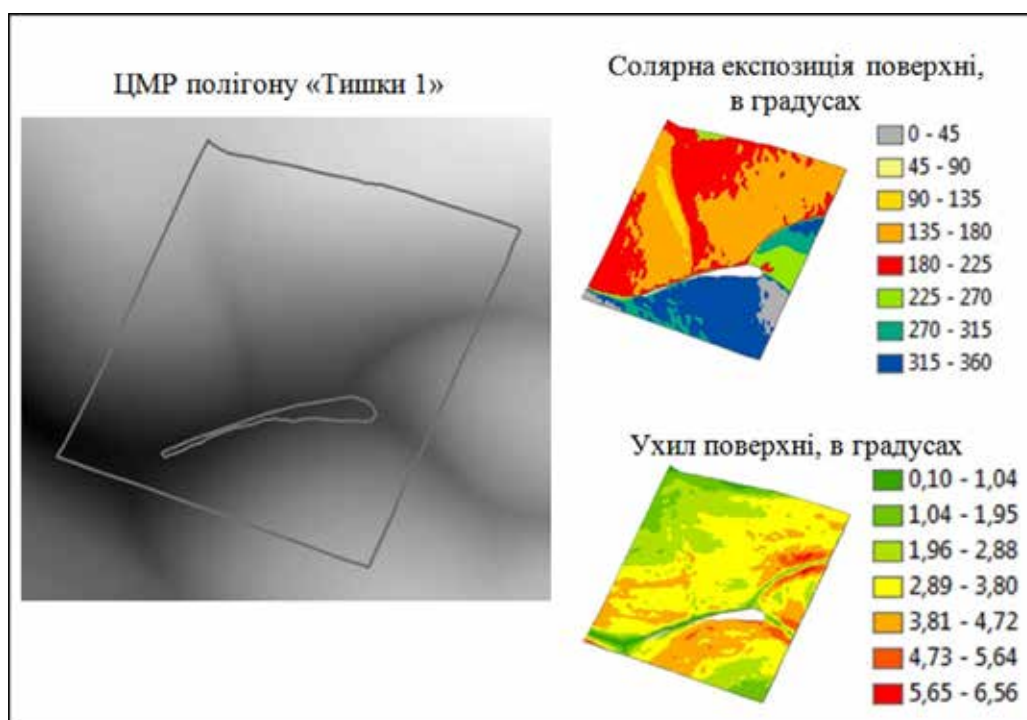


Рис. 1. ЦМР полігону «Тишки 1» та її похідні

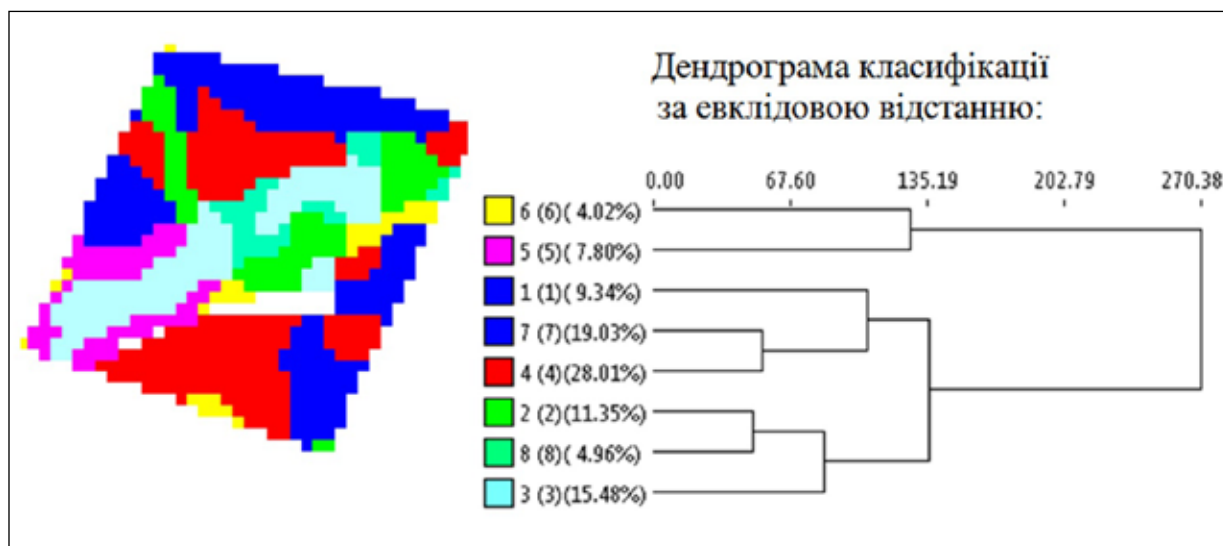


Рис. 2. Результати класифікації космічного зображення полігону «Тишки 1» за методом ISODATA на рівні 8 класів

чинним, традиційним підходам до картографування ґП, які існують в українському ґрунтознавстві та підтверджує коректність картографічної моделі, яка деталізує особливості схилової системи цієї території.

Статистичний аналіз даних, що здійснено за аналітичними дослідженнями відібраних проб ґрунту (в якості навчальної вибірки дешифрування), зокрема аналіз розподілів загального вмісту гумусу, гідролітичної кислотності та вмісту фракцій фізичної глини (ФГ) показали від'ємну асиметрію, розподіл рН сольового також має високий коефіцієнт ексцесу ($E \geq 0,4$). На основі цього зроблено висновок, що вибірка складається зі споріднених виділів ґрунту, але відмінних за режимами. Опис розрізів, які закладено в межах визначених за даними БСКС класів ґрунтів, показав їх належність до малогумусних чорноземів реградованого та типового, з відмінами за глибиною скипання карбонатів, потужністю гумусованої частини профілю, вмістом ФГ та ступенем еродованості.

На основі аналізу I_M та його супутніх оцінок визначено, що диференціація ґП полігону «Тишки 1» за даними БСКС лише частково вирішила завдання виділення однорідних відмін ґрунту. Найбільш однорідними виявилися за загальним вмістом гумусу виділи чорноземів реградованого та типового малогумусних важкосуглинкових слабозмитих на лесоподібному суглинку, для яких I_M знаходився в інтервалі від -0,21 до 0,09 (Z -оцінки – від -1,3 до 1,2, p -значення – від 0,18 до 0,9); за рН сольовим та гідролітичною кислотністю – різновиди чорнозему

типового глибокого та середньоглибокого малогумусного як на лесоподібному суглинку, так і на делювіальних відкладах, для яких I_M складав від -0,03 до 0,41 (Z -оцінки – від -0,5 до 1,55, p -значення – від 0,12 до 0,63). Для цих виділів характерною є й однорідність за вмістом ФГ, за фактором дисперсності Качинського (Φd) для яких I_M складав від -0,08 до 0,20 (Z -оцінки – від -0,03 до 1,36, p -значення – від 0,15 до 0,8). За гранулометричним показником структурності за А.Ф. Вадюніною для гумусних ґрунтів (P) та за ступенем агрегатності за Бейвером та Роадесом (Ka) однорідними виявилися виділи чорнозему типового середньо та важкосуглинкового на лесоподібному суглинку та делювіальних відкладах і чорнозем реградований малогумусний важкосуглинковий слабозмитий на лесоподібному суглинку, для яких I_M складав від -0,20 до 0,26 (Z -оцінки – від -0,8 до 0,9, p -значення – від 0,3 до 0,9).

Більшість з визначених за даними БСКС різновидів чорнозему типового на лесоподібному суглинку та виділ лучно-чорноземного глибокоскипаючого легкоглинистого ґрунту за відносними показниками структурного стану виявилися неоднорідними. Так, за показником P , для цих ґрунтів I_M складав від 0,34 до 0,49 (Z -оцінка – від 3,09 до 4,07, p -значення – біля 0,002), за Φd – I_M знаходився в інтервалі від 0,10 до 0,59 (Z -оцінка – від 1,81 до 5,98, p -значення – від 0,002 до 0,07).

Для верифікації результатів класифікації космічного зображення полігону та точ-

ного опису ґрунтових властивостей у межах кожного з визначених за даними БСКС класів ґрунтів проведено геостатистичне моделювання за емпіричним байєсовим кригінгом – аналізом (ЕБК) даних навчальної вибірки ґрунтового дешифрування даних БСКС. Слід відзначити, що використання ЕБК обґрунтовано його можливостями щодо моделювання для окремих піднаборів даних, а також для автоматичного врахування невизначеностей, які пов'язано з побудовою емпіричних варіограм. В цілому ж, результати побудови варіограм для двох різних ділянок полігону (окружності на рис. 3), демонструють різницю у характері варіювання дослідної ознаки ґрунту. Аналіз варіограм, які побудовано для двох ділянок в межах полігону «Тишки 1» доводить закономірне варіювання загального вмісту гумусу в ґрунті, але більш значне – для мало-

гумусної ділянки, в серединній частині полігону (верхня варіограма), яка характеризується як меншим медіанним значенням самородку, так й більший нахилом варіограми. Це підтверджує наявність неоднорідності ґП полігону та доречність його просторової диференціації, зокрема на основі даних БСКС. Аналіз результатів перехресної перевірки інтерполювання за методом ЕБК також підтвердив ефективність використання цього методу моделювання для створення коректної картограми загального вмісту гумусу для полігону «Тишки 1».

Обговорення

ґП є надзвичайно складним об'єктом дешифрування за даними БСКС, тому що характеризується довільністю форм контурів, відсутністю строгої впорядкованості в їх розташуванні на місцевості, незначною тривалістю часу, коли перебуває в оптималь-

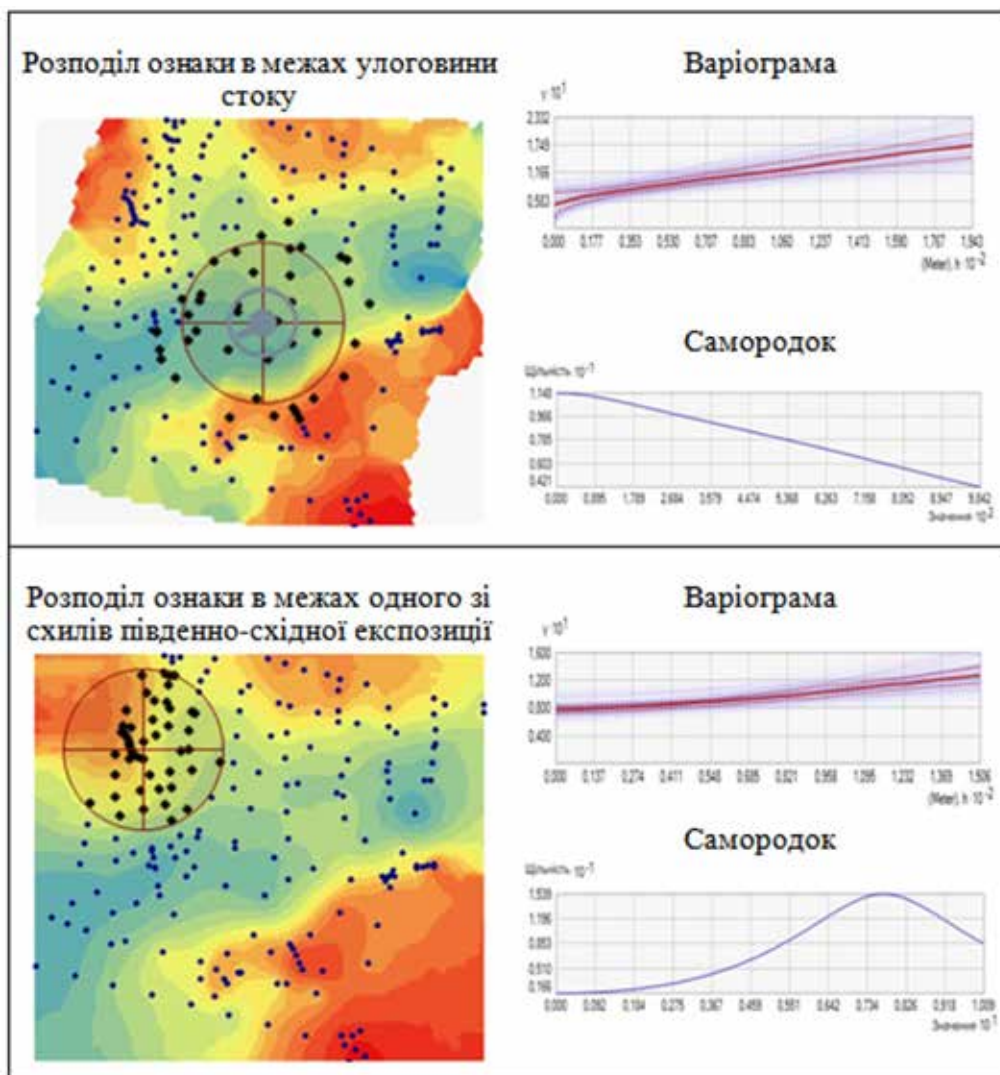


Рис. 3. Результати геостатистичного моделювання даних вибіркового, відбору проб на полігоні «Тишки 1» для загального вмісту гумусу у ґрунті за методом ЕБК

них умовах для знімання відкритої поверхні ґрунту, що достатньо часто унеможливає дешифрування ґрунтів за прямими дешифрувальними ознаками. Тому часто використовують метод ландшафтної індикації, який складається у непряму або опосередкованому визначенні властивостей ґрунтів, за допомогою зв'язків ґрунтів з іншими компонентами ландшафтів. У зв'язку з цим, не можна визначити, що ґрунтове, як гаузовий вид дешифрування даних БСКС є достатньо розвинутим напрямом у світовій науці та практиці. Враховуючи це, а також новітній характер запропонованих підходів щодо використання даних БСКС, вважаємо за необхідне в рамках представленої роботи більш детально розглянути підходи до аналізу отриманих результатів, оскільки це дозволяє не тільки довести ефективність розроблених методів обробки даних БСКС, але й вдосконалити методи інтерпретаційного завдання дешифрування – трансформування інформації щодо оптичних властивостей ґрунтової поверхні в інформацію про складові структури ІП та кількісні оцінки його неоднорідності. Зокрема, на наш погляд, важливим результатом проведених досліджень є можливість кількісного опису складових локальних структур ІП в межах сільськогосподарських угідь.

Оскільки найбільш повною характеристикою випадкової величини є закон її розподілу, то для узагальнюючого опису та параметризації просторової неоднорідності ІП в межах дослідного полігону «Тишки 1» було здійснено вилучення результатів геостатистичного моделювання за основними показниками ґрунтів для окремих класів ґрунтів, які визначено за класифікацією даних БСКС.

За загально-статистичним аналізом дослідних ознак ґрунту зроблено узагальнюючий висновок щодо ступеня їх мінливості та суттєвій відмінності законів їх розподілу від нормального (за значеннями показників асиметрії та ексцесу розподілу, а також їх похибок), що обґрунтовує використання робастних оцінок опису сукупності для кожного з класів, визначених під час класифікації даних БСКС.

Так, визначені в межах полігону класи ґрунтів певним чином диференційовані (чорнозем типовий, реградований та лучно-чорноземний ґрунт) за значенням медіани. Так медіанне значення за загальним вмістом гумусу для першого, другого, четвертого, сьомого та восьмого класів, які представляють різновиди чорнозему типо-

вого, знаходиться в межах від 3,6 до 4,0%. Виключення складає лише чорнозем намитий (5 клас), який відрізняється дещо облегшеним гранулометричним складом та пов'язаним з цим зниженим медіанним значенням загального вмісту гумусу – 3,26%. В той час, коли медіанне значення для цього показнику ґрунту для лучно-чорноземного ґрунту та реградованого чорнозему (клас 3) є проміжним та дуже подібним, що складає відповідно 3,5 та 3,4%. Також відмінним за медіанним значенням ступеню агрегатності за Бейвером та Родесом можна вважати чорнозем типовий легкоглинистий, який достатньо відрізнявся від важкосуглинкового різновиду. Проміжні медіанні значення для цього показнику ґрунту відзначено для чорнозему типового середньосуглинкового та лучно-чорноземного ґрунту (відповідно п'ятий та шостий класи). Визначені за даними БСКС виділи ґрунтів добре диференційовані за медіанним значенням рН сольового. Так медіана цього показнику для всіх класів, що відповідають чорнозему типовому важкосуглинковому та легкоглинистому, знаходилась в інтервалі між 5,4 та 5,7 моль на 1 л. Цікаво, що визначені за даними БСКС класи ґрунтів (чорнозем типовий, реградований та лучно-чорноземний ґрунт) диференційовані за значенням медіани, перш за все, для відносних показників структурного стану, наприклад, K_a та P , які є значно відмінними для різновидів чорнозему типового та лучно-чорноземного ґрунту.

У цілому ж, геостатистичний експрес-аналіз даних точкового відбору проб за I_M на полігоні «Тишки 1» дозволив деталізувати умови та фактори латеральної неоднорідності чорноземних ґрунтів (чорноземи типовий, реградований та лучно-чорноземний) у межах схилів різних експозицій (див. рис. 1). Зокрема, встановлено, що на схилі південно-східної експозиції, для якої в тій чи іншій мірі характерно розвиток ерозійних процесів, латеральна неоднорідність характерна для показників гранулометричного складу, загального вмісту гумусу та окремих складових водного витягу. На схилах північно-західної та північної експозицій, в умовах дуже слабого прояву ерозії, латеральна неоднорідність відзначено тільки для показників мікроагрегатного складу, що дозволило зробити висновок про значний вплив структурного складу поверхневого шару ґрунту на формування його оптичного образу.

Значний обсяг польових досліджень, зокрема значна кількість ґрунтових розрі-

зів, що закладено в межах цього полігону дозволили встановити можливість використання даних БСКС для визначення елементів локальних структур ГП, які є відмінними за характеристиками вертикальної будови ґрунту (грубизна гумусового шару, глибина карбонатного шару й тощо), що дозволяє визначити наявність прямого або опосередкованого зв'язку між оптичними характеристиками поверхні ґрунту та його морфологічною будовою. Й саме цей висновок обґрунтовує доцільність використання даних БСКС високого просторового розрізнення для створення актуальних великомасштабних ґрунтово-картографічних матеріалів, які складатимуть сучасну систему інформаційного забезпечення раціональних систем землі та природокористування у нашій країні.

Крім цього, на наш погляд, розроблені підходи до сумісного аналізу результатів обробки та класифікації даних БСКС, геостатистичної обробки та моделювання даних, що отримано за даними відбору проб із поверхневого шару ґрунту, дозволили

отримати дані щодо якісного стану ґрунтів значної точності та встановити основні закономірності просторового варіювання властивостей ґрунту за комплексом показників ґрунту, що доцільно використовувати під час оцінювання ефективності агрозаходів, розробки систем точного, збалансованого землеробства.

У зв'язку з цим, на прикладі полігону «Тишки 1», для якого накопичено значну кількість різноманітної, корисної для землекористувача інформації, що отримана за результатами тематичного дешифрування даних космічного сканування високого просторового розрізнення також апробовано підходи до створення сучасних інформаційних сервісів для землекористувачів.

Зокрема, під час створення пілотного проєкту інформаційного сервісу для полігону використано відомі програмні продукти, зокрема ArcGIS Online (Architecting..., 2023). ArcGIS Online використано як точку доступу до сайту ArcGIS Server, що представляє більш зручну для швидкого пошуку і використання веб – сервісів ГІС, а також має авто-

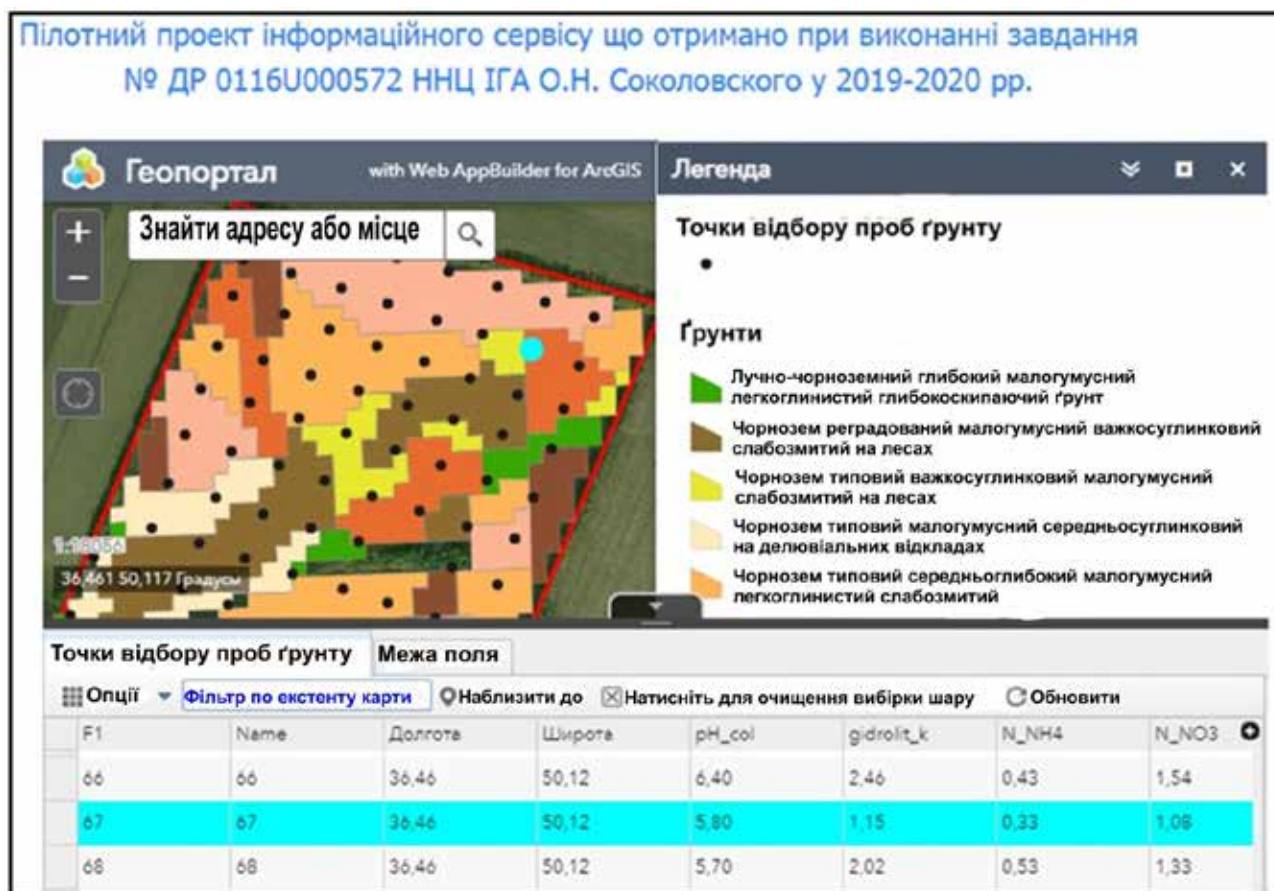


Рис. 4. Скріншот робочого вікна розробленого інформаційного сервісу для полігону «Тишки 1»

номний спосіб використання ArcGIS Server, що доречно для надання основних ресурсів в якості постачальника даних для землекористувачів. Скріншот робочого вікна розробленого інформаційного сервісу (рис. 4) дозволяє наочно продемонструвати простоту та зручність його використання для отримання та аналізу інформації щодо дослідних угідь для навіть не обізнаного в геоінформаційних технологіях користувача.

У цілому ж, представлення високоточних даних про якісний стан ґрунтів та ГП у вільному доступі здатне забезпечити необхідною інформацією не тільки проектування сучасних систем землекористування та визначення стану земельних та ґрунтових ресурсів, але й сприяє суспільному контролю громадськості за діяльністю землекористувачів та спеціалізованих установ, які є уповноваженими у сфері природо- та землекористування в Україні.

Висновки

Таким чином, шляхом аналізу світових тенденцій створення інформаційних систем раціонального природо- та землекористування обґрунтовано необхідність розробки практичної методології багаторівневої тематичної обробки даних БСКС високого просторового розрізнення для діагностики та параметризації латеральної неоднорідності ґрунтів та ГП для створення сучасної системи інформаційного забезпечення збалансованого землеробства в Україні.

Розроблено та апробовано методи сумісного аналізу космічного зображення ґрунтової поверхні та даних вибіркового наземного обстеження щодо верифікації та оцінювання результатів дешифрування даних БСКС високого просторового розрізнення для великомасштабних досліджень ГП та цифрового картографування локальних структур ГП як основи створення сучасної системи інформаційного забезпечення точного та збалансованого землеробства.

Опрацювання розроблених підходів до сумісного аналізу результатів класифікації космічного зображення та геостатистичного моделювання за даними наземного обстеження на полігоні «Тишки 1» доводить ефективність розробленої методології ґрунтового

дешифрування даних БСКС для визначення складових локальних структур ГП навіть на територіях поширення ґрунтів гумусово-аккумулятивного типу ґрунтоутворення, які мають найнижчі значення оптичних характеристик та є слабо контрастними в усіх діапазонах зйомки.

В умовах лісостепової зони України, для якої притаманним є чергування у просторі найнижчих таксономічних одиниць систематично близьких чорноземів, встановлено ефективність розроблених методичних підходів до дешифрування даних БСКС для визначення та кількісного опису виділів чорнозему типового, реградованого та лучно-чорноземного ґрунту з відмінами за загальним вмістом гумусу, гідролітичною кислотністю, вмістом ФГ та складовими мікроагрегатного складу.

За результатами геостатистичного експрес-аналізу даних точкового відбору проб за індексом Морана (I_M) та його супутніми оцінками, встановлено, що результати класифікації даних БСКС коректно відображають просторову структуру мінливості ґрунтових властивостей в межах поверхневого шару.

За отриманими результатами апробовано підходи до створення інформаційних сервісів, здатних представити для широкого кола користувачів (землекористувачі, фахівці у сфері екології, охорони природи та ґрунтів, установ у сфері управління земельними та ґрунтовими ресурсами, громадськості) актуальну інформацію, високої точності про якісний стан ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення.

Подяки

Автори висловлюють щирі подяки Геологічній службі США за можливість безкоштовного придбання даних Landsat 8, які було використано під час досліджень, співробітникам сектору дистанційного зондування ГП, лабораторії охорони ґрунтів від ерозії та лабораторії інструментальних методів аналізу ґрунтів ННЦ «ІА імені О.Н. Соколовського» за допомоги під час виконання польових, камеральних досліджень та аналітичних досліджень проб ґрунту, які складають експериментальну основу представленої роботи.

Список використаної літератури

Биндич Т.Ю. Багатоспектральне космічне сканування ґрунтового покриву в моніторингових дослідженнях: монографія. Київ: Аграрна наука, 2022. 144с.

Ґрунтові ресурси України: збалансоване використання, прогноз та управління: монографія. /за наук. ред. С.А. Балюка, М.М. Мірошниченка, Р.С. Трускавецького. Харків: ФООП Бровін О.В., 2020. 452 с.

Загальська О. Внесок дистанційного зондування Землі в Україні у розвиток ландшафтознавства. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2014. № 48. С. 3–11. [Електронний ресурс]. URL: <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/view/1287> (дата звернення 22.07.2024).

Куценко М.В. Вступ до географічних інформаційних систем та моделювання стану довкілля. Харків : Екограф, 2008. 204 с.

Маринич О.М., Шищенко П.Г. Фізична географія України: Підручник. К.: Знання, 2005. 511 с.

Станкевич С.А., Козлова А.О. Методика оцінювання біорізноманіття території за багатоспектральними космічними зображеннями середньої просторової розрізненності. *Космічна наука і технологія*. 2007. Т. 13. № 4. С. 25–39. <https://doi.org/10.15407/knit2007.04.025>.

Трускавецький С.Р. та ін. Багатоспектральне космічне сканування в системі моніторингу ґрунтів: монографія. Харків : ФОП Бровін О.В., 2018. 280 с.

Architecting the ArcGIS System: Best Practices. 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://architecture.arcgis.com/assets/pdf/architecting-the-arcgis-system.pdf> (дата звернення 21.07.2024).

Applying Ecological Principles to Land Management / ed. by V.H. Dale, R.T.T. Forman, R.A. Naeuber. New York: Springer, 2001. 346 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4613-0099-1> (дата звернення 05.07.2024).

Baruth B. et al. The use of remote sensing within the MARS crop yield monitoring system of the European Commission. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2008. Vol. 36. P. 935–941.

Dale V.H. et al. Ecological principles and guidelines for managing the use of lands: Report of the Ecological Society of America Committee on Land Use. *Ecological Applications*. 2000. Vol. 10. № 3. P. 639–670. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0639:EPAGFM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0639:EPAGFM]2.0.CO;2).

FAO. Report of the seconde meeting of the plenary assemble of the Global soil partnership plenary assembly. Second session Rome, 22–24 July 2014. Updated World Soil Charter (2014). [Електронний ресурс]. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e95df587-a8f2-45a9-8265-7894069b0a93/content> (дата звернення 12.12.2022).

IPBES. The IPBES assessment report on land degradation and restoration / ed. by L. Montanarella, R. Sholes, A. Brainich. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Service, Bonn, Germany. 2018. 744p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237392>.

King D., Jones R.J.A, Thomasson A.J. European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community, 1995a. 286 p.

King D. et al. The EU soil geographic database. *European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community. 1995b. P. 43–60.

Li H., Calder C.A., Cressie N. Beyond Moran's *I*: Testing for Spatial Dependence Based on the Spatial Autoregressive Model. *Geographical analysis*. 2007. Vol. 39. № 4. P. 357–375. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2007.00708.x>.

Moran P.A.P. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*. 1950. Vol. 37. P. 17–23.

Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session, held in Ordos, China, from 6 to 16 September 2017. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its thirteenth session. [Електронний ресурс]. URL: https://www.unccd.int/sites/default/files/sessions/documents/2017-11/cop21add1_eng.pdf (дата звернення 20.06.2024).

The thematic accuracy of CORINE Land Cover 2000. Assessment using LUCAS (landuse / cover area frame statistical survey). Techn. Rept EEA. 2006. № 7. 85 p. [Електронний ресурс]. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2006_7 (дата звернення 20.07.2024).

References

Byndych, T.Yu. (2022). Bahatospektralne kosmichne skanuvannya gruntovoho pokryvu v monitorynhovykh doslidzhenniakh: monohrafiia [Multispectral space-based land cover scanning in monitoring studies: monograph]. Kyiv : Ahrarna nauka [in Ukrainian].

Gruntovi resursy Ukrainy: zbalansovane vykorystannia, prohnoz ta upravlinnia: monohrafiia (2020). [Soil resources of Ukraine: balanced use, forecast and management: monograph] / za nauk. red. S.A. Baliuka, M.M. Miroshnychenka, R.S. Truskavetskoho. Kharkiv: FOP Brovin O.V. [in Ukrainian].

Zahulska, O. (2014). Vnesok dystantsiinoho zonduvannia Zemli v Ukraini u rozvytok landshaftoznavstva [The contribution of remote sensing of the Earth to the development of landscape

science in Ukraine]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii heohrafichna [Bulletin of Lviv University. Geographical series]*, 48, 3–11. [Electronic resource]. URL: <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geography/article/view/1287/1344> (access date 22.07.2024) [in Ukrainian].

Kutsenko, M.V. (2008). *Vstup do heohrafichnykh informatsiinykh system ta modeliuvannya stanu dokillia [Introduction to geographic information systems and environmental modeling]*. Kharkiv : Ekohraf [in Ukrainian].

Marynych, O.M., & Shyshchenko, P.H. (2005). *Fyzychna heohrafiia Ukrainy: Pidruchnyk [Physical geography of Ukraine: The Textbook]*. Kyiv : Znannia [in Ukrainian].

Stankevych, S.A., & Kozlova, A.O. (2007). *Metodyka otsiniuvannya bioriznomanittia terytorii za bahatospektralnyimi kosmichnymi zobrazhenniamy serednoi prostorovoi rozrznennosti [Methodology for assessing the biodiversity of the territory using multispectral space images of medium spatial resolution]*. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia [Space Science and Technology]*, 13 (4), 25–39. <https://doi.org/10.15407/knit2007.04.025> [in Ukrainian].

Truskavetskyi, S.R. et al. (2018). *Bahatospektralne kosmichne skanuvannya v systemi monitorynhu gruntiv: monografiia [Multispectral space scanning in the soil monitoring system: monograph]*. Kharkiv : FOP Brovin O.V. [in Ukrainian].

Architecting the ArcGIS System: Best Practices (2023). [Electronic resource]. URL: <https://architecture.arcgis.com/assets/pdf/architecting-the-arcgis-system.pdf> (access date 21.07.2024) [in English].

Applying Ecological Principles to Land Management (2001) /ed. by V.H. Dale, R.T.T. Forman, R.A. Haeuber. New York: Springer. [Electronic resource]. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4613-0099-1> (access date 05.07.2024) [in English].

Baruth, B. et al. (2008). The use of remote sensing within the MARS crop yield monitoring system of the European Commission. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 36, 935–941 [in English].

Dale, V.H. et al. (2000). Ecological principles and guidelines for managing the use of lands: Report of the Ecological Society of America Committee on Land Use. *Ecological Applications*, 10 (3), 639–670. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0639:EPAGFM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0639:EPAGFM]2.0.CO;2) [in English].

FAO. Report of the seconde meeting of the plenary assemble of the Global soil partnership plenary assembly. Second session Rome, 22–24 July 2014. Updated World Soil Charter. (2014). [Electronic resource]. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e95df587-a8f2-45a9-8265-7894069b0a93/content> (access date 12.12.2021) [in English].

IPBES (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration /ed. by L. Montanarella, R. Sholes, A. Brainich. Bonn : Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Service, Bonn, Germany. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237392> [in English].

King, D., Jones, R.J.A., & Thomasson, A.J. (1995a). *European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community [in English].

King, D. et al. (1995b). The EU soil geographic database. *European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community. pp. 43–60 [in English].

Li, H., Calder, C.A., & Cressie, N. (2007). Beyond Moran's *I*: Testing for Spatial Dependence Based on the Spatial Autoregressive Model. *Geographical analysis*, 39 (4), 357–375. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2007.00708.x> [in English].

Moran, P.A.P. (1950). Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*, 37, 17–23 [in English].

Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session, held in Ordos, China, from 6 to 16 September 2017. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its thirteenth session. [Electronic resource]. URL: https://www.unccd.int/sites/default/files/sessions/documents/2017-11/cop21add1_eng.pdf (access date 20.06.2024) [in English].

The thematic accuracy of CORINE Land Cover 2000. Assessment using LUCAS (landuse / cover area frame statistical survey). *Techn. Rept EEA*. 2006. № 7. 85 p. [Electronic resource]. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2006_7 (access date 20.07.2024) [in English].

Отримано: 26.07.2024

Прийнято: 14.08.2024