УДК 528.854:528.88 DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2023.287763

ЕФЕКТИВНІСТЬ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ У СИСТЕМІ АГРОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

О.В. Мудрак[1], Т.В. Морозова[2]

[1]КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти» (м. Вінниця, Україна)
e-mail: ov_mudrak@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1776-6120
[2]Національний транспортний університет (м. Київ, Україна)
e-mail: tetiana.morozova@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4836-1035

У статті розглянуто екологічне значення нормалізованого індексу рослинності (NDVI). Здійснено узагальнення наукових даних щодо можливості використання у лісовому, сільському господарстві, екологічних дослідженнях, моделюванні екосистем і моніторингу. З'ясовано, що оперативний/супутниковий моніторинг посівів, що дає можливість автоматично формувати звіти, контролювати стан, прогнозувати врожайність та планувати сільськогосподарські операції з урахуванням реальних екологічних і погодних умов. Зокрема, створювати електронні карти вегетації та рельєфу полів для конкретного регіону. Встановлено, що використання даних ДЗЗ забезпечує визначення об'єктивного стану культур (густоти, кількісних і якісних змін посівів, необхідності проведення обробок засобами хімізації) на великих площах. Наведено чинники, які впливають на обчислення NDVI. З'ясовано, що перетворення багатоспектральних даних NDVI в один шар зображення дає можливість оцінити кількість наявної рослинності та розвиток культур у масштабі поля. Регулярна робота з картографуванням полів NDVI допомагає розпізнавати та пом'якшувати будь-які проблеми з вирощуванням рослин, підвищувати врожайність і робити аграрний бізнес більш прибутковим. NDVI став одним із найважливіших і часто використовуваних показників у точному землеробстві, тому заслуговує подальшого практичного дослідження. Це числовий показник якості та кількості рослин на полі. Використання спектральних індексів сприяє виробництву якісної «екологічно чистої» продукції, збереженню компонентів довкілля, відтворенню родючості ґрунту, отриманню максимального прибутку, вкупі з переходом від лінійної економіки до циркулярної (економічний ефект), економії ресурсів, оптимізації та диверсифікації сільськогосподарського виробництва. Знімки NDVI є важливим інструментом для візуального відображення та аналізу зеленого покриву й фізіологічного стану рослин на певній території.

Ключові слова: *вегетаційні індекси, екосистемні послуги, дистанційне зондування, NDVI.*

ВСТУП

Екосистемний підхід дає можливість виявляти загрози та передбачити спричинені ними зміни, будучи, відтак, важливим для просторового планування та управління землекористуванням, формування соціально прийнятних й ефективних кейсів вирішення екологічних проблем [1]. Дослідження екосистемних послуг є важливим для ухвалення рішень, здатних вплинути на природні екосистеми. Адже від збереження екосистем, біогеоценозів і біорізноманіття загалом [2] залежить підтримання економічних можливостей та забезпечення середовища існування людей.

Підхід із позицій сервісу екосистем все ще недостатньо визнаний та пророблений, оскільки екосистемні послуги ще не передбачені українським законодавством, тому врахування їх у ході ухвалення рішень ще не так поширене. Окрім того, методи і критерії оцінки екосистемних послуг недостатньо пророблені. Екосистемні послуги агроекосистем безперечно приносять користь людині [3], про що згадано в акті ООН «Millenium Ecosystem Assessment». У ньому ж екосистемні послуги називають «прямим і непрямим внеском екосистем у добробут людини».

З позицій вигоди для людини оперативний моніторинг стає екосистемною послу-

© О.В. Мудрак, Т.В. Морозова, 2023

гою. Використання спектральних індексів сприяє виробництву якісної «екологічно чистої» продукції, збереженню компонентів довкілля, відтворенню родючості ґрунту, отриманню максимального прибутку, вкупі з переходом від лінійної економіки до циркулярної (економічний ефект), економії ресурсів, оптимізації та диверсифікації сільськогосподарського виробництва.

Відтак, **метою роботи** є аналіз та узагальнення літературних наукових даних щодо використання спектральних індексів для агроскаутингу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На відміну від природних самоорганізованих і саморегульованих екосистем та біогеоценозів, що ефективно діють і без зовнішнього втручання, функцію керування біотичними процесами в агроекосистемах виконує людина [4]. Агроекосистеми потребують сприятливих ґрунтових, кліматичних та водних ресурсів, які розглядаються як екосистемний сервіс. В умовах високої трансформації природних геосистем сільське господарство, крім виробництва харчових продуктів, специфічних нехарчових продуктів і сировини забезпечує виконання таких екосистемних послуг, як рекреація, естетика ландшафту, збереження біорізноманіття. Порушення балансу, існуючого в агроекосистемі, витісняє її з норми і призводить до антисервісу.

У звіті FAO «The future of food and agriculture — Alternative pathways to 2050» [5] зазначено про зростання глобальних екологічних ризиків. Фахівці FAO підкреслюють важливість подолання розриву у знаннях щодо сталого розвитку агропродовольчих систем та поєднання зусиль різних країн, міжнародних організацій, громадськості й наукових кіл для його підтримання. У наступні 30 років, згідно з планом, усі країни мають трансформувати свої агроекосистеми і зробити їх сталими у довгостроковій перспективі.

Ця трансформація може бути здійсненою по-різному під впливом низки чинників: зростання населення, технічний прогрес, розподіл доходів, стан і використання природних ресурсів, кліматичні зміни та зусилля щодо запобігання й вирішення конфліктів. Створення ефективних штучних екосистем потребує розуміння аутекологічних особливостей живих компонентів (субсистем), вимог щодо основних чинників середовища (світла, вологи, агротехнічних способів догляду, алелопатичних взаємовідношень, стійкості до шкідників і хвороб тощо).

Ураховуючи євроінтеграційний вектор розвитку України, необхідно чітко розуміти тренди, що задаються в Європейському Союзі, як флагмані у реалізації ідей сталого розвитку та циркулярної економіки. У грудні 2019 р. Європейською комісією прийнята нова стратегія зростання Green Deal [6]. Головна ціль політичних ініціатив цього стратегічного плану — зробити Європу вуглецево нейтральною до 2050 р. і створити сучасну конкурентоспроможну економіку, що поступово переходитиме від лінійної до циркулярної. Для агросектору встановлені такі цілі: забезпечити продовольчу безпеку в умовах зміни клімату та втрати біорізноманіття; зменшити екологічний і кліматичний слід харчової системи ЄС; посилити стійкість продовольчої системи ЄС; очолити глобальний перехід до конкурентоспроможності. Зростаючі глобальні вимоги прискорення переходу до зеленої та кліматично нейтральної економіки потребують серйозних трансформацій, зокрема у сільському господарстві з використанням новітніх технологій. Цей головний тренд сучасності обов'язково враховуватиметься в планах відновлення та подальшого розвитку агросектору України.

Одним із найважливіших завдань розвитку агропромислового комплексу є прийняття і впровадження управлінських рішень щодо оцінки стану посівів сільськогосподарських культур на різних рівнях господарювання від локального/базового до національного, визначення строків дозрівання залежно від різних типів ґрунтів і кліматичних умов, контроль сільськогосподарських робіт та продуктивного процесу культивування.

Сталість, екологічність українського агропромислового комплексу — це конкурентна перевага на світових ринках. Зростання цін на насіння, мінеральні добрива, засоби захисту рослин, техніку й інші засоби виробництва в сільському господарстві призводить до необхідності підвищувати ефективність їх використання. *Precision agriculture* (точне землеробство) — один із базових елементів ресурсоощадних технологій у сільському господарстві, передбачає використання даних дистанційного зондування (ДЗЗ). Це інноваційний метод, що передбачає застосування сучасних технологій дистанційного моніторингу стану екосистеми задля покращання якості врожаю. Оптимальне управління продуктивністю посівів [7] на кожному квадратному метрі поля дає можливість здійснювати обробіток з урахуванням типу ґрунту, неоднорідностей рельєфу та екологічних умов.

Розвиток систем ДЗЗ зумовлений збільшенням доступності супутникової інформації, кількості космічних апаратів і поліпшення їх експлуатаційних характеристик, прогресом у сенсорних технологіях, що дають можливість моніторити стан екосистеми у режимі реального часу, розробкою веб-сервісів і стандартів передачі геопросторових даних [8]. Нові геоінформаційні веб-технології, інтерактивні онлайн-картографічні системи з прямим доступом до супутникової інформації забезпечені можливістю налаштування параметрів візуалізації геопросторових даних і формування складних аналітичних запитів, дали змогу організувати принципово нові способи обробки даних, створити покоління систем екологічного моніторингу стану екосистеми. Сучасні веб-ГІС інтегровані в сервісноорієнтовану архітектуру. Їх розглядають як сукупність взаємопов'язаних програмних засобів обробки просторових даних (імпорт/експорт, каталогізація, візуалізація, створення, обробка, поширення) [9; 10]. Технологічна основа забезпечує доступ до функцій і контексту відображення картографічних елементів веб-сторінки — засобів візуалізації карти і просторових метаданих (інформація про параметри рельєфу місцевості, характеристики об'єктів на карті) [11; 12].

Супутниковий моніторинг посівів — технологія спостереження за змінами індексу вегетації, отриманого за допомогою спектрального аналізу знімків високої роздільної здатності. Він використовується на конкретному полі або сільськогосподарської культури і дає можливість спостерігати ростову динаміку, діагностувати диспропорції культури або поля. Цю технологію відносять до методів точного землеробства, яке дає змогу обробляти поля залежно від реальних потреб культур, що вирощуються. До того ж, обробка розрізняється в межах ділянок поля, що оптимізує використання добрив та пестицидів (диференційоване внесення з урахуванням змінних норм), отримати максимальний ефект при мінімальному навантаженні на компоненти довкілля і зниженні загальної витрати матеріалів. Діагностування посівів здійснюють регулярно (2–4 тури за вегетацію). Строки проведення прив'язують до фаз/мікростадій розвитку рослин. Оперативний/супутниковий моніторинг дає можливість визначити стан рослин, забезпечення елементами живлення, фітопатогенну ситуацію (ураження хворобами, пошкодження шкідниками, забур'яненість), якість проведення технологічних операцій, показує реальну поточну картину посіву та сприяють прогнозуванню рівня врожайності. Користувач програми вводить координати полів, базову інформацію, системи обробітку ґрунту, культури, сорт, добрива, які використовуються. Супутники роблять знімки полів у різних спектральних діапазонах, на основі цієї інформації програма адаптує модель прогнозування врожайності до особливостей поля. L.M. Viana і співав. [13] запропонували гнучку для управління нерегулярним відбором і часовими рядами методологію визначення сталого міського розвитку за допомогою обчислення вегетаційного (NDVI), забудовного (NDBI), водного (NDWI) та відкритісного (NDBaI) диференційних індексів.

Система веб-візуалізації супутникової інформації базується на наборах спеціаль-

но сформованих колекцій багатомасштабних зображень із можливістю вибору у веб-інтерфейсі комбінацій відображуваних каналів у малих масштабах і при цьому наявності детальних даних при максимально доступному просторовому дозволі. Обмеження у виборі комбінацій каналів на детальному рівні зумовлено економією дискового простору. Отже, реалізується компроміс між системою «робота з грубими костівами» і системою рівня «що завгодно, з максимальною деталізацією».

Огляд поля ↔ моніторинг ↔ агроскаутинг (*crop scouting*) — конгломерат важливої складової агрономічного процесу вирощування культур. Поняття «агроскаутинг» з'явилося в результаті залучення до агротехнологій можливостей Data Science та застосування штучного інтелекту. Формування комплексу «людина + ІТ» дає можливість досягти значно вищих результатів із більш ефективним використанням ресурсів. Використання аерокосмічних засобів дистанційного зондування Землі дає змогу забезпечити об'єктивну і достовірну інформацію щодо екологічних умов, властивостей, стану агроекосистем, просторової структури та динаміки природно-територіальних комплексів, сприяє накопиченню даних для створення і розробки систем моніторингу природних агроресурсів [14]. Тому складається індивідуальна модель прогнозу (*рис. 1*), яка вдосконалюється із внесенням оновлених даних у систему.

За допомогою карт супутникового моніторингу формуються карти врожайності, які можна трансформувати для розробки систем удобрення та меліорації (*рис. 2*).

Спектральні індекси рослин визначаються оптичними характеристиками листків, поглинанням і пропусканням випромінювання. Промені поглинаються неоднаково, зміни вмісту пігментів, а також вологи в листках, призводять до відмінностей у спектральних характеристиках на різних стадіях вегетації.

Спектрально-відбивні характеристики ґрунтів залежать від вологості і хімічного складу. Неоднорідність фізико-хімічних властивостей ґрунтів істотно впливає на інтенсивність відбитого світла рослинами одного виду, що ростуть на них. Мінливість спектрально-відбивних властивостей угруповань рослин залежить від великої кількості чинників. Так, за відсутності/

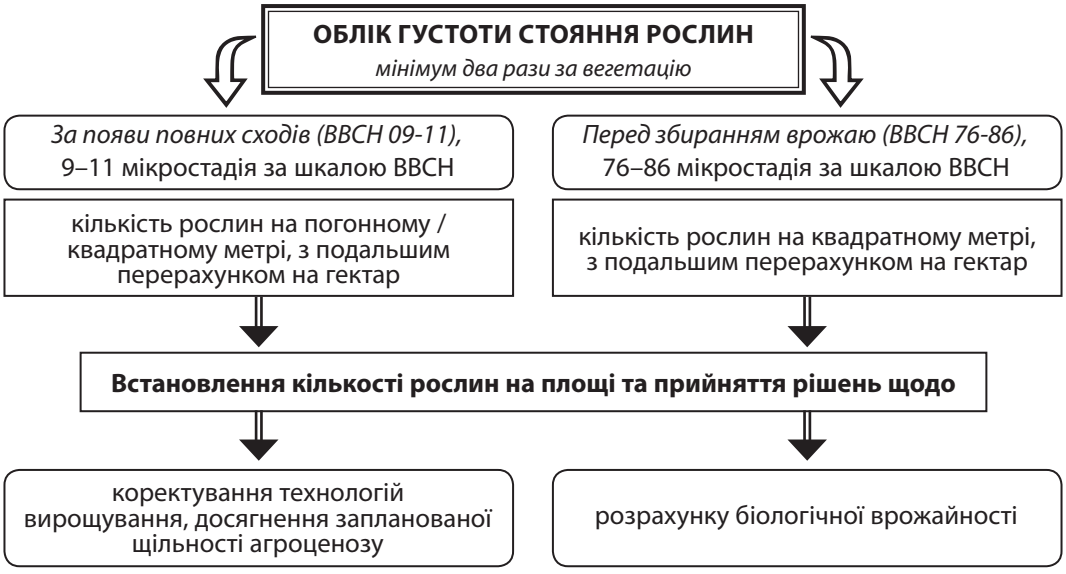

Рис. 1. Модель прогнозування карти врожайності

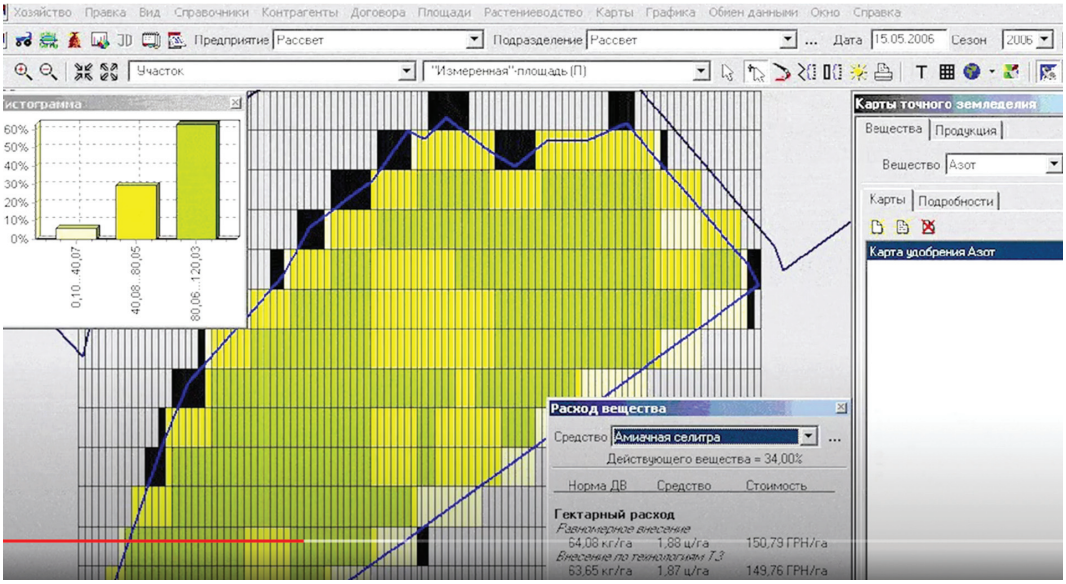

Рис. 2. Фрагмент комп'ютерного опрацювання даних ДЗЗ

наявності азотного стресу, зафіксовано зміщення межі поглинання у бік коротких довжин хвиль. При розпаді хлорофілу, внаслідок несприятливих чинників або досягнення рослиною певної фази розвитку, знижується поглинання світлового потоку в червоній і відбиття у зеленій зонах спектра (спостерігається поступова деградація спектра рослинності до спектра ґрунту). Найінформативніші для цілей класифікації зони спектра 480–550–670–890 нм. Залежно від екологічних умов зростання і особливостей розвитку рослин використовується процедура попіксельної трансформації зображення шляхом обчислення вегетаційних індексів.

Для діагностики стану рослин у багатьох випадках недостатньо аналізувати спектральну відбивну здатність в окремих зонах спектра або індукцію флуоресценції хлорофілу (ефект Каутського). Більш інформативними є показники, що характеризують співвідношення відбиття в різних каналах супутникової зйомки, зокрема, спектральні вегетаційні індекси. Ці індекси також знайшли своє застосування в дослідженнях водойм, ґрунтів, снігового покриву, поверхонь зі штучних матеріалів. Багато дослідників вбачають алюзію на формулу розрахунку вегетаційного індексу NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Це стандартизований індекс, який показує наявність і стан рослин, один із найпоширеніших для кількісної оцінки рослинного покриву, що ґрунтується на оптичних властивостях клітинної структури листків. Фотосинтетичні пігменти (хлорофіл, асоційовані світлозбиральні пігменти) ефективно поглинають випромінювання у видимому для фотосинтезу діапазоні спектра і відбивають випромінювання в ближньому інфрачервоному (NIR) діапазоні. Проста формула NDVI та її прямий зв'язок із фотосинтетичною здатністю рослинності є проксі для широкого діапазону важливих характеристик і функцій рослин (наприклад, частки фотосинтетичного випромінювання, поглиненого пологом рослин, площі листкової поверхні, «зеленості» пологів, валової первинної продуктивності) з незліченною кількістю застосувань у вивченні біорізноманіття, сільському, лісовому господарстві, екології, моделюванні середовищ існування.

Використання NDVI як одного із найпоширеніших та обґрунтованих індексів пов'язано з можливістю характеризувати густоту рослинного покриву, що дає можливість оцінити схожість, продуктивність посівів та угідь [14]. На величину індексу впливає тип, стан, зімкнутість рослин, експозиція і кут нахилу поверхні. Використовується контраст характеристик з мультиспектрального растрового набору даних — поглинання хлорофілом (0,55–0,75 мкм) в червоному каналі (RED) і відбивна здатність (0,75–1,0 мкм) в інфрачервоному каналі (NIR). Щільність рослин (NDVI) в певній точці зображення дорівнює різниці інтенсивностей відбитого світла в червоному і інфрачервоному діапазоні, поділеної на їх суму:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}.$$

Висока фотосинтетична активність (густа рослинність) призводить до меншого відбиття в червоній області спектра і більше в інфрачервоній. Співвідношення цих показників дає змогу чітко відокремити і проаналізувати рослини. Використання нормалізованої різниці, а не простого співвідношення між мінімумом і максимумом відображень підвищує точність вимірювання, зменшує вплив метеорологічних та кліматичних чинників, що дає можливість контролювати щільність і інтенсивність росту рослин. Листки, зазвичай, краще відбиваються в ближньому діапазоні інфрачервоних, ніж видимих довжин хвиль. Якщо листки пошкоджені (водний стрес, в'янення, відмерлі), вони стають жовтішими і менше відображаються в ближньому інфрачервоному діапазоні.

NDVI є вимірюванням щільності рослинності та вказує на стан рослин у певному місці. Індекс варіює від –1,0 до 1,0, де низькі значення NDVI (≤0,1) представляють скелю, пісок чи сніг, помірні значення (0,2–0,5) — рідку рослинність, високі значення (0,6–0,9) — густу, зелену рослинність (*Earth Resources and Observation Science Center*). NDVI також використовується для моніторингу посухи [15], прогнозування врожайності, як інструмент у прогнозуванні небезпечних пожежних зон та картографування опустелювання. NDVI допомагає нівелювати зміни умов освітлення, нахилу поверхні та інших чинників [16], тому є кращим для глобального моніторингу рослин. Моніторинг здійснюється на підставі ортофотозніків/ортозображення (*рис. 3*).

Зображення дають можливість формувати карти лісових культур (лісові карти). Можна аналізувати як статичні, так і динамічні параметри екосистем. Ортофотоплан використовують для вимірювання площ, динаміки змін, візуальної оцінки місця розташування лісових масивів, аналізу перші ознаки погіршення стану лісів і спрогнозувати поширення несприятливих процесів. Публічний доступ до хмарних обчислювальних кластерів усуває багато бар'єрів (маніпулювання даними). Можливість створювати зручні для користувача програми, які взаємодіють із обчислюваль-

Рис. 3. Загущеність лісової екосистеми та фіксація усихаючих дерев

ними службами дає змогу користувачам із мінімальними технічними навичками кодування отримувати доступ до даних і обробляти їх [17].

Алгоритм розрахунку NDVI (*рис. 4*) вбудований практично в усі програмні пакети, пов'язані з обробкою даних ДЗЗ (Arc View Image Analysis, ERDAS Imagine,

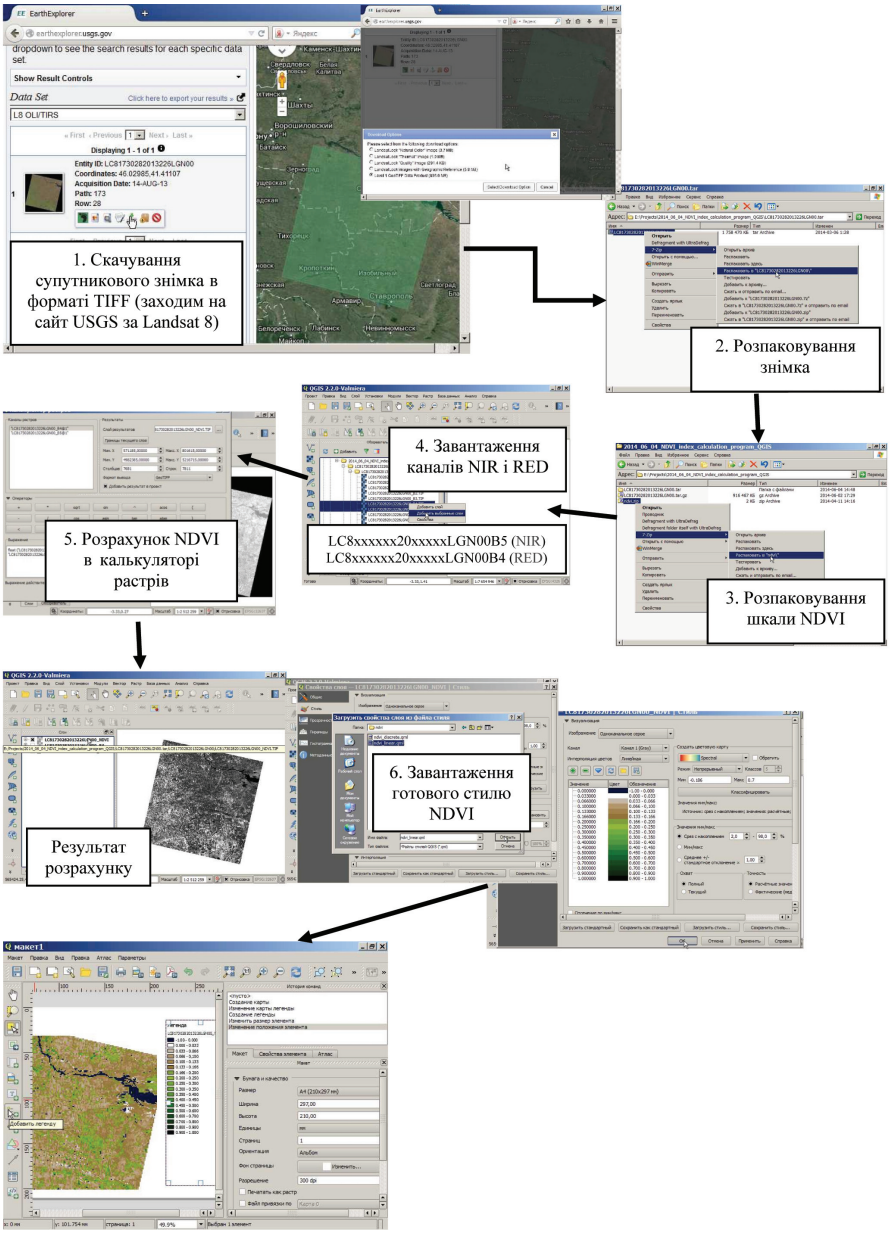

Рис. 4. Візуалізація алгоритму розрахунку NDVI за допомогою програмного забезпечення QGIS з використанням даних Landsat 8

Примітка: розроблено авторами з використанням [19].

ENVI, Ermapper, Scanex MODIS Processor, ScanView і т.д.).

ДЗЗ є важливим інструментом для виявлення та моніторингу екологічних проблем [18], оскільки NDVI є ефективним індикатором стану рослин, порівняльний аналіз кількості опадів та NDVI дає можливість визначати аномалії розподілу та діагностувати посуху, зокрема виміряти каскадні наслідки посухи.

Деякі зміни рослинності помітні з космосу і тому базові карти відбиття поверхні (https://www.planet.com/products/basemap) дають можливість генерувати в динаміці NDVI для великих регіонів, щоб візуалізувати висихаючий ландшафт. За вивчення спектральних властивостей підстилаючої поверхні необхідно здійснювати одночасний/паралельний облік різноманіття ознак і процесів у ґрунтово-рослинному покриві.

ВИСНОВКИ

NDVI став одним із найважливіших і часто використовуваних показників у точному землеробстві. Перетворення багатоспектральних даних NDVI в один шар зображення дає змогу оцінити кількість наявної рослинності та розвиток культур у масштабі поля. Регулярна робота з картографуванням полів NDVI допомагає розпізнавати та пом'якшувати будь-які екологічні проблеми з рослинами, підвищувати врожайність і робити аграрний бізнес більш прибутковим.

ЛІТЕРАТУРА

1. Portman M.E. Ecosystem services in practice: Challenges to real world implementation of ecosystem services across multiple landscapes — A critical review. *Applied Geography*. 2013. № 45. P. 185–192.
2. Морозова Т.В., Ліхо О.А. Емісія CO_2 з ґрунтів під енергетичними культурами. *Вісник НУВГП Збірник наукових праць. Сер.: Сільськогосподарські науки*. 2022. Вип. 2 (98). С. 89–103.
3. Granek E.F., Polasky S., Kappel C.V. et al. Ecosystem services as a common language for coastal ecosystem-based management. *Conservation Biology*. 2009. № 24 (1). P. 207–219.
4. Гнатів П.С., Хірівський П.Р., Зинюк О.Д. та ін. Природні ресурси України. Львів: Камула, 2012. 216 с.
5. FAO. The future of food and agriculture — Alternative pathways to 2050. Summary version, Rome, Italy. 2019.
6. European Commission. Communication on The European Green Deal, December 11, 2019.
7. Majumdar S., Chatterjee U., Raj A.D. and Kumar S. Chapter 16-Decline in vegetation cover over Kolkata city: an environmental concern from remote-sensing perspective: collective monograph / U. Chatterjee et al. In Science of Sustainable Systems, Water, Land, and Forest Susceptibility and Sustainability, Elsevier, 2023. P. 453–474. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91880-0.00003-9.
8. Kashnitskii A.V., Lupyan E.A., Balashov I.V. and Konstantinova A.M. Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2017. Vol. 30 (1). P. 84–88. DOI: https://doi.org/10.1134/S1024856017010080.
9. Pinde F. and Jiulin S. Web GIS: principles and applications. Esri Press, 2011. 300 p.
10. Songnian L., Dragicevic S. and Veenendaal B. Advances in Web-based GIS, Mapping Services and Applications. CRC Press, 2011. 400 p.
11. Mari R., Bottai L., Busillo C. et al. A GIS-based interactive web decision support system for planning wind farms in Tuscany (Italy). *Renewable Energy*. 2011. Vol. 36. P. 754–763.
12. Yakubailik O.E., Kadochnikov A.A. and Tokarev A.V. Web geographic information system and the hardware and software ensuring rapid assessment of air pollution. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. Vol. 54. P. 243–249.
13. Viana L.M., Oliveira S., Oliveira S.C. and Rocha J. 29-Land Use/Land Cover Change Detection and Urban Sprawl Analysis, Editor(s): Hamid Reza Pourghasemi, Candan Gokceoglu. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences, Elsevie*. 2019. P. 621–651. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00029-6.
14. Кохан С.С. Застосування вегетаційних індексів на основі серії космічних знімків IRS-1D LISS-III для визначення стану посівів сільськогосподарських культур. *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17. № 5. С. 58–63.
15. Drisya J., Kumar D.S., Roshni T. Chapter 27-Spatiotemporal Variability of Soil Moisture and Drought Estimation Using a Distributed Hydrological Model, Editor(s): Pijush Samui, Dookie Kim, Chandan Ghosh. *Integrating Disaster Science and Management, Elsevier*. 2018. P. 451–460. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00027-0.
16. Lillesand T.M., Kiefer R.M., Chipman J.W. Remote Sensing and Image Interpretation (Fifth Edition). *Geographical Journal*. 2004. Vol. 146 (3). DOI: https://doi.org/10.2307/634969.
17. Robinson N.P., Allred B.W., Jones M.O. et al. A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference

Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. *Remote Sens*. 2017. Vol. 9 (8). P. 863. DOI: https://doi.org/10.3390/rs9080863.
18. Gessesse A.A. and Melesse A.M. Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation Chapter 8 — Temporal relationships between time series CHIRPS-rainfall estimation and eMODIS-NDVI satellite images in Amhara Region, Ethiopia 2019. *Extreme Hydrology and Climate Variability.* P. 81–92. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00008-7.
19. URL: https://e2e3.wordpress.com/2014/06/04/ndvi-index-calculation-program-qgis/.

REFERENCES

1. Portman, M.E. (2013). Ecosystem services in practice: Challenges to real world implementation of ecosystem services across multiple landscapes — A critical review. *Applied Geography, 45*, 185–192 [in English].
2. Morozova, T.V. & Likho, O.A. (2022). Emisiia CO_2 z gruntiv pid enerhetychnymy kulturamy [Emission of CO_2 from soils under energy crops]. *Visnyk NUVHP Zbirnyk naukovykh prats. Seriia: Silskohospodarski nauky — Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. Series: Agricultural science, 2 (98)*, 89–103 [in Ukrainian].
3. Granek, E.F., Polasky S., Kappel C.V. et al. (2009). Ecosystem services as a common language for coastal ecosystem-based management. *Conservation Biology, 24 (1)*, 207–219 [in English].
4. Hnativ, P.S., Khirivskyi, P.R., Zyniuk, O.D. et. al. (2012). *Pryrodni resursy Ukrainy [Natural resources of Ukraine]*. Lviv: Kamula [in Ukrainian].
5. FAO. (2019). The future of food and agriculture — Alternative pathways to 2050. Summary version, Rome, Italy. URL: https://www.fao.org/3/CA1553EN/ca1553en.pdf [in English].
6. European Commission. Communication on The European Green Deal, December 11, (2019). URL: https://ec.europa.eu/info/publications/communication-european-greendeal_en [in English].
7. Majumdar, S., Chatterjee, U., Raj, A.D. & Kumar, S. (2023). Chapter 16-Decline in vegetation cover over Kolkata city: an environmental concern from remote-sensing perspective. *In Science of Sustainable Systems, Water, Land, and Forest Susceptibility and Sustainability, Elsevier collective monograph*. (pp. 453–474). DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91880-0.00003-9 [in English].
8. Kashnitskii, A.V., Lupyan, E.A., Balashov, I.V. & Konstantinova, A.M. (2017). Technology for designing tools for the process and analysis of data from very large scale distributed satellite archives. *Atmospheric and Oceanic Optics, 30 (1)*, 84–88. DOI: https://doi.org/10.1134/S1024856017010080 [in English].
9. Pinde, F. & Jiulin, S. (2011). Web GIS: principles and applications. *Esri Press*. 300 p.
10. Songnian, L., Dragicevic, S. & Veenendaal, B. (2011). Advances in Web-based GIS, Mapping Services and Applications. *CRC Press* [in English].
11. Mari, R., Bottai, L., Busillo, C. et al. (2011). A GIS-based interactive web decision support system for planning wind farms in Tuscany (Italy). *Renewable Energy, 36*, 754–763 [in English].
12. Yakubailik, O.E., Kadochnikov, A.A. & Tokarev, A.V. (2018). Web geographic information system and the hardware and software ensuring rapid assessment of air pollution. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 54*, 243–249 [in English].
13. Viana, L.M., Oliveira, S., Oliveira, S.C. & Rocha, J. (2019). 29-Land Use/Land Cover Change Detection and Urban Sprawl Analysis, Editor(s): Hamid Reza Pourghasemi, Candan Gokceoglu. *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences, Elsevier*, 621–651. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00029-6 [in English].
14. Kokhan, S.S. (2011). Zastosuvannia vehetatsiinykh indeksiv na osnovi serii kosmichnykh znimkiv IRS-1D LISS-III dlia vyznachennia stanu posiviv silskohospodarskykh kultur [Application of vegetation indexes derived from satellite images IRS–1D LISS–III for determination of crop status]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia — Space science and technology, 17 (5)*, 58–63 [in Ukrainian].
15. Drisya, J., Kumar, D.S. & Roshni, T. (2018). Chapter 27-Spatiotemporal Variability of Soil Moisture and Drought Estimation Using a Distributed Hydrological Model, Editor(s): Pijush Samui, Dookie Kim, Chandan Ghosh. *Integrating Disaster Science and Management, Elsevier*, 451–460. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00027-0 [in English].
16. Lillesand, T.M., Kiefer, R.M. & Chipman, J.W. (2004). Remote Sensing and Image Interpretation (Fifth Edition). *Geographical Journal, 146 (3)*. DOI: https://doi.org/10.2307/634969 [in English].
17. Robinson, N.P., Allred, B.W., Jones, M.O. et al. (2017). A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. *Remote Sens., 9 (8)*, 863. DOI: https://doi.org/10.3390/rs9080863 [in English].
18. Gessesse, A.A. & Melesse, A.M. (2019) Monitoring, Modelling, Adaptation and Mitigation Chapter 8 — Temporal relationships between time series CHIRPS-rainfall estimation and eMODIS-NDVI satellite images in Amhara Region, Ethiopia. *Extreme Hydrology and Climate Variability*, 81–92. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00008-7 [in English].
19. URL: https://e2e3.wordpress.com/2014/06/04/ndvi-index-calculation-program-qgis/.

Стаття надійшла до редакції журналу 25.05.2023