

Київський національний університет будівництва і архітектури  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ЖЕНЬ ЛЕЙ**

УДК 528.8+528.94

ДИСЕРТАЦІЯ  
**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ДЗЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИКОРИСТАННЯ  
ЗЕМЕЛЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

193 – Геодезія та землеустрій  
спеціалізація – Геодезія, картографія та фотограмметрія  
19 Архітектура і будівництво  
Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Жень Лей

Науковий керівник: Лазоренко Надія Юріївна  
кандидат технічних наук, доцент

**Київ – 2025**

Ідентичний за змістом з іншими примірниками дисертації

---

## АНОТАЦІЯ

*Жень Лей.* Застосування методів ДЗЗ для моніторингу використання земель сільськогосподарського призначення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 193 – «Геодезія та землеустрій» (19 – «Архітектура і будівництво»). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ. – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2025.

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення ефективності моніторингу земель сільськогосподарського призначення на основі використання методів дистанційного зондування Землі хмарної технології Google Earth Engine та геоінформаційного моделювання.

Актуальність цієї задачі зумовлена потребою у забезпеченні оперативного виявлення змін площ типів земельного покриття для здійснення моніторингу земель сільськогосподарського призначення з використанням хмарної технології Google Earth Engine та геоінформаційного моделювання, оскільки землі цієї категорії забезпечують продовольчу безпеку України і світу.

Проаналізовано існуючий стан та тенденції застосування методів ДЗЗ для вирішення моніторингових завдань. Обґрунтовано вибір хмарної технології GEE для моніторингу земель сільськогосподарського призначення. Завдяки високій точності класифікації та результатам візуального огляду класифікованих типів земельного покриття виконано аналіз виявлених змін.

Розроблено технологічну модель застосування методів ДЗЗ моніторингу земель сільськогосподарського призначення, яка передбачає використання платформи GEE для оперативного опрацювання супутникових зображень та інтерпретації отриманих результатів класифікації і тематичних індексів.

Розроблено методику виконання керованої класифікації ансамблевим методом машинного навчання Random forest, що дозволило досить швидко

опрацювати супутникові зображення на всю територію України станом на 2000 та 2021 роки.

Результати досліджень забезпечують ефективний геоінформаційний моніторинг земель сільськогосподарського призначення на основі використання методів ДЗЗ, хмарної технології Google Earth Engine та геоінформаційного моделювання, насамперед у сферах топографо-геодезичній та картографічній діяльності, земельних відносин, що впливає на якість прийняття управлінських рішень.

*Ключові слова:* геоінформаційні системи, бази геопросторових даних, моніторинг, методи дистанційного зондування Землі, площа, геодезичний моніторинг, геопросторовий аналіз, класифікація.

## ABSTRACT

*Ren L.* Application of remote sensing methods for monitoring agricultural land use – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) on speciality 193 – «Geodesy and Land Management» (19 «Architecture and Construction»). – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv. – Kyiv National University of Construction and Architecture, MES, Kyiv, 2025.

The dissertation solves the scientific and applied problem of increasing the efficiency of agricultural land monitoring based on the use of remote sensing methods of Google Earth Engine cloud technology and geographic information modelling.

The relevance of this task is stipulated by the need to ensure prompt detection of changes in the areas of land cover types for monitoring agricultural land using Google Earth Engine cloud technology and geographic information modelling since the land of this category ensures the food security of Ukraine and the world.

The current state and trends in using remote sensing methods for solving monitoring tasks are analysed. The choice of GEE cloud technology for monitoring agricultural land is substantiated. Due to the high accuracy of classification and the results of visual inspection of the classified land cover types, the analysis of the detected changes is carried out.

A technological model for the application of remote sensing methods for monitoring agricultural land has been developed, which involves using the GEE platform for the operational processing of satellite images and the interpretation of the obtained classification results and thematic indices.

A methodology for performing supervised classification using the Random Forest ensemble machine learning method was developed, which allowed us to quickly process satellite images for the entire territory of Ukraine as of 2000 and 2021.

The research results ensure effective geoinformation monitoring of agricultural land based on the use of remote sensing methods, Google Earth Engine

cloud technology and geoinformation modelling, primarily in the areas of topographic, geodetic and cartographic activities, land relations, which affects the quality of management decision-making.

Keywords: geographic information systems, geospatial databases, monitoring, remote sensing methods, area, geodetic monitoring, geospatial analysis, classification.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

#### *Статті у наукових фахових виданнях України*

1. Ren, L. (2023). Дослідження змін типів земельного покриття в Україні на основі даних дистанційного зондування землі. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*, (1), 127-140. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2023.01.12>
2. Лей, Ж. (2023). ОЦІНКА ЗМІН ЯКОСТІ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ НА ОСНОВІ ЕКОЛОГІЧНИХ ІНДЕКСІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ. *Містобудування та територіальне планування*, (84), 132–144. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.132-144>
3. Ren, L. Охорона сільськогосподарських земель у Китаї: сучасний стан та історичні передумови. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*, (4), 15-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2023.04.02>

### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Ren, L., & Lazorenko-Hevel, N. (2020). The Status and Development Trends of Land Remote Sensing. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2020» (Vol. 2020, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers
2. Жень, Л. (2021). ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАТФОРМИ GOOGLE EARTH ENGINE ДЛЯ ОБРОЛЕННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ. Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2021». P28.
3. Ren, Lei. (2022). Current State and Trends of Urban Remote Sensing Development. International Scientific-Practical Conference of young scientists "Build-Master-Class-2022". December 2022, Kyiv, Ukraine.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	3
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	7
ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ДЗЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ.....	13
1.1. Характеристика предметної сфери моніторингу сільськогосподарських земель.....	13
1.1.1 Джерела даних для виконання дослідження.....	17
1.1.2 Класифікація даних дистанційного зондування.....	22
1.2. Аналіз нормативно-методичного забезпечення для моніторингу сільськогосподарських земель.....	26
1.2.1 Закони та нормативно-правові акти щодо моніторингу земель сільськогосподарського призначення в Україні. ....	26
1.2.2 Досвід реалізації аграрної політики у світі.....	31
1.3. Основний зміст дослідження .....	35
1.3.1 Сучасні методи дослідження, які були використані у роботі.....	37
1.3.2 Актуальні виклики, які враховано у дослідженні .....	40
1.3.3 Перспективні тенденції розвитку застосування методів ДЗЗ для моніторингу земель сільськогосподарського призначення .....	41
1.3.4 Комплексне застосування технології дистанційного моніторингу земель сільськогосподарського призначення на національному та регіональному рівнях.....	43
1.4. Висновки до Розділу 1 .....	47
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ДЗЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ ЗАСОБАМИ GEE .....	50
2.1 Платформа хмарних обчислень даних дистанційного зондування .....	50
2.1.1 Традиційні платформи для завантаження даних ДЗЗ та їхні недоліки .....	51
2.1.2 Розроблення та застосування хмарних платформ для обчислень на основі даних ДЗЗ.....	56
2.2 Технологічна модель дослідження.....	63
2.3 Огляд досліджуваної території.....	66
2.4 Збирання та опрацювання вихідних даних .....	68

2.4.1 Збір даних про адміністративні кордони - перезапис.....	68
2.4.2 Набори даних супутникових знімків.....	76
2.5 Побудова системи класифікації земель та отримання еталонних моделей.....	79
2.5.1 Визначення еталонів.....	80
2.5.2 Метод вибору точок вибірки.....	81
2.5.3 Кількість еталонних моделей.....	87
2.6 Принципи та процедури опрацювання даних.....	91
2.6.1 Принципи та методи класифікації космічних знімків.....	91
2.6.2 Вибір і порівняння методів класифікації.....	95
2.6.3 Побудова та вилучення ознак зображень.....	99
2.6.4 Попереднє опрацювання супутникових даних.....	106
2.7 Результати класифікації та перевірка точності.....	112
2.7.1 Перевірка точності в GEE.....	112
2.7.2 Розрахунок фази за допомогою інших продуктів класифікації дистанційного зондування.....	116
2.8 Висновки до Розділу 2.....	118
<b>РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ЗМІН ПОКРИВУ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ В УКРАЇНІ, 2000-2021 РР.....</b>	<b>120</b>
3.1. Розроблення методики застосування строгих числових методів координатних операцій.....	122
3.1.1 Аналіз пропорційних змін у структурі землекористування..	122
3.1.2 Коефіцієнт зміни землекористування (Land Use Change Rate).....	124
3.1.3 Ступінь динамічності землекористування (Land Use Dynamic Degree).....	125
3.2 Аналіз характеристик передачі типу землекористування – побудова матриці передачі землі.....	127
3.3 Висновки до Розділу 3.....	134
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>136</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>139</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>157</b>



## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Актуальність дослідження обґрунтована потребою у забезпеченні оперативного виявлення змін земельного покриття для здійснення моніторингу земель сільськогосподарського призначення з використанням хмарної технології Google Earth Engine та геоінформаційного моделювання, оскільки землі цієї категорії забезпечують продовольчу безпеку України і світу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Науково-дослідна робота виконувалась на кафедрі геоінформатики і фотограмметрії Київського національного університету будівництва і архітектури та відповідає тематиці наукової діяльності кафедри «Створення веб-сервісів, розвиток інструментальних геоінформаційних систем, розроблення програмно-методичних комплексів»: державний реєстраційний номер: 0122U201382; тема: «Інфраструктура геопросторових даних для сталого розвитку територіальних громад»; дата реєстрації: 06.11.2022; відповідальний виконавець: Київський національний університет будівництва і архітектури.

**Мета і задачі дослідження.** *Метою* роботи є вирішення науково-прикладної задачі підвищення ефективності моніторингу земель сільськогосподарського призначення на основі використання методів дистанційного зондування Землі хмарної технології Google Earth Engine та геоінформаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні *завдання*:

- обґрунтувати вибір хмарної технології GEE для моніторингу земель сільськогосподарського призначення;
- розробити технологічну модель застосування методів ДЗЗ моніторингу земель сільськогосподарського призначення засобами GEE;
- розробити методику виконання керованої класифікації ансамблевим методом машинного навчання Random forest;
- розробити методику визначення точності результатів керованої

класифікації;

- виконати оцінку якості отриманих результатів керованої класифікації ансамблевим методом машинного навчання Random forest;
- виконати геоінформаційне моделювання просторово-часових змін земель сільськогосподарського призначення в Україні у 2014-2021 роках.

**Об’єкт дослідження:** землі сільськогосподарського призначення.

**Предмет дослідження:** методи дистанційного зондування Землі та геоінформаційні моделі для забезпечення моніторингу земель сільськогосподарського призначення.

**Наукова новизна роботи** полягає у наступному:

- розроблено технологічну модель застосування методів ДЗЗ моніторингу земель сільськогосподарського призначення засобами ГЕЕ;
- розроблено методику виконання керованої класифікації ансамблевим методом машинного навчання Random forest для моніторингу земель сільськогосподарського призначення;
- розроблено методику визначення точності результатів керованої класифікації земель сільськогосподарського призначення.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична значущість досліджень полягає також у використанні методів ДЗЗ для оперативного виявлення змін земельного покриття, забезпечення контролю та охорони земель сільськогосподарського призначення у реальному часі.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, які становлять основний зміст дисертації, були отримані здобувачем самостійно. Загалом за темою дисертації опубліковано 6 наукових праць.

**Апробація результатів дослідження.** Отримані результати досліджень були представлені на 3 міжнародних конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції молодих професіоналів «GeoTerrace-2020» (Львів, Україна) у 2020 р.; Міжнародній науково-технічній конференції «GEOFORUM» (Львів-Брюховичі-Яворів, Україна) у 2021 р., Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «БудМайстерКлас-2022»

(Київ, Україна).

**Публікації.** Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 6 наукових працях, серед яких 3 статей у наукових фахових періодичних виданнях з технічних наук, рекомендованих Міністерством освіти і науки України та 3 тез доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації та додатково відображають наукові результати дисертації.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 156 сторінки, з них: 129 сторінки основного тексту, ілюстрованого 30 рисунками і 14 таблицями, з яких на окремих сторінках 1 рисунок і 2 таблиці; список використаних джерел зі 138 найменувань на 18 сторінках.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ДЗЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ

## 1.1. Характеристика предметної сфери моніторингу сільськогосподарських земель

Сільське господарство є ключовим елементом розвитку країни, забезпечуючи продовольчу безпеку, робочі місця та економічне зростання. Воно охоплює виробництво продовольчих і промислових культур, розведення худоби, вирощування фруктів і овочів. Експорт сільськогосподарської продукції забезпечує валютні надходження, а самі землі відіграють центральну роль у біорізноманітті, кліматичній стабільності та економіці.

Згідно з ФАО, сільськогосподарські угіддя включають землі для посівів, пасовища, сади, рисові поля та лісисто місцевість, використовувану для вирощування комерційних культур. Їхні головні характеристики: родючість, різноманітність, відновлюваність, економічна та екологічна цінність, а також культурно-історична значущість [1, 2].

Водночас зміни клімату, стихійні лиха, неправильне управління та економічні коливання знижують продуктивність земель, спричиняючи ерозію, деградацію ґрунтів та підвищення цін на продовольство [3].

Це вимагає сталого підходу до використання сільськогосподарських угідь і ефективного реагування на глобальні виклики.

Глобальні зміни клімату, економічні коливання та неправильне управління негативно впливають на сільськогосподарські угіддя. Посухи та хвилі спеки зменшують врожайність і спричиняють розтріскування ґрунту через нестачу води. Сильні дощі та повені провокують водну ерозію ґрунтів.

Коливання у світовій продовольчій системі викликають зростання цін і змінюють структуру землекористування: збільшуються площі під продовольчими культурами, що іноді призводить до надмірної експлуатації ресурсів (рис. 1.1). Причинами таких змін можуть бути стихійні лиха, війни,

економічні санкції або інші чинники, що знижують ефективність використання сільськогосподарських земель [2–4].

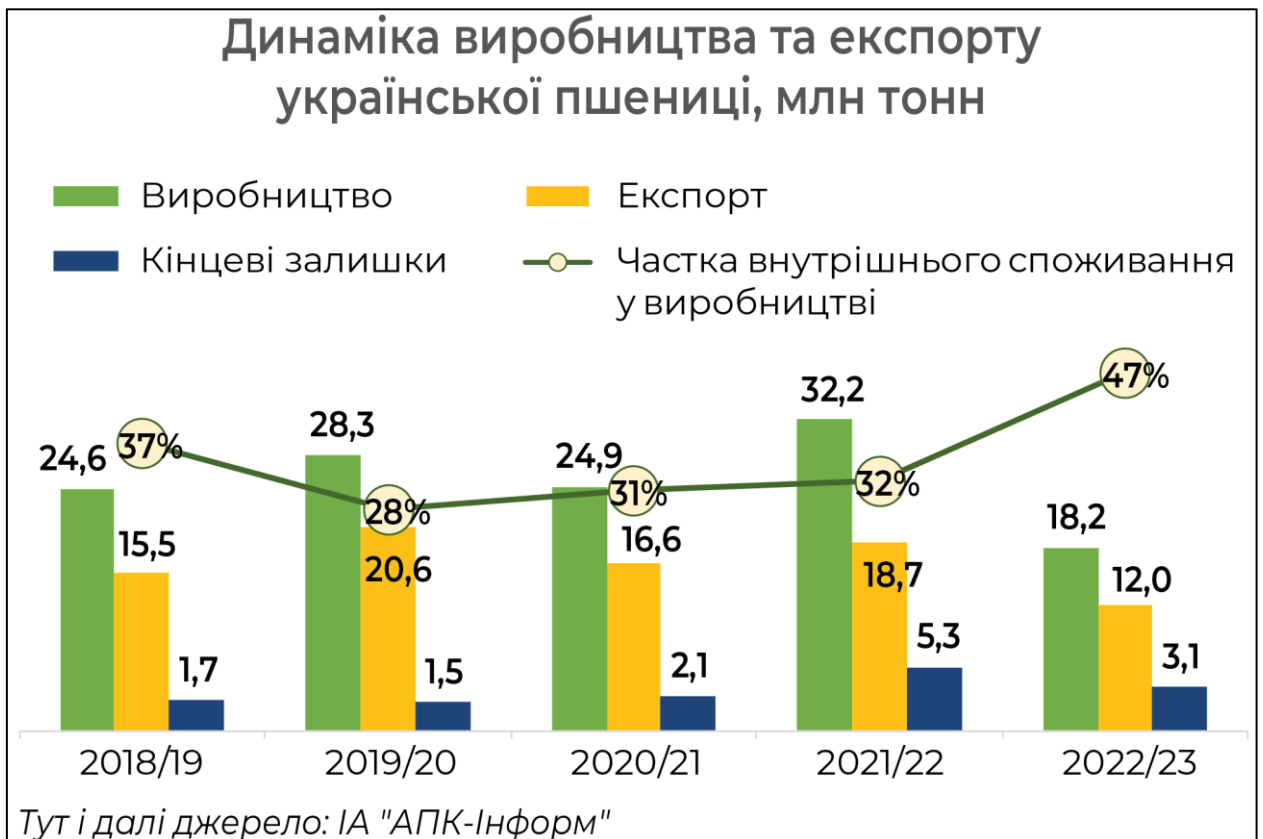


Рис. 1.1 Динаміка виробництва та експорту української пшениці, млн. тонн

(<https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/topic/1528022>)

До 2050 року населення світу досягне 9,7 млрд, а зростання економіки зумовить збільшення попиту на тваринний білок, фрукти та овочі, що змінить структуру сільськогосподарського виробництва [2–4]. Нераціональне землеробство, зокрема надмірне використання добрив і пестицидів, негативно впливає на орні землі та водні ресурси.

Добрива і пестициди потрапляють у водойми через стік, викликаючи евтрофікацію, цвітіння водоростей, закислення ґрунту та загибель риби. Залишки пестицидів забруднюють ґрунт, воду та можуть потрапляти в організм людини через харчовий ланцюг, створюючи ризик для здоров'я.

Надмірне використання пестицидів може призвести до забруднення ґрунту, що, в свою чергу, впливає на врожай, а залишки пестицидів можуть

потрапляти у водойми і вбивати водні організми, завдаючи шкоди водним екосистемам і потрапляючи в організм людини через харчовий ланцюг, створюючи ризик для здоров'я людини.

Тому моніторинг сільськогосподарських угідь є дуже важливим для національних економік та екосистем, а також для стратегій сталого розвитку. По-перше, з економічної точки зору, моніторинг може надати урядам і політикам дані в режимі реального часу про використання сільськогосподарських земель, врожайність і продуктивність. Ці дані можуть допомогти країнам передбачити пропозицію та попит на продовольство та оперативно реагувати на можливі продовольчі кризи або дефіцит. Коли сільськогосподарським землям загрожують шкідники, хвороби, посуха чи інші стихійні лиха, своєчасний моніторинг може допомогти особам, які приймають рішення, швидко вжити заходів для зменшення економічних втрат.

З точки зору екосистеми, моніторинг сільськогосподарських угідь гарантує, що земля управляється та використовується належним чином. Він може швидко виявити невідповідне сільськогосподарське виробництво, наприклад надмірне культивування, неправильне використання пестицидів і добрив тощо, що може мати довгостроковий негативний вплив на якість землі. Завдяки своєчасному моніторингу цієї діяльності є можливість забезпечити наукову основу для планування сільськогосподарського виробництва, коригування сільськогосподарської структури, розвитку та використання сільськогосподарських ресурсів тощо, ефективно запобігати несільськогосподарським і незерновим сільськогосподарським угіддям та забезпечити раціональне використання сільськогосподарських земель ресурси, стійкі, захищають здоров'я ґрунту та підтримують екологічний баланс. Крім того, моніторинг сільськогосподарських угідь також може ефективно відстежувати зміни в сільськогосподарському екологічному середовищі, створювати наукові основи для захисту сільськогосподарського екологічного середовища та сприяти підтримці біорізноманіття, оскільки сільськогосподарські угіддя є не лише місцем для посадки

сільськогосподарських культур, але й місцем, де живе багато організмів.

У загальному розумінні моніторинг сільськогосподарських угідь означає постійне та систематичне спостереження, реєстрацію та аналіз кількості, якості та стану використання сільськогосподарських угідь. Моніторинг земель сільськогосподарського призначення є важливою основою сільськогосподарського виробництва, управління земельними ресурсами та охорони навколишнього середовища.

Об'єктом моніторингу земель сільськогосподарського призначення є землі сільськогосподарського призначення, у тому числі оброблені землі, садові землі, ліси, луки тощо.

Зміст моніторингу сільськогосподарських земель загалом включає [5]:

- моніторинг площі сільськогосподарських угідь, оброблюваних земель, садів, лісів, пасовищ тощо.

- моніторинг якості сільськогосподарських угідь, включаючи родючість ґрунту, ерозію ґрунту, забруднення ґрунту тощо.

- моніторинг стану сільськогосподарського землекористування, включаючи тип землекористування, інтенсивність землекористування, ефективність землекористування тощо.

- моніторинг екологічного стану сільськогосподарських угідь, включаючи збереження ґрунту та води, біорізноманіття тощо.

Моніторинг сільськогосподарських угідь передбачає використання різноманітних джерел даних та технічних засобів. Серед них джерела даних є основою для моніторингу, а метод класифікації визначає, як використовувати ці дані точніше та ефективніше для аналізу та оцінки сільськогосподарських земель.

### *1.1.1 Джерела даних для виконання дослідження*

Джерела даних є важливою частиною моніторингу сільськогосподарських земель. Ці джерела даних можна класифікувати за різними типами відповідно до точності наданої інформації та частоти оновлення. Наприклад, деякі джерела даних можуть надавати щоденні оновлення, надаючи дослідникам оперативний статус сільськогосподарських угідь, тоді як інші джерела даних можуть оновлюватися лише раз на рік, але надавати широкий річний огляд.

Часова та просторова роздільна здатність також є важливими факторами для диференціації джерел даних. Деякі джерела даних можуть бути такими ж деталізованими, як статус кожної невеликої ділянки сільськогосподарських угідь, яка підходить для локальних або дрібномасштабних досліджень сільськогосподарських угідь. Тому, обираючи джерела даних, дослідники повинні ретельно враховувати їх призначення та потреби. Різні сценарії дослідження можуть потребувати різних типів джерел даних.

За допомогою *даних дистанційного зондування* отримують різноманітну інформацію про сільськогосподарські угіддя, включаючи види землекористування, умови землекористування, зміни у землекористуванні тощо. Дані дистанційного зондування можна отримати за допомогою супутників, авіації, дронів та інших платформ.

*Дані наземного обстеження та статистичного аналізу.* Дані наземного обстеження можуть надавати детальну інформацію про сільськогосподарські угіддя, наприклад про родючість ґрунту, ріст культур, шкідників та хвороби тощо. Такі дані можна отримати шляхом польових досліджень. Дані наземних досліджень є найбільш часто використовуваним джерелом даних у моніторингу сільськогосподарських угідь, зазвичай для отримання інформації про тип землекористування, площу та статус використання сільськогосподарських угідь. Інші дані, які використовуються для статистичного аналізу. Соціальні мережі та краудсорсингові дані, де фермери та громадськість можуть ділитися своєю сільськогосподарською діяльністю



або спостереженнями, можуть слугувати вторинним джерелом даних.

Історія землекористування, записи про вирощування сільськогосподарських культур і дані в документах також можуть стати джерелом інформації для поточного моніторингу сільськогосподарських земель.

Дані лабораторного аналізу дають можливість отримати таку інформацію, як якість сільськогосподарських угідь. Дані лабораторного аналізу можуть отримати інформацію, яку неможливо отримати з даних дистанційного зондування та даних наземних досліджень, наприклад вміст важких металів у ґрунті, залишки пестицидів тощо. Зазвичай включає дві категорії:

1) Дані аналізу ґрунту, за допомогою яких отримують інформацію про фізичні та хімічні властивості, хімічні властивості, біологічні властивості ґрунту. Використовується для отримання інформації про якість ґрунтів сільськогосподарських угідь.

2) Дані аналізу врожаю містять таку інформацію, як поживні компоненти врожаю та залишки пестицидів, які можна використовувати для отримання інформації про умови росту врожаю на сільськогосподарських угіддях.

Отримання інформації про просторовий розподіл і зміни сільськогосподарських земель у режимі реального часу має вирішальне значення для сприяння інформатизації сільського господарства та сталому розвитку. Це не тільки відіграє вирішальну роль у формуванні сільськогосподарської політики, управлінні плануванням, захисті та сталому розвитку сільськогосподарських ресурсів, але також узгоджується з метою викорінення крайньої бідності та голоду в Цілях розвитку тисячоліття (ЦРТ), запропонованих ООН [6].

Традиційно дані про кількість сільськогосподарських угідь та їх територіальний розподіл отримують шляхом наземних обстежень та статистичного аналізу на основі адміністративно-територіальних одиниць. Ці

методи зазвичай передбачають безпосереднє польове обстеження для статистичного аналізу значного за обсягом масивів даних. Незважаючи на те, що цей метод має переваги в точності класифікації, через витрати часу та низьку ефективність важко вчасно отримати інформацію про оброблювані землі та має очевидні обмеження. У той же час лабораторний аналіз підлягає тим самим обмеженням, часто можна аналізувати лише невеликі зразки, а результати обмежені розміром лабораторії.

З розвитком науки і техніки використання супутникових даних дистанційного зондування поступово вважається найкращим способом отримання інформації про зміни сільськогосподарських земель. Спектральну, просторову та текстурну інформацію, надану зображеннями дистанційного зондування, рекомендовано використовувати для ідентифікації сільськогосподарських угідь [7]. У поєднанні з різними алгоритмами класифікації ці дані можна використовувати для моніторингу сільськогосподарських земель. Сьогодні використання технології дистанційного зондування для отримання інформації про сільськогосподарські землі успішно використовується в багатьох практичних проектах [8].

Серед численних даних дистанційного зондування двома основними джерелами даних є дані оптичного супутникового дистанційного зондування та дані радіолокаційного супутникового дистанційного зондування. На сьогодні оптичні зображення, особливо супутники серії MODIS [10-13] і Landsat [10-13], широко використовуються для отримання інформації про сільськогосподарські землі. Дослідники віддають перевагу MODIS через їх високу часову роздільну здатність і використання у вивченні характеристик часових рядів індексу вегетації орних культур [14]. Однак слід зазначити, що нижча просторова роздільна здатність (250 м) може призвести до змішаних проблем із пікселями, що вплине на точність отриманої інформації. Середня просторова роздільна здатність супутників серії Landsat стала їх основною перевагою, що робить їх широко застосованими у сільському господарстві,

екології, кліматології тощо [15-16].

У той же час дані оптичних зображень високої роздільної здатності, такі як серія GF [17, 18], Sentinel-2 [19, 20] і WorldView-2 [21], QuickBird, SPOT тощо, можуть візуально виявляти стан сільськогосподарських угідь. Ці дані дистанційного зондування з високою роздільною здатністю зменшують вплив змішаних пікселів і забезпечують спектральні характеристики для ідентифікації оброблених земель. Однак слід зазначити, що ці дані можуть мати нестабільність у зборі даних за певних умов, таких як хмарна погода або дощ. Ці фактори можуть вплинути на точність вилучення інформації про оброблені. У той же час існують також деякі обмеження та проблемні питання щодо застосування технології у багатоспектральному дистанційному зондуванні.

По-перше, розміри багатоспектральних даних великі за обсягом пам'яті, що ускладнює обробку та аналіз даних.

По-друге, спектральне змішування, лінійне чи нелінійне, може призвести до помилок в ідентифікації та інтерпретації. Крім того, процесу вимірювання можуть заважати такі механізми погіршення, як атмосферні впливи, що додатково впливає на точність вимірювання.

Опрацювання багатоспектральних даних вимагає не тільки високошвидкісної обчислювальної потужності комп'ютера та чіткої технології виявлення, але також вимагає великої ємності для зберігання даних. Через багатовимірність і характеристики великого обсягу даних багатоспектрального куба вимоги до їх зберігання можуть досягати сотень гігабайт.

Радар із синтезованою апертурою (SAR) забезпечує метод спостереження поверхні, який не залежить від погоди та умов освітлення. Враховуючи, що посіви на сільськогосподарських угіддях зазнають біофізичних змін під час свого циклу росту, таких як висота, біомаса та покриття, зображення SAR можуть ефективно фіксувати ці характеристики для отримання інформації про сільськогосподарські угіддя [22, 23]. Водночас

дані SAR більш чутливі до характеристик зворотного розсіювання водних об'єктів, що означає, що вони можуть ефективно збирати інформацію про рисові поля, за допомогою даних часових рядів. Однак через принцип візуалізації SAR його зображення часто супроводжуються спекл-шумом і специфічними геометричними спотвореннями, що, безсумнівно, збільшує складність обробки та інтерпретації його даних [24, 25].

Що стосується супутникової технології дистанційного зондування, хоч вона і показала багато переваг, проте через властивий їй довгий цикл збору даних, високу вартість і низькі обмеження мобільності ця технологія все ще має труднощі та виклики разом із зростаючим попитом на ці дані.

Слід зазначити, що технологія дистанційного зондування за допомогою літальних апаратів має значну операційну гнучкість і високу просторову та часову роздільну здатність. Порівняно з супутниковою технологією дистанційного зондування, технологія дистанційного зондування за допомогою літальних апаратів може значно знизити витрати та менше залежати від циклів повторного знімання та несприятливих кліматичних умов (таких як хмарність), завдяки чому вона демонструє великий потенціал у дослідженнях на рівні сільськогосподарських угідь [26, 27].

Оскільки БПЛА можуть літати саме на малих висотах, вони фіксують деталі, які ігноруються під час аерофотознімання або супутниковими системами через хмарність, таким чином отримуючи детальну інформацію про сільськогосподарські угіддя з високою роздільною здатністю [29, 30]. У порівнянні з результатами традиційного супутникового дистанційного зондування, зображення із БПЛА виявилися більш точними [29]. Ці досягнення в дослідженнях означають, що технологія повітряного дистанційного зондування БПЛА відіграватиме більш важливу роль у майбутніх застосуваннях сільськогосподарського дистанційного зондування.

Різноманітність і доступність даних дистанційного зондування надають широкий спектр джерел даних для моніторингу сільськогосподарських угідь.

Для моніторингу сучасні дослідження прагнуть інтегрувати дані дистанційного зондування з багатьох джерел і повністю використовувати переваги різних модальностей і даних з різною роздільною здатністю. Наприклад, поєднання оптичних супутникових і супутникових даних SAR може забезпечити моніторинг орних земель [31-33]; тоді як поєднання даних із часовими рядами середньої роздільної здатності та даних високої просторової роздільної здатності може забезпечити більш детальні зображення посівів на невеликих сільськогосподарських площах [34-35]. Однак важливо зазначити, різні джерела даних мають значні обмеження.

Наприклад, на роботу оптичного супутникового дистанційного зондування легко впливають наявність хмар, що призводить до зниження якості зображення. Хоча радіолокаційне супутникове дистанційне зондування має характеристики проникнення через хмари та дощ, на зображенні з'являється крапковий шум, який впливає на ідентифікацію інформації про оброблювані землі. Дистанційне зондування за допомогою літальних апаратів, особливо застосування малих безпілотних літальних апаратів, відкриває нові можливості для застосування дистанційного зондування завдяки високій просторовій роздільній здатності та стійкості до метеорологічних умов, але воно також має свої обмеження.

Таким чином, суть дослідження моніторингу сільськогосподарських угідь полягає не лише у виборі відповідних джерел даних, але, що більш важливо, у тому, як комплексно використовувати різні джерела даних для точного моніторингу метричних властивостей сільськогосподарських угідь.

### ***1.1.2 Класифікація даних дистанційного зондування***

Як джерело даних, зображення дистанційного зондування забезпечують більш швидкі, вичерпні та точні дані для моніторингу сільськогосподарських земель. Після отримання джерела даних вибір методу класифікації визначає спосіб вилучення інформації щодо сільськогосподарських угідь із даних для аналізу. В даний час частіше використовуються два методи: піксельне

вилучення інформації та об'єктно-орієнтоване вилучення інформації.

Вилучення інформації про сільськогосподарські угіддя на основі пікселів — це стратегія класифікації кожного окремого пікселя в зображеннях дистанційного зондування, яка в основному покладається на спектральне значення кожного пікселя в кожній смузі. Цей метод намагається максимізувати використання спектральної інформації пікселів і характеристик індексів дистанційного зондування, таким чином висвітлюючи спектральні відмінності між сільськогосподарськими землями та іншими типами земель, полегшуючи їх ідентифікацію та вилучення. Однак цей підхід має деякі обмеження.

Через стратегію на основі значення одного пікселя він часто не може повністю охопити більш складні характеристики просторової текстури та топологічні зв'язки, особливо в районах із фрагментованим розподілом сільськогосподарських угідь і складним середовищем. Крім того, для зображень дистанційного зондування з високою просторовою роздільною здатністю кількість доступних діапазонів обмежена, що призводить до зниження спектральної роздільної здатності, що посилює перекриття та плутанину спектральної інформації. Ця плутанина може призвести до надмірності даних і зниження точності класифікації. Хоча метод, заснований на піксельних спектральних характеристиках, є відносно повним в теорії та супроводжується різними алгоритмами, його точність вилучення в практичних застосуваннях, особливо у сценаріях з високою роздільною здатністю, може більше не відповідати високим вимогам сучасного сільськогосподарського моніторингу.

Об'єктно-орієнтоване вилучення інформації про сільськогосподарські землі – це сучасний метод обробки безперервних областей або «об'єктів» на зображеннях дистанційного зондування, який відрізняється від традиційних стратегій, заснованих на окремих пікселях. Цей метод вперше запропонували Томас Блашке та Штефан Ланг у середині 1990-х років в Університеті Зальцбурга, Австрія [36]. Його основним принципом є сегментація

зображення, процес, за допомогою якого сусідні пікселі, схожі за спектральними чи іншими властивостями, поділяються на об'єкти, які відображають певні особливості або особливості поверхні. Ці об'єкти не тільки класифікуються на основі спектральних особливостей, але також поєднують кілька атрибутів, таких як текстура, форма та просторове розташування. Ця стратегія повністю використовує інформацію про спектр, текстуру та форму оброблюваної землі на зображеннях дистанційного зондування та використовує відносно однорідні комбінації пікселів як одиниці класифікації, тим самим покращуючи швидкість і точність класифікації. Особливо під час опрацювання даних дистанційного зондування з високою просторовою роздільною здатністю він може точно фіксувати мікроструктурні характеристики сільськогосподарських угідь, такі як структура поля та міжрядні відмінності. Після цього все більше дослідників почали використовувати об'єктно-орієнтовані методи класифікації зображень для вивчення сільськогосподарських угідь.

Наприклад, Watts та інші використовували алгоритми сегментації та алгоритм RF в для створення карт сільськогосподарських угідь у північно-центральної частині штату Монтана на основі зображень Landsat. Результати довели, що цей метод класифікації може ефективно та точно поєднувати RF та об'єктно-орієнтовані методи, точність становила 82% [37].

Лу та ін. використовували зображення Quickbird і безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як джерела даних для побудови алгоритму, який всебічно враховує середнє значення текстури та спектральне середнє значення відтінків сірого для спектральних особливостей, форми та текстури, щоб виділити межі ділянок на досліджуваній території. результати доводять, що порівняно з традиційними методами, межі, виділені цим методом, більш узгоджуються з реальними межами [38].

Луо та ін. безпосередньо проаналізували земельний покрив у великих районах на основі зображень із середньою роздільною здатністю та алгоритмів сегментації зображень на основі об'єктів. Результати дослідження показали,

що між 2000 і 2010 роками 190 квадратних кілометрів оброблених земель було перетворено на забудовані території, що узгоджується з урбанізацією, пов'язаною з економічним розвитком [39].

Гудін та ін. використали сільськогосподарську територію зі складними типами сільськогосподарських угідь між Польщею та Україною як територію для тестування методів об'єктної класифікації та методів піксельної класифікації. Результати дослідження показали, що об'єктні методи класифікації з використанням як спектральних, так і просторових ознак мають перевагу. Це може значно покращити результати класифікації землекористування [40].

Лонг та ін. використали зображення із супутника Landsat 7 у 2012 році та прийняли об'єктно-орієнтований підхід для класифікації сільськогосподарських ландшафтів у північно-східній частині Монтани. Результати експерименту показали, що точність класифікації була покращена без заповнення пропусків на дефектних зображеннях до 85 % [41].

Фундаментальна відмінність між цим методом і піксельною стратегією полягає в тому, що його об'єкт класифікації змінюється зі звичайного окремого пікселя на суцільну та нерегулярну область об'єкта зображення, а основа для класифікації розширюється від однієї спектральної ознаки до кількох ознак, а також роздільна здатність отриманих зображень дистанційного зондування може постійно покращуватися, що має очевидні переваги при обробці зображень дистанційного зондування сільськогосподарських угідь, особливо зображень високої роздільної здатності.



## **1.2. Аналіз нормативно-методичного забезпечення для моніторингу сільськогосподарських земель**

### ***1.2.1 Закони та нормативно-правові акти щодо моніторингу земель сільськогосподарського призначення в Україні.***

Аналіз нормативно-методичного забезпечення моніторингу земель сільськогосподарського призначення є важливим завданням раціонального використання та охорони земельних ресурсів сільськогосподарського призначення. Моніторинг земель сільськогосподарського призначення передбачає систематичне спостереження за станом, динамікою та тенденціями зміни якості земель, що використовуються для виробництва харчових продуктів та іншої сільськогосподарської продукції. Для ефективного моніторингу необхідні чіткі нормативні документи, які б визначали зміст моніторингу, методи моніторингу, стандарти, заходи та штрафи.

Окрім Конституції України, в Україні моніторинг регулюють:

1. Земельний кодекс України [42]. Закон уточнює визначення земельних відносин, завдання та принципи земельного права, виділяє землю як основне національне багатство, що охороняється державою. Сфера застосування цього Закону поширюється на всі землі, права користування землею, земельні частки (паї) та земельні відносини, пов'язані з використанням і охороною надр, лісів, вод, рослинних і тваринних ресурсів, атмосферного повітря в Україні. У структурі влади Верховна Рада України наділяється чіткими повноваженнями, зокрема розробляє закони, визначає державну земельну політику, координує діяльність установ усіх рівнів у сфері земельних відносин.

2. Закон України «Про охорону земель» [43]. Закон складається з дев'яти частин, починаючи з «Загальних положень», в яких викладено мету, сферу застосування, основні поняття, принципи та інститути управління законодавством про охорону земель. Наступний розділ – «Компетенція органів державної влади та місцевого самоврядування у сфері охорони земель», яка уточнює формування політики, нагляд за її виконанням та координацію повноважень відповідних органів державної

влади та місцевого самоврядування.

3. Закон України «Про Державний земельний кадастр» [44] регулює ведення та функціонування державного земельного кадастру. Закон уточнює визначення, мету, принципи та орган управління земельним кадастром як єдиною національною геоінформаційною системою. Його метою є систематичний облік земельної інформації на території України, як-от використання, обмеження використання, кількісні та якісні характеристики, оцінка та відведення власникам і користувачам, щоб надавати уряду, місцевим установам та різним фізичним і юридичним особам необхідну інформацію. інформаційне забезпечення. З точки зору принципів функціонування земельний кадастр наголошує на обов'язковості внесення та надання інформації, уніфікації методології, об'єктивності, точності, повноті та узгодженості правової бази інформації, а також акцентує увагу на відкритості, доступності та сталості інформації.

4. Закон України «Про оцінку земель» [45]. Цей закон деталізує різні аспекти оцінки землі. З метою забезпечення стандартизації та нормативності оціночної діяльності законом також окремо сформульовано конкретні вимоги щодо форми, структури, змісту та додатків до технічних документів і звітів, уточнено відповідні технічні стандарти. Крім того, з метою систематичного та електронного управління оціночною інформацією закон передбачає положення про створення, управління та використання інформаційних систем і баз даних оцінки земель, а також уточнює відповідні технічні стандарти та специфікації. З метою забезпечення дотримання законодавства та недопущення порушень в іншій главі конкретно визначено контролюючі органи, методи та порядок проведення оціночних робіт, а також відповідну відповідальність за порушення.

5. Закон України «Про меліорацію земель» [46]. У ньому визначаються правові основи та види меліорації землі та права власності на відповідні інженерні об'єкти, уточнюються повноваження різних адміністративних органів. Щодо завдання впровадження та нагляду за меліорацією земель, закон

уточнює різні рівні адміністративних органів, від Кабінету Міністрів України до центральних і місцевих адміністрацій, з їхніми унікальними повноваженнями та обов'язками. Крім того, детально встановлюються порядок та вимоги щодо розроблення, затвердження, впровадження та коригування проектів меліорації, а також положення про джерела та напрямки формування коштів.

6. Цивільний кодекс України [47]. Кодекс уточнює основні принципи охорони земель, наголошуючи на тому, що землевласники та землекористувачі повинні дотримуватися законодавчих вимог щодо охорони навколишнього середовища з метою підвищення родючості ґрунтів та збереження інших його корисних властивостей. Кодекс також встановлює нормативи якості ґрунтів, розглядає ґрунт як об'єкт особливої охорони та створює для нього самостійну правову основу. Будь-яке відчуження землі без дозволу Держгеокадастру забороняється. Крім того, закон містить чіткі положення щодо захисту деградованих і непродуктивних земель.

7. Кодекс України про адміністративні правопорушення [48]. Кодекс чітко визначає відповідальність та штрафи за шкоду, заподіяну сільськогосподарським землям. Серед них, якщо землекористування не досягає очікуваної мети або якщо відповідні правила не дотримуються під час землекористування, планування, проектування, будівництва та впровадження, що негативно впливає на стан землі, передбачено штрафи. Крім того, до відповідальності будуть притягнуті особи, які незаконно заволоділи ґрунтовим покривом земель або не приведуть тимчасово зайняті землі до цільового призначення.

Водночас моніторинг земель, як вид моніторингу природного середовища, регулюється й іншими законами, зокрема:

- Закон України "Про затвердження Положення про моніторинг ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення";
- Закон України "Про державну систему моніторингу довкілля";
- Закон України "Про Державний технологічний центр охорони

родючості ґрунтів";

- Наказ Мінагрополітики України "Про затвердження Порядку ведення агрохімічного паспорту поля, земельної ділянки";

- Водний кодекс України;

- Кодекс України про надра;

- Лісовий кодекс України;

- Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища";

- Закон України "Про природно-заповідний фонд України";

- Закон України "Про охорону атмосферного повітря";

- Закон України "Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність";

- "Положення про державний моніторинг навколишнього природного середовища" (затверджене Постановою Кабінету Міністрів України);

- Державна цільова екологічна програма проведення моніторингу навколишнього природного середовища (затверджена постановою Кабінету Міністрів України).

Як вид земельних ресурсів створення та моніторинг земель сільськогосподарського призначення також регулюється такими законами: Земельний Кодекс України, Положення про моніторинг земель, Положення про моніторинг ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення, Постанова Кабінету Міністрів України "Про затвердження Порядку проведення інвентаризації земель", Закон України "Про землеустрій".

У статтях 35 і 37 Закону України «Про землеустрій» наголошується на важливості проведення інвентаризації земель. Його метою є, головним чином, визначення конкретного місця розташування, меж, розміру та правового статусу проектів рекультивації земель, виявлення земель, які не використовуються, використовуються нераціонально чи не за цільовим призначенням, а також виявлення та збереження деградованих сільськогосподарських угідь та забруднених земель. Така інвентаризація

гарантує, що кількісні та якісні характеристики землі правильно записуються та зберігаються, що додатково сприяє точності Державного земельного кадастру [50]. Це також забезпечує основу для прийняття адміністративними органами та органами місцевого самоврядування чітких рішень щодо використання та збереження земель.

У Земельному кодексі України уточнено визначення, призначення та механізм здійснення моніторингу земель. “Моніторинг земель – це система спостережень за станом земель з метою своєчасного виявлення та оцінки змін, уникнення та ліквідації наслідків негативних процесів. Система моніторингу передбачає збір, обробку, передачу, збереження та аналіз інформації про стан земель, а також надає прогнози та наукові консультації щодо змін земель для запобігання негативним змінам статусу земель та забезпечення екологічної безпеки. Моніторинг земель є частиною української національної системи моніторингу довкілля. Відповідно до мети моніторингу, змісту спостереження та охопленої площі моніторинг земель можна розділити на три види: загальнодержавний, регіональний та місцевий. Моніторинг земель покладається на центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну земельну політику, та центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері охорони навколишнього природного середовища. Конкретний порядок проведення моніторингу земель визначається Кабінетом Міністрів України” [5].

У Земельному Кодексі України у статті 22 дається визначення земель сільськогосподарського призначення: *“До земель сільськогосподарського призначення належать:*

- *сільськогосподарські угіддя (рілля, багаторічні насадження, сіножаті, пасовища та перелоги);*
- *несільськогосподарські угіддя (господарські шляхи і прогони, позахисні лісові смуги та інші захисні насадження, крім тих, що віднесені до земель лісгосподарського призначення, землі під господарськими будівлями і дворами, землі під інфраструктурою оптових ринків*

*сільськогосподарської продукції, землі тимчасової консервації тощо)» (п.2 Ст.22) [24].*

На юридичному рівні українські закони та нормативно-правові акти достатньо потужні, щоб захистити українські землі, які є важливим національним надбанням. Але це потребує своєчасного та об'єктивного розуміння їхнього становища, кваліфікованої та неупередженої його оцінки та вжиття законних заходів. Дослідженням моніторингу земель займалися Попрозман Н. В., Коробська А. О, Новаковська І. О., Іщенко Н. Ф., Скрипник Л. Р., Третяк А. М. [51-53]; питанням застосування даних та методів ДЗЗ займалися Кохан С.С., Четверікова Б.В., Карпінський Ю. О., Зіборов В.В., Лазоренко Н.Ю., та ін. [54-61] Слід зазначити, що у розглянутих працях не було застосовано хмарну технологію для опрацювання геопросторових даних і не було виконано досліджень щодо змін площ земель сільськогосподарського призначення на всю територію України.

### ***1.2.2 Досвід реалізації аграрної політики у світі***

Багато розвинутих країн мають значний досвід і передову практику охорони сільськогосподарських земель. Зокрема, США, Південна Корея, Японія та Німеччина продемонстрували унікальний досвід у сфері скоординованого розвитку сільського господарства та охорони сільськогосподарських угідь, агротехніки та охорони якості сільськогосподарських угідь, що є цінним для інших країн.

*Японія* розробила повну правову систему щодо охорони сільськогосподарських земель, яка включає понад 130 відповідних законів, таких як Закон про сільське господарство, Основний закон про сільське господарство, Регіональний закон про сприяння сільському господарству та Закон про поліпшення земель. Для реалізації ефективного використання земельних ресурсів Японія встановила чотири рівні: планування землекористування, комплексне планування землекористування, базове планування землекористування та відомче планування землекористування, а

також забезпечує координацію та взаємодоповнюваність між ними. Південна Корея також створила правову базу для захисту сільськогосподарських земель, включаючи Закон про сільськогосподарські землі, Закон про охорону та використання сільськогосподарських земель, Закон про земельну реформу сільськогосподарського призначення та Закон про сприяння розвитку сільського господарства. Ці закони роз'яснюють вимоги щодо охорони, використання, управління та перетворення земель сільськогосподарського призначення.

*Південна Корея* також прийняла систему управління землекористуванням для уточнення типів використання сільськогосподарських угідь і забезпечила реалізацію функцій сільськогосподарських угідь через систему дозволів на забудову сільськогосподарських земель.

*Німеччина*, особливо Баварія, запровадила систему контролю за землекористуванням, щоб забезпечити захист сільськогосподарських угідь у загальному плані землекористування, включаючи зони забудови, зони помірнього зростання та зони заборони забудови, кожна зона має чіткі вимоги до управління.

*Сполучені Штати Америка*. Площа сільськогосподарських угідь США становить 52% площі суші [62], що забезпечує достатню площу для посіву різних культур і забезпечує стабільність і різноманітність продовольчого забезпечення. У той же час різноманітні кліматичні умови Сполучених Штатів охоплюють різні середовища від помірного до субтропічного, від посушливого до вологого, що дозволяє Сполученим Штатам вирощувати різноманітні культури та забезпечувати відповідні умови для різних культур у різні пори року. Ці дві переваги дозволяють сільському господарству США виробляти ефективну продукцію, задовольняти внутрішній і зовнішній попит і мати здатність справлятися з невизначеними ринковими проблемами та викликами зміни клімату. Загалом Сполучені Штати створили всеохоплюючу багаторівневу систему захисту сільськогосподарських земель, яка охоплює

політичне управління та економічні засоби, а також потужну наукову, освітню галузь та засоби впровадження технологій. Ці заходи підтримують сільськогосподарський потенціал Сполучених Штатів і забезпечують продовольчу безпеку країни [63-66].

*Китай.* Після закінчення Другої світової війни, зважаючи на такі фактори, як економічний розвиток, швидке зростання населення та розширення міст, китайський уряд сформулював низку заходів щодо захисту сільськогосподарських земель і забезпечення продовольчої безпеки.

Щоб ще більше підвищити продуктивність сільського господарства, у 1978 році уряд Китаю видав документ «Система сімейного землекористування та відповідальності», яка розділила право власності на землю та права на користування. У 1986 році охорона сільськогосподарських земель була визнана основною національною політикою [68, 69]. Не зважаючи на ці політичні заходи, незаконне посягання на сільськогосподарські землі з метою отримання економічної вигоди залишається поширеним явищем (рис. 1.2).

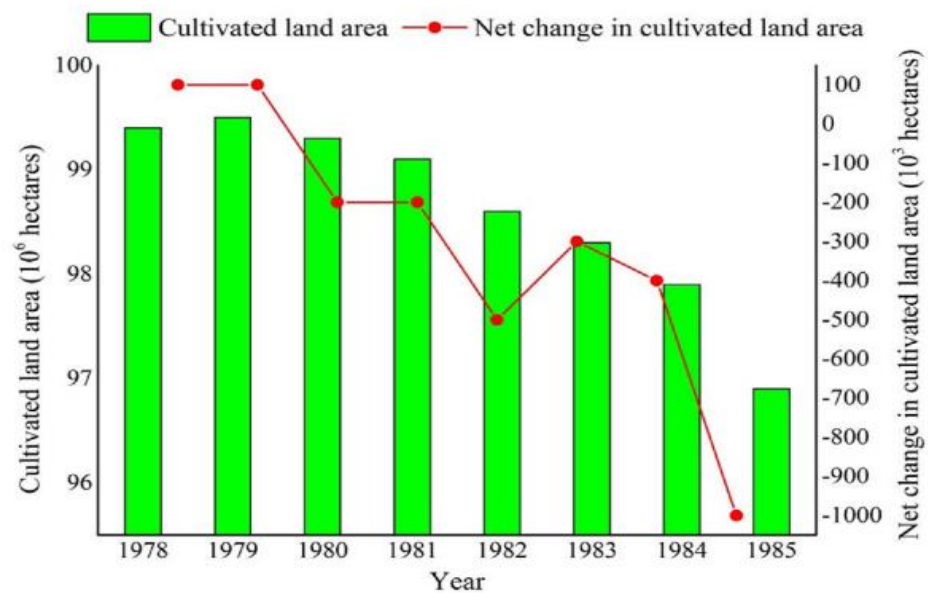


Рис. 1.2 Посівна площа Китаю та її чисте зменшення за період 1978–1985 рр.

[67]



Спостерігаючи за еволюцією політики Китаю у сфері захисту сільськогосподарських угідь за останні сорок років з 1981 по 2021 рік, визначено, що численні формулювання політики та коригування часто вносяться для вирішення різноманітних проблем і викликів, спричинених економічним розвитком [70, 71].

З точки зору захисту навколишнього середовища, оброблена земля, як важлива частина екосистеми, є не тільки наріжним каменем підтримки сільськогосподарського господарства та постачання продовольства, але також відіграє життєво важливу роль у підтримці біорізноманіття, регулюванні клімату, гідрологічного циклу та ґрунту. плодючість ефект. Хоч досліджена виробнича модель, яка задіює хімічні речовини, призвела до збільшення виробництва в короткостроковій перспективі, мала негативний вплив на ґрунт і екологію навколишнього середовища в довгостроковій перспективі. Щоб глибше зрозуміти проблему, Китай провів своє перше національне дослідження забруднення ґрунту з 2005 по 2013 рік. Результати дослідження показують, що в деяких районах Китаю спостерігається понаднормове забруднення ґрунту, особливо забруднення важкими металами [72]. Незважаючи на те, що були впроваджені найсуворіші у світі заходи щодо захисту сільськогосподарських угідь, результати заходів не такі хороші, як очікувалося. Згідно з даними третього обстеження земель і ресурсів у 2019 році, загальна площа оброблюваних земель у Китаї становить 127,8619 млн га.

Щоб вирішити проблему використання оброблюваних земель для посіву інших товарних культур, уряд посилив дослідження сільськогосподарських посівів і розробив “спеціальне сільське господарство на основі місцевих екологічних і кліматичних умов”, щоб збільшити дохід фермерів [73]. Однак, беручи до уваги мінливість ситуації внутрішнього та зовнішнього економічного розвитку, нестабільність міжнародної ситуації та зміни глобального клімату, уряд Китаю все ще постійно коригує свою політику захисту сільськогосподарських угідь для забезпечення національної продовольчої безпеки.

### 1.3. Основний зміст дослідження

Дослідження сільськогосподарських угідь за допомогою даних дистанційного зондування в основному зосереджені на двох аспектах: отримання інформації про сільськогосподарські угіддя та виявлення їх якісних та кількісних змін, а саме ідентифікація та визначення властивостей сільськогосподарських угідь на основі даних дистанційного зондування, використовуючи їх унікальні дешифрувальні характеристики, і отримання інформації про їх просторовий розподіл, морфологію та площу. За цією інформацією можна не лише визначити наявність сільськогосподарських угідь, а й зрозуміти її поточний стан та зміни. Виявлення змін у сільськогосподарських землях має на меті ідентифікацію та аналіз їх змін за даними ДЗЗ у встановлений часовий період. Слід зазначити, що час отримання супутникових знімків може відрізнятись в різні періоди, що може призвести до «псевдозмін» зовнішнього вигляду сільськогосподарських угідь на зображеннях. Більшість існуючих досліджень щодо виявлення змін у сільськогосподарських угіддях базується на довгострокових даних із середньою та низькою роздільною здатністю [74].

Основний зміст дослідження включає аналіз моделей змін площ сільськогосподарських земель.

Швидке виявлення змін у сільськогосподарських угіддях і надання допомоги в оновленні географічних інформаційних даних сільськогосподарських угідь є важливим завданням у практичних застосуваннях. Тому дуже важливо розуміти процес і розробку методів виявлення дистанційного зондування сільськогосподарських угідь.

Історія розвитку методів дистанційного зондування моніторингу культивованих земель також є історією розвитку галузей космічних супутників, датчиків, машинного навчання та штучного інтелекту в науці про людину. Розвиток цих галузей глибоко вплинув на розвиток методів моніторингу дистанційного зондування сільського господарства землі.

*Перший етап.* На ранніх стадіях технології дистанційного зондування,

обмежених технічними умовами того часу, моніторинг сільськогосподарських угідь в основному покладався на дані дистанційного зондування з низькою роздільною здатністю та статистичні дані, які могли надати лише обмежену інформацію про поверхню. У той же час, через низьку обчислювальну потужність комп'ютерів на той час, велику кількість даних обробляли та аналізували вручну, що обмежувало ефективність і точність дистанційного моніторингу культивованих земель.

*Другий етап.* З розвитком комп'ютерних технологій і початковим розвитком технології машинного навчання обробка даних дистанційного зондування починає вводити інтелектуальні алгоритми. У порівнянні з попередніми методами, які в основному покладалися на моніторинг і класифікацію піксельних змін, нові алгоритми машинного навчання підвищили рівень розпізнавання для моніторингу сільськогосподарських угідь. Заздалегідь надаючи в систему зразки даних, система може точніше класифікувати невідомі дані, таким чином покращуючи точність моніторингу культивованих земель за допомогою дистанційного зондування.

*Третій етап.* Запровадження машинного навчання та технології Object-Based Image Analysis (OBIA) ще більше підвищує точність і детальність моніторингу культивованих земель за допомогою дистанційного зондування. Традиційні методи аналізу на основі пікселів можуть зіткнутися з труднощами в розрізненні під час обробки даних дистанційного зондування високої роздільної здатності, тоді як OBIA може групувати суміжні пікселі зі схожими характеристиками в один об'єкт для аналізу, що значно покращує точність класифікації. У той же час методи фенологічного аналізу на основі спектру дозволяють дослідникам використовувати спектральні зміни в рослинах під час циклів їх росту для моніторингу культивованих земель, і цей метод демонструє значні переваги при роботі з сезонними змінами.

*Четвертий етап.* В останні роки впровадження глибокого навчання, особливо технології згорткової нейронної мережі (CNN), принесло революційні зміни в моніторинг культивованих земель за допомогою

дистанційного зондування. Завдяки структурі багаторівневої нейронної мережі система може автоматично вивчати та витягувати складні характеристики в даних дистанційного зондування, тим самим значно покращуючи точність і ефективність моніторингу культивованих земель за допомогою дистанційного зондування. Цей метод особливо підходить для даних дистанційного зондування з високою роздільною здатністю та дозволяє досягти високоточної ідентифікації сільськогосподарських угідь майже без ручного втручання [75].

### ***1.3.1 Сучасні методи дослідження, які були використані у роботі***

#### *Моніторинг сільськогосподарських угідь на основі фенології.*

Фенологія — наука про зв'язок між різними стадіями циклу росту й розвитку організмів і факторами середовища. У сфері моніторингу дистанційного зондування сільського господарства фенологічний аналіз означає отримання цієї фенологічної інформації шляхом аналізу даних дистанційного зондування на основі фенологічних характеристик культур під час їх росту та розвитку, таких як проростання, цвітіння, плодоношення та в'янення, з метою моніторингу визначення видів культур, оцінка стану росту культур, прогнозування врожайності та інші цілі. Поєднання фенології та даних дистанційного зондування означає, що при отриманні інформації про сільськогосподарські угіддя можна використовувати фенологічні характеристики сільськогосподарських культур для покращення класифікації та інтерпретації даних дистанційного зондування. Наприклад, на основі спектральних характеристик відбиття сільськогосподарських культур у різні періоди вегетації можна точніше ідентифікувати та розрізнити різні види сільськогосподарських культур або оцінити стан росту однієї культури в різних регіонах [76-78]. Він надає точнішу та детальнішу інформацію про сільськогосподарські угіддя, а також може використовувати часові ряди даних дистанційного зондування для фіксації динамічних змін у процесі росту культур, забезпечуючи тим самим більш комплексну підтримку прийняття

рішень у режимі реального часу для сільськогосподарського виробництва та управління [79, 80].

*Метод дистанційного моніторингу сільськогосподарських угідь з інтеграцією машинного навчання та технології сегментації об'єктів.* Зі швидким розвитком технологій дистанційного зондування та обчислювальної потужності цей метод став передовою технологією дистанційного моніторингу сільського господарства. Цей метод поєднує традиційну технологію обробки зображень дистанційного зондування з сучасними алгоритмами машинного навчання для підвищення точності та ефективності моніторингу сільськогосподарських угідь.

Технологія сегментації об'єктів, яку часто називають Object-Based Image Analysis — це технологія, яка сегментує зображення дистанційного зондування на об'єкти практичного значення (наприклад, сільськогосподарські угіддя, будівлі або водойми). На відміну від традиційного аналізу на рівні пікселів, ОБІА зосереджується не лише на спектральній інформації окремого пікселя, але також розглядає співвідношення між пікселями в безперервній області. Це дозволяє ОБІА краще обробляти складні типи наземних об'єктів, особливо на зображеннях дистанційного зондування з високою роздільною здатністю. Машинне навчання відіграє тут ключову роль.

Традиційний аналіз зображень дистанційного зондування часто базується на сформульованих вручну правилах або порогових значеннях, які можуть не працювати належним чином, якщо зіткнутися з великими або змінними даними. Алгоритми машинного навчання, особливо алгоритми навчання під наглядом, можуть автоматично ідентифікувати та класифікувати особливості зображень дистанційного зондування, навчаючись на анотованих навчальних даних. Це значно підвищує автоматизацію та точність обробки даних ДЗЗ.

Поєднуючи сегментацію на рівні об'єкта з машинним навчанням, дослідники можуть використовувати ОБІА, щоб спочатку сегментувати

зображення дистанційного зондування на значущі об'єкти, а потім використовувати алгоритми машинного навчання для класифікації та аналізу цих об'єктів. Цей метод довів свою ефективність у багатьох сценаріях застосування, таких як виявлення змін у сільськогосподарських угіддях, класифікація типів культур і оцінка сільськогосподарських катастроф [81]. Хоча методи, що інтегрують машинне навчання та сегментацію на рівні об'єктів, досягли значного прогресу в моніторингу дистанційного зондування сільськогосподарських угідь, деякі проблеми все ще існують. Наприклад, для навчання моделі машинного навчання потрібна велика кількість анотованих даних; на ефект сегментації ОБІА може вплинути якість зображення або складність рельєфу; обчислювальна складність алгоритму може обмежити його застосування до великомасштабних даних [82].

*Дистанційний моніторинг сільськогосподарських угідь на основі технології глибокого навчання.* Технологія глибокого навчання є галуззю машинного навчання і зараз є гарячою темою в галузі обчислювальної науки [83, 84]. Дистанційний моніторинг сільськогосподарських угідь на основі технології глибокого навчання поступово формує майбутнє управління земельними ресурсами та сільськогосподарського виробництва.

Глибоке навчання, особливо згорточні нейронні мережі (CNN), надає потужний інструмент, який може автоматично виділяти складні характеристики в зображеннях дистанційного зондування та виконувати точну класифікацію порівняно з традиційними методами на основі статистики та емпіричних моделей. Цей метод автоматично вивчає особливості сільськогосподарських угідь, підкреслюючи переваги продуктивності в складності даних дистанційного зондування, викликаних змінами освітленості, пори року та погоди.

У той же час моделі глибокого навчання також демонструють потенціал перенесення навчання, що дозволяє моделям, навченим в одній області, ефективно застосовувати в інших сферах, таким чином сприяючи широкомасштабному багаточасовому моніторингу дистанційного зондування

сільськогосподарських угідь. Порівняно з традиційним машинним навчанням і методами сегментації об'єктів, глибоке навчання також демонструє інші ключові переваги, такі як: інтуїтивно зрозуміле та автоматизоване вилучення функцій із даних, здатність обробляти великі дані дистанційного зондування та використання гнучких мережевих структур для адаптації до різних джерел даних і часових рядів, а також його розширену здатність представляти нелінійні моделі. Однак, незважаючи на те, що глибоке навчання показало очевидні переваги в цій галузі, його проблеми з точки зору обчислювальних ресурсів, інтерпретації моделі та надмірного оснащення все ще потребують уваги. Дистанційне зондування для завдань сільського господарства має передбачати розуміння географії та біологічної фенології, великі кліматичні та ґрунтові відмінності між регіонами, а механізм навчання передачі в глибокому навчанні може бути не дуже ефективним. Для практичного застосування дистанційного зондування на сільськогосподарських землях необхідно враховувати різні фактори, щоб визначити, коли та як найкраще використовувати методи глибокого навчання [85].

### ***1.3.2 Актуальні виклики, які враховано у дослідженні***

Розвиток методів дистанційного моніторингу сільськогосподарських угідь відображає прогрес і розвиток науки і техніки. Однак, через складність і різноманітність самих сільськогосподарських земель, їх моніторинг дистанційного зондування все ще стикається з багатьма проблемами. Ці проблеми в основному стосуються щонайменше трьох аспектів.

*Складність ідентифікації ознак.* Сільськогосподарська земля має багаті морфологічні та фенологічні характеристики, що ускладнює її ідентифікацію за допомогою дистанційного зондування. З точки зору морфологічних характеристик, через відмінності в різних географічних середовищах, таких як рівнини, пагорби та гори, існує значна неоднорідність у формі, розмірі та характеристиках меж культивованих земельних ділянок. За фенологічними характеристиками на оброблюваних землях часто зустрічаються різноманітні

культури, що зумовлює ускладнення її спектрально-текстурних характеристик. Через цю неоднорідність або мінливість у часі та просторі люди схильні до упередженості у своєму зоровому сприйнятті та пізнанні характеристик сільськогосподарських земель.

*Відсутність цілісності даних.* Хоча існують різноманітні дані дистанційного зондування, вони часто мають «прогалини» в часі та просторі через зовнішні фактори, такі як хмари, дощ, туман і обмеження датчиків. Ці розриви ускладнюють єдине джерело даних для повного та бездоганного опису комплексних фенологічних характеристик динамічних змін у сільськогосподарських угіддях, що створює проблеми для всебічного пізнання земельних особливостей повного циклу.

*Обмеження методів.* На сьогодні багато методів моніторингу культивованих земель часто оптимізовані для конкретних просторово-часових областей, що призводить до того, що їхні моделі та методи мають обмежені можливості узагальнення, точність і стабільність під час вирішення більш широкого спектру завдань моніторингу культивованих земель, стає незадовільним. Тому необхідні подальші дослідження та вдосконалення цих методів, щоб подолати розрив між теорією та практичним застосуванням.

### ***1.3.3 Перспективні тенденції розвитку застосування методів ДЗЗ для моніторингу земель сільськогосподарського призначення***

*Сприяння технологічному прогресу на основі поглиблених теоретичних досліджень.* У галузі дистанційного моніторингу сільськогосподарських угідь широку увагу набули фундаментальні теоретичні дослідження та фундаментальні дослідження, які доповнюють одна одну та спільно сприяють науковому прогресу в цій галузі. Основні теоретичні дослідження зосереджені на розкритті глибинних внутрішніх закономірностей, і дослідження законів географічного просторового розподілу масових культур і відмінностей у часі та просторі спектральних характеристик належать до цієї категорії. Фундаментальна дослідницька робота більше зосереджена на конкретних



прикладом, таких як вивчення того, як різні комбінації спектральних характеристик, фрагментація ландшафтів і часова роздільна здатність зображення впливають на можливість і точність ідентифікації типу культур.

*Повне покриття та цілісність стануть трендом майбутнього.* Зі зростанням розвитку технологій дистанційний моніторинг сільськогосподарських угідь зміниться від локальних досліджень до повного охоплення та цілісних методів. Цей зсув відображається не лише в повному охопленні даних, але також може використовуватися у більших масштабах, таких як національні, Дані безперервного дистанційного зондування, отримані в рамках дослідження, відображаються на загальній застосовності застосованих технологій, гарантуючи, що ці технології можуть бути застосовані в широкому діапазоні регіонів і середовищ. Взявши за приклад технологію дистанційного зондування посівних площ, ті методи та технології, які в минулому були обмежені певною територією, тепер розробляються та адаптуються для адаптації до ширшої сфери досліджень, що вимагає не лише однорідності дистанційного зондування. дані з різних джерел, щоб забезпечити узгодженість і узгодженість наступних програм. Крім того, потрібно оптимізувати методи вилучення, які спочатку були ефективними лише в певних областях, щоб задовольнити ширший спектр потреб програми.

У зв'язку зі збільшенням обсягу даних і ускладненням просторових зв'язків, управління просторовими даними та аналіз сільськогосподарських ресурсів також зазнають подібних змін. Ті системи управління, які спочатку обслуговували лише місцеві території, замінюються більш макро- та комплексними системами. . Це повне охоплення та цілісна тенденція, безсумнівно, підвищить ефективність і точність моніторингу дистанційного зондування та забезпечить більш детальну та детальну підтримку даних для змін та використання сільськогосподарських земель у більших масштабах.

*Перспективи комплексного застосування.* З розвитком технологій і поглибленими дослідженнями очікується, що технологія дистанційного моніторингу сільського господарства буде повністю застосована в

майбутньому. Не тільки для культур, які вирощуються на великих площах, ця технологія також охопить важливі товарні культури та спеціальні культури. Крім того, від етапу підготовки посівів до збору врожаю кожна ланка всього виробничого процесу точно контролюватиметься та оцінюватиметься за допомогою дистанційного зондування, щоб забезпечити сталість та ефективність сільськогосподарського виробництва.

#### ***1.3.4 Комплексне застосування технології дистанційного моніторингу земель сільськогосподарського призначення на національному та регіональному рівнях***

Раніше вже було подано визначення дистанційного моніторингу сільськогосподарських угідь, джерела даних, методи класифікації, правила охорони сільськогосподарських земель і політику в різних країнах, а також поточний основний зміст досліджень і методи моніторингу дистанційного моніторингу сільськогосподарських угідь. землі.

*Досвід країн Європейського Союзу.* У всьому світі охорона та управління сільськогосподарськими землями є ключовим елементом забезпечення продовольчої безпеки, екологічної стійкості та процвітання сільських громад. У цьому відношенні Спільна сільськогосподарська політика Європи (САР) є передовим прикладом, який демонструє інтеграцію розробки політики та наукових і технологічних інновацій.

Початковий намір САР — забезпечити стабільне постачання продовольства в Європі за розумними цінами та захистити засоби до існування фермерів. Його основні цілі полягають у забезпеченні економічної стабільності для фермерів, захисті навколишнього середовища, підтримці соціальної структури сільських територій та сприянні збалансованому розвитку сільського господарства в Європі. З часом САР поступово перейшла від підтримки цін до прямих субсидій фермерам, водночас збільшуючи свою увагу на питаннях навколишнього середовища, біорізноманіття та зміни клімату.

Наприклад, система прямих зелених платежів вимагає від фермерів дотримання певних сільськогосподарських та екологічних стандартів для отримання субсидій, підкреслюючи тісний зв'язок між сільським господарством і навколишнім середовищем [86].

Щоб ефективніше запровадити CAP та забезпечити належний розподіл ресурсів, ЄС запровадив інтегровану систему адміністрування та контролю (IACS). IACS — це дуже складна система управління та контролю, яка поєднує в собі геоінформаційні системи (ГІС) і технологію дистанційного зондування, щоб забезпечити інструменти для управління та моніторингу сільськогосподарських угідь. Щороку фермери вносять у систему інформацію про вирощувані ними культури для отримання дотацій. Під час роботи системи IACS правильність субсидії перевіряється шляхом аналізу даних наземних спостережень високої роздільної здатності або проведення вибіркового наземного зйомки окремих ділянок. Дані наземних спостережень зазвичай надходять із супутників Європейської серії Sentinel та програми Copernicus. Розташування цих ділянок було ретельно визначено за допомогою методів стратифікованої вибірки та геопросторової статистики ((On-The-Spot-Check - OTSC) [87]. Інструменти керування дозволяють автоматизовано перехресну перевірку даних, і ці інструменти також дозволяють швидше, проводити великі масштабні інспекції більш економічні, збільшуючи частоту та точність інспекцій. Для перевірки точності даних, введених фермерами, також можна використовувати методи оцінки ризиків. Якщо під час перевірки виявлено невідповідності, країни-члени ЄС повинні Організація проводить на- Для цього можуть бути використані різні методи, у тому числі випадковий вибір ділянок, які підлягають верифікації, стратифікований випадковий відбір або відбір у межах конкретних кластерів, у цьому випадку необхідно перевірити 50% неправильних ділянок. У той же час, якщо аерофотознімки або супутникові знімки доступні в цільовій зоні, часто можна мінімізувати кількість наземних візитів за допомогою цих даних і дистанційно оцінити розмір ділянки та тип культури [87].

*Досвід США.* Місія Національної служби сільськогосподарської статистики (NASS) полягає в підтримці розробки політики, прийняття рішень, дослідження та освіти шляхом збору, компіляції, аналізу та розповсюдження статистичних даних про сільське господарство та природні ресурси США. Починаючи з 2009 року, цей орган щороку розробляв програму CropLand Data Layer Program (CDL), яка передбачає створення даних високої роздільної здатності про ґрунтовий покрив окремих культур, які використовуються для відображення конкретних річних умов посівів. Програма CDL надає важливу підтримку функціям урядових установ США, надаючи оперативну інформацію для оцінки площі сільськогосподарських угідь під 15 основних культур у 27 штатах для використання Радою сільськогосподарської статистики та Управлінням збору правдивих даних. Програма відстежує різноманітні культури, включаючи кукурудзу, сою, пшеницю, рис, бавовну тощо, і надає оцінки посівних площ для поточного сезону вегетації, коли надходять звіти фермерів і супутникові дані. Для штатів, які є найважливішими з точки зору сільського господарства, служба CDL оновлює цю інформацію до шести разів на сезон [88, 89].

Створення продуктів CDL в основному спирається на різноманітні джерела вхідних даних, включаючи дані AWiFS (які мають просторову роздільну здатність 56 метрів), дані Landsat TM і ETM+, супутникові дані MODIS, історичні дані та дані наземних вимірювань у реальному часі та дані наземних вимірювань збираються під час щорічного сільськогосподарського обстеження в червні. Дані були відібрані на основі стратегії національної статистичної стратифікованої вибірки та включають приблизно 11 000 сегментів розміром 1x1 миля, набір даних національної класифікації поверхні для несільськогосподарських полів, набори історичних даних і дані, надані Геологічною службою США (USGS). моделі класифікуються на основі методів класифікації машинного навчання із загальною точністю від 85% до 95. Ця інформація включена як метадані в продукти CDL. Зараз система також містить дані з 1997 по 2008 рік [90].

*Досвід Канади.* Будучи першою країною, яка використала геоінформаційні технології для вирішення практичних завдань, у Канаді технологія дистанційного зондування відіграє життєво важливу роль у сільськогосподарському моніторингу. Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC) — це департамент сільського господарства та продовольства уряду Канади, який займається підтримкою та регулюванням сільського господарства та харчової промисловості Канади для забезпечення її процвітання та конкурентоспроможності. З метою підвищення ефективності управління сільським господарством цей сектор створив супутникові дані як основне джерело інформації для підтримки прийняття управлінських рішень. Беручи до уваги величезні масштаби та складність сільськогосподарського ландшафту Канади, департамент почав використовувати дані супутникових спостережень для розробки системи ідентифікації сільськогосподарських культур у 2007 році. Вона була введена в дію в 3 вибраних областях з 2009 по 2010 рік і з 2011 року. поширено на всі інші провінції Канади, використовуючи багаточасові дані оптичного дистанційного зондування (такі як Landsat-5, AWiFS, DMC, SPOT) і радіолокаційні (такі як Radarsat-2) супутникові зображення як джерела супутникових даних, а також використовуючи машинне навчання. алгоритм виконує класифікаційну обробку зображень [91], обрізати зображення, додати кілька, щоб отримати кількість]. Цей підхід використовується в інших провінціях Канади з 2011 року, зокрема завдяки підтримці Національного кадастрового реєстру Канади. Завдяки цій технології результати ідентифікації сільськогосподарських культур із точністю не менше 85% завжди можуть бути надані з просторовою роздільною здатністю 30 метрів, що підтримує аграрні дослідження країни [92]. Однак через велику кількість супутникових даних, які необхідно обробити, карти посівів, що охоплюють всю Канаду, часто публікуються лише протягом 8 місяців після закінчення вегетаційного сезону. Щоб скоротити час, витрачений на це завдання, повністю автоматизована карта розробляється Алгоритм класифікації культур [91].

*Досвід Китаю.* Оскільки Китай є країною, що розвивається, площа оброблюваних земель на 1 особу відносно невелика. Через консервативну політику Китаю щодо географічної інформації існує дуже мало конкретних матеріалів для застосування на національному рівні. Відповідну інформацію можна отримати лише з наукових статей та урядових бюлетенів, що описують моніторинг дистанційного зондування місцевих сільськогосподарських угідь. Наразі загальнодоступна інформація це:

- 1) Китайська платформа даних дистанційного зондування та обслуговування додатків (<https://www.cpeos.org.cn/home>);
- 2) Глобальна система дистанційного зондування сільськогосподарських умов (CropWatch, <http://cloud.cropwatch.com.cn/>).

Серед них Глобальна система дистанційного зондування сільськогосподарських умов (CropWatch) — єдиний веб-сайт із сторінкою англійською мовою. Ця система спочатку використовувалася для моніторингу сільськогосподарських умов у Китаї, а потім поступово перетворилася на глобальну систему моніторингу, але вона надає лише сільськогосподарську інформацію. Система використовує дані дистанційного зондування з кількох джерел часових рядів для раннього попередження та прогнозування, підтримує глобальні стратегії продовольчої безпеки та забезпечує комплексний аналіз 14 комплексних сільськогосподарських показників, включаючи агрометеорологічні умови, зміни посівів сільськогосподарських угідь та прогнози врожайності після модернізації технологій [93].

#### **1.4. Висновки до Розділу 1**

Технологія дистанційного зондування відіграє ключову роль у моніторингу сільськогосподарських земель. Незважаючи на те, що глобальна площа сільськогосподарських земель на душу населення продовжувала скорочуватися з 1960 року, через безперервне зростання світового населення та поступове збільшення попиту на продовольство, цінність сільськогосподарських земельних ресурсів стає все більш важливою для

людства. Тому країни почали активно вивчати, як використовувати технічні методи та відповідну політику для захисту сільськогосподарських угідь, що сприяло розвитку сфери дистанційного моніторингу сільськогосподарських земель. У цьому розділі досліджено прогрес досліджень методів дистанційного зондування, що використовуються у сфері моніторингу сільськогосподарських земель:

На технічному рівні розглянуто джерела даних і загальнозживані методи класифікації.

На правовому та політичному рівні розвинуті країни Європи та Сполучених Штатів дуже рано почали природоохоронну діяльність і сформулювали багато стратегій землекористування. Порівняно з цими країнами, Сполучені Штати не мають комплексного плану охорони сільськогосподарських земель через приватну власність на землю. Проте вони проводять наукове планування з точки зору національної стратегії та ухвалення впливових федеральних законів. Хороші природні умови, наукове планування, численні місцеві нормативні акти, великий обсяг капіталовкладень та сприяння розвитку аграрної науки та технології. Як країна, що розвивається, Китай має велике населення, невелику площу оброблюваної землі на душу населення, а розподіл сільськогосподарських угідь фрагментований. Сільськогосподарські земельні ресурси є дуже цінними для Китаю.

На рівні практичного застосування обговорюється поточний основний зміст дослідження, методи дослідження та виклики, а також майбутні тенденції розвитку, а також перераховуються деякі практичні застосування на національному рівні.

З розвитком технологій і збільшенням кількості супутникових систем дані дистанційного зондування містять сотні гігабайт пам'яті, що ускладнює їх опрацювання і збільшує навантаження на локальне комп'ютерне обладнання. У 2011 році Google запустив GEE, першу платформу хмарних обчислень дистанційного зондування для усіх користувачів у мережі Інтернет,

також стимулювало розвиток галузі хмарних обчислень даних дистанційного зондування. Хмарні обчислювальні платформи дистанційного зондування надають нові можливості та мають багато варіантів застосувань у різних сферах діяльності.



## **РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ДЗЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ ЗАСОБАМИ ГЕЕ**

### **2.1 Платформа хмарних обчислень даних дистанційного зондування**

Після того, як у 1960 році Сполучені Штати успішно запустили свій перший метеорологічний супутник, технологія дистанційного зондування відкрила нову еру в дослідженні самої Землі. За останні півстоліття технологія дистанційного зондування надала науці про Землю нову перспективу спостережень і накопичила цінні довгострокові ряди даних. Станом на 1 липня 2023 року, згідно з даними некомерційної організації Union of Concerned Scientists (UCS), загальна кількість супутників, що обертаються навколо Землі, досягла 6718, що відображає зростання та різноманітність інструментів спостереження [94]. Обсяг, зростаюча кількість пристроїв збору продовжує генерувати велику кількість даних спостережень. Усе більше завдань вимагають обробки та аналізу в режимі реального часу. Велика кількість даних дистанційного зондування, накопичених протягом тривалого періоду часу, надає додаткову інформацію, яка може бути використана для прогнозування глобальних змін клімату і спрямування розвитку сільського господарства.

Ці великі дані, отримані за допомогою дистанційного зондування, розкривають більше деталей і глобальних особливостей земної системи, забезпечуючи поглиблену перспективу для науки про систему Землі, а для зберігання і завантаження цих даних дослідники створили різноманітні платформи даних.

### **2.1.1 Традиційні платформи для завантаження даних ДЗЗ та їхні недоліки**

*EarthExplorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov>) – це інструмент, розроблений Геологічною службою США спеціально для надання користувачам можливостей онлайн-пошуку, знаходження та замовлення супутникових даних. Інструмент дозволяє користувачам виконувати інтерактивні та текстові запити для пошуку і завантаження знімків із супутників, літаків та інших платформ дистанційного зондування. Користувачі можуть визначити область пошуку, ввівши адресу, назву населеного пункту, координати або клацнувши безпосередньо на карті, а також встановити часовий діапазон для року/місяця/дня. *EarthExplorer* надає широкий спектр поширених даних дистанційного зондування, таких як EO-1, Landsat, AVIHRR, MODIS та ін., а також підтримує текстові файли, експорт метаданих і завантаження списків сцен для більш ефективного завантаження завантажувати або замовляти дані. Крім того, інструмент оснащений веб-додатком для пакетного завантаження, який запускається в браузері, щоб полегшити завантаження великих обсягів даних. У його першому інтерфейсі, як показано на рис. 2.1, ліворуч можна задати досліджувану територію, а праворуч на карті будуть відображені і позначені широта і довгота обраної ділянки. Користувачі можуть переглядати конкретні зображення, знайдені в Інтернеті, бачити місця, які вони охоплюють, і безкоштовно завантажувати відповідні метадані та інформацію про зображення, але для того, щоб користуватися інструментом, їм потрібно спочатку увійти до свого облікового запису в Геологічній службі США (USGS) [95].

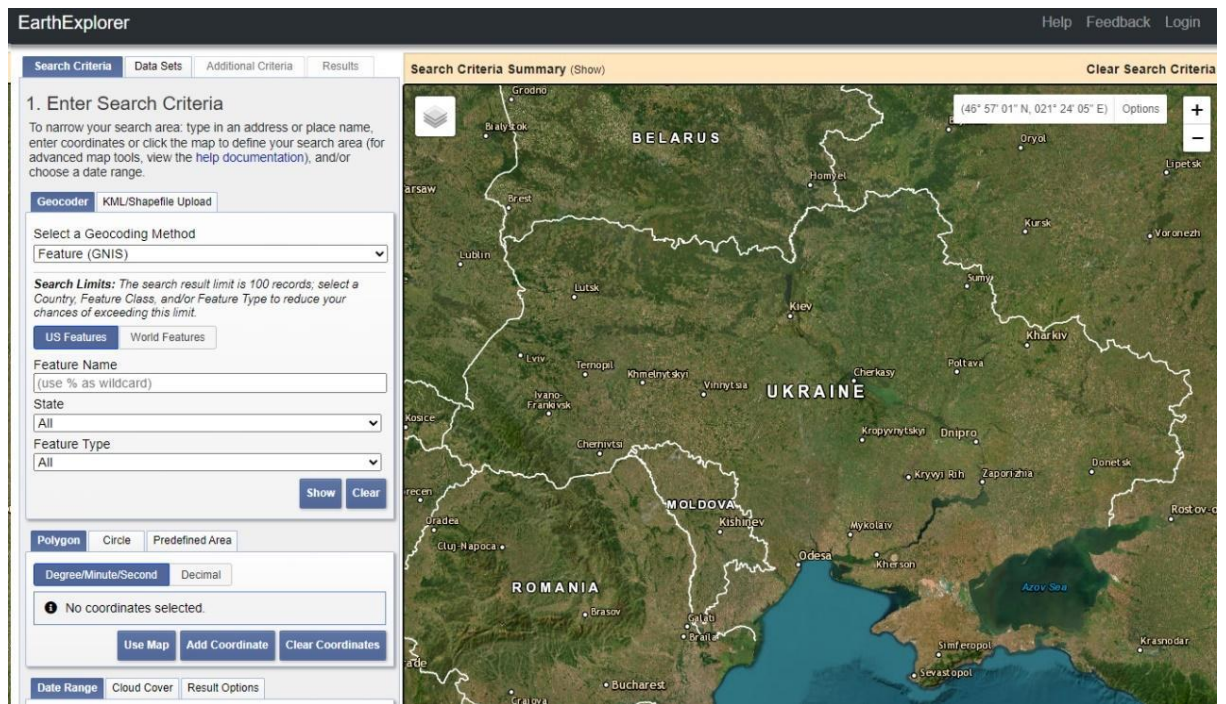


Рис. 2.1. Веб-інтерфейс геопорталу EarthExplorer

*GEOSS-ESA*. European Space Agency (ESA) Європейське космічне агентство (ЄКА) – міжурядова організація країн-членів ЄС, що займається дослідженням космосу. Серед завдань ЄКА - запуск та експлуатація безпілотних дослідницьких місій, спостереження за Землею, наука та зв'язок; проектування космічних ракет-носіїв; підтримка основної космічної наукової програми (Міжнародної космічної станції).

Глобальна інтегрована система спостереження Землі (GEOSS) експлуатується і впроваджується ЄКА. Система являє собою мережу, яка об'єднує соціальні та програмні екосистеми для об'єднання даних і ресурсів спостереження Землі від різних провайдерів, що сприяє подальшому вдосконаленню моніторингу стану Землі та підвищенню доступності й інтероперабельності даних та інформації на підтримку Цілей сталого розвитку (ЦСР) та пом'якшення наслідків стихійних лих. Її унікальними характеристиками є глобальний характер, всеосяжність спостережень та інтеграція систем (<http://www.geoportal.org/>).

З метою покращення моніторингу земної оболонки GEOSS об'єднує системи спостереження Землі, забезпечуючи обмін інформацією про дані,

зібрані національними та організаційними системами спостереження Землі, які є вільно доступними і сумісними, а також розробку спільних технічних стандартів для нових систем, де існують відмінності, що дозволяє об'єднувати дані з тисяч різних інструментів в узгоджені набори даних. GEOSS надає наступні дані Перший інтерфейс пошукової платформи GEOSS показаний на рис. 2.2. Основні компоненти GEOSS включають: портал GEOSS, брокер відкриття і доступу до даних GEOSS (GEO DAB), сервіс "Жовті сторінки" GEOSS і перевірку стану сервісу GEOSS. Разом ці інструменти і сервіси надають повний набір рішень для постачальників і користувачів даних, від виявлення даних і доступу до них до моніторингу стану їхніх сервісів, забезпечуючи ефективність і надійність GEOSS. Користувачам потрібен обліковий запис для завантаження [96].

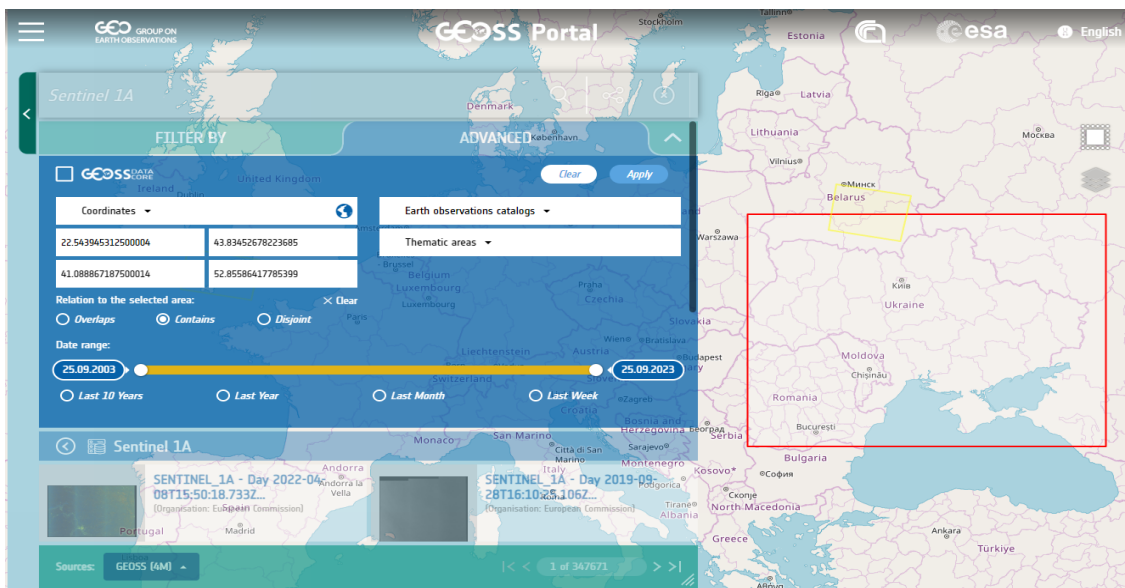


Рис. 2.2. Інтерфейс платформи *GEOSS*

*Портал обміну даними наземної станції супутникового зондування Китаю.* Портал обміну даними наземної станції супутникового зондування Китаю, Він експлуатується Національним центром даних спостереження Землі Китаю, тому дані надходять з Китайської наземної станції дистанційного зондування Землі (CRSSG), яка, як основна науково-технічна інфраструктура китайської держави, є ключовим членом Міжнародної мережі ресурсних супутникових наземних станцій (INRES). Наразі вона відповідає за 43

спутникові місії на орбіті, що робить її однією з організацій, які отримують і обробляють найбільшу кількість супутникових даних у світі. Крім того, це найдовший в Китаї історичний архів супутникових даних спостереження Землі, який містить дані Landsat-5, Landsat-7, ERS-1 та інші дані(рис. 2.3). Вона відіграє ключову роль у розвитку застосування дистанційного зондування в Китаї [97].



Рис. 2.3. Портал обміну даними наземної станції супутникового зондування Китаю [97]

Наземна станція має п'ять супутникових приймальних станцій, які можуть приймати безперебійні супутникові дані в режимі реального часу, що охоплюють весь Китай і 70 відсотків сухопутної території Азії, а також мають можливість швидкого доступу до глобальних супутникових даних. За своїми масштабами, кількістю приймальних станцій і кількістю супутникових місій,

які вона обслуговує, вона є однією з провідних цивільних наземних станцій супутникового зв'язку у світі. Однак наразі веб-сайт доступний лише китайською мовою і поки що не підтримує деякі запити даних за межами Китаю [97].

Традиційні платформи для завантаження даних ще не повністю автоматизували процес пошуку даних, вимагаючи від користувачів пошуку за напрямом дослідження, ключовим словом, набором даних або списком, а результати пошуку повинні бути додатково відфільтровані користувачем відповідно до умов метаданих у вторинний спосіб.

*Збір за ключовим словом.* Назва супутника, тип датчика, час та інші основні параметри використовуються як ключові слова для вибору користувачами. Користувачам потрібно фільтрувати дані в одному з результатів пошуку, а ефективність збору даних є низькою.

*Збір даних за списком.* Надається користувачам список для вибору, користувачі повинні самостійно оцінити та відфільтрувати дані. Легко виникає явище відсутності даних, користувачі повинні мати певний досвід.

*Збір наборів даних.* Надавати набори даних безпосередньо користувачам, користувачі повинні бути знайомі з класифікацією наборів даних відповідно до номера смуги, дати, кількості хмар, широти і довготи та іншої інформації для фільтрації. Часові витрати на отримання даних є високими.

Хоча ці методи пошуку даних забезпечують повне покриття результатів пошуку зображень, відсутність автоматизованого процесу пошуку також призводить до низки проблем, таких як тривалі результати пошуку, неможливість знайти точні результати і тривалий час завантаження. Після отримання попередніх результатів також потрібен вторинний відбір, що впливає на корисність даних, а це значною мірою обмежує практичне застосування знімків дистанційного зондування. Коли користувач завершив складну перевірку набору даних, його також потрібно завантажити, що створює додаткове навантаження на сховище.

### ***2.1.2 Розроблення та застосування хмарних платформ для обчислень на основі даних ДЗЗ***

Стрімке зростання обсягів даних дистанційного зондування призвело до виникнення проблем з їх обробкою та зберіганням. Традиційні засоби обробки і зберігання даних, такі як настільні комп'ютери або сервери, вже не можуть задовольнити поточний попит на дані дистанційного зондування, що породжує дві проблеми:

1) Як впорядковано і ефективно зберігати і керувати швидко зростаючими, гетерогенно розподіленими масивними даними зображень дистанційного зондування, а також забезпечити реальний обмін даними.

2) Враховуючи зростаючий попит користувачів на дані дистанційного зондування, як отримувати і обробляти дані швидше і з кращою якістю, а також як швидко і точно виокремлювати з масиву даних дистанційного зондування набори зображень, які задовольняють різноманітні потреби.

Враховуючи ці проблемні питання, технологія хмарних обчислень поступово стає ідеальним рішенням. Хмарні обчислення не лише надають величезний простір для зберігання даних, але й забезпечують потужну обчислювальну потужність для обробки великих обсягів даних. Завдяки API хмарної платформи обробка та аналіз даних стають більш ефективними і зручними, що дозволяє краще задовольнити потреби у зберіганні та обробці даних дистанційного зондування.

З метою застосування технології хмарних обчислень у сфері дистанційного зондування для кращого задоволення потреб наукових досліджень, дослідницькі групи в різних країнах розпочали дослідження і розробку платформ хмарних обчислень, таких як платформа AWS, запущена американською дослідницькою групою [98], платформа CODE-DE, запущена німецькою дослідницькою групою [99], і платформа Earth Data Miner, запущена китайською командою [100].

### 1.4.2.1 Хмарна платформа Google

Google Earth Engine – це хмарна обчислювальна платформа для обробки супутникових знімків та інших геопросторових і спостережних даних. Заснована на архітектурі обчислювальних сервісів Google і відкритих даних супутникових зображень дистанційного зондування, платформа зберігає майже 60-річні супутникові дані дистанційного зондування в Інтернеті, такі як дані серії Landsat, дані MODIS, дані Sentinel і використовує для обчислень велику кількість серверів, розташованих по всьому світу, і надає доступ до великих баз даних супутникових зображень, а також обчислювальну потужність, необхідну для аналізу цих зображень. Користувачі можуть отримати доступ до неї через інтернет-інтерфейси (API) і методи на основі веб-браузера, що забезпечує легкий доступ до високопродуктивних комп'ютерних ресурсів для обробки великих наборів геопросторових даних без необхідності завантажувати набори даних і встановлювати програмне забезпечення [101].

GEE була офіційно запущена на 16-й Глобальній конференції зі зміни клімату в 2010 р.

*Редактор коду GEE.* Інтерфейс GEE складається в основному з редактора коду та публічного набору даних. Редактор коду GEE пропонує два способи доступу до нього: інтерфейс прикладного програмування (API) та веб-інтерактивне середовище розробки (IDE). Найпоширенішим способом є веб-інтерактивне середовище розробки, користувачам потрібен лише веб-браузер та обліковий запис Google, щоб отримати доступ до редактора коду GEE через Інтернет, мовою програмування редактора є JavaScript, користувачі також можуть використовувати програмування на Python через API, ці два способи надають користувачам велику кількість викликів для візуалізації даних дистанційного зондування Землі, Функції та алгоритми GEE постійно оновлюються [102]. Редактор коду GEE включає наступні частини: редактор коду, активи користувача, консоль, диспетчер завдань, документація тощо. Консоль, диспетчер завдань, документація, карта, менеджер шарів. Користувач пише код через середній редактор і візуалізує результати в



реальному часі за допомогою інтерфейсу карти нижче. У вкладці "Написання сценаріїв" GEE надає велику кількість прикладів для вивчення, а також користувачі можуть дізнатися про типи і функції функцій з документації (рис. 2.4).

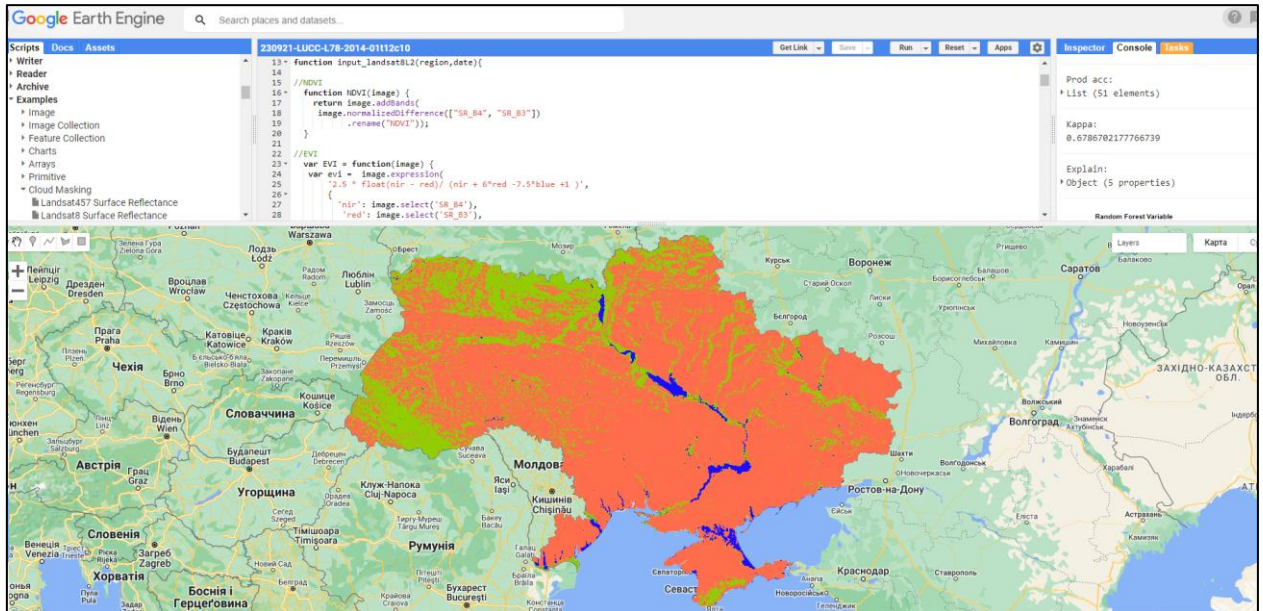


Рис. 2.4. Редактор коду GEE

*Публічні набори даних GEE.* GEE містить понад 2 000 наборів даних, що охоплюють широкий спектр галузей, таких як дистанційне зондування, ГІС, клімат, демографія та економіка. Серед них набори даних дистанційного зондування є основними наборами даних GEE, включаючи Landsat, MODIS, Sentinel-2 та інші набори даних дистанційного зондування з глобальним покриттям. Ці набори даних відкриті для всіх некомерційних користувачів, і користувачі можуть запитувати дані, які їх цікавлять, на сторінці набору даних, і кожен набір даних супроводжується основною інформацією, такою як детальний опис даних, опис діапазону, джерело даних і як викликати редактор коду GEE. Крім того, користувачі можуть використовувати функції фільтрації, що надаються GEE, щоб швидко відфільтрувати потрібні дані з наборів даних, що містять велику кількість зображень, відповідно до своїх потреб. Користувачі також можуть звернутися до GEE з проханням додати нові набори

даних. Ви також можете завантажувати власні дані і ділитися ними з іншими користувачами, а GEE надає вам папку Assets для зберігання ваших приватних даних розміром 250 ГБ [102].

*Бібліотека функцій GEE.* Бібліотека функцій Google Earth Engine (GEE) містить понад 800 функцій [102], які дозволяють користувачам виконувати широкий спектр операцій над одним зображенням або колекцією зображень. Ці операції варіюються від базових математичних операцій до просунутих алгоритмів класифікації зображень і машинного навчання. Більшість обчислень над зображеннями в GEE базуються на операціях зі спектральними діапазонами на рівні пікселів. Через природу таких операцій вони добре підходять для паралельних обчислень на платформах з хмарною архітектурою. Однак слід зазначити, що паралельні обчислення, хоча й ефективні в обробці зображень, можуть обмежувати швидкість обробки GEE для векторних даних. На додаток до цього, бібліотека функцій GEE охоплює ряд розширених операцій, таких як контрольована класифікація, неконтрольована класифікація, оцінка точності класифікації та обчислення каппа-коефіцієнта. GEE також надає інші функції, такі як проекція, повторна вибірка, маскування, обрізання, зсув, колімація та перетворення між векторними та растровими зображеннями.

Зараз, коли кількість користувачів і популярність GEE зростає, виникають такі ситуації, як довший час очікування запиту і нижча швидкість виконання запиту. Більше того, оскільки GEE є вільно доступним сервісом, обчислювальні ресурси, що використовуються для кожного користувача, також дуже обмежені, і коли користувач намагається виконати довгу послідовність великомасштабних обчислень регіону, можуть виникати помилки, коли кількість обчислень перевищує допустимий обсяг пам'яті або час обчислень перевищено. У 2021 році Google оголосив про комерційний план тарифікації для GEE, що, з одного боку, свідчить про те, що Google інвестував більше ресурсів, що сприятиме підвищенню продуктивності та надійності GEE. З іншого боку, плата може допомогти Google підтримувати

операційні витрати GEE і гарантувати, що GEE може продовжувати надавати користувачам високоякісні послуги, що надає можливість користувачам, які хочуть працювати з великими обсягами даних і великими обчисленнями, використовувати GEE.

Модель тарифікації GEE базується на принципі "на вимогу" і передбачає використання обчислювальних блоків (Earth Engine Compute Unit - EECU) та місця для зберігання даних. EECU поділяються на онлайн EECU (для завдань, що вимагають результатів у реальному часі, таких як візуалізація зображень) та пакетні EECU (для великомасштабних обчислювальних завдань, таких як обробка даних та машинне навчання). Обчислювальні блоки тарифікуються на погодинній основі, а сховище - на щомісячній основі відповідно до обсягу використаного простору [103].

#### *1.4.2.2 Інші хмарні платформи для обробки даних дистанційного зондування*

*PIE-Engine & AI Earth.* PIE-Engine (Pixel Information Expert Engine. Це обчислювальна платформа для великих даних наук про Землю в режимі реального часу, запущена китайською комерційною компанією з дистанційного зондування в 2020 році, яка надає послуги хмарної обробки даних дистанційного зондування, послуги хмарних обчислень, спільне маркування зразків ґрунту в режимі онлайн, розробку та навчання моделей, інтелектуальну інтерпретацію зображень, обмін даними та інші послуги. Вбудовані більше 40 публічних наборів даних дистанційного зондування, більше 20 моделей алгоритмів дистанційного зондування, подібний до GEE за досвідом програмування, але включених наборів даних набагато менше, ніж у GEE. І він підтримує лише китайську мову.

AI Earth, розроблена і запущена у 2022 році іншою комерційною компанією в Китаї, яка переважно надає послуги хмарних обчислень. Наразі платформа містить понад 8 петабайт загальнодоступних наборів даних, таких як Landsat-5/7/8/9, Sentinel-1/2, MODIS та ін. Вона надає різноманітні

інструменти ШІ, такі як класифікація ознак і виявлення змін, а також базові інструменти обробки зображень, такі як обчислення індексів і композиція смуг [104].

*Microsoft Planetary Computer (MPC)*. MPC – платформа, яка надає можливості хмарних обчислень для прийняття рішень щодо екологічної стійкості, розробляється компанією Microsoft і запускається наприкінці 2021 року. Платформа містить наступні п'ять компонентів:

Набори даних, що містять петабайти геонаукових даних, розміщені в Azure та є у вільному доступі для користувачів.

Пошук даних, за допомогою API, що надаються платформою, користувачі можуть швидко знаходити потрібні їм дані в наборі даних, спрощуючи процес пошуку даних та досліджень, а також маючи можливість працювати з великою кількістю наборів геопросторових даних. Користувачі можуть розробляти за допомогою власної звичної мови розробки, підтримує три мови розробки JavaScript, Python, R, а також надає Tensorflow, PyTorch, QGIS та інші види віртуальних середовищ розробки. Навчальні посібники та практичні кейси платформи надаються для того, щоб допомогти користувачам ознайомитися з платформою та її можливостями.

Наразі платформа перебуває на стадії внутрішнього тестування, користувачам необхідно подати заявку, щоб отримати доступ до використання (рис. 2.5) [105].

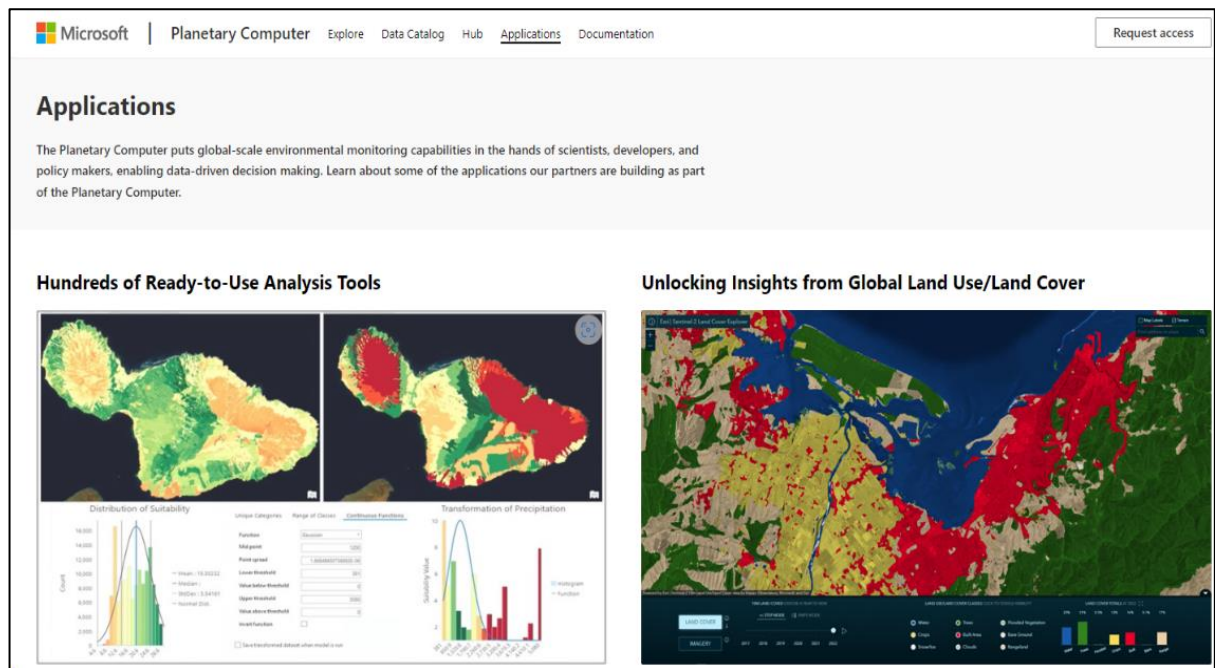


Рис. 2.5 Інтерфейс MPC

*Multi-Mission Algorithm and Analysis Platform (MAAP)*. MAAP – це науковий інструмент з відкритим вихідним кодом для аналізу даних про Землю в хмарі, розроблений протягом двох років у спільній співпраці між NASA та ESA. Дотримуючись принципів науки з відкритим вихідним кодом, включаючи безперешкодний доступ до даних про Землю NASA та ESA, використання коду з відкритим вихідним кодом та необмежений доступ до користувачів даних, MAAP дозволяє вченим співпрацювати над розробкою алгоритмів та коду. MAAP спільно підтримується і обслуговується NASA та ESA, що відображає співпрацю між двома агентствами, і є зразковою моделлю наукової співпраці та аналізу з відкритим вихідним кодом. Згідно з офіційним веб-сайтом, MAAP повністю функціонує і в найближчі місяці буде поступово розширювати свою спільноту користувачів, додаючи додаткові джерела даних, щоб дозволити вченим вирішувати ширший спектр питань науки про Землю (рис. 2.6) [106].

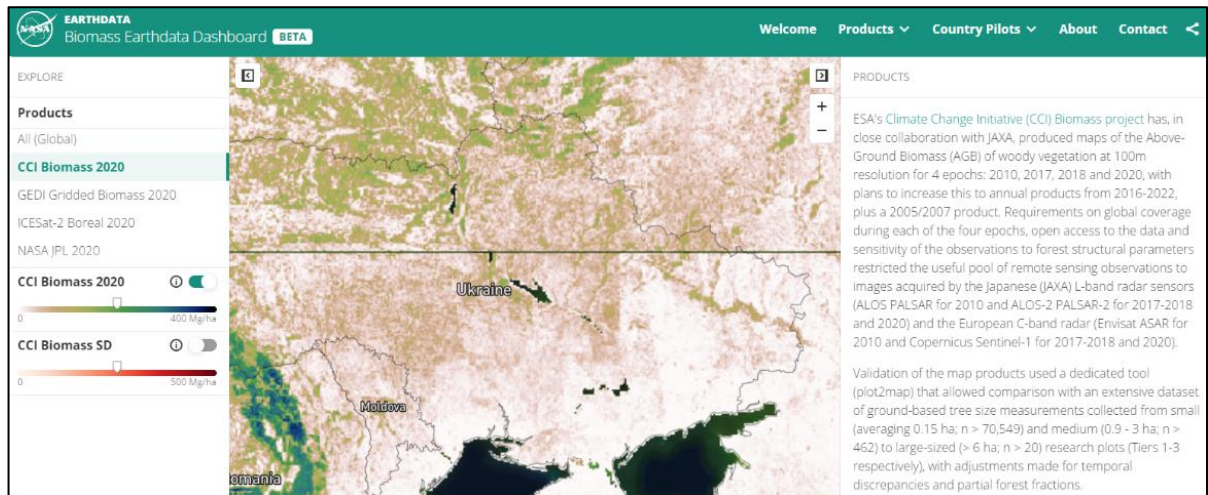


Рис. 2.6. Продукти даних МААР

Перше застосування МААР зосереджується на вимірюванні надземної біомаси в рамках глобальних зусиль з визначення розміру та вмісту вуглецю в лісах Землі. Ці дані мають вирішальне значення для розуміння зміни клімату та прогнозування його наслідків і будуть використовуватися як частина регулярних оновлень Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату (МГЕЗК) [107].

## 2.2 Технологічна модель дослідження

Це дослідження було виконано на території України. Вихідні дані були отримані з загальнодоступних джерел.

Технологічна модель дослідження подана на рис. 2.7.

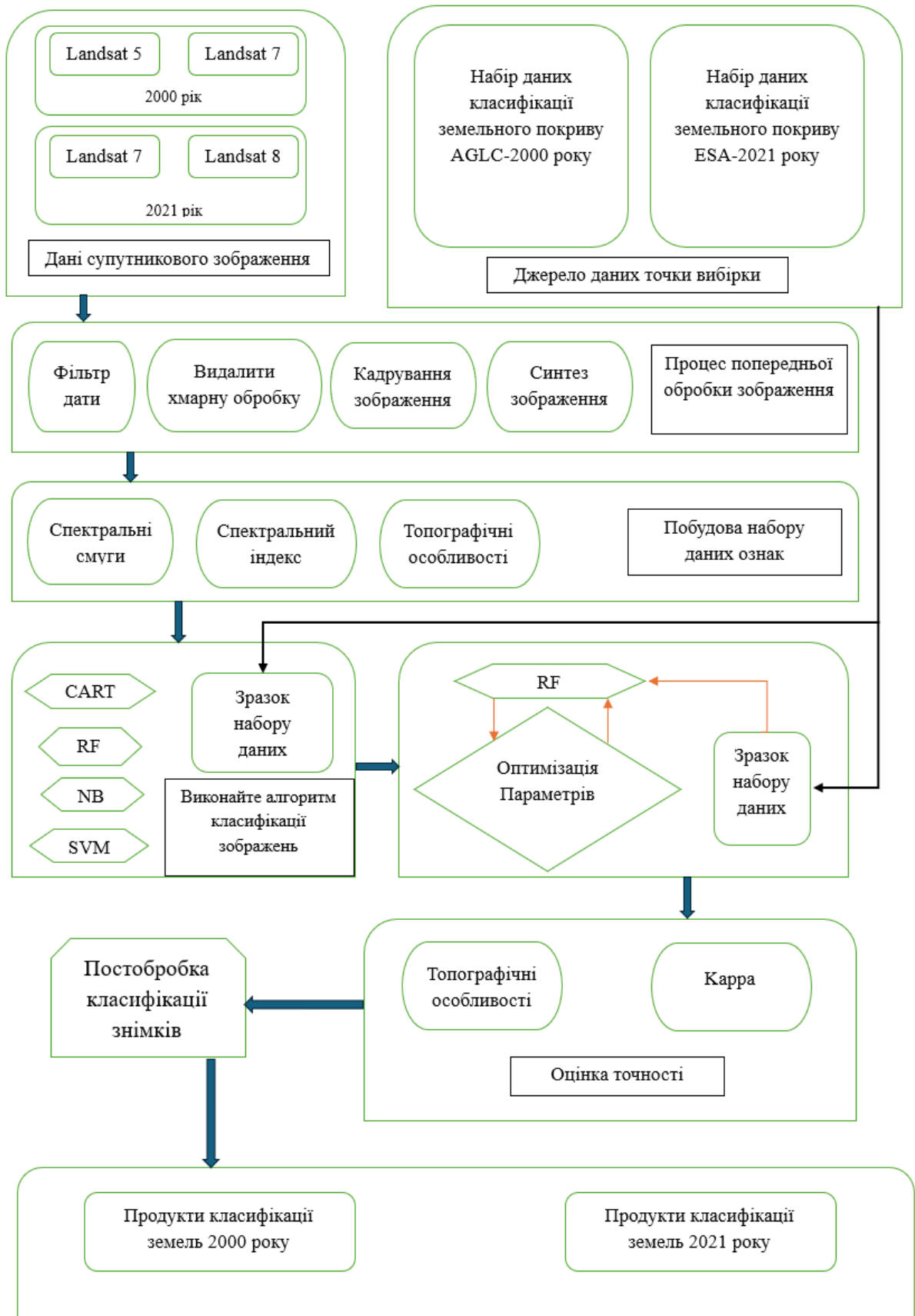


Рис. 2.7. Методика дослідження (виконано автором)

Дані про адміністративні межі були використані з Глобальної бази даних адміністративних одиниць (GADM), що розповсюджується Об'єднаним дослідницьким центром (JRC) Європейського Союзу. Дані дистанційного зондування були отримані з колекції 2 рівня 2 продуктів поверхневого відбиття, створених на основі даних супутників Landsat 5, Landsat 7 і Landsat 8, розповсюджених Геологічною службою США (USGS). Часовий період було обрано з квітня по листопад, загалом 1046 пар зображень, з яких загалом 469 пар зображень у 2000 році, загалом 577 зображень у 2021 році. Отримання даних зображення ґрунтується на масштабах досліджуваної області, часовому діапазоні та хмарному покриві, а вибрані зображення попередньо обробляються шляхом зменшення хмарності, мозаїки тощо. Нарешті, колекція зображень стандартизується за допомогою медіанного синтезу. Метод роботи полягає в мінімізації впливу тіней, хмар і короткочасних змін наземних об'єктів шляхом обчислення медіани всіх значень кожного пікселя в наборі зображень [108]. Топографічні дані отримані на основі спільної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) SRTM V3, поширюваної NASA/USGS, з просторовою роздільною здатністю 30 метрів.

Дані про класифікацію земного покриву складаються з трьох джерел:

- 1) набір даних AGLC-2000-2015, завантажений на платформу GEE виробником цих даних;
- 2) продукт MODIS Land Cover Type (MCD12Q1 v6) з просторовою роздільною здатністю 500 м, випущений розподіленням центром NASA Land Processes Distributed (LP DAAC). Active Archive Center NASA (LP DAAC);
- 3) картографічний продукт ESA WorldCover 2021 (v200) з просторовою роздільною здатністю 10 м, розроблений Європейським космічним агентством (ЄКА) у співпраці з компаніями VITO, Brockmann Consult та іншими.

Детальна характеристика даних та підстави для їх відбору описані в наступних розділах.

За винятком геопросторових даних про адміністративні межі, до всіх вищезазначених даних можна отримати доступ, обробити та проаналізувати за



допомогою коду через платформу хмарних обчислень Google Earth Engine (GEE). Конкретні параметри всіх продуктів даних детально описані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Дані, використані в дослідженні, джерела та опис**

Назва даних	Джерело	Опис
Global Administrative Boundaries	EU, Joint Research Centre (JRC)	Дані про національний кордон
Landsat 5	U.S. Geological Survey	Супутникові дані
Landsat 7	U.S. Geological Survey	Супутникові дані
Landsat 8	U.S. Geological Survey	Супутникові дані
NASA SRTM Digital Elevation 30m	NASA / USGS / JPL-Caltech	Цифрові дані високого рівня
AGLC-2000-2015	Mapping annual global land cover changes at a 30 m resolution from 2000 to 2015	Дані класифікації земель
MODIS Land Cover Type Yearly Global 500m	NASA LP DAAC at the USGS EROS Center	Дані класифікації земель
ESA WorldCover 10m v200	ESA/VITO/Brockmann Consult/CS/GAMMA Remote Sensing/IIASA/WUR	Дані класифікації земель

### 2.3 Огляд досліджуваної території

*Фізико-геологічний огляд.* Україна розташована в південно-східній частині Європи, займає площу близько 603 700 квадратних кілометрів і має населення близько 48 мільйонів осіб, між 44° і 52° північної широти і 22° і 40° східної довготи. Адміністративно-територіальний устрій складається з 24 областей, однієї Автономної Республіки Крим і двох міст зі спеціальним статусом, а також межує з 7 країнами. У рельєфі України переважають рівнини, середні висоти яких становлять близько 178 м. Майже на всій території помірно-континентальний клімат [109].

*Характеристика земельних ресурсів.* Україна має велику кількість чорноземів, і моніторинг змін ґрунтового покриву по всій країні забезпечує краще розуміння загальних тенденцій у сільському господарстві, надання

рекомендацій щодо оптимізації розміщення сільськогосподарських земель та підвищення продуктивності і сталого розвитку територій.

*Географічне різноманіття.* Географічне розташування та природне середовище України є різноманітним, включаючи широкий спектр ландшафтів та екосистем, таких як гори, ліси, степи, водно-болотні угіддя, сільськогосподарські землі та забудовані території. Таке розмаїття забезпечує багатство даних і об'єктів дослідження для вивчення змін у різних типах земельного покриття, допомагає вивчати вплив різних ландшафтів і екосистем на сільськогосподарські угіддя, а також розробляти і перевіряти методи моніторингу, застосовні до різних типів ландшафтів та земельного покриття.

*Охорона навколишнього середовища.* На сьогодні в Україні також існує низка екологічних проблем, таких як забруднення земель, опустелювання, вирубка лісів, ерозія ґрунтів тощо. Моніторинг змін земельного покриття по всій території може забезпечити наукову основу для захисту та відновлення довкілля, а також допомогти розробити більш ефективну політику та заходи щодо збереження сільськогосподарських земель.

*Підстави для вибору території дослідження.* Існує потреба в комплексному дослідженні, бо зміна земельного покриття – це складний процес, на який впливає поєднання природних та антропогенних факторів. Дослідження на одній території можуть не враховувати певні фактори впливу на інших землях, в той час як дослідження на всій території може забезпечити більш повну та інтегровану перспективу, забезпечуючи встановлення взаємодії та взаємозв'язків між різними регіонами.

*Потреба у формулюванні та впровадженні політики.* Особи, які приймають рішення, повинні базувати свою політику землекористування та охорони довкілля на повних і точних даних. Територіальний моніторинг змін земельного покриття забезпечує високоякісну підтримку даних, що допоможе сформулювати більш наукову та раціональну політику та ефективно впроваджувати її на національному рівні.

*Поширення та застосування технологій.* Використання GEE для

реалізації проектів моніторингу території може не тільки забезпечити точну підтримку даних про зміни земель, рослинний покрив, управління водними ресурсами в конкретних регіонах тощо, але й слугувати демонстраційним проектом для демонстрації потенціалу та переваг застосування технології GEE у загальнодержавному моніторингу земель, сприяти технологічній модернізації та підвищенню ефективності у суміжних галузях, а також сприяти процесу модернізації системи охорони довкілля та управління природними ресурсами країни. Популяризація та застосування цієї технології дозволить державним відомствам, науково-дослідним інститутам та підприємствам краще реагувати на складні виклики у сфері охорони довкілля та управління природними ресурсами.

Дослідження з моніторингу змін земельного покриття на всій території України не лише сприятиме сталому розвитку країни, але й слугуватиме моделлю для розвитку співпраці з іншими країнами та міжнародними організаціями у сфері моніторингу земель та охорони довкілля.

## **2.4 Збирання та опрацювання вихідних даних**

### ***2.4.1 Збір даних про адміністративні кордони - Perezapis***

Територія та суверенітет держави мають першорядне значення і є наріжним каменем існування держави, несучи в собі її історичну та культурну спадщину. При проведенні наукових досліджень відбір даних про адміністративні кордони має бути ретельним і авторитетним, щоб уникнути будь-яких суперечностей, які можуть виникнути в результаті. Оскільки адміністративні кордони є різновидом штучно визначеної віртуальної географічної інформації, більшість ГІС-програм, як з відкритим кодом, так і комерційних, не мають вбудованих чутливих даних, таких як адміністративні кордони. Наприклад, програмне забезпечення ArcGIS постачається з файлом бази геоданих, але глобальні дані в цьому файлі містять лише базовий вміст, такий як міста, річки та озера, і не містять даних про адміністративні кордони.

Зазвичай, адміністративні кордони країни можна знайти на веб-сайті

департаменту управління географічною інформацією кожної країни або за допомогою пошуку в Інтернеті, але дані, отримані з Інтернету, не можуть бути ідентифіковані як конкретне джерело, а їх точність і достовірність не можуть бути гарантовані.

Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру відповідає за надання інформації про просторові дані про Україну [110]. Внаслідок війни з 24 лютого 2022 року в Україні введено воєнний стан, а надання відповідних геоінформаційних публічних послуг було призупинено до закінчення воєнного стану [109].

У цьому дослідженні в якості джерела даних про державні кордони України було використано набір даних Global Administrative Borders, опублікований Об'єднаним дослідницьким центром ЄС (JRC) (рис. 2.8) [111]. Основні фактори щодо вибору цього набору даних:

- 1) авторитетність даних: набір даних був розроблений на основі Глобальних рівнів адміністративних одиниць (GAUL) Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), що є надійним джерелом даних;
- 2) доступність: набір даних знаходиться у відкритому доступі на Порталі даних СЦД (<https://data.jrc.ec.europa.eu>);
- 3) розширюваність: набір даних належним чином оптимізовано для підтримки Системи сільськогосподарського моніторингу ЄС (ASAP).

Враховуючи, що Україна отримала статус країни-кандидата на вступ до ЄС у червні 2022 року [112], використання набору даних ЄС полегшує сумісний обмін деякими даними сільськогосподарської інформаційної системи ЄС у майбутньому.

The screenshot shows the 'European data' portal. At the top, there is a search bar and navigation links for 'Login' and 'English'. The main header includes the European Union logo and the text 'European data'. Below this, a navigation bar contains links for 'Home', 'Data', 'EU Open Data Days', 'Academy', 'Community', 'Publications', and 'Documentation'. The breadcrumb trail indicates the path: 'Home > Datasets > Global administrative boundaries'. The dataset title is 'Global administrative boundaries', published by the 'Joint Research Centre'. There are buttons for 'Dataset', 'Quality', and 'Similar datasets'. A metadata table shows the creation date as '26.09.2018' and the creator as 'Name: Joint Research Centre' with a homepage link. A descriptive paragraph explains that the data is provided at national (Gaul0) and sub-national (Gaul1) levels, derived from the Global Administrative Unit Layers (GAUL) dataset.

Рис. 2.8. Набір даних про глобальні адміністративні кордони, який створений JRC

Процес збору та обробки даних:

- 1) завантажити дані про глобальні адміністративні кордони з порталу даних JRC;
- 2) виділити елементи українського кордону за допомогою програмного забезпечення ГІС, ArcGIS;
- 3) завантаження вилучених даних про кордони на платформу GEE для подальшого аналізу (рис. 2.9).

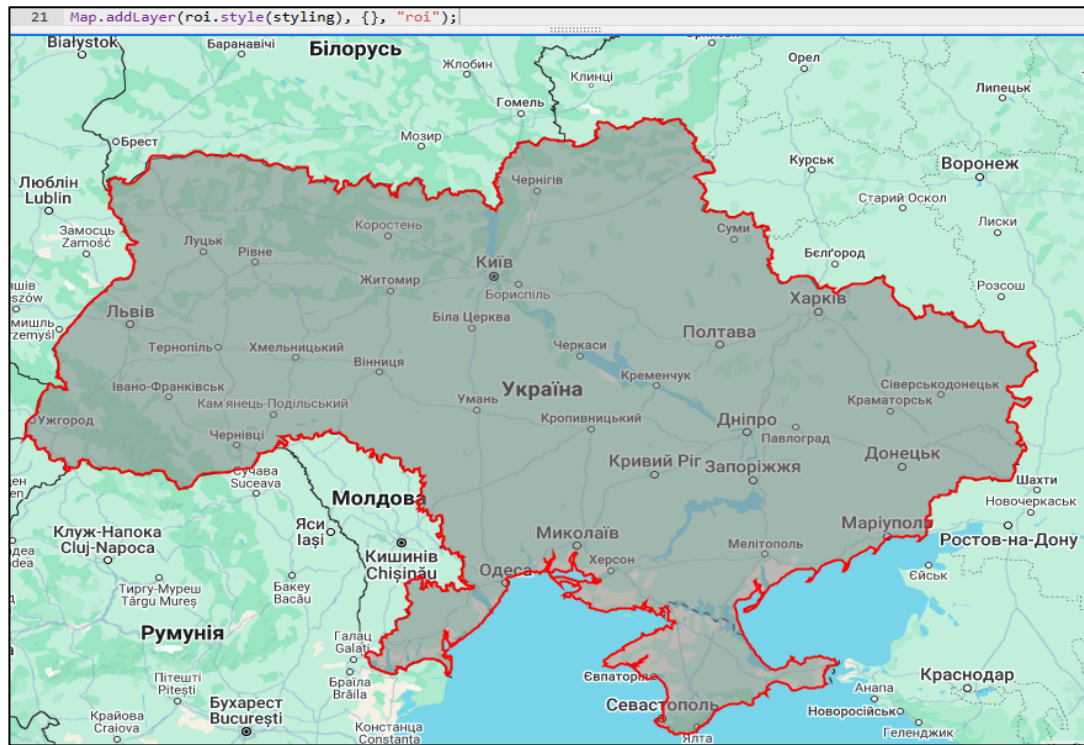


Рис. 2.9. Дані про державний кордон, використані в цьому дослідженні

Крім того, існує кілька інших загальноживаних джерел даних про глобальні адміністративні кордони, а саме:

1. Набір даних FAO GAUL підтримується Продовольчою та сільськогосподарською організацією ООН (FAO) з використанням Єдиної глобальної системи кодування (UGC) для Організації Об'єднаних Націй та її уповноважених установ. Ця веб-сторінка не надає можливості прямого завантаження продуктів даних GAUL (рис. 2.10), які, можливо, не були офіційно підтверджені авторитетними національними джерелами, а лише надає посилання на WMS та сервіси для додавання онлайн карт FAO. Завантаження необхідно здійснювати самостійно, шукаючи в Інтернеті набори даних GAUL (<https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search#/home>).

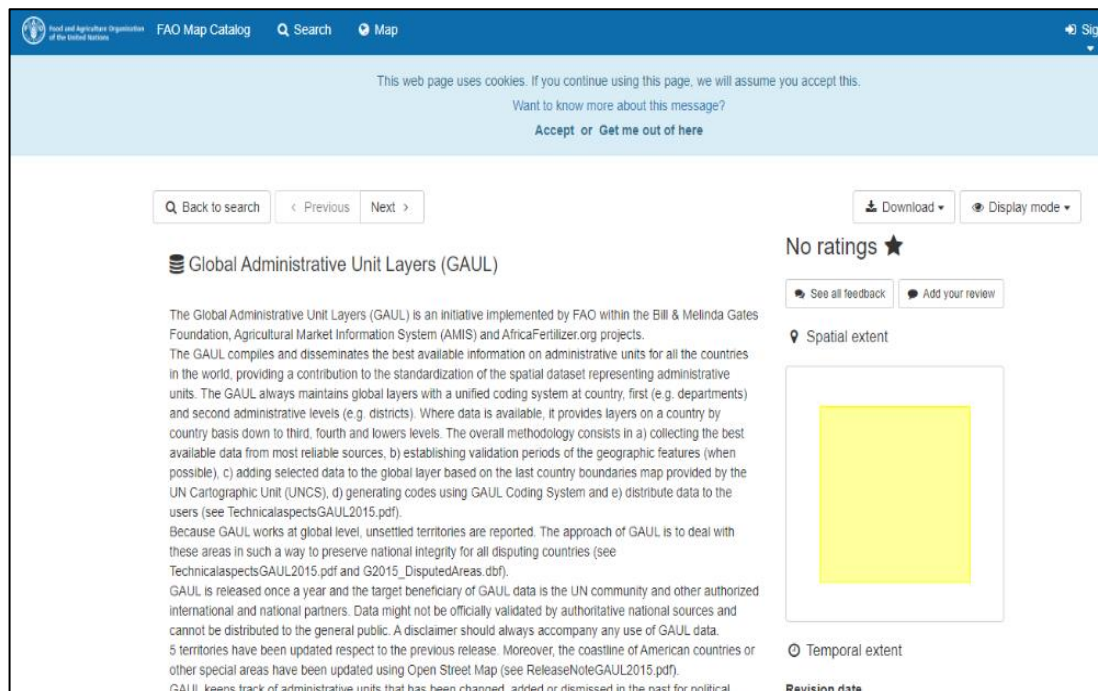


Рис. 2.10. Набір даних FAO GAUL

2. База даних GADM (Database of Global Administrative Areas) - загальнодоступний набір даних, що містить дані про адміністративний поділ на різних рівнях по всьому світу (рис. 2.11).

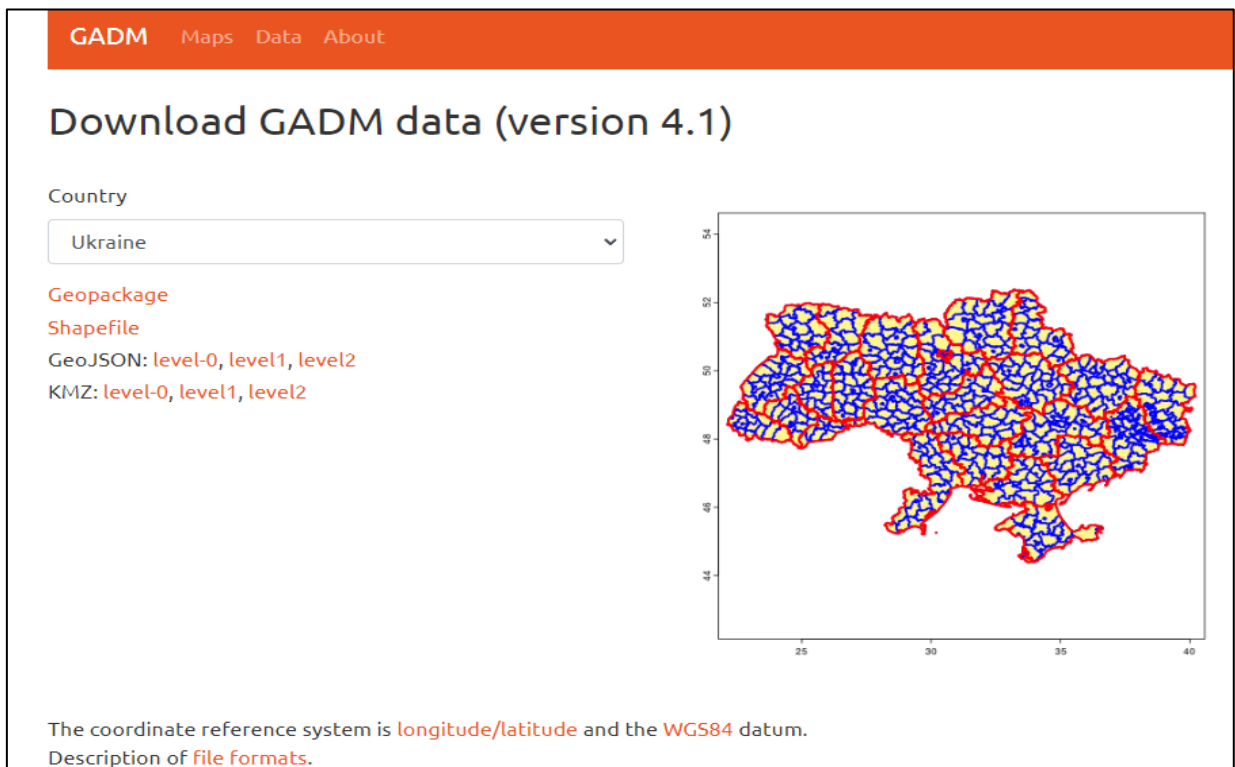


Рис. 2.11. Набір даних GADM (<https://gadm.org>)

3. Natural Earth – відкритий набір даних, що оновлюється та підтримується волонтерами по всьому світу, який містить дані в масштабах 1:10 000 000, 1:50 000 000 та 1:110 000 000 (рис. 2.12) (<https://www.naturalearthdata.com/blog/admin-0-countries-point-of-views/>).

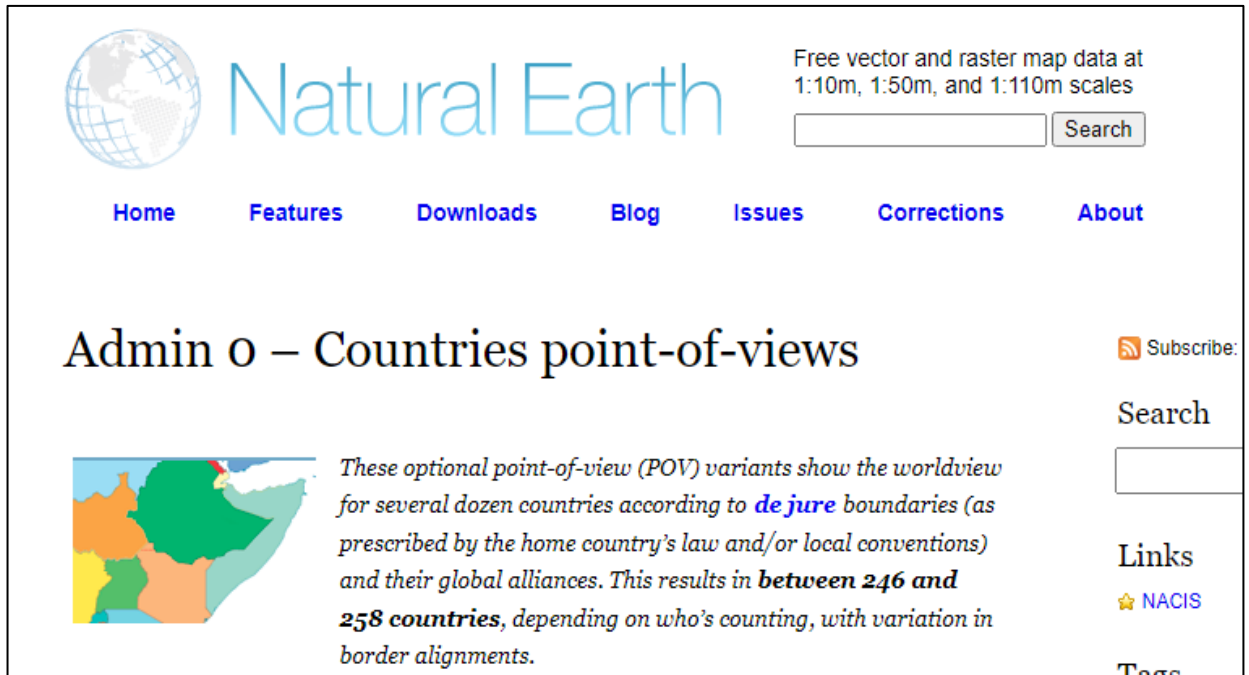


Рис. 2.12. Фрагмент інтерфейсу Natural Earth

4. LSIB (Large Scale International Boundaries), цей набір даних можна знайти на веб-сайті Державного департаменту США «State GeoNode», який використовується для публікації відкритих географічних даних, створених або зібраних урядом США (рис 2.13). Адреса веб-сайту: <https://geonode.state.gov/>.





Рис. 2.13. Набір даних LSIB

5. HDX (Humanitarian Data Exchange): платформа відкритих даних, яку підтримує Центр гуманітарних даних у Гаазі. Використовується для обміну гуманітарними даними між організаціями (рис. 2.14). Веб-сайт платформи <https://data.humdata.org/faq>.

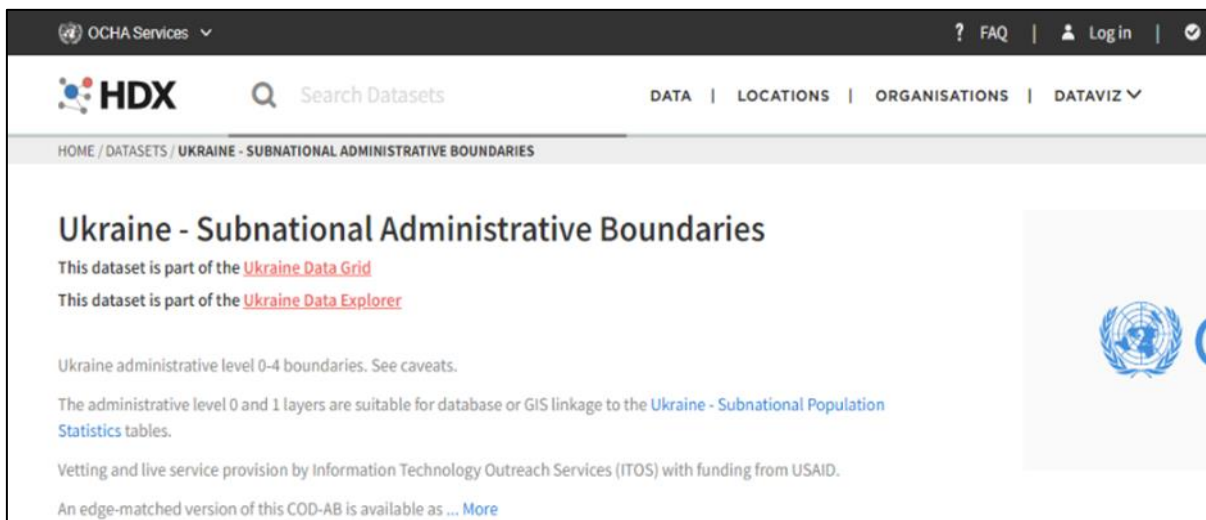


Рис. 2.14. Платформа відкритих даних HDX

6. Набір даних Каліфорнійського університету в Берклі, Бібліотека наук про Землю та карт Каліфорнійського університету в Берклі надає дані про державний кордон України 2015 року (рис. 2.15) за посиланням: <https://geodata.lib.berkeley.edu/catalog/stanford-nv937bq8361>

« Previous | 1 of 39 | Next »

## National Boundary, Ukraine, 2015

**Author(s):** Hijmans, Robert J. and University of California, Berkeley. Museum of Vertebrate Zoology

**Description:** This polygon shapefile contains the national boundary of Ukraine (adm0). This layer is part of the Global Administrative Areas 2015 (v2.8) dataset.

**Publisher:** University of California, Berkeley. Museum of Vertebrate Zoology

**Place(s):** Ukraine

**Subject(s):** Administrative and political divisions and Boundaries

**Held by:** Stanford

**More details at:** <http://purl.stanford.edu/nv937bq8361>

**Web Map Service (WMS)**

Map showing the National Boundary of Ukraine, 2015, overlaid on a geographical map of Eastern Europe. The boundary is highlighted in a dark grey color. Neighboring countries like Poland, Slovakia, Hungary, Romania, and Moldova are visible. Major cities like Warsaw, Bratislava, and Bucharest are labeled. The map includes a scale bar and a 75% zoom indicator.

Export For:

- Shapefile
- KMZ
- GeoJSON

Рис. 2.15. Державний кордон України

7. Набори даних, надані китайськими науковими установами. Національний науковий центр даних про земну систему Китаю, Інститут наук про Землю та ресурсів Китайської академії наук і Пекінський університет надають дані про кордони адміністративно-територіальних одиниць для завантаження, але веб-сайти цих ресурсів є лише китайськомовними, мають давні дати випуску, вимагають реєстрації та входу для завантаження, а також не дозволяють завантажувати Дані не є безпосередньо доступними. Однак веб-сайти цих ресурсів доступні лише китайською мовою, мають давні дати випуску і вимагають реєстрації та входу для завантаження, що робить їх майже непридатними для використання.

## **2.4.2 Набори даних супутникових знімків**

### **2.4.2.1 Супутникові дані Landsat**

Програма Landsat, найстаріша програма супутникового спостереження Землі, безперервно функціонує з моменту запуску першого супутника в 1972 році і знаходиться під спільним управлінням NASA та Геологічної служби США (USGS) як основний компонент Національної програми зйомки Землі (NLIP) USGS. З 1972 року і сьогодні Landsat накопичив великий архів даних дистанційного зондування з середньою просторовою роздільною здатністю за тривалий період часу і є унікальним інструментом для аналізу змін і тенденцій у земельних ресурсах, а його набори даних були використані для вивчення змін земельних ресурсів, спричинених зміною клімату, урбанізацією, посухою та іншими причинами. Наразі найновішим супутником є Landsat 9, і планується запуск наступних супутників [113].

З розвитком технологій датчики на борту супутників серії Landsat пройшли еволюцію від мультиспектрального сканера (MSS), тематичного картографа (TM), розширеного тематичного картографа (ETM+) до тепловізора Ordnance Land Imager (OLI). Кожне покоління сенсорів пропонує значне покращення спектральної і просторової роздільної здатності: сенсори MSS (Landsat 1-3) мають чотири видимі і ближній інфрачервоний діапазони; сенсори TM (Landsat 4-5) додають тепловий інфрачервоний (TIR) і короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) діапазони і збільшують просторову роздільну здатність до 30 метрів; сенсори ETM+ (Landsat 7) додають новий панхроматичний діапазон з роздільною здатністю 15 метрів; а для сенсорів OLI (Landsat 8-9) оптимізували функцію спектральної чутливості та додали смуги виявлення прибережних/аерозольних та хмарних явищ (рис. 2.16) [113].

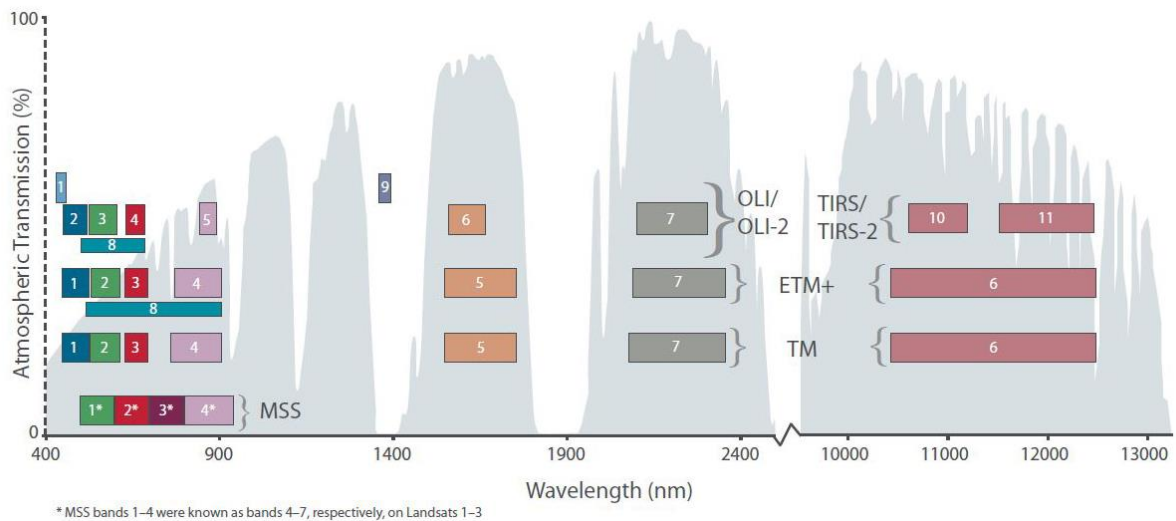


Рис. 2.16 Спектральні смуги пропускання для всіх датчиків Landsat [114]

Геологічна служба США створила багаторівневу систему оцінки якості даних Landsat, що включає класи Tier 1 (T1), Tier 2 (T2) і Real-Time (RT) [115]:

- дані T1, які мають найвищу геометричну точність ( $RMSE \leq 12$  м) і радіометричну якість, точно скориговані з урахуванням рельєфу місцевості та радіометрично відкалібровані за допомогою крос-сенсорів;
- дані T2, які не відповідають стандарту T1 під час обробки через такі фактори, як точність орбітальної інформації, хмарність або наземні контрольні точки;
- Дані RT, з іншого боку, є продуктами обробки в режимі, близькому до реального часу, на основі прогнозованих ефемерид, які обробляються і класифікуються як T1 або T2 протягом 14-26 днів після збору.

Колекція 2 є найновішою версією збору даних і використовує покращений алгоритм атмосферної корекції для генерації стандартизованого продукту поверхневого відбиття. Нова версія має значні покращення в радіометричному калібруванні, атмосферній корекції та топографічній корекції порівняно з Колекцією 1 (Markham et al., 2022). Продукт рівня 2 позбавлений атмосферних ефектів і надає дані про відбиття поверхні безпосередньо, що робить його більш придатним для аналізу змін поверхні протягом тривалих часових рядів.

Основними міркуваннями при виборі продукту поверхневого відбиття рівня 2 колекції 2 для цього дослідження були наступні:

- 1) дані охоплюють тривалий період часу, починаючи з 1984 року. Дані охоплюють досліджувану область цього дослідження, 2000-2021 рр.
- 2) просторова роздільна здатність 30 метрів підходить для досліджень регіонального масштабу
- 3) мультиспектральні дані полегшують класифікацію рослинного покриву;
- 4) для забезпечення стабільної якості даних використано вдосконалений метод масштабування значень пікселів.

#### *2.4.2.2 Дані ЦМР*

Для підвищення точності класифікації в цьому дослідженні було використано дані глобальної цифрової моделі рельєфу (ЦМР), цифрової моделі рельєфу 30-метрової роздільної здатності SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), щоб охарактеризувати просторову мінливість класів рослинного покриву, спричинену різними топографічними факторами. Дані отримані в рамках проекту SRTM - глобальної місії з топографічного картографування, що здійснюється Національним управлінням з авіації і дослідження космічного простору (NASA), Національним агентством геопросторової розвідки (NGA), а також німецькими та італійськими космічними агентствами. Місія була здійснена космічним шатлом «Індевор» з 11 по 22 лютого 2000 року і тривала 222 години 23 хвилини, успішно отримавши близько 80 відсотків даних про земну поверхню світу, що охоплює площу понад 119 мільйонів квадратних кілометрів від 60 градусів північної широти до 56 градусів південної широти. Його можна використовувати не лише безпосередньо для отримання інформації про висоту поверхні, але й для визначення топографічних параметрів, таких як схил, напрямок схилу і гірська тінь, які відіграють важливу роль у багатьох галузях, таких як аналіз рельєфу, управління земельними ресурсами, гідрологічні дослідження і екологічна оцінка [116].

## **2.5 Побудова системи класифікації земель та отримання еталонних моделей**

Типи земельного покриву є інтегрованим вираженням взаємодії між природними процесами та діяльністю людини. Навіть у межах однієї широкої категорії (наприклад, сільськогосподарські землі) існують підтипи зі значними відмінностями, такі як орні землі та сади, і ці підтипи демонструють унікальність з точки зору екосистемних послуг, ефективності використання ресурсів та впливу на навколишнє середовище. Ця складність не є результатом людського дизайну, а неминучим відображенням різноманітності систем земної поверхні. Тому побудова детальної системи класифікації земель є важливою для точного розуміння та управління процесами, що відбуваються на земній поверхні.

Зі зростанням попиту на міждисциплінарні дослідження та швидким розвитком технологій спостереження Землі відбулася диференціація систем класифікації земного покриву. Різні продукти класифікації земного покриву мають різні системи класифікації, і навіть один і той самий набір продуктів має декілька систем класифікації, наприклад, MODIS Land Cover Type Yearly Global 500m має 11 наборів систем класифікації [117].

Основним об'єктом дослідження є сільськогосподарські угіддя, і при виборі схеми класифікації, окрім практичності класифікації зображень дистанційного зондування, обмежень вибіркової роботи та основних потреб у класифікації землекористування/покриву, були враховані такі фактори: практичність класифікації зображень дистанційного зондування, обмеження вибіркової роботи та базові потреби у класифікації землекористування/покриву:

- 1) цілі та проблеми дослідження;
- 2) географічні та екологічні характеристики досліджуваної території;
- 3) просторова та часова роздільна здатність наявних даних;
- 4) точність та можливість перевірки класифікації;
- 5) порівнянність з іншими дослідженнями.

Було вирішено побудувати систему класифікації земного покриву, що містить шість класифікацій: сільськогосподарські землі, лісові масиви, луки, забудовані території, водні об'єкти та інші.

Перевагами цієї програми є те, що вона:

- 1) охоплює основні типи землекористування/покриву;
- 2) максимізує кількість інформації в обмеженій кількості категорій;
- 3) збалансовує рівень деталізації класифікації з її операційною доцільністю;
- 4) значно зменшує обсяг роботи, пов'язаної з вибіркою та категоризацією;
- 5) все ще може надавати значущу інформацію про землекористування/земний покрив.

### ***2.5.1 Визначення еталонів***




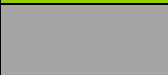
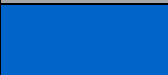

Побудова еталонів (опорних точок) є ключовою ланкою для забезпечення точності класифікації, і її важливість відображається в декількох аспектах. Хоча супутникові дані дозволяють отримати спектральну інформацію про земну поверхню, важко точно оцінити тип об'єктів на основі одних лише знімків, наприклад, подібні спектральні характеристики можуть відповідати різним об'єктам (наприклад, міські дахи проти голої землі), а однотипні об'єкти можуть мати різні характеристики в різних регіонах, наприклад, сільськогосподарські угіддя на сході і заході. Тому вибіркові точки, отримані в результаті польових робіт або інтерпретації знімків високої роздільної здатності, надають нам надійну інформацію про реальні типи об'єктів. Крім того, в національному масштабі існують значні регіональні відмінності в географічному середовищі, і той самий тип земель може мати різні характеристики через відмінності в кліматичних зонах, топографічних умовах і людській діяльності. Збір репрезентативних точок вибірки допомагає алгоритму зрозуміти та адаптуватися до цієї просторової неоднорідності. Водночас, вибіркові точки також є важливою основою для перевірки надійності результатів класифікації, і, порівнюючи їх з результатами

класифікації, можна оцінити точність класифікації та цілеспрямовано вдосконалити метод класифікації.

На основі вже побудованої системи класифікації аналогічно класифіковано точки вибірки на 6 категорій і присвоєно точкам вибірки ідентифікаційні коди та кольорові коди відповідно до потреб подальшого аналізу даних (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

**Класи та їх значення кольорів для керованої класифікації**

Значення	Клас	16-річне кодування кольору	Значення RGB	Колір
10	Землі сільськогосподарського призначення	#FF6D4C	(255, 105, 76)	
20	Ліси	#05450A	(5, 69, 10)	
30	Пасовища	#93CE04	(147, 206, 4)	
40	Міські території	#A5A5A5	(165, 165, 165)	
50	Водні об'єкти	#0064C8	(0, 100, 200)	
60	Інше.	#1E9DB3	(30, 157, 179)	

**2.5.2 Метод вибору точок вибірки**

У класифікації за даними дистанційного зондування якість обраних навчальних вибірок (еталонних моделей) безпосередньо визначає точність результатів класифікації. З точки зору статистики та науки про дистанційне зондування, вибір точок вибірки повинен враховувати такі фактори:

1) достовірність і надійність вибірки є основною передумовою, яка вимагає, щоб дані вибірки мали чітке і достовірне джерело.

2) репрезентативність вибірки є важливим принципом, який повинен повністю враховувати просторову неоднорідність топографії, клімату та інших природних умов на досліджуваній території, а також гарантувати, що вибірки можуть відображати характерні варіації одного і того ж типу ознаки за різних умов навколишнього середовища.



3) просторово-часовий розподіл вибірок має бути науково обґрунтованим, не тільки відповідати вимогам статистики щодо обсягу вибірки, забезпечувати чисельний баланс між категоріями, але й враховувати систематичний розподіл вибірок у просторі.

4) доцільність та економічна ефективність отримання вибірки також є факторами, які не можна ігнорувати на практиці, а переваги та обмеження різних методів відбору необхідно зважувати, виходячи з передумови забезпечення якості вибірки. Всебічний розгляд цих факторів забезпечує теоретичне керівництво для вибору та застосування різних стратегій відбору зразків.

#### *2.5.2.1 Відбір точок вибірки за традиційними методами*

Традиційний метод відбору еталонних моделей ґрунтується на поєднанні суворих статистичних принципів та систематичних польових досліджень. Цей метод спочатку визначає стратегію просторового розподілу зразків і вимоги до мінімального розміру вибірки за допомогою математичної статистики, потім визначає конкретне місце відбору зразків і кількість зразків у кожній категорії на основі принципів стратифікованої випадкової вибірки або систематичної вибірки, і, нарешті, отримує детальну інформацію про характеристики за допомогою польових обстежень. Рамкове обстеження землекористування/покривної площі ЄС (LUCAS) є типовим прикладом такого типу методології. З моменту свого заснування у 2006 році проєкт проводить масштабні систематичні дослідження кожні три роки на території країн-членів ЄС, використовуючи двоетапний план вибірки: спочатку територія ЄС поділяється на GRID-модель 2 км на 2 км, а потім у кожній чарунці цієї моделі систематично розміщуються пункти спостереження. Дослідники повинні були дістатися до кожної точки відбору проб і зафіксувати до 100 параметрів навколишнього середовища, включаючи тип земельного покриву, практику землекористування, стан іригації тощо, а також відібрати зразки ґрунту і зробити фотографії ландшафту. Перевагами цього методу є висока надійність даних, багатий набір параметрів та хороша часова

безперервність і просторова систематичність, що забезпечує важливу наукову основу для розробки сільськогосподарської та екологічної політики в ЄС [118].

Хоча традиційний метод має значні переваги з точки зору якості даних, він також стикається з певними проблемами: по-перше, він є дорогим і вимагає великої кількості людських, матеріальних і часових витрат; по-друге, доступність вибіркового ділянок є поганою в певних регіонах зі складним рельєфом або незручним транспортним сполученням; крім того, при проведенні одночасного обстеження у регіоні він також стикається з проблемами уніфікації стандартів обстеження та контролю якості. Тим не менш, високоякісна бібліотека зразків, створена цим методом, може не тільки безпосередньо використовуватися в поточній класифікаційній роботі, але й застосовуватися як валідаційні дані інших методів класифікації, що може відігравати важливу роль в оцінці точності класифікації за даними дистанційного зондування.

#### *2.5.2.2 Використання еталонних моделей з Google Earth*

Відбір еталонних моделей на основі платформи Google Earth (<https://earth.google.com/web/>) – це метод відбору, який повністю заснований на зображеннях. Google Earth – це сервісна платформа візуалізації Землі, запущена компанією Google Inc. у 2005 році, дані якої в основному отримані з космічних знімків, наданих комерційними супутниками з високою роздільною здатністю, а також інтегровані деякі аерофотознімки. Платформа створює інтерактивну глобальну систему 3D візуалізації поверхні, поєднуючи ці зображення дистанційного зондування з топографічними даними. У процесі відбору еталонних моделей спочатку необхідно конвертувати файл меж досліджуваної території з традиційного формату ГІС (наприклад, Shapefile) у формат KML, що підтримується Google Earth, та імпортувати його в платформу, а потім позначити еталони на основі візуальної інтерпретації зображень, після чого позначені еталони можна експортувати та конвертувати в загальний формат ГІС для підтримки подальшої роботи з класифікації.

Переваги цього методу полягають у простоті експлуатації та економічній ефективності, підтримці перегляду різномасштабних зображень і тривимірне відображення рельєфу місцевості, а також значно скорочує час і економічні витрати на відбір зразків. Однак існують очевидні обмеження цього методу: по-перше, Google Earth має єдине джерело зображень, в основному покладаючись на комерційні супутникові дані високої роздільної здатності, які мають обмежену спектральну характеристику; по-друге, існують очевидні регіональні відмінності в частоті оновлення зображень: економічно розвинені райони оновлюються частіше, тоді як зображення у віддалених районах можуть мати проблеми зі своєчасністю; крім того, через повну залежність від візуальної інтерпретації якість зразків є дуже високою, а якість проб - дуже низькою. Крім того, через повну залежність від візуальної інтерпретації, якість зразків значною мірою залежить від професійного рівня та досвіду інтерпретаторів.

#### *2.5.2.3 Швидке отримання еталонних моделей з наявних наборів даних*

Створення еталонних моделей для керованої класифікації на основі існуючих продуктів класифікації земель є широко використовуваним методом за даними дистанційного зондування. Цей метод в основному спирається на існуючі офіційні набори даних класифікації земель для отримання достовірних еталонних моделей за допомогою просторового аналізу і процедур контролю якості. Зокрема, цей метод спочатку визначає регіони з високою достовірністю класифікації в існуючих наборах даних, а потім створення еталонів за допомогою таких методів, як стратифікована випадкова вибірка або систематична вибірка на основі просторових ознак. Для забезпечення якості вибірки зазвичай необхідно об'єднати продукти класифікації з різних часових періодів для перехресної перевірки, і лише регіони з послідовно узгодженими результатами класифікації залишаються в якості регіонів-кандидатів на вибірку [119]. Недоліки цього методу полягають у тому, що своєчасність вибірок обмежена циклами оновлення продуктів вихідних даних і

відмінностями в системах класифікації між різними продуктами класифікації, що може призвести до невідповідності вибірки еталонів місцевості;

Цей метод часто використовується на практиці в поєднанні з іншими методами вибірки. Наприклад, він може використовуватися як початковий етап вибірки, який потім доповнюється і перевіряється за допомогою польових досліджень або експертної інтерпретації для створення більш достовірного набору даних вибірки. Така інтегрована стратегія вибірки підвищує ефективність формування вибірки, водночас забезпечуючи її надійність.

#### *2.5.2.4 Методи збору даних за допомогою краудсорсингу*

Зі стрімким розвитком інформаційних технологій і підвищенням рівня обізнаності громадськості щодо участі у громадському житті, краудсорсинг (Crowdsourcing), як нова парадигма збору геопросторових даних, змінює традиційну модель збору зразків даних дистанційного зондування. Цей метод збору даних, заснований на громадській думці, ламає шаблон, в якому домінують професіонали в традиційному методі вибірки, і формує диверсифікований і соціалізований механізм збору геопросторових даних. Наприклад, проєкт «The Degree Confluence Project» (DCP), який організовує волонтерів для відвідування глобальних точок збігу широти і довготи для збору даних спостережень на місці, в тому числі наземних фотографій і описів об'єктів (рис. 2.17). Аналогічно, існують відкриті геоінформаційні платформи, такі як OpenStreetMap і Geo-Wiki, які реалізують широкомасштабний краудсорсинг геопросторових даних за допомогою мережі Інтернет і мобільних пристроїв.

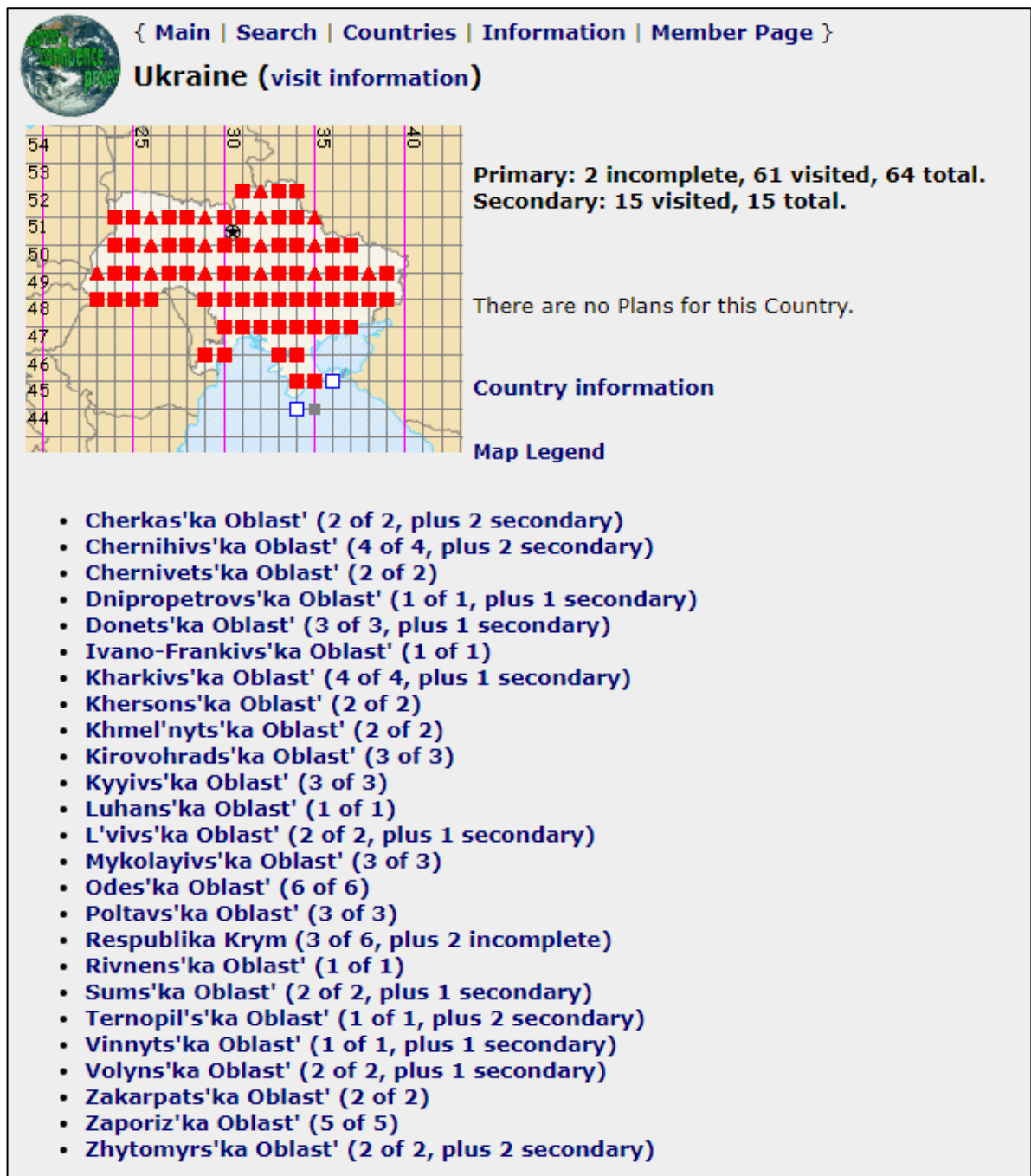


Рис. 2.17. Проєкт «The Degree Confluence Project»

(DCP, <https://www.confluence.org/>), де червоні трикутники і квадрати – місця перетину координатної сітки

Інноваційність краудсорсингових методів відображається в їхніх унікальних характеристиках даних і механізмах збору. Порівняно з традиційними методами вибірки, краудсорсингові дані часто містять багату мультимодальну інформацію, не лише дані про місцезнаходження, але й текстові описи, фотографії, емоційні вирази та інші соціально-перцептивні

елементи. Хоча просторово-часовий розподіл таких даних залежить від уподобань соціальної активності та характеризується нерівномірністю, їхня постійно оновлювана архітектура надає нові можливості для динамічного моніторингу змін на поверхні. Вони демонструють просторово-часову чутливість і соціальні фактори, які не притаманні традиційним методам вибірки.

Однак застосування краудсорсингових методів також стикається з такими проблемами, як контроль якості даних та упередженість вибірки. На практиці методи краудсорсингу часто доповнюють традиційні методи вибірки, особливо в дослідницьких сценаріях, які вимагають безперервного моніторингу або мають високі часові вимоги, демонструючи при цьому унікальні переваги. Ця інноваційна модель збору даних не лише збагачує доступ до зразків дистанційного зондування, але й вливає нову енергію в сферу спостереження Землі, що є важливим напрямком розвитку науки про дистанційне зондування в цифрову еру.

### ***2.5.3 Кількість еталонних моделей***

При виконанні класифікації земного покриття вибір кількості еталонних моделей (точок вибірки) зазвичай залежить від розміру цільової території, складності типу земельного покриття, необхідної точності класифікації та обчислювальних можливостей. Визначення розміру вибірки безпосередньо впливає на надійність і статистичну значущість результатів класифікації, а невідповідний розмір вибірки може призвести до зниження точності класифікації або проблем з перенавчанням. Зі статистичної точки зору, адекватний розмір вибірки може забезпечити ефективну характеристику простору ознак і стабільність класифікатора; з практичної точки зору, розумний розмір вибірки допомагає збалансувати точність класифікації та обчислювальну ефективність. Тому наукове визначення розміру вибірки є ключовою ланкою в класифікації даних дистанційного зондування, і при цьому необхідно враховувати такі аспекти, як загальна репрезентативність,

вимоги до точності класифікації, складність категорії, мінімальний обсяг вибірки, балансування між категоріями.

Теоретично, розподіл вибірки повинен відповідати частці площі фактичного типу земельного покриття, тобто використовувати стратегію пропорційної стратифікованої вибірки (Proportional Stratified Sampling). Цей метод може забезпечити просторову репрезентативність вибірок, завдяки чому результати класифікації можуть краще відображати фактичні умови поверхні. Однак на практиці необхідно також враховувати вимоги до мінімального розміру вибірки для рідкісних типів.

Складні або неоднорідні категорії потребують більшої кількості точок вибірки, щоб повністю охарактеризувати їхню варіабельність. Наприклад, забудована територія зазвичай вимагає більше точок вибірки, ніж більш однорідна водойма через різноманітність її внутрішнього складу.

У деяких випадках для підвищення загальної точності класифікації може знадобитися збалансована вибірка між категоріями. Ця стратегія особливо підходить для класифікаторів машинного навчання, щоб уникнути упередженості класифікації, спричиненої незбалансованістю вибірки. Однак надмірне збалансування вибірки може вплинути на відображення результатів класифікації на реальних особливостях поверхні, і тому необхідно знайти відповідний компроміс між репрезентативністю та збалансованістю.

У практичному застосуванні визначення розміру вибірки часто вимагає використання ітеративної оптимізації для визначення найбільш підходящого розміру вибірки шляхом попередніх експериментів. Водночас слід створити механізм оцінювання якості вибірки, щоб гарантувати якість і надійність вибірки при дотриманні кількісних вимог.

У цьому дослідженні розмір території України становить у проєкції Меркатора 598633,43 км<sup>2</sup>. Це значення було отримано шляхом прямого розрахунку території дослідження за допомогою функцій та набору даних, наданих GEE. А також 601567,2 км<sup>2</sup> на референц-еліпсоїді Красовського у середовищі QGIS.

Кожен піксель має роздільну здатність супутникових знімків Landsat 30x30 м, що відповідає 900 м<sup>2</sup> (0,09 га або 0,0009 км<sup>2</sup>).

Таким чином, кількість пікселів, що покривають всю територію України, становить:  $601567,2/0.0009 = 668\ 408\ 777$ .

Ці вибіркові точки значно перевищують верхню межу розрахунку, тому було переосмислено стратегію вибірки, щоб гарантувати отримання найкращих результатів класифікації з обмеженою кількістю точок вибірки.

Після кількох експериментальних перевірок виявлено, що кількість точок вибірки не може перевищувати 2000 точок при виконанні розрахунків класифікації через (GEE) для України як досліджуваної території, і в той же час, враховуючи, що випадкові точки, згенеровані стохастичним алгоритмом, мають різну щільність в різних регіонах, що може призвести до нерівномірного просторового розподілу точок вибірки і вплинути на точність класифікації. Для вирішення цієї проблеми в даному дослідженні використовується стратегія систематичної сітчастої вибірки, тобто створюється карта квадратної сітки, що покриває всю територію України, центральна точка кожної сітки використовується як точка вибірки зразків, а оптимальний параметр довжини сторони сітки визначається шляхом математичного виведення та експерименту (рис. 2.18):

Площа досліджуваної території – 601567,2 км<sup>2</sup>.

Кількість сіток – 2000.

Теоретична максимальна площа однієї сітки:  $601567,2/2000 = 300,78$  км<sup>2</sup>.

Теоретична максимальна довжина сторони однієї сітки:  $\sqrt{300,78}$  км<sup>2</sup> = 17,34 км.

Насправді, шляхом безперервних експериментів було виявлено, що кількість балів, згенерованих, коли довжина сторони становила 17 кілометрів, була занадто великою, і довжину сторони сітки потрібно було збільшити, щоб кількість балів відповідала вимогам. У результаті довжина сторони склала 27 кілометрів, кількість згенерованих точок менше критичного значення (рис. 2.19).



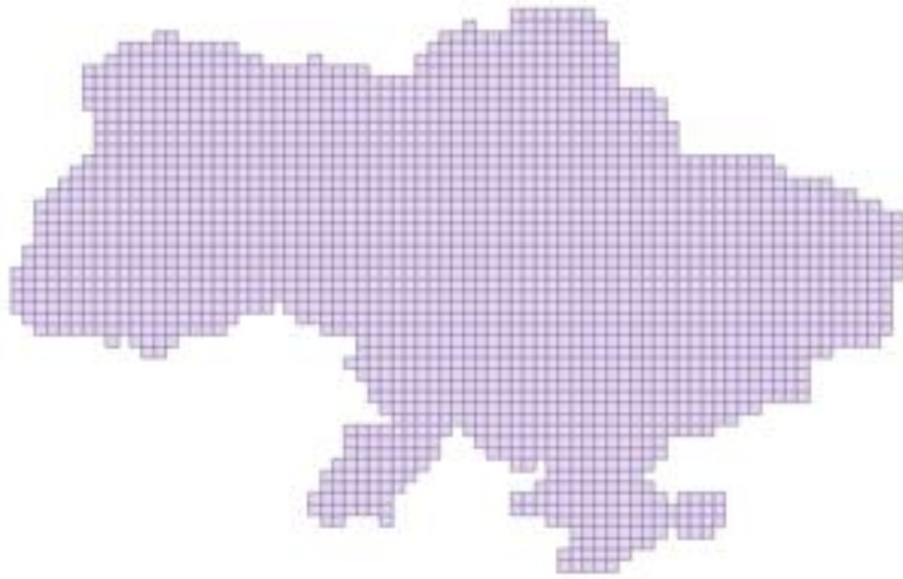


Рис. 2.18. Блочна GRID-модель, що покриває всю територію України  
(виконано автором)



Рис. 2.19. Точки вибірки, що покривають всю територію України (виконано  
автором)

Зрештою, було створено 1 920 точок вибірки – кількість, яка забезпечує безперебійну роботу програми в GEE, але також забезпечує достатню кількість зразків для класифікації земель, щоб задовольнити вимоги до точності.

## **2.6 Принципи та процедури опрацювання даних**

### ***2.6.1 Принципи та методи класифікації космічних знімків***

Класифікація зображень ДЗЗ є одним з ключових методів вилучення інформації з ДЗЗ, суть якого полягає у віднесенні кожного пікселя на зображенні ДЗЗ до попередньо визначених категорій ознак на основі його спектральних характеристик, просторових особливостей та часових характеристик. Кожен піксель на карті класифікується до певного класу за допомогою спеціального алгоритму класифікації на основі його спектральних, просторових і часових характеристик. Цей процес можна використовувати не лише для створення тематичних карт, але й для забезпечення базових даних для таких додатків, як дослідження регіональних ресурсів, моніторинг довкілля та виявлення змін.

Основний принцип класифікації ґрунтується на відмінностях спектральних характеристик об'єктів і схожості спектральних характеристик об'єктів одного класу. Зокрема, за однакових умов спостереження об'єкти однієї категорії мають схожі характеристики спектрального відгуку та просторової структури, а їхні вектори ознак мають тенденцію до кластеризації у просторі ознак; тоді як через відмінності у фізико-хімічних властивостях різних категорій об'єктів їхні вектори ознак, як правило, розподілені в різних областях простору ознак. Виходячи з цього принципу, класифікація ознак може бути досягнута шляхом аналізу характеристик розподілу елементів зображення в просторі ознак.

Після встановлення точок відбору у дослідженні було розроблено методику опрацювання даних ДЗЗ для моніторингу сільськогосподарських земель (рис. 2.20).

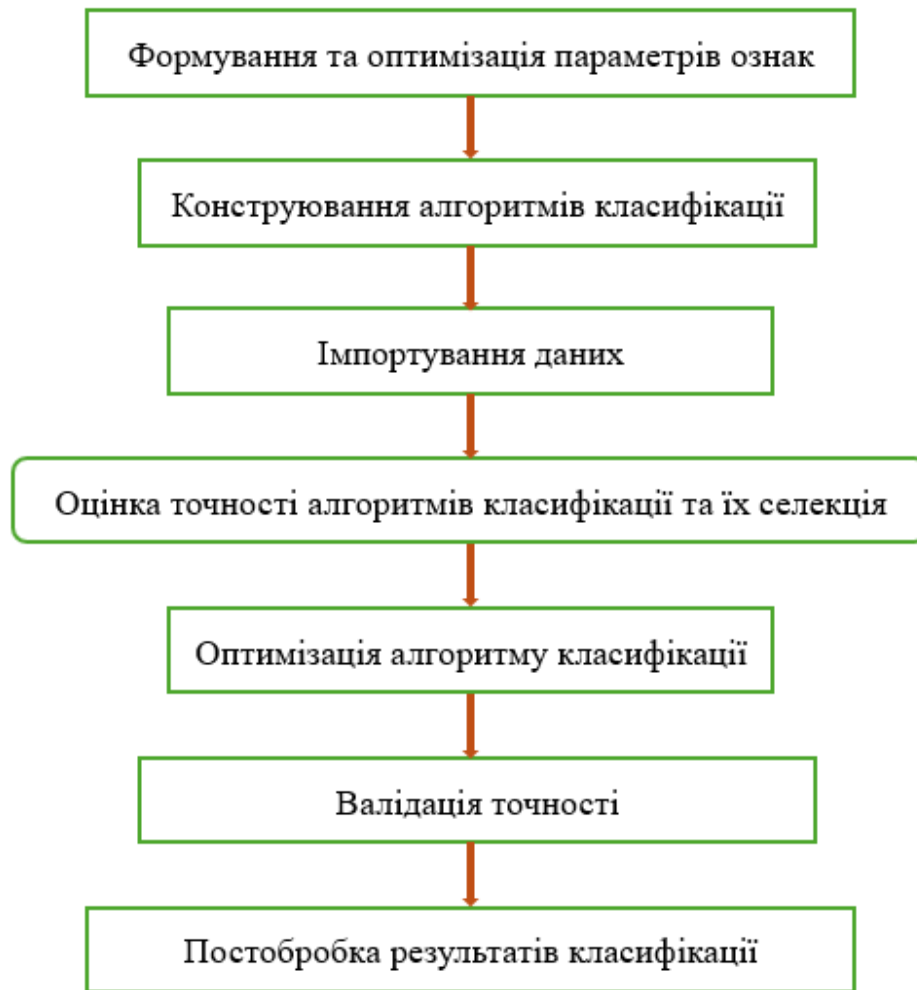


Рис. 2.20. Методика опрацювання даних ДЗЗ для моніторингу сільськогосподарських земель (виконано автором)

У процесі розвитку методів класифікації зображень ДЗЗ сформувалися дві основні технічні системи:

1. Класифікація на основі пікселів (Pixel-based Classification) [120]. Це традиційний технологічний шлях класифікації, який в основному базується на спектральній інформації одного пікселя для класифікації та дискримінації, і може бути поділений на наступні за ступенем взаємодії людини та комп'ютера:

– Контрольована класифікація: метод класифікації, заснований на апріорних знаннях, для якого необхідно заздалегідь вибрати репрезентативні навчальні вибірки. Найпоширеніші алгоритми включають максимальну правдоподібність, машину опорних векторів (SVM) і випадковий ліс. Перевагою цих методів є те, що результати класифікації мають чіткий

фізичний зміст, але отримання якісних навчальних вибірок часто займає багато часу.

–Класифікація без нагляду (Unsupervised Classification) [121]: також відома як кластерний аналіз (Cluster Analysis) або самоорганізована класифікація, без попередніх знань. Найпоширеніші алгоритми включають K-середні та ISODATA. Цей тип методів підходить для швидкого отримання характеристик просторового розподілу категорій ознак, але результати класифікації потрібно розшифровувати пізніше, щоб визначити конкретні категорії.

2. Удосконалені методи класифікації Зі стрімким розвитком комп'ютерних технологій та штучного інтелекту було запропоновано та широко використано низку нових методів класифікації:

–Класифікація з глибоким навчанням (Deep Learning Classification) [122]: такі методи класифікації, як CNN, Transformer, можуть автоматично вивчати різномасштабні ознаки, особливо підходять для тонкої класифікації складних сцен.

–Класифікація на основі злиття даних з різних джерел: поєднання оптичних, радіолокаційних, LiDAR та інших даних з різних джерел дозволяє підвищити надійність і точність класифікації.

–Класифікація часових рядів: повне використання кліматичних змін об'єктів для класифікації, з видатними характеристиками в класифікації рослинності та сільськогосподарських культур.

–Класифікація з навчанням ансамблю: такі як Bagging, Boosting та інші методи, які підвищують точність і надійність класифікації за рахунок поєднання декількох класифікаторів.

Наразі основне програмне забезпечення для обробки зображень дистанційного зондування забезпечує багаті функціональні модулі класифікації. Традиційне комерційне програмне забезпечення ENVI, ERDAS і ArcGIS оснащені комплексними наборами інструментів класифікації, тоді як хмарна платформа Google Earth Engine (GEE) пропонує нове рішення для

класифікації великомасштабних зображень дистанційного зондування.

*ENVI* надає найповніший інструментарій класифікації, що включає в себе, головним чином:

- Контрольовану класифікацію: максимальна правдоподібність, нейронна мережа, машина опорних векторів, дерево рішень тощо.
- Неконтрольована класифікація: K-середні, ISODATA.
- Класифікація на основі машинного навчання: Random Forest, Deep Learning.

*ERDAS* надає класичні та стабільні інструменти класифікації:

- Некеровані класифікатори: ISODATA, K-Means;
- Контрольовані класифікатори: мінімальна відстань, максимальна правдоподібність, відстань Махаланобіса;
- Експертна система класифікації: експертний класифікатор на основі знань (Knowledge Engineer).

*ArcGIS* надає повний набір інструментів для класифікації зображень:

- «Інтерактивна керована класифікація»: підтримує інтерактивний вибір зразків і попередній перегляд результатів класифікації в реальному часі;
- «Класифікація за максимальною правдоподібністю»: параметричний метод класифікації, заснований на статистичній ймовірності;
- «Класифікація без нагляду ISO-кластеризації»: автоматичний алгоритм кластеризації;
- «Класифікація з глибоким навчанням»: підтримка класифікації з використанням навчених моделей глибокого навчання (ArcGIS Pro).

*Google Earth Engine*. На відміну від них, платформа (GEE), як нове покоління платформи для аналізу даних ДЗЗ, має наступні унікальні переваги:

- 1, масовий доступ до даних: прямий доступ до бібліотеки зображень дистанційного зондування Google, без необхідності завантаження
- 2, можливість хмарних обчислень: використовуйте розподілені обчислювальні ресурси Google для великомасштабних обчислень.
- 3, Багата бібліотека алгоритмів:

- Традиційні алгоритми класифікації: CART, Random Forest, SVM тощо.
  - Інтеграція машинного навчання: може бути інтегрована з TensorFlow та іншими фреймворками глибокого навчання.
4. Обмін результатами: підтримка онлайн-обміну та спільного аналізу результатів класифікації.

### ***2.6.2 Вибір і порівняння методів класифікації***

Для вибору методу класифікації були враховані такі аспекти:

- 1) велика кількість обчислень: необхідно обробити дані зображень ДЗЗ, що охоплюють всю Україну з квітня по листопад;
- 2) різні набори даних: вхідні дані містять кілька смуг і особливостей рельєфу;
- 3) кількість еталонів кожного класу дуже різниться.

Ці характеристики висувають високі вимоги до алгоритмів класифікації: по-перше, алгоритм повинен бути здатний обробляти дані великої розмірності; по-друге, алгоритм повинен мати високу обчислювальну ефективність. Тому вибір відповідного алгоритму класифікації є вирішальним для здійсненності та точності дослідження [124]. Базуючись на наведених вище вимогах, у цьому дослідженні протестовані та порівняні чотири контрольовані алгоритми класифікації, надані платформою GEE, а саме CART (Дерево класифікації та регресії), RF (RandomForest), (NB) NaiveBayes і SVM (Support Vector Machine) [125].

CART (Дерево класифікації та регресії) створює дерево рішень за допомогою рекурсивного бінарного пошуку, вибирає оптимальні функції та порогові значення в кожному вузлі для розділення вибірок і, таким чином, завершує завдання класифікації. Його головні переваги полягають у тому, що структура моделі є інтуїтивно зрозумілою та легкою для розуміння, висока обчислювальна ефективність, а нелінійний зв'язок між функціями можна природно обробляти. Ці характеристики роблять його широко

використовуваним у практичних застосуваннях, таких як класифікація зображень дистанційного зондування [123]. У GEE він викликається через функцію `ee.Classifier.smileCart`.

RF (RandomForest) — це алгоритм машинного навчання, заснований на ансамблевому навчанні. Основна ідея полягає в тому, щоб побудувати кілька класифікаторів дерева рішень. Кожен класифікатор навчається з використанням даних навчання та підмножин ознак, відібраних випадковою вибіркою, і, нарешті, результат класифікації отримується шляхом об'єднання результатів прогнозування всіх дерев рішень за допомогою механізму голосування. Основні переваги РЧ полягають у тому, що він може ефективно обробляти дані з великими внутрішньокласовими відмінностями, є високостійким до шумів і не вимагає попередніх припущень щодо розподілу даних, що робить його широко використовуваним у класифікації зображень дистанційного зондування [126-128]. У GEE він викликається через функцію `ee.Classifier.smileRandomForest`.

NB (NaiveBayes), у GEE, є імовірнісним класифікатором, заснованим на теоремі Байєса. Основна ідея полягає в тому, щоб припустити, що ознаки є незалежними одна від одної, і передбачити категорію вибірки шляхом обчислення умовної ймовірності класу та попередньої ймовірності. У класифікації дистанційного зондування NB має переваги високої обчислювальної ефективності, легкої реалізації та хорошого класифікаційного ефекту навіть з малими вибірками [129]. У GEE це викликається через функцію `.Classifier.smileNaiveBayes`.

Машина опорних векторів (SVM) — це контрольований метод навчання, який реалізує класифікацію даних шляхом побудови оптимальної гіперплощини класифікації. Основна ідея полягає в тому, щоб знайти межу рішення в просторі ознак, яка може максимізувати інтервал між класами. Його основні переваги полягають у тому, що він може ефективно справлятися з проблемами нелінійної класифікації; крім того, він може обробляти простори ознак без значного збільшення обчислювальної складності [131]. У GEE він

викликається через функцію *ee.Classifier.libsvm*.

Щоб оцінити ефективність різних алгоритмів класифікації, у цьому дослідженні використовувалися дані з 2021 року як вхідні дані та прийнято матрицю невідповідностей як основний інструмент для оцінки точності. Загальна точність (OA) і коефіцієнт Каппа були розраховані за допомогою функцій, наданих платформою Google Earth Engine (GEE). Конкретний метод розрахунку індексу оцінки та детальний аналіз будуть розроблені в наступних розділах. Загальна точність різних алгоритмів наведена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

### Порівняння методів класифікації

Назва алгоритму	OA %	Каппа
CRAT	78%	0.59
RF	82%	0.68
NB	3%	0
SVM	67%	0.37

Грунтуючись на результатах у таблиці 2.3, для дослідження було обрано алгоритм випадкового лісу (RF) як основний метод класифікації.

У GEE команда виклику алгоритму випадкового лісу має вигляд «*ee.Classifier.smileRandomForest(numberOfTrees, variablesPerSplit, minLeafPopulation, bagFraction, maxNodes, seed)*» (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

### Список параметрів радіочастотного алгоритму в GEE

Аргумент	Тип	Деталі
numberOfTrees	Integer	Налаштування за результатами тюнінгу
variablesPerSplit	Integer	default: null
minLeafPopulation	Integer	default: 1
bagFraction	Float	default: 0.5
maxNodes	Integer	default: null
seed	Integer	default: 0



Налаштування параметрів алгоритмів класифікації часто впливає на точність результатів класифікації, для того, щоб оптимізувати роботу моделі та підвищити точність результатів класифікації, це дослідження зосереджується на оптимізації точності класифікації шляхом налаштування кількості дерев рішень, побудови системи оптимізації параметрів через код, реалізації тесту обходу для кількості дерев рішень від 5 до 100 (з кроком 5) та розрахунку точності класифікації при кожній конфігурації параметрів на основі вибіркового набору даних, на основі Систематично оцінено вплив кількості дерев рішень на точність класифікації в класифікаторах випадкових лісів. Експериментальні результати представлено у вигляді графіків залежності точності від параметрів, які дозволяють об'єктивно визначити оптимальні параметри (рис. 2.21).

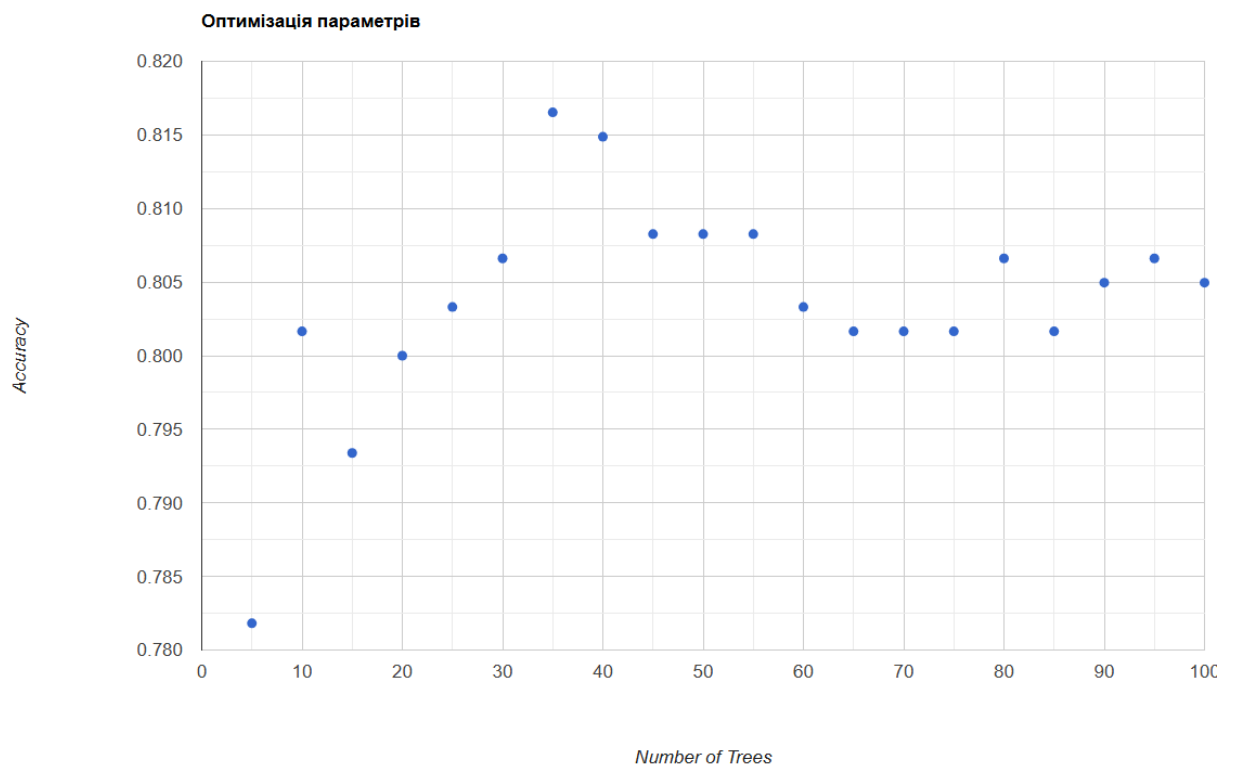


Рис. 2.21 Точність класифікації в залежності від кількості дерев рішень  
(виконано автором)

### 2.6.3 Побудова та вилучення ознак зображень

Для того, щоб повною мірою використати дані дистанційного зондування та географічну інформацію для класифікації ознак, у цьому дослідженні було створено багатовимірну колекцію ознак на основі платформи Google Earth Engine (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

#### Набір функцій багатовимірного зображення

Назва особливості	Назва набору даних	Індекси та канали, які використані
Спектральні особливості	Landsat 5	SR_B1, SR_B2, SR_B3, SR_B4, SR_B5, SR_B7
	Landsat 7	
	Landsat 8	
	спектральні індекси	NDBI, NDVI, MNDWI, NDWI, SAVI, EVI
Топографічні особливості	STRM DEM	ELEVATION

Зокрема, побудовано класифікаційні ознаки з двох вимірів: спектральні ознаки: для відображення спектральних характеристик об'єктів були використані кілька спектральних діапазонів супутникових зображень; топографічні ознаки: топографічні параметри, витягнуті на основі даних ЦМР, були використані для характеристики геопросторових особливостей об'єктів, а дані ELEVATION були розраховані і витягнуті в якості топографічних ознак з даних SRTM DEM 30M зображення. Дані ELEVATION були вилучені як елементи рельєфу. Ці ознаки разом слугують вхідними даними для класифікатора для підвищення точності класифікації об'єктів.

#### 2.6.3.1 Спектральні ознаки

Спектральні характеристики зображень ДЗЗ є основою для класифікації об'єктів, причому різні об'єкти мають унікальні особливості спектрального відгуку в різних діапазонах через відмінності в їхніх фізико-хімічних властивостях. У цьому дослідженні класифікаційні ознаки були побудовані на

основі мультиспектральних знімків із супутників серії Landsat (включаючи Landsat-5, 7 і 8). Враховуючи, що досліджувана територія містить різноманітні складні типи об'єктів (наприклад, сільськогосподарські угіддя, природна рослинність, будівлі, водні об'єкти тощо), важко досягти точної класифікації, покладаючись лише на один діапазон. Тому використану у цьому дослідженні такі стратегії для побудови спектральних ознак:

1) Усі мультиспектральні діапазони супутників серії Landsat були обрані в якості базових ознак. Ці діапазони охоплюють спектральний діапазон від видимого світла до короткохвильового інфрачервоного, що може всебічно відображати характеристики спектрального відгуку об'єктів. Спектральна узгодженість даних з різних датчиків забезпечується функцією узгодження діапазонів платформи GEE.

2) З метою покращення спектральних характеристик конкретної ознаки при придушенні втручання інших факторів в даному дослідженні побудовано серію спектральних індексів (Spectral Index). Спектральний індекс – це технічний засіб для посилення характеристик цільових ознак шляхом математичного поєднання різних діапазонів (рис. 2.22).

### *2.6.3.2. Спектральний індекс для рослинності*

Спектральний індекс рослинності є найбільш раннім розробленим і найбільш широко використовуваним типом спектрального індексу в дистанційному зондуванні. Його теоретична основа ґрунтується на унікальних спектральних характеристиках рослинності: у видимій червоній смузі (0,63-0,69 мкм) сильне поглинання світлової енергії хлорофілом призводить до низького коефіцієнта відбиття, тоді як у ближній інфрачервоній смузі (0,76-0,90 мкм) багаторазове розсіювання, спричинене клітинною структурою листя рослин, призводить до значного збільшення коефіцієнта відбиття. Ця важлива особливість «червоної долини - ближнього інфрачервоного плато» забезпечує надійну фізичну основу для моніторингу рослинності за допомогою дистанційного зондування.

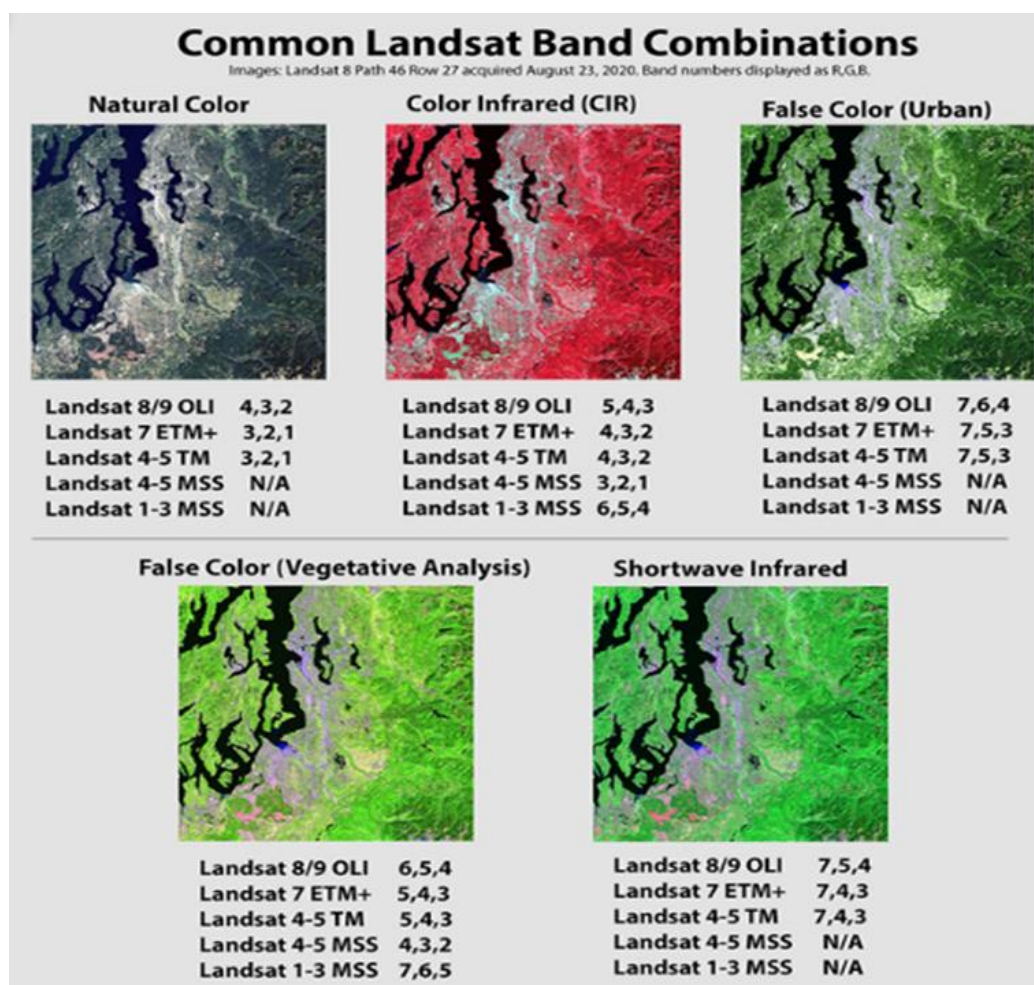


Рис. 2.22 Загальні комбінації діапазонів Landsat [132]

Однак, через різноманітність типів рослинності, складність кліматичних змін та вплив зовнішніх факторів (наприклад, атмосферних умов, ґрунтового фону, рельєфу тощо), важко точно охарактеризувати стан рослинності в одній смузі. Засовуються різноманітні вегетаційні індекси для посилення сигналів рослинності за допомогою математичних комбінацій різних смуг, при цьому пригнічуючи вплив факторів, що заважають.

NDVI, Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index) є одним з найбільш широко використовуваних вегетаційних індексів у дистанційному зондуванні. Індекс базується на унікальних спектральних характеристиках рослинності у видимій червоній (Red) та ближній інфрачервоній (NIR) областях: здорова рослинність поглинає велику кількість видимого світла для фотосинтезу через хлорофіл, що

призводить до низького коефіцієнта відбиття в червоній області; в той час як в ближній інфрачервоній області рослинність має високий коефіцієнт відбиття і розсіювання завдяки особливостям її клітинної структури. Ця характеристика спектрального відгуку тісно пов'язана з фізіологічними та екологічними характеристиками рослинності: чим вищий вміст хлорофілу, тим сильніше поглинання в червоному діапазоні, а чим більша біомаса, тим сильніше відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні.

Обчислюючи нормалізовану різницю між коефіцієнтом відбиття в ближній інфрачервоній та червоній смугах, NDVI ефективно посилює інформацію про рослинність, при цьому певною мірою пригнічуючи вплив кута сонячної висоти, топографії та інших факторів. Однак, індекс все ще має деякі обмеження, головним чином, чутливість до змін фонові відбивної здатності ґрунту, змін атмосферних умов та хмарності, що може впливати на точність індексу [133].

$$NDVI = \frac{B_{NIR} - B_{Red}}{B_{NIR} + B_{Red}} \quad (2.1)$$

SAVI, Індекс рослинності з поправкою на ґрунт (Soil-Adjusted Vegetation Index) – це вдосконалений індекс рослинності, запропонований для усунення недоліків чутливості NDVI до ґрунтового фону. Індекс ефективно зменшує вплив змін відбивної здатності ґрунтового фону (включаючи колір ґрунту, вміст поверхневих вод тощо) на моніторинг рослинності шляхом введення поправочного коефіцієнта L. У практичному застосуванні SAVI еквівалентний NDVI, коли L=0; в той час як у більшості досліджень L приймається рівним 0,5 як емпіричне значення для адаптації до середніх умов рослинного покриву [133].

$$SAVI = \frac{(B_{NIR} - B_{Red})(1+L)}{B_{NIR} + B_{Red} + L} \quad (2.2)$$

EVI, з іншого боку, розширений вегетаційний індекс (Enhanced Vegetation Index, EVI) додатково вирішує проблему, пов'язану з тим, що NDVI

легко насичується в густонаселених районах (наприклад, у лісах) і має значний атмосферний вплив, оскільки враховує вплив ґрунтового фону. На відміну від SAVI, який коригує лише вплив ґрунту, EVI вносить атмосферні поправки шляхом введення синіх світлових смуг і використовує оптимізовану конструкцію коефіцієнтів для інтегрованого коригування сигналів атмосферного фону і фону полого. Зокрема, введення коефіцієнтів аерозольного імпедансу ефективно пом'якшує ефект розсіювання атмосферного аерозолю. Така багатосмугова синергетична стратегія проектування дозволяє EVI значно покращити можливості моніторингу територій з високою біомасою, зберігаючи при цьому чутливість до змін рослинності, що особливо підходить для дослідження густо зарослих територій [133]:

$$EVI = \frac{2.5(B_{NIR} - B_{Red})}{(B_{NIR} + C_1 B_{Red} - C_2 B_{Blue} + L)} \quad (2.3)$$

де  $C_1$  – коефіцієнт імпедансу аерозолю червоного діапазону, становить 6;  
 $C_2$  – коефіцієнт імпедансу аерозолю синього діапазону, становить 7,5;  
 $L$  – коефіцієнт поправки на ґрунт, який має значення 1.

### 2.6.3.3 Індекс забудованої території (BAI)

NDBI. Нормалізований різницевий індекс забудови (NDBI) - це індекс дистанційного зондування, розроблений на основі унікальних спектральних характеристик будівель та штучних поверхонь. Індекс використовує властивості відбиття забудованих територій, які є вищими в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR) і нижчими в ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR), і покращує інформацію про забудовану територію, обчислюючи нормалізовану різницю між цими двома діапазонами. Завдяки різниці у спектральному відгуку різних об'єктів, NDBI демонструє чітку здатність до диференціації об'єктів: забудовані території показують високі позитивні значення через вищий коефіцієнт відбиття в інфрачервоному діапазоні; водні об'єкти показують від'ємні значення через

дуже низький коефіцієнт відбиття в інфрачервоному діапазоні; а рослинність зазвичай показує низькі значення NDBI через сильні характеристики відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні. Такі спектральні характеристики роблять NDBI ефективним інструментом для виділення забудованих територій та моніторингу розростання міст [133]:

$$NDBI = \frac{B_{SWIR} - B_{NIR}}{B_{SWIR} + B_{NIR}} \quad (2.4)$$

#### 2.6.3.4 Індекси водних об'єктів

NDWI, Нормалізований різницевий водний індекс (Normalized Difference Water Index) - це різновид індексу виділення водного об'єкта на основі багатоспектральних даних дистанційного зондування, який використовує властивість сильного поглинання водного об'єкта в ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR) і властивість відбиття в зеленому діапазоні (Green), а також підвищує інформативність водного об'єкта за рахунок розрахунку нормалізації двох діапазонів. В той же час, спектральний відгук рослинності та ґрунту був ефективно пригнічений [133]:

$$NDWI = \frac{B_{NIR} - B_{SWIR}}{B_{NIR} + B_{SWIR}} \quad (2.5)$$

MNDWI ,Модифікований нормалізований різницевий водний індекс (Modified Normalized Difference Water Index) є оптимізованим покращенням NDWI, який ще більше покращує спектральні характеристики водних об'єктів шляхом заміни ближньої інфрачервоної смуги на короткохвильову інфрачервону смугу (SWIR). Оскільки водні об'єкти мають сильніші властивості поглинання в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні, а інші об'єкти (наприклад, будівлі, рослинність і голий ґрунт) демонструють більшу відбивну здатність у цьому діапазоні, MNDWI значно покращує спектральне розділення між водними і неводними об'єктами, а також підвищує надійність великомасштабного картографування водних об'єктів [133]:

$$MNDBI = \frac{B_{GREEN} - B_{SWIR}}{B_{GREEN} + B_{SWIR}} \quad (2.6)$$

На додаток до вищезазначених спектральних індексів, у цьому дослідженні також оцінювався ряд спектральних індексів, включаючи ядерний нормалізований індекс різниці рослинності (KNDVI), модифікований індекс рослинності з поправкою на ґрунт 2 (MSAVI2). MSAVI2), нормалізований різницевий індекс вологості (NDMI), нормалізований різницевий індекс оголеності (NDBaI), нормалізований різницевий індекс непроникної поверхні (NDISI), нормалізований різницевий індекс непроникної поверхні (NDISI) та нормалізований різницевий індекс непроникної поверхні (NDISI). Різницевий індекс протифільтраційної поверхні (NDISI) та нормалізований різницевий індекс протифільтраційної поверхні (NDISI).

Для оптимізації результатів класифікації отримано індекс важливості ознак моделі «випадкового лісу» шляхом виклику вбудованої функції *classifier.explain()* GEE, створено код на основі спектральної оцінки важливості ознак та визначили ключові змінні, які суттєво впливають на точність класифікації, шляхом візуалізації та аналізу розподілу важливості ознак. Смуги з низьким внеском були виключені. Шість вищезгаданих спектральних індексів були остаточно визначені як оптимальні комбінації ознак для поточних умов дослідження. Ці індекси можуть не тільки ефективно характеризувати відмінності в спектральних особливостях ознак на досліджуваній території, але й ефективно зменшити складність моделі та споживання обчислювальних ресурсів, а також показати хорошу обчислювальну продуктивність при обробці даних на великих регіональних масштабах, забезпечуючи надійну підтримку ознак для подальшої класифікації земного покриву (рис. 2.24).



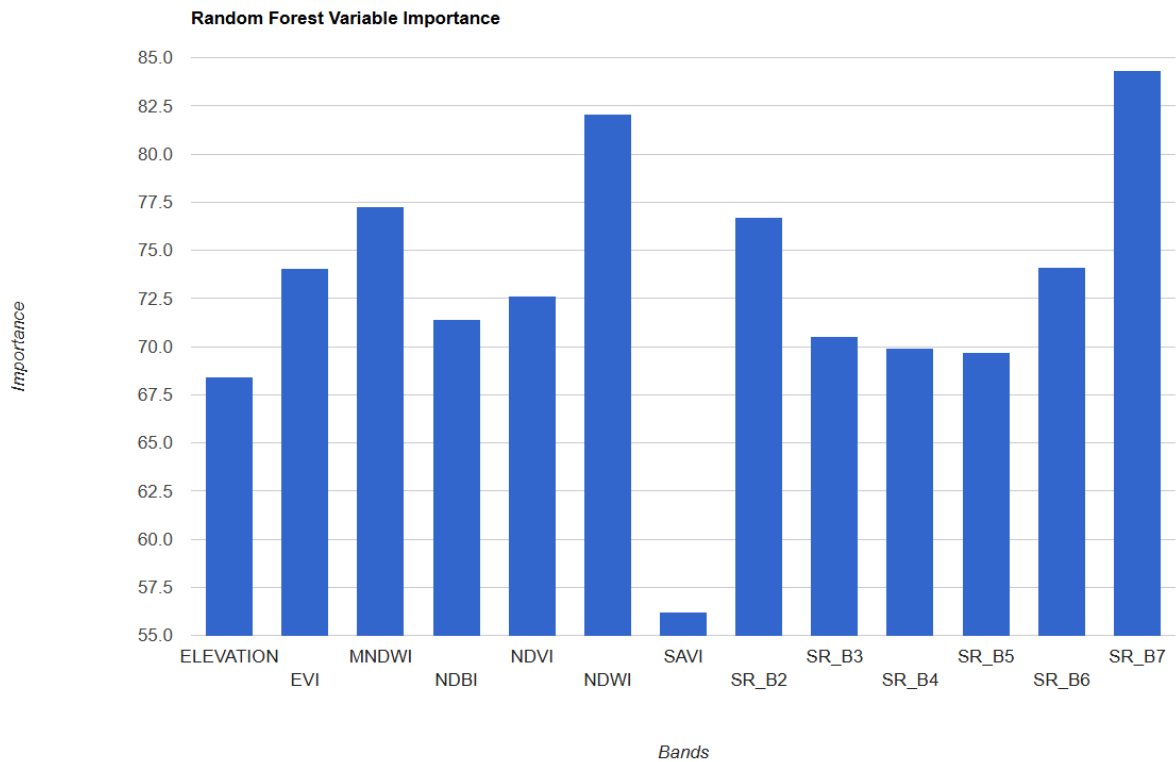


Рис. 2.23 Радіочастотний алгоритм, аналіз значущості характерних смуг (виконано автором)

## 2.6.4 Попереднє опрацювання супутникових даних

### 2.6.4.1 Вибір часової фази знімків

Територія України розташована на Східноєвропейській рівнині і має помірно-континентальний клімат. Ця кліматична особливість призводить до високої хмарності на досліджуваній території навесні та восени, що суттєво впливає на отримання оптичних знімків ДЗЗ: хмарність не тільки безпосередньо закриває інформацію про об'єкти, але й відкидає тіні, які змінюють спектральні характеристики об'єктів, що, в свою чергу, впливає на точність класифікації земного покриву.

Виходячи з вищезазначених обмежень, з метою отримання якомога більшої кількості знімків, у цьому дослідженні було обрано період з квітня по листопад як часове вікно для отримання зображень, зважаючи на наступні міркування:

- 1) сільськогосподарські кліматичні характеристики: квітень є

початковим періодом росту весняних культур, травень-серпень - піковим періодом росту, а вересень-листопад охоплює період осіннього збору врожаю та період посіву озимих культур, що є повним часовим вікном, яке охоплює основний цикл росту сільськогосподарських культур; це дозволяє уникнути потенційного впливу вегетаційних кліматичних змін на точність класифікації.

2) атмосферні умови: більша кількість сонячних днів і вища прозорість атмосфери влітку (червень-серпень) сприяють отриманню високоякісних зображень;

3) уникнення факторів впливу: обхід поверхневих збурень у період снігового покриву в грудні-лютому та під час танення снігу в березні;

Ця операція досягається викликом функції *ee.DateRange* в GEE (рис. 2.24).

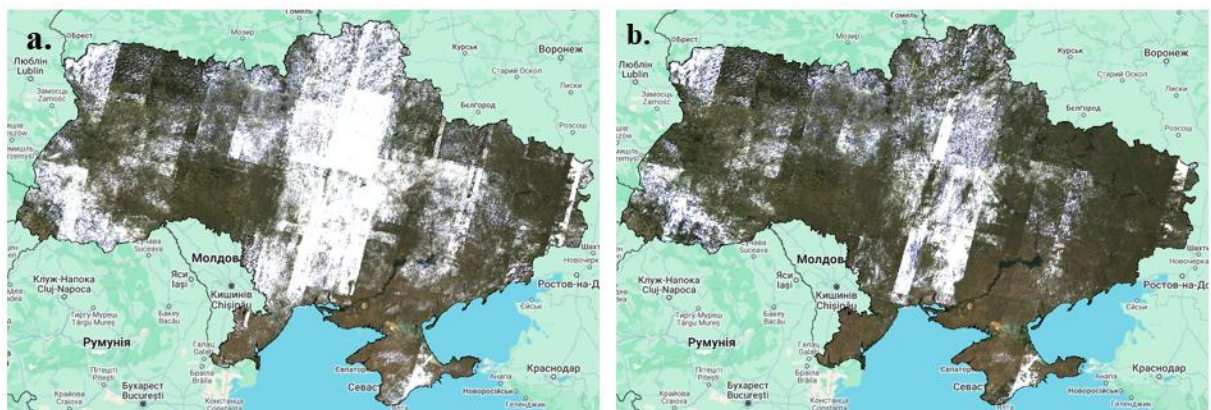


Рис. 2.24. Мозаїка зображень супутника Landsat-5: а - комбінований знімок за січень-грудень; б - комбінований знімок за квітень-листопад (виконано автором)

#### 2.5.4.2 Відбір знімків дистанційного зондування з мінімальним вмістом хмар і усунення хмар

Враховуючи географічне розташування та масштабні характеристики досліджуваної території, важко отримати зображення всієї території дослідження без хмарності або з низькою хмарністю. Для подолання цього обмеження на основі платформи GEE розроблено метод оптимізації зображень для усунення хмарності, який ефективно покращує якість та просторову

цілісність наявних зображень, поєднуючи відсіювання колекції зображень з маскуванням на рівні пікселів.

По-перше, скринінг хмарності реалізовано шляхом встановлення порогу покриття хмари для одноракурсних зображень на рівні 20% за допомогою функції фільтрації, щоб гарантувати, що початкова колекція зображень має низький загальний обсяг хмари. Вибір порогу хмарного вмісту залежить від розміру досліджуваної області, тривалості часового охоплення та вимог до точності класифікації зображень. Таке порогове значення забезпечує доступність даних і водночас ефективно контролює початкову якість даних, закладаючи основу для подальшої тонкої обробки (рис. 2.25).

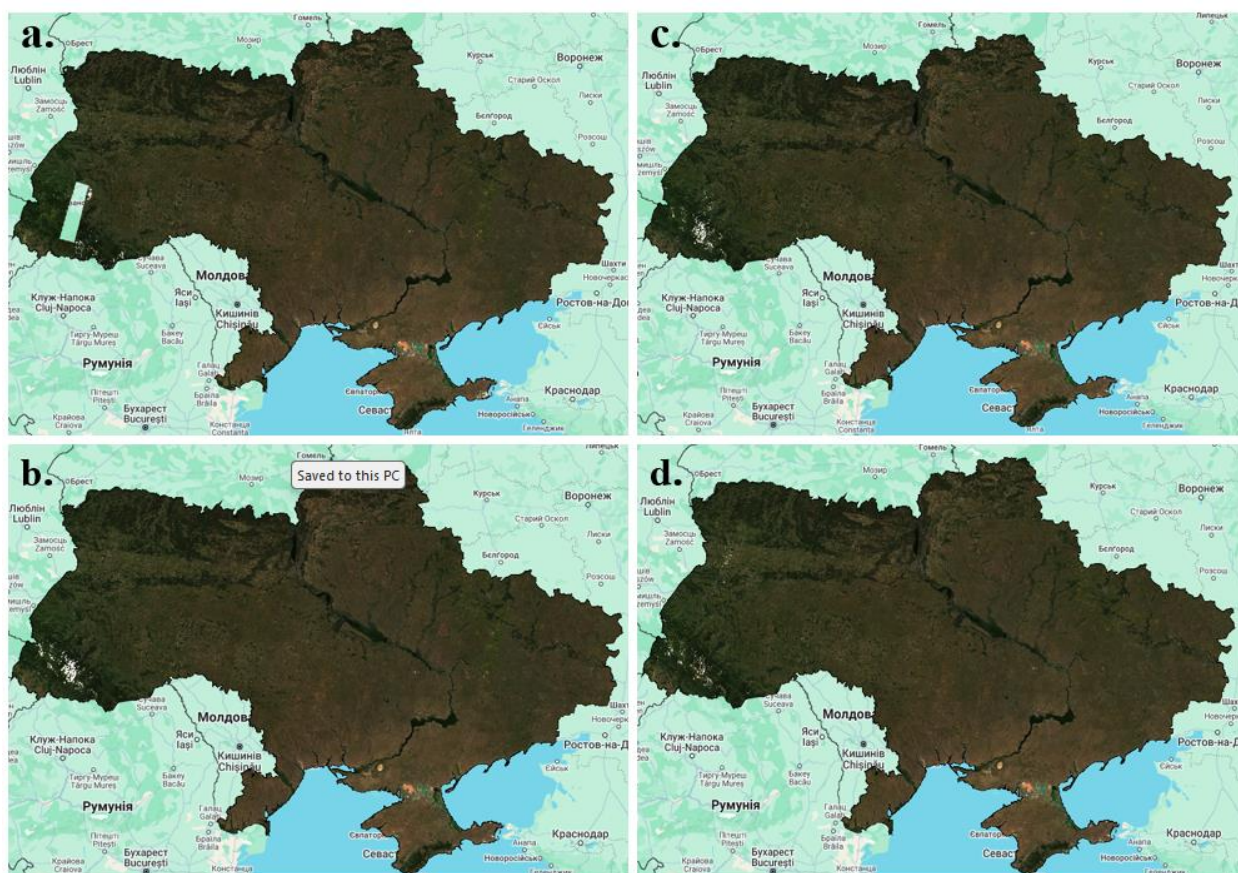


Рис. 2.25. синтетичні знімки Landsat-8 протягом вегетаційного періоду, квітень-листопад. а – 5% хмарності. б – 10% хмарності. с – 15% хмарності, д – 20% хмарності (виконано автором)

По-друге, для зображень, які пройшли первинну перевірку, виконується оцінка якості на піксельному рівні. На цьому етапі для обробки зображень використовуються функції хмарних масок супутникових знімків Landsat, що надаються компанією GEE. Ці функції точно ідентифікують хмари, хмарні тіні та насиченість радіації на рівні пікселів, аналізуючи смуги оцінки якості QA\_PIXEL та QA\_RADSAT зображення, і виконують маскування для усунення впливу хмар.

#### *2.5.4.3 Синтез супутникових даних з різних джерел*

Незважаючи на вибір періоду зйомки рослин у період вегетації та застосування порогового відсіювання хмар і обробки хмарних масок, просторові розриви в ефективних спостереженнях на досліджуваній території все ще існували, а дані знімків все ще були відсутні в деяких районах через 16-денний період повторного відвідування та орбітальні характеристики окремих супутників. Щоб подолати просторові та часові обмеження супутникових знімків, притаманні підходу з використанням одного супутника для великомасштабних досліджень, впроваджено комбіновану систему інтеграції даних з декількох супутників. Тобто, використовуючи дані Landsat-5 і Landsat-7 для злиття у 2000 році та Landsat-7 і Landsat-8 для злиття у 2021 році (рис. 2.26).

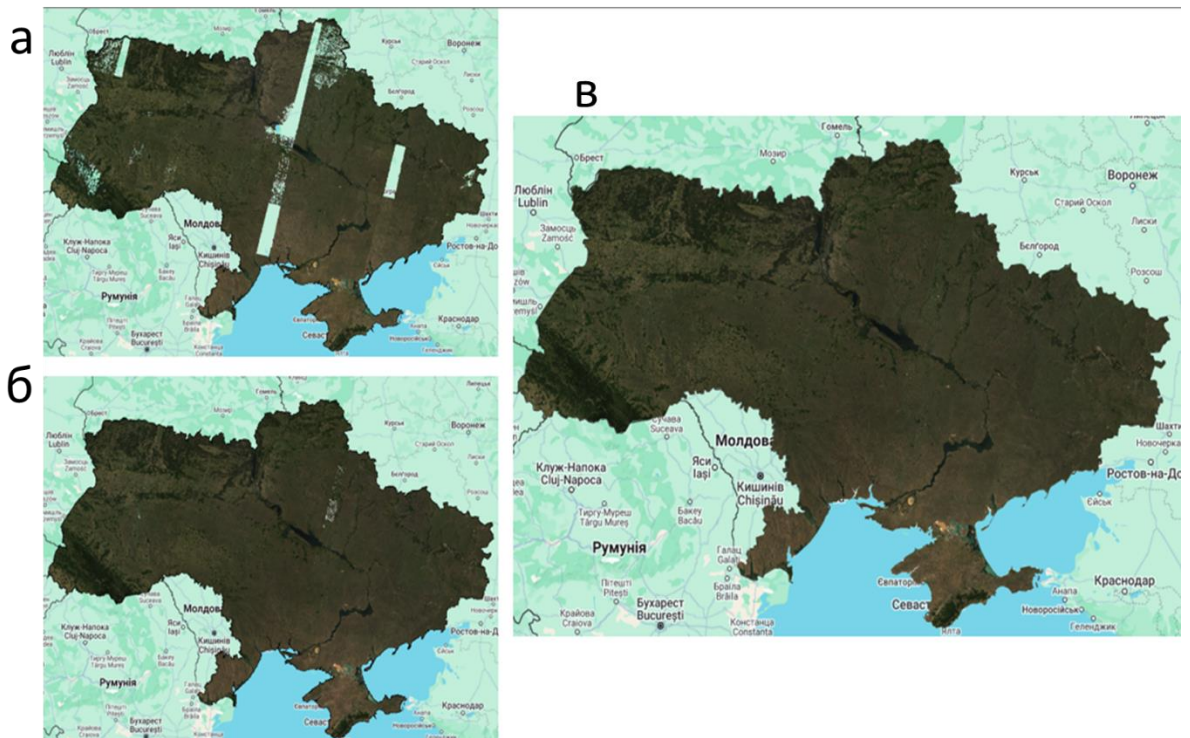


Рис 2.26. 2000 композитних знімків досліджуваної території: а - Landsat-5; б - Landsat-7; в - Landsat-5 з багатоспектральним композитом Landsat-7 (виконано автором)

По-перше, гармонізовано спектральні діапазони між двома поколіннями датчиків, щоб забезпечити узгодженість діапазонів (табл. 2.6). Це пов'язано з відмінностями у визначенні назв спектральних діапазонів між датчиками ETM+ та OLI.

Потім, для композиції на рівні пікселів, застосовано медіанну композицію до об'єднаної колекції багатоспектральних зображень. У межах піксельного діапазону, якщо існує спостереження лише одного датчика (інший датчик не може отримати достовірне спостереження через вплив хмар), зберігається єдине достовірне спостереження, тоді як середні значення використовуються для позицій з достовірними спостереженнями від декількох датчиків одночасно. Цей метод синтезу на основі пікселів ефективно вирішує проблему відсутності даних, зменшуючи спектральні варіації, спричинені відмінностями сенсорів та атмосферними умовами, а також покращуючи стабільність та репрезентативність спектральних характеристик (рис. 2.27).

### Характеристики знімків LANDSAT 7 і LANDSAT 8

Landsat Collection 2 Tier 1	LANDSAT 7		LANDSAT 8	
Канали	Довжина хвилі	Опис	Довжина хвилі	Опис
SR_B1	0.45-0.52 $\mu\text{m}$	Band 1 (blue) surface reflectance	0.435-0.451 $\mu\text{m}$	Band 1 (ultra blue, coastal aerosol) surface reflectance
SR_B2	0.52-0.60 $\mu\text{m}$	Band 2 (green) surface reflectance	0.452-0.512 $\mu\text{m}$	Band 2 (blue) surface reflectance
SR_B3	0.63-0.69 $\mu\text{m}$	Band 3 (red) surface reflectance	0.533-0.590 $\mu\text{m}$	Band 3 (green) surface reflectance
SR_B4	0.77-0.90 $\mu\text{m}$	Band 4 (near infrared) surface reflectance	0.636-0.673 $\mu\text{m}$	Band 4 (red) surface reflectance
SR_B5	1.55-1.75 $\mu\text{m}$	Band 5 (shortwave infrared 1) surface reflectance	0.851-0.879 $\mu\text{m}$	Band 5 (near infrared) surface reflectance
SR_B6	-----	-----	1.566-1.651 $\mu\text{m}$	Band 6 (shortwave infrared 1) surface reflectance
SR_B7	2.08-2.35 $\mu\text{m}$	Band 7 (shortwave infrared 2) surface reflectance	2.107-2.294 $\mu\text{m}$	Band 7 (shortwave infrared 2) surface reflectance

#### Медіанний композит

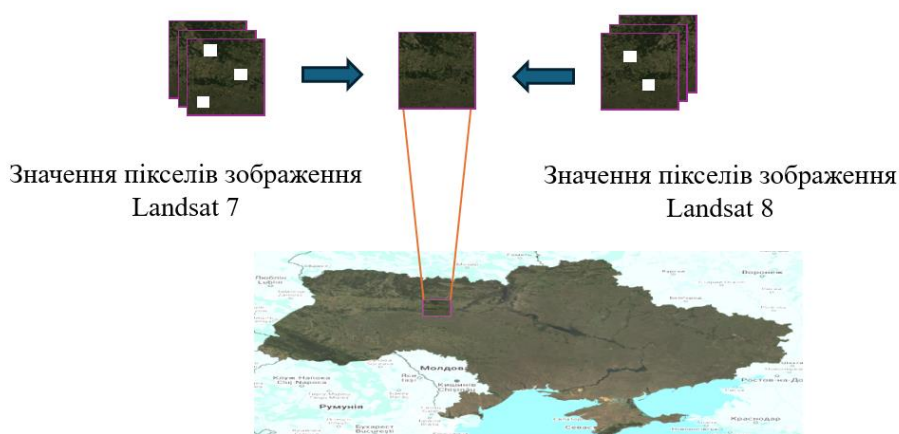


Рис. 2.27 Медіанний синтез пікселя зображення (виконано автором)

## 2.7 Результати класифікації та перевірка точності

### 2.7.1 Перевірка точності в GEE

Оцінка точності класифікації зображень дистанційного зондування Землі є ключовим кроком для забезпечення надійності результатів класифікації. У цьому дослідженні для оцінки результатів класифікації використано матрицю помилок, яка є широко використовуваним методом оцінки точності результатів класифікації зображень ДЗЗ, і містить чотири метрики: загальну точність (OA), точність користувача (UA), точність виробника (PA) та коефіцієнт каппа, які математично розраховуються за формулами [134]:

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^m n_{ii}}{n} \quad (2.7)$$

$$UA = \frac{n_{ii}}{n_{+i}} \quad (2.8)$$

$$PA = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \quad (2.9)$$

$$Каппа = \frac{n \sum_{i=1}^m n_{ii} - \sum_{i=1}^m (n_{+i} + n_{i+})}{n^2 - \sum_{i=1}^m (n_{+i} + n_{i+})} \quad (2.10)$$

відповідно, де:

$n_{ii}$  - правильно класифіковане число пікселів типу  $i$ ,

$m$  - кількість типів ґрунтового покриття,

$n$  – загальна кількість пікселів у досліджуваній області,

$n_{i+}$  — загальна кількість пікселів типу  $i$  в наборі даних перевірки,

$n_{+i}$  — загальна кількість пікселів типу  $i$  в землі.

Загалом Каппа становить від 0 до 1. Чим більше значення Каппа, тим вища точність класифікації коефіцієнта Каппа (табл. 2.7) [135, 136].

### Оцінка коефіцієнта Каппа

Каппа Statistic/ Інтервали значень Каппа	Strength of Agreement/ Ступінь довіри
<0.00	Поганий- Poor
0.00-0.20	Незначний- Slight
0.21-0.40	Неістотний - Fair
0.41-0.60	Помірний- Moderate
0.61-0.80	Істотний- Substantial
0.81-1.00	Майже ідеальний- Almost Perfect

Відповідно до формули розрахунку матриці невідповідностей виконано оцінку точності класифікації (табл. 2.8).

Таблиця 2.8

### Оцінка точності класифікації

Значення	Клас	Індекс	2000 рік	2021 рік
10	Землі сільськогосподарського призначення	P.A.	83.62%	94.45%
		U.A.	96.93%	80.43%
20	Ліси	P.A.	86.60%	79.61%
		U.A.	75.45%	81.03%
30	Пасовища	P.A.	25%	21.02%
		U.A.	0.64%	59.11%
40	Міські території	P.A.	59.38%	64.81%
		U.A.	19.69%	36.27%
50	Водні об'єкти	P.A.	89.66%	62.28%
		U.A.	84.42%	92.20%
60	Інше.	P.A.	0%	0%
		U.A.	0%	25%
ОА			84%	78%
Каппа			0.65	0.62

Було оцінено точність продуктів класифікації ґрунтового покриття України за 2000 та 2021 роки, результати подані у табл. 2.8. Судячи з результатів оцінки точності, загальна точність (ОА) у 2000 і 2021 роках становила 84% і 78% відповідно, а коефіцієнти Каппа становили 0,65 і 0,62



відповідно, що вказує на те, що узгодженість результатів класифікації за два періоди була на рівні вище середнього, але точність класифікації в 2021 році була трохи нижчою, ніж у 2000 році.

Аналіз точності класифікації різних типів земель виявив, що точність виробника сільськогосподарських угідь (Землі сільськогосподарського призначення) зросла з 83,62% у 2000 році до 94,45% у 2021 році, що вказує на те, що явище пропусків у цій категорії зменшилося; але точність користувачів впала з 96,93% до 80,43%, що свідчить про те, що існує більше помилкових класифікацій, які можуть бути пов'язані зі змінами у моделях використання сільськогосподарських земель. Точність виробника для лісових угідь (Ліси) знизилася з 86,60% до 79,61%, що може бути спричинено вирубкою лісів або зміною рослинного покриву. Точність класифікації пасовищ (Пасовища) загалом низька, особливо точність користувачів у 2000 році становила лише 0,64%, хоча у 2021 році вона зросла до 59,11%, точність виробника все ще низька, що свідчить про те, що спектральні характеристики пасовищ подібні до інших типів угідь, і їх легко сплутати.

Загальну точність забудованих територій було покращено, але вона все ще відносно низька, особливо точність користувачів, що може бути наслідком серйозної плутанини, спричиненої складним складом об'єктів у місті. Водні об'єкти мають хороші результати у 2000 році, але точність виробника у 2021 році значно знизилася, з 89,66% до 62,28%, що може бути пов'язано з визначенням меж водних об'єктів або сезонними змінами.

Слід зазначити, що загальна точність і коефіцієнт Каппа вказують на те, що хоча точність однієї категорії коливається, загальні результати класифікації все ще мають певний ступінь надійності. Беручи до уваги якість зображень дистанційного зондування, сезонні відмінності та складність змін ґрунтового покриву, цей рівень точності все ще є еталонним для довгострокових досліджень змін ґрунтового покриву. У майбутніх дослідженнях можна розглянути можливість використання даних зображень з вищою роздільною здатністю або вдосконалення алгоритмів класифікації для

підвищення точності класифікації конкретних типів землі.

За результатами спрощеної оцінки точності класифікації земельного покриття України загальна точність (ОА) становила 84% та 78% у 2000 та 2021 роках, а коефіцієнт Каппа – 0,65 та 0,62 відповідно. Це свідчить про те, що результати класифікації в обидва періоди досягли прийняттого рівня точності, але точність класифікації у 2021 році дещо знизилася порівняно з 2000 роком.

Зниження загальної точності на 6 процентних пунктів і незначне зниження коефіцієнта Каппа (з 0,65 до 0,62) можуть відображати вплив багатьох факторів. По-перше, складність змін земельного покриття зростає з часом, що ускладнює класифікацію. По-друге, відмінності в якості, роздільній здатності або сезоні отримання даних зображень, що використовуються в різні періоди, також можуть призвести до відмінностей у результатах класифікації. Це збільшує невизначеність класифікації.

Варто зазначити, що хоча загальна точність знизилася, зміна коефіцієнта Каппа є відносно невеликою, що вказує на те, що узгодженість результатів класифікації залишається на рівні вище середнього. Це свідчить про те, що, незважаючи на деякі коливання в точності, здатність методу класифікації охоплювати основні типи земного покриття залишається відносно стабільною.

Через відсутність детальних індикаторів точності для кожної категорії неможливо оцінити, які конкретні типи земель мають кращі чи гірші результати класифікації, але загальні результати все одно можуть підтримувати макромасштабний аналіз змін земельного покриття. Для додатків, які вимагають більш високої точності, рекомендується додатково вдосконалити метод класифікації або інтегрувати дані з багатьох джерел для підвищення надійності результатів класифікації. У майбутніх дослідженнях також може бути розглянуто впровадження більш складних методів оцінки точності для більш повної оцінки якості результатів класифікації.

### 2.7.2 Розрахунок фази за допомогою інших продуктів класифікації дистанційного зондування

Щоб краще визначити основну мету дослідження: точність класифікації сільськогосподарських угідь, класифіковані площі сільськогосподарських угідь у 2000 та 2021 роках були витягнуті з еталонного набору даних земельного покриття, відповідно, і порівняні з результатами класифікації земель, отриманими GEE, і була розрахована відносна похибка, математична формула така:

$$RE = \frac{|A_r - A_e|}{A_r} \quad (2.11)$$

де  $A_r$  – фактична площа;

$A_e$  – площа класифікованої області.

Результати розрахунків наведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

#### Відносна похибка результатів класифікації земель у 2000 та 2021 роках

Тип	Відносна похибка-2000	Відносна похибка-2021
Землі сільськогосподарського призначення	16.2%	17.5%

Згідно з таблицею 2.9, відносні похибки площі у 2000 та 2021 роках становлять 16% та 17% відповідно. Це відхилення в основному пов'язане з властивими відмінностями в джерелах даних, просторовій роздільній здатності та системах класифікації різних продуктів, яких важко уникнути [137, 138].

Слід звернути увагу, що помилки залишалися дуже стабільними протягом періоду дослідження, підтверджуючи часову послідовність і надійність прийнятої методології. Незважаючи на певний ступінь відносної похибки, класифікація земельного покриття на основі платформи Google Earth Engine все ще має значні переваги, включаючи високу ефективність, масштабованість і здатність адаптуватися до регіональних особливостей.

Беручи до уваги поточні особливі обставини, важко отримати високоточні дані польових досліджень як абсолютну довідку.

Поточний рівень точності все ще достатній для підтримки динамічного моніторингу земельних ресурсів у досліджуваній території та підтримки прийняття політичних рішень, особливо в аналізі відносних тенденцій змін. Порівняно з аналогічними продуктами в усьому світі, цей метод може надати інформацію про просторовий розподіл оброблюваних земель, яка більше підходить для досліджуваної території, і забезпечити точнішу наукову основу для захисту та управління сільськогосподарськими угіддями.

Результати класифікації космічних знімків за 2000 рік та 2021 рік наведено у рис. 2.28 та рис. 2.29.

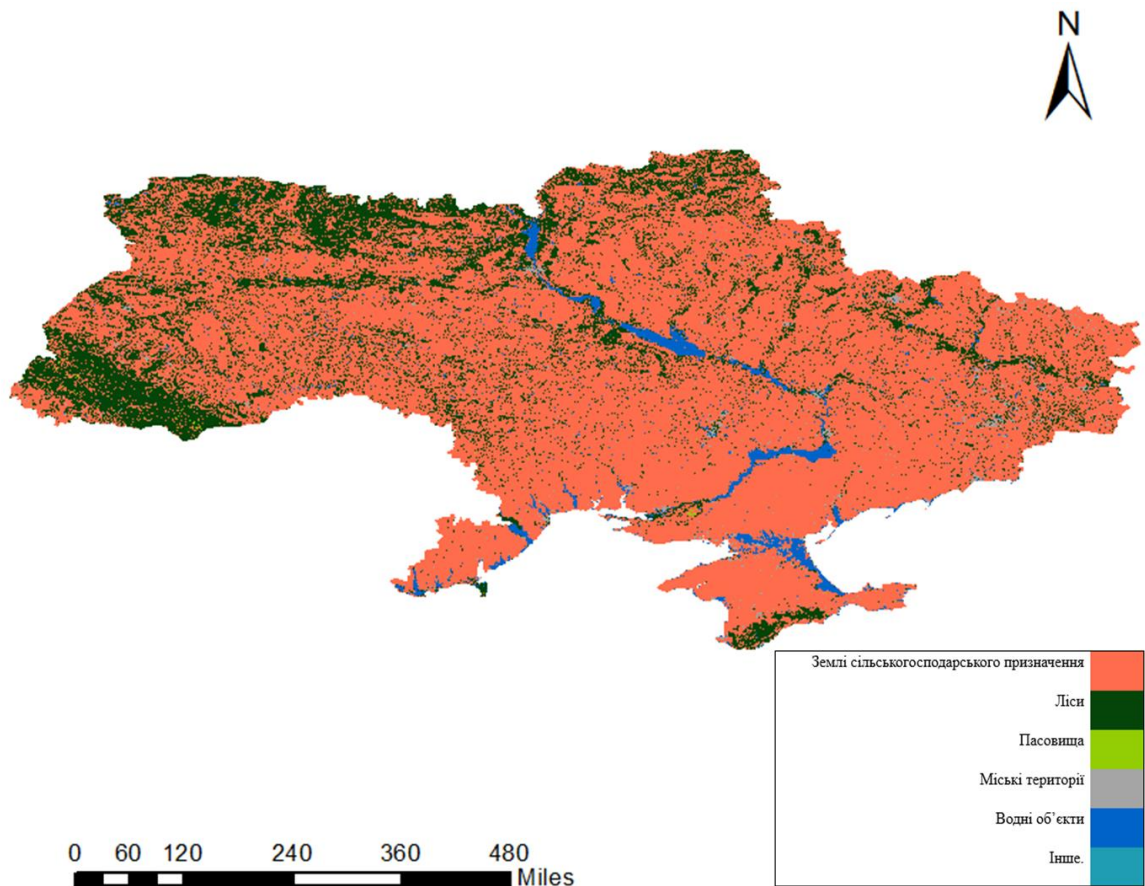


Рис.2.28. Опрацьовані результати класифікації за 2000 рік  
(виконано автором)

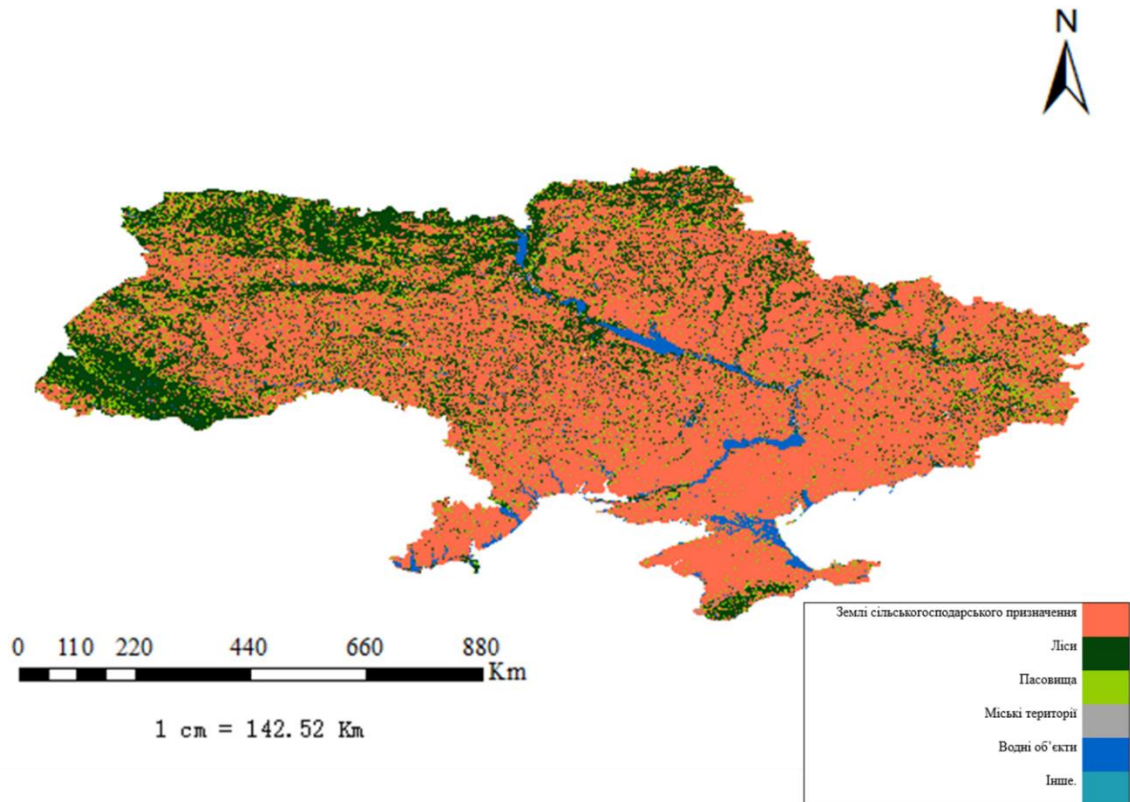


Рис. 2.29. Опрацьовані результати класифікації за 2021 рік  
(виконано автором)

## 2.8 Висновки до Розділу 2

У цьому розділі було детально описано усі набори геопросторових даних, які були використані у дослідженні. Усі ці набори даних є відкритому доступі у каталозі платформи GEE, що є зручним для використання під час написання програмного коду, вказуючи посилання на необхідний набір.

В основі технологічної моделі дослідження є метод керованої класифікації Random forest, визначивши перед цим шість класів, які будуть використані у подальшому аналізі ,а саме: землі сільськогосподарського призначення, ліси, пасовища, міські території, водні об'єкти, інше.

Експериментально встановлено, що кількість точок вибірки для класифікації не може перевищувати 2000 точок при виконанні розрахунків класифікації через (GEE) для України як досліджуваної території, і в той же час, враховуючи, що випадкові точки, згенеровані стохастичним алгоритмом, мають різну щільність в різних регіонах, що може призвести до

нерівномірного просторового розподілу точок вибірки і вплинути на точність класифікації. Для вирішення цієї проблеми було використано GRID-модель, що покриває всю територію України, центроїд кожного блоку використовується як точка вибірки зразків.

Враховуючи встановлені обмеження дослідження, з метою отримання якомога більшої кількості супутникових зображень було обрано період з квітня по листопад.

### **РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ЗМІН ПОКРИВУ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ В УКРАЇНІ, 2000-2021 РР.**

Зміна землекористування/земного покриву є одним з найбільш наочних проявів процесу регіонального розвитку, а його динамічні характеристики не лише відображають ступінь впливу людської діяльності на навколишнє природне середовище, але й розкривають внутрішні закономірності регіонального соціально-економічного розвитку. Серед багатьох типів земельного покриву особливої уваги заслуговує зміна сільськогосподарських угідь не тільки тому, що вона тісно пов'язана з продовольчою безпекою, але й тому, що сільськогосподарські угіддя часто перебувають у складних трансформаційних відносинах з іншими типами угідь. Точне розуміння мінливих характеристик сільськогосподарських земель вимагає систематичного просторово-часового аналізу, заснованого на класифікації всієї категорії земельного покриву, щоб повністю зрозуміти її місце і роль у регіональних змінах землекористування.

Україна, як одна з найбільших сільськогосподарських країн світу, зазнала значних змін у структурі використання земельних ресурсів у 2000-2021 роках під впливом багатьох факторів, таких як соціально-економічні перетворення, модернізація сільського господарства та регіональні конфлікти, а сільськогосподарські угіддя країни та пов'язані з ними типи ґрунтового покриву зазнали глибоких перетворень. Ці зміни не лише впливають на потенціал виробництва продовольства в Україні, але й мають значний вплив на світові ринки сільськогосподарської продукції через її статус світової житниці. Тому поглиблений аналіз особливостей змін сільськогосподарських угідь та пов'язаних з ними типів земного покриву на основі комплексної класифікації земного покриву має велике значення для розуміння динаміки використання ресурсів сільськогосподарських угідь.

У цьому дослідженні використовується метод растрових операцій на основі алгебри карт для визначення характеристик просторового розподілу

зміни типів землекористування шляхом накладання карт класифікації землекористування 2000 та 2021 років, і, відповідно, починається математичний розрахунок, щоб всебічно проаналізувати зміни за 21 рік. Порівняно з традиційним векторним оверлейним аналізом, метод растрових обчислень має значні переваги у вигляді високої обчислювальної ефективності та низького споживання ресурсів. Зокрема, карти класифікації землекористування у векторному форматі спочатку перетворюються на растрові дані з однаковою просторовою роздільною здатністю та присвоюються унікальні кодові значення для різних типів земель. Потім за допомогою простих та ефективних операцій растрової алгебри отримують нові шари, що відображають зміни у землекористуванні, підраховують кількість пікселів з різними кодовими комбінаціями та об'єднують фактичну площу пікселів, щоб остаточно зробити вичерпний висновок про зміни у землекористуванні. Цей метод не тільки дозволяє уникнути складних топологічних операцій і великих витрат пам'яті при аналізі векторного накладання, але також може швидко впоратися з аналізом змін у землекористуванні на великих територіях, що особливо підходить для вивчення динамічного моніторингу землекористування на великих територіях (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Метод растрової алгебри



### 3.1. Розроблення методики застосування строгих числових методів координатних операцій

#### 3.1.1 Аналіз пропорційних змін у структурі землекористування

Коефіцієнт структури землекористування (Land Use Structure Ratio) є базовим показником, що відображає частку кожного типу землекористування в загальній земельній площі регіону, і розраховується за формулою (3.1):

$$P_i = S_i/S \times 100\%, \quad (3.1)$$

де  $P_i$  – частка (%) площі і-го типу землекористування;  $S_i$  – площа і-го типу землекористування;  $S$  - загальна площа досліджуваної території.

За результатами класифікації земного покриву у 2000, 2021 роках було розраховано площі шести типів земель, які відображають кількісні зміни у типах землекористування в Україні протягом 2000-2021 років.

Площі та частки різних типів землекористування наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

#### Частка в структурі землекористування

Значення	Клас	2000рік		2021рік		чистий темп зміни, %
		Відсотки, %	Площа, км <sup>2</sup>	Відсотки, %	Площа, км <sup>2</sup>	
10	Землі сільськогосподарського призначення	75.57	452382.95	63.88	382379.50	-11.69%
20	Ліси	20.59	123258.99	23.20	138865.95	2.61%
30	Пасовища	0.13	805.93	9.81	58733.63	9.68%
40	Міські території	1.09	6536.35	0.29	1720.86	-0.80%
50	Водні об'єкти	2.61	15649.21	2.80	16777.49	0.19%
60	Інше.	0.00	0.00	0.03	156.01	0.03%

За результатами аналізу структури землекористування (таблиця 3.1), структура землекористування в Україні за період 2000-2021 рр. зазнала значних змін. З точки зору структури землекористування, сільськогосподарські землі завжди були найбільш домінуючим типом землекористування в Україні. у 2000 році сільськогосподарські землі

становили 452 382,92 км<sup>2</sup>, що становило 75,57% від загальної земельної площі країни, за ними йшли лісові землі площею 123 258,99 км<sup>2</sup>, що становило 20,59% від загальної площі. Ці два типи земель займають загалом 96,16% території країни, що відображає типову для України структуру землекористування агролісогосподарського комплексу.

Протягом 2000-2021 років структура землекористування в Україні зазнала значних змін. Найбільш помітними змінами є:

- 1) значне зменшення площі сільськогосподарських угідь до 382 379,50 км<sup>2</sup>, а їхня частка впала до 63,88%, тобто на 11,69 відсоткових пунктів;
- 2) значне розширення площі пасовищ з 805,93 км<sup>2</sup> до 58 733,63 км<sup>2</sup>, а їхня частка зросла з 0,13% до 9,81%, тобто на 9,68 відсоткових пунктів;
- 3) збільшення площі лісових угідь з 0,13% до 9,81%, тобто на 9,68 відсоткових пунктів.

Площа лісових земель зросла помірно, збільшившись до 138 865,95 км<sup>2</sup>, а частка зросла до 23,20%, тобто на 2,61 відсоткових пункти. Зміни в інших типах земель були відносно невеликими, включаючи незначне збільшення площі водних об'єктів (з 15 649,21 км<sup>2</sup> до 16 777,49 км<sup>2</sup>, збільшення на 0,19%) та невелике зменшення площі забудованої території (з 6 536,35 км<sup>2</sup> до 1 728,86 км<sup>2</sup>, зменшення на 0,80%).

Головною особливістю змін у землекористуванні за цей період було переведення сільськогосподарських угідь в інші типи землекористування, особливо значним був перехід до пасовищних угідь. Така структура перепрофілювання відображає той факт, що структура землекористування в Україні переживає перехід від єдиного типу з домінуванням сільського господарства до більш диверсифікованої, але сільськогосподарські землі залишаються абсолютно домінуючими.

### 3.1.2 Коефіцієнт зміни землекористування (Land Use Change Rate)

На основі аналізу пропорційної зміни структури землекористування подальше кількісне визначення тенденції зміни кожного типу землекористування допоможе глибше зрозуміти особливості розподілу та трансформації земельних ресурсів на досліджуваній території. Відносну зміну площі кожного типу землекористування можна розрахувати за допомогою коефіцієнта зміни землекористування, який є базовим показником, що використовується для кількісної оцінки величини зміни площі типів землекористування протягом певного періоду часу. Формула має такий вигляд

$$R = \frac{U_b - U_a}{U_a} \cdot 100\% , \quad (3.2)$$

де  $R$  – темп зміни типу землекористування протягом досліджуваного періоду (%);

$U_a$  – площа типу землекористування в початковий момент часу;

$U_b$  – площа типу землекористування на кінцевий момент.

На основі статистичних даних результати розрахунків наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

#### Значення змін площ у 2000 та 2021 році

Значення	Клас	Площа в 2000 році, км <sup>2</sup>	Площа в 2021 році, км <sup>2</sup>	Зміна площі, км <sup>2</sup>	Темпи зміни (%)
10	Землі сільськогосподарського призначення	452382.95	382379.50	-70003.45	-15.47
20	Ліси	123258.99	138865.95	15606.96	12.66
30	Пасовища	805.93	58733.63	57927.7	7187.68
40	Міські території	6536.35	1720.86	-4815.49	-73.67
50	Водні об'єкти	15649.21	16777.49	1128.28	7.21
60	Інше	0.00	156.01	156.01	-

З даних, наведених у таблиці 3.2, видно, що зміни у землекористуванні в Україні за період 2000-2021 рр. характеризуються значними змінами. З точки зору абсолютної величини змін площі, на досліджуваній території відбулися масштабні перетворення між типами землекористування. Найбільш драматичними змінами є зменшення площі сільськогосподарських угідь ( $-70003,45 \text{ км}^2$ ) та збільшення площі пасовищ ( $+57927,7 \text{ км}^2$ ), схожість обсягів зміни площі між цими двома типами угідь дозволяє припустити, що між ними може існувати прямий зв'язок конверсії. Площа лісів збільшилася на  $15606,96 \text{ км}^2$ , що є другим за величиною типом збільшення, що свідчить про те, що досліджувана територія, можливо, зазнала певної міри процесу екологічного відновлення.

З точки зору відносної швидкості змін, спостерігалися значні відмінності в інтенсивності змін землекористування між типами. Найбільш різких змін зазнали пасовища, площа яких зросла на  $7187,68\%$ , збільшившись з  $805,93 \text{ км}^2$  у 2000 році до  $58\,733,63 \text{ км}^2$  у 2021 році, і це значне збільшення може бути пов'язане із занедбаністю сільськогосподарських угідь. Площа міських земель зменшилася на  $73,67\%$ , з  $6536,35 \text{ км}^2$  до  $1720,86 \text{ км}^2$ , що є значним скороченням, яке заслуговує на подальше вивчення. На противагу цьому, лісові землі та водні об'єкти продемонстрували відносно помірну тенденцію до зростання -  $12,66\%$  та  $7,21\%$  відповідно.

### ***3.1.3 Ступінь динамічності землекористування (Land Use Dynamic Degree)***

Ступінь динамічності землекористування (СДЗ) є важливим показником для кількісного опису швидкості зміни типів регіонального землекористування, який ( $K$ ) може характеризувати швидкість трансформації типу землекористування протягом періоду дослідження, або відобразити просторово-часові характеристики зміни землекористування на комплексному рівні ( $L$ ).

Формула його розрахунку виглядає так:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} * \frac{1}{T} * 100\% \quad (3.3)$$

$$L = \frac{\sum |U_b - U_a|}{2 * \sum U_a} * \frac{1}{T} * 100\% \quad (3.4)$$

де  $K$  – відношення (у відсотках) типу землекористування протягом досліджуваного періоду;

$U_a$  – площа типу землекористування в початковій точці;

$U_b$  – площа типу землекористування в кінці періоду дослідження;

$T$  – тривалість періоду дослідження (роки).

Виходячи з вищенаведеної формули, результати розрахунків наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

**Зміна площ залежно від типу земельного покриття**

Значення	Клас	Зміна площі (км <sup>2</sup> )	$K(\%)$
10	Землі сільськогосподарського призначення	-70003,45	-0,74
20	Ліси	15606,96	0,60
30	Пасовища	57927,7	342,27
40	Міські території	-4815,49	-3,51
50	Водні об'єкти	1128,28	0,34
60	Інше	156,01	---
L = 0,60			

За період 2000-2021 рр. зміни у землекористуванні на досліджуваній території відповідають характеристиці «локальна різка, загальна стабільність». Інтегральна динаміка землекористування ( $L$ ) становить 0,60%, що вказує на те, що загальне землекористування на досліджуваній території перебуває у відносно стабільному процесі еволюції, з середнім показником близько 0,60% земель, що зазнають зміни типу щороку. Однак, єдине динамічне

відношення (*K*) різних типів землекористування демонструє значну диференціацію характеристик, що відображає внутрішню мінливість реструктуризації землекористування.

Зокрема, пасовища показали найбільш значну тенденцію до розширення: їхня мотивація досягла 342,27%, а площа збільшилася з 805,93 км<sup>2</sup> до 58 733,6 км<sup>2</sup>. Міські землі скоротилися з показником -3,51%, зменшившись з 6536,35 км<sup>2</sup> до 1720,86 км<sup>2</sup>. Сільськогосподарські землі також показали негативну тенденцію -0,74%, а загальна кількість земель зменшилася на 70003,5 км<sup>2</sup>, що є відносно помірним і близьким до загальної тенденції досліджуваної території.

Лісові землі та водні об'єкти демонструють незначну позитивну динаміку, з тенденцією 0,60% та 0,34% відповідно, що за величиною схоже на загальну тенденцію (0,60%), що свідчить про те, що зміни в цих двох типах земель гармонійно поєднуються із загальною еволюцією регіону. Варто зазначити, що площа інших типів земель зросла з нуля до 156,01 км<sup>2</sup>, що є невеликим показником в абсолютному вираженні, але заслуговує на увагу.

### **3.2 Аналіз характеристик передачі типу землекористування – побудова матриці передачі землі**

Матриця трансформації землекористування (МТЗ) є важливим аналітичним інструментом для кількісного опису динамічних змін регіонального землекористування, який систематично показує взаємозв'язок конверсії між різними типами землекористування протягом досліджуваного періоду у вигляді матриці.

Цей метод дозволяє не тільки виявити структурні характеристики змін у землекористуванні, але й точно кількісно оцінити масштаби та напрямки конверсії між різними типами землекористування, забезпечуючи наукове підґрунтя для поглибленого розуміння еволюції регіонального землекористування, математичний вираз якого виглядає наступним чином, де горизонтальні рядки вказують на кінцевий напрямок типів

землекористування, а стовпці - на початкові типи землекористування [119]:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

де  $P$  – площа типу землекористування та кількість типів землекористування.  $i$  - тип землекористування на початку дослідження,  $j$  - тип землекористування в кінці, а  $P_{ij}$  – ймовірність переходу від типу  $i$  до типу  $j$  за наступних умов, з діагональною лінією, що позначає тип землі, який не змінився.

Чиста зміна ( $D_j$ ) представляє різницю в загальній кількості. Чиста зміна для категорії земного покриття – це різниця між часткою в початковий період і часткою в кінцевий період, тобто різниця між підсумками рядків і підсумками стовпців для певної категорії земного покриття в матриці, причому результат береться як абсолютна величина. Він розраховується за наступною формулою [119]:

$$D_j = |P_{+j} - P_{j+}| \quad (3.6)$$

де  $P_{+j}$  – частка земного покриття категорії  $J$  на початку дослідження;

$P_{j+}$  – частка земного покриття категорії  $J$  на кінець дослідження.

Однак, чиста зміна відображає лише пропорційну зміну певної категорії земельного покриття і не може відображати зміну просторового розташування цієї категорії земельного покриття. Наприклад, якщо сільськогосподарські землі вилучаються для будівництва, а та ж сама площа сільськогосподарських земель компенсується в іншому місці, то чиста зміна сільськогосподарських земель дорівнює нулю, але фактичне просторове розташування змінилося. Цей тип змін називається обміном ( $S_j$ ), який відноситься до прибутків і збитків для категорії земель у різних місцях і розраховується як подвоєна мінімальна величина прибутків і збитків [119]. Цей показник обчислюється за наступною формулою:

$$S_j = 2 * \text{MIN}(P_{+j} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj}) \quad (3.7)$$

Загальна зміна категорії земного покриття, яка є сумою чистої зміни та зміни внаслідок обміну, розраховується за такою формулою:

$$C_j = D_j + S_j \quad (3.8)$$

Згідно з даними, наведеними у таблиці 3.4, всі типи землекористування в Україні змінилися, але масштаби змін не є очевидними. Найбільшою категорією земельного покриття є орні землі, за нею йдуть ліси та пасовища, а потім міські та забудовані землі.



Таблиця 3.4

## Матриця передачі земного покриву 2000-2021 рр. (%)

	Клас	Площі станом на 2021 рік, км <sup>2</sup>						Всього	
		Землі сільськогосподарського призначення	Ліси	Пасовища	Міські території	Водні об'єкти	Інше	2000( $P_{i+}$ )	Втрати
Площі станом на 2020 рік, км <sup>2</sup>	Землі сільськогосподарського призначення	369257.29	32976.75	48933.90	582.51	588.50	44.24	452383.18	83125.90
	Ліси	9079.87	104038.69	8859.34	99.18	1174.81	7.20	123259.11	19220.41
	Пасовища	278.57	134.82	379.98	9.38	2.67	0.45	805.88	425.90
	Міські території	3301.65	1151.18	389.71	981.43	610.50	101.67	6536.15	5554.71
	Водні об'єкти	464.76	564.96	170.28	46.21	14400.52	2.39	15649.12	1248.60
Всього	2021( $P_{+j}$ )	382382.15	138866.40	58733.21	1718.72	16777.00	155.96	598633.43	
	Приріст	13124.86	34827.71	58353.23	737.29	2376.48	155.96		

Таблиця 3.5

## Зведені дані про зміни ландшафту

Клас		Площа в 2000 році (км <sup>2</sup> )	Площа в 2021 році (км <sup>2</sup> )	Абсолютна величина чистої зміни, $D_j$	Приріст	Втрати	Обмін, $S_j$	Всього зміни, $C_j$
10	Землі сільськогосподарського призначення	452382.95	382379.50	13124.86	83125.90	26249.72	96253.17	13124.86
20	Ліси	123258.99	138865.95	34827.71	19220.41	38440.82	54047.78	34827.71
30	Пасовища	805.93	58733.63	58353.23	425.90	851.80	58779.50	58353.23
40	Міські території	6536.35	1720.86	737.29	5554.71	1474.57	6290.06	737.29
50	Водні об'єкти	15649.21	16777.49	2376.48	1248.60	2497.20	3625.48	2376.48
60	Інше	0.00	156.01	155.96	0.00	0.00	156.01	155.96

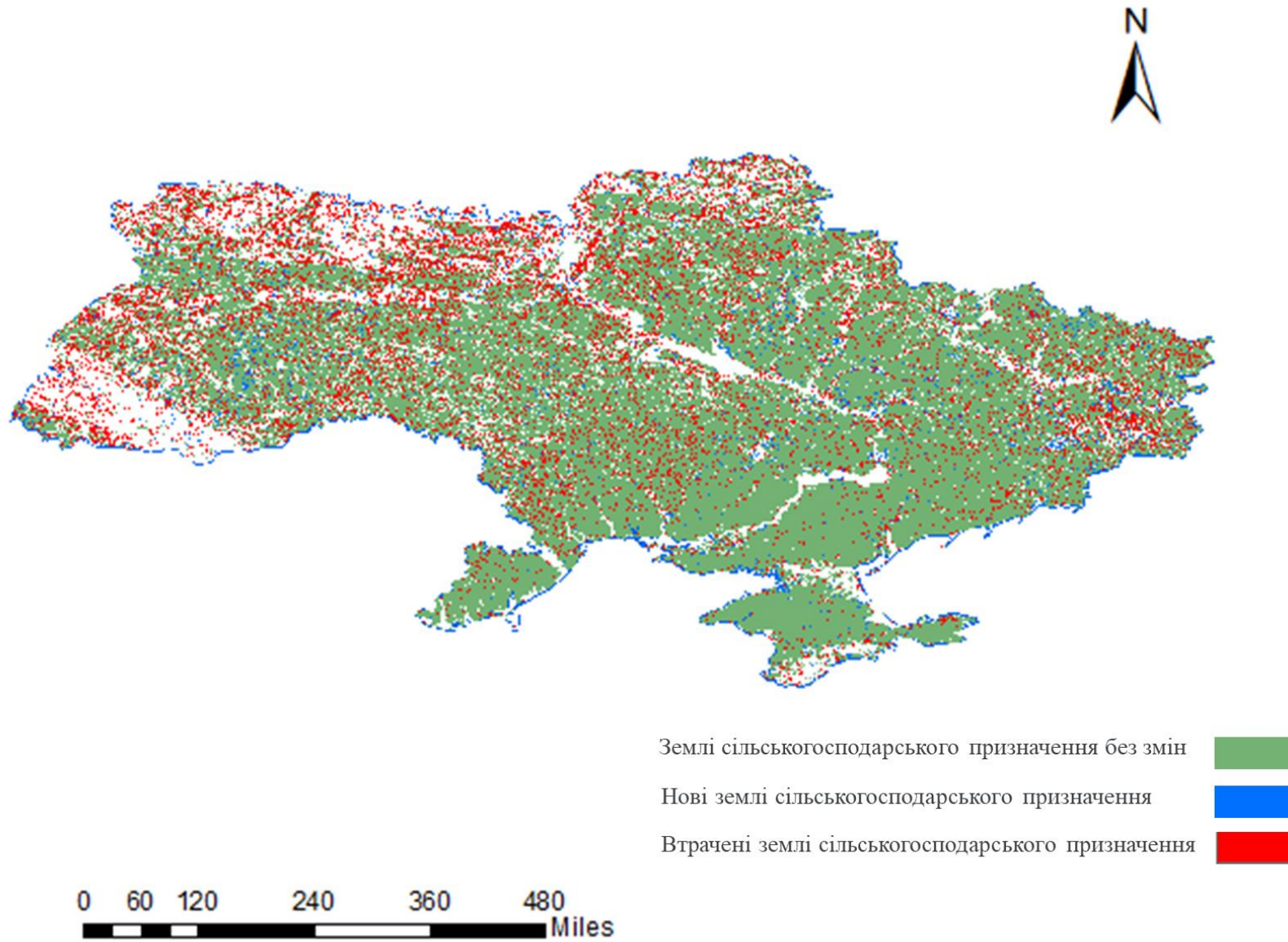


Рис. 3.2. Тематична карта кількісних змін земель сільськогосподарського призначення (виконано автором)

Згідно з даними таблиці 3.4, Зміни землекористування в Україні протягом 2000-2021 років демонструють складні структурні перетворення. На основі аналізу матриці трансформації, сільськогосподарські землі зазнали найбільш значних динамічних змін: загальна площа зменшилася з 452 383,18 км<sup>2</sup> до 382 382,15 км<sup>2</sup>, з чистим відтоком 83 125,90 км<sup>2</sup> та притоком 13 124,86 км<sup>2</sup>, що демонструє найбільший масштаб втрат та відносно невеликий приріст. Особливо примітним є те, що ліси та пасовища показують значну тенденцію до розширення: ліси отримали чистий приріст 34 827,71 км<sup>2</sup> при втратах лише 19 220,41 км<sup>2</sup>; пасовища демонструють ще більш виражену тенденцію до розширення з чистим притоком 58 353,23 км<sup>2</sup>, що значно перевищує їх втрати (425,90 км<sup>2</sup>). Міські території демонструють унікальне явище "скорочення": чисті втрати становлять 5 554,71 км<sup>2</sup> при притоку лише 737,29 км<sup>2</sup>, що призвело до зменшення загальної площі з 6 536,15 км<sup>2</sup> до 1 718,72 км<sup>2</sup>. Водні об'єкти, хоча і демонструють високу стабільність (коефіцієнт утримання 92,0%), все ж мають приріст 2 376,48 км<sup>2</sup> та втрати 1 248,60 км<sup>2</sup>, що вказує на динамічну рівновагу. Нова категорія землекористування, що з'явилася у 2021 році (155,96 км<sup>2</sup>), повністю сформувалася за рахунок переходу з інших категорій, переважно з міських територій (101,67 км<sup>2</sup>) та сільськогосподарських земель (44,24 км<sup>2</sup>).

Згідно з даними таблиці 3.5, Зміни землекористування в Україні протягом 2000-2021 років демонструють значну просторову реорганізацію. Аналіз чистих змін ( $D_j$ ), обмінних змін ( $S_j$ ) та загальних змін ( $C_j$ ) для кожного типу землекористування показує, що сільськогосподарські землі, незважаючи на чисте зменшення на 13 124,86 км<sup>2</sup>, мають значний обмінний показник у 96 253,17 км<sup>2</sup>, що свідчить про масштабний процес просторового перерозподілу цього типу землекористування. Пасовища демонструють найбільш виражену тенденцію до розширення з чистим збільшенням на 58 353,23 км<sup>2</sup> та обмінними змінами у 58 779,50 км<sup>2</sup>, що відображає масштабну реорганізацію просторового розподілу цього типу земель. Лісові території показують відносно збалансовану модель змін із чистим приростом у

34 827,71 км<sup>2</sup> та обмінними змінами у 54 047,78 км<sup>2</sup>, що вказує на те, що процес розширення супроводжувався значним просторовим заміщенням. Міські території, попри чисте зменшення на 737,29 км<sup>2</sup>, мають обмінні зміни у 6 290,06 км<sup>2</sup>, що свідчить про значну просторову реструктуризацію. Водні об'єкти демонструють помірніші зміни з чистим збільшенням на 2 376,48 км<sup>2</sup> та обмінними змінами у 3 625,48 км<sup>2</sup>. Нова категорія інших земель (клас – 60), відсутня у 2000 році, показує чисте збільшення на 155,96 км<sup>2</sup> без обмінних змін. Ці дані поглиблюють розуміння змін землекористування, особливо виявляючи процеси просторової реорганізації, які неможливо спостерігати лише через аналіз чистих змін.

### **3.3 Висновки до Розділу 3**

У цьому розділі були отримані такі результати:

1. Встановлено, що головною особливістю змін у землекористуванні за цей період було переведення сільськогосподарських угідь в інші типи землекористування, особливо значним був перехід до пасовищних угідь. Така структура перепрофілювання відображає той факт, що структура землекористування в Україні переживає перехід від єдиного типу з домінуванням сільського господарства до більш диверсифікованої, але сільськогосподарські землі залишаються абсолютно домінуючими.

2. Для аналізу просторово-часових змін типів земельного покриву, в тому числі земель сільськогосподарського призначення, була використана матриця трансформації землекористування для кількісного опису динамічних змін регіонального землекористування, який систематично показує взаємозв'язок конверсії між різними типами землекористування протягом досліджуваного періоду у вигляді матриці. Цей метод дозволяє не тільки виявити структурні характеристики змін у землекористуванні, але й точно кількісно оцінити масштаби та напрямки конверсії між різними типами землекористування, забезпечуючи наукове підґрунтя для поглибленого розуміння еволюції регіонального землекористування.

3. На основі отриманих даних класифікацій встановлено, що зміни землекористування в Україні протягом 2000-2021 років демонструють складні структурні перетворення. Землі сільськогосподарського призначення зазнали найбільш значних динамічних змін: загальна площа зменшилася з 452 383,18 км<sup>2</sup> до 382 382,15 км<sup>2</sup>, з чистим відтоком 83 125,90 км<sup>2</sup> та притоком 13 124,86 км<sup>2</sup>, що демонструє найбільший масштаб втрат та відносно невеликий приріст.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано ряд теоретичних, емпіричних та практичних досліджень з метою підвищення ефективності моніторингу земель сільськогосподарського призначення на основі використання методів дистанційного зондування Землі, хмарної технології Google Earth Engine та геоінформаційного моделювання і отримано основні наукові та практичні результати:

1. Проаналізовано існуючий стан та тенденції застосування методів ДЗЗ для вирішення моніторингових завдань. Як результат аналізу, було встановлено, що у порівнянні з традиційними платформами обробки зображень, завдяки підтримці масивної бази даних GEE і потужних можливостей обробки даних, платформа хмарних обчислень GEE може швидко й ефективно створювати й обробляти сотні безхмарних смуг зображень дистанційного зондування протягом багатьох років, генерувати куби та застосувати алгоритм випадкового лісу в класифікаторах машинного навчання. Обґрунтовано вибір хмарної технології GEE для моніторингу земель сільськогосподарського призначення. Завдяки високій точності класифікації та результатам візуального огляду продукти класифікації землекористування можуть відповідати подальшому аналізу виявлення змін і можуть використовуватися для динамічного моніторингу та нагляду за сільськогосподарськими землями. Це відіграє важливу роль у всебічному розумінні змін у використанні сільськогосподарських земель та підвищення якісного рівня захисту, моніторингу та нагляду.

2. Розроблено технологічну модель застосування методів ДЗЗ моніторингу земель сільськогосподарського призначення, яка передбачає використання платформи GEE для оперативного опрацювання супутникових зображень та інтерпретації отриманих результатів класифікації і тематичних індексів.

3. Розроблено методику виконання керованої класифікації ансамблевим методом машинного навчання Random forest, що дозволило досить швидко

опрацювати супутникові зображення на всю територію України станом на 2000, 2014 та 2021 роки.

4. Розроблено і реалізовано метод швидкого збору еталонних зразків, який базується на створеному коді програмування в хмарній платформі GEE, а дані зображень дистанційного зондування, що використовуються, отримуються онлайн з хмарної платформи GEE. А виконання програми попередньої обробки та аналізу зображень забезпечувалось у режимі реального часу шляхом написання коду. Результати досліджень доводять, що інтегрована обробка та паралельні обчислення значно підвищують ефективність роботи, заощаджують простір локального зберігання та ефективно вирішують тривалий і трудомісткий процес отримання та класифікація інформації про ґрунтовий покрив із традиційних зображень дистанційного зондування.

5. Розроблено методику визначення точності результатів керованої класифікації ансамблевим методом машинного навчання Random forest, на основі якої було виконано оцінку точності результатів керованої класифікації земель сільськогосподарського призначення. Було встановлено загальну точність 86% – 82%.

6. Виконано геоінформаційне моделювання просторово-часових змін земель сільськогосподарського призначення в Україні у 2014-2021 роках. За отриманими результатами дослідження було встановлено, що структура типів землекористування сільськогосподарських угідь в Україні з 2000 по 2021 рік є відносно стабільною, частка оброблених земель залишається на рівні понад 59%, лісів і луків та інших має тенденцію до зростання, тоді як оброблювані землі та землі під забудову демонструють тенденція до зниження. У той час як сільськогосподарські угіддя перетікають у лісові угіддя, лісові угіддя перетікають у сільськогосподарські угіддя Ці зміни відбуваються переважно в у всіх областях України. Проте загальна стабільність оброблюваних земель відносно висока. Кількість оброблюваних земель, що зменшилася, розподіляється біля західних і південних областей, тоді як кількість



оброблених земель, що дещо збільшилася, переважно розташована біля південно-західного регіону.

Результати досліджень забезпечують ефективний геоінформаційний моніторинг земель сільськогосподарського призначення на основі використання методів ДЗЗ, хмарної технології Google Earth Engine та геоінформаційного моделювання, насамперед у сферах топографо-геодезичній та картографічній діяльності, земельних відносин, що впливає на якість прийняття управлінських рішень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Glossary | DataBank. (n.d.). URL: <https://databank.worldbank.org/metadataglossary/world-development-indicators/series/AG.LND.AGRI.K2> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
2. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point. (2022). FAO eBooks. URL: <https://doi.org/10.4060/cb9910en> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
3. Climate change impacts on agriculture and food supply | US EPA. (2023, September 8). Retrieved from <https://www.epa.gov/climateimpacts/climate-change-impacts-agriculture-and-food-supply> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
4. Agriculture and climate change: impacts, mitigation and adaptation - OECD. URL: <https://www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/agriculture-and-climate-change.htm> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
5. Постанова Кабінет Міністрів України від 23 липня 2024 р. № 848 «Про затвердження Порядку проведення моніторингу земель і ґрунтів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/848-2024-%D0%BF#Text>
6. United Nations. (n.d.). Millennium Summit | United Nations. URL: <https://www.un.org/en/conferences/environment/newyork2000> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
7. Wang, X., Shu, L., Han, R., Yang, F., Gordon, T., Wang, X., & Xu, H. (2023). A survey of farmland boundary extraction technology based on remote sensing images. *Electronics*, 12(5), 1156. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12051156>.
8. Pan, J., Wei, Z., Zhao, Y., Zhou, Y., Lin, X., Zhang, W., & Tang, C. (2022). Enhanced FCN for farmland extraction from remote sensing image. *Multimedia Tools and Applications*, 81(26), 38123-38150. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-022-12141-6>.
9. Wei, Z., Gu, X., Sun, Q., Hu, X., & Gao, Y. (2021). Analysis of the spatial and temporal pattern of changes in abandoned farmland based on long time series

- of remote sensing data. *Remote Sensing*, 13(13), 2549. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13132549>.
10. Brown, J. C., Kastens, J. H., Coutinho, A. C., de Castro Victoria, D., & Bishop, C. R. (2013). Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time-series MODIS vegetation index data. *Remote Sensing of Environment*, 130, 39-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.009>.
  11. Alcantara, C., Kuemmerle, T., Baumann, M., Bragina, E. V., Griffiths, P., Hostert, P., ... & Radeloff, V. C. (2013). Mapping the extent of abandoned farmland in Central and Eastern Europe using MODIS time series satellite data. *Environmental Research Letters*, 8(3), 035035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035035>.
  12. Wang, C., Fan, Q., Li, Q., SooHoo, W. M., & Lu, L. (2017). Energy crop mapping with enhanced TM/MODIS time series in the BCAP agricultural lands. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 124, 133-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.12.002>.
  13. Hereher, M. E. (2009). Inventory of agricultural land area of Egypt using MODIS data. *Egypt J Remote Sens Space Sci*, 12, 179-184. URL: <https://www.researchgate.net/publication/265991707> (дата звернення: 06.09.2024 p.).
  14. Shapla, T., Park, J., Hongo, C., & Kuze, H. (2015). Agricultural land cover change in Gazipur, Bangladesh, in relation to local economy studied using Landsat images. *Advances in Remote Sensing*, 4(03), 214. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ars.2015.43017>
  15. Gong, P., Wang, J., Yu, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, L., ... & Chen, J. (2013). Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7), 2607-2654. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.748992>.
  16. Alam, A., Bhat, M. S., & Maheen, M. (2020). Using Landsat satellite data for assessing the land use and land cover change in Kashmir

valley. *GeoJournal*, 85, 1529-1543. DOI:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10708-019-10037-x>.

17. Wang, Q., Li, J., Jin, T., Chang, X., Zhu, Y., Li, Y., ... & Li, D. (2020). Comparative analysis of Landsat-8, Sentinel-2, and GF-1 data for retrieving soil moisture over wheat farmlands. *Remote Sensing*, 12(17), 2708. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172708>.
18. Luo, K., & Moiwo, J. P. (2022). Rapid monitoring of abandoned farmland and information on regulation achievements of government based on remote sensing technology. *Environmental Science & Policy*, 132, 91-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.02.019>
19. Szatmári, D., Feranec, J., Goga, T., Rusnák, M., Kopecká, M., & O'ahel', J. (2021). The Role of Field Survey in the Identification of Farmland Abandonment in Slovakia Using Sentinel-2 Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 47(4), 569-587. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.2021.1929118>.
20. Zhan, D., Mu, Y., Duan, W., Ye, M., Song, Y., Song, Z., ... & Ding, Z. (2023). Spatial Prediction and Mapping of Soil Water Content by TPE-GBDT Model in Chinese Coastal Delta Farmland with Sentinel-2 Remote Sensing Data. *Agriculture*, 13(5), 1088. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13051088>.
21. Wang, H. P., Lei, T. C., Chu, T. H., Shiu, Y. S., & Lee, R. Y. (2015). A STUDY OF SPECTRAL FEATURE EXTRACTION METHODS FOR CROPS CLASSIFICATION BASE ON WORLDVIEW-2 IMAGE. In *ACRS 2015-36th Asian Conference on Remote Sensing: Fostering Resilient Growth in Asia, Proceedings*. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=44d75fac68bf0bbcfb2988efa5bf690534203bdf> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
22. Stefanski, J., Kuemmerle, T., Chaskovskyy, O., Griffiths, P., Havryluk, V., Knorn, J., ... & Waske, B. (2014). Mapping land management regimes in

- western Ukraine using optical and SAR data. *Remote Sensing*, 6(6), 5279-5305. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6065279>.
23. Dirgahayu, D., & Parsa, I. M. (2019, June). Detection Phase Growth of Paddy Crop Using SAR Sentinel-1 Data. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 280, No. 1, p. 012020). IOP Publishing. DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/280/1/012020>.
  24. Ma, W., Xin, Z., Huang, X., & Zhang, S. (2021). Overview of speckle noise suppression methods in SAR image based on NLM. In *Smart innovation, systems and technologies*. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3391-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3391-1_7).
  25. Painam, R. K., & Manikandan, S. (2021). A comprehensive review of SAR image filtering techniques: systematic survey and future directions. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06416-1>.
  26. Choi, S., Lee, S., Kang, Y., Choi, D. Y., & Choi, J. (2020). Use of unmanned aerial vehicle imagery and deep learning UNet to classification upland crop in small scale agricultural land. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 38(6), 671-679. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19183859>.
  27. Diaz-Varela, R. A., Zarco-Tejada, P. J., Angileri, V., & Loudjani, P. (2014). Automatic identification of agricultural terraces through object-oriented analysis of very high resolution DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle. *Journal of environmental management*, 134, 117-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.006>.
  28. Lee, R. Y., Chang, K. C., Ou, D. Y., & Hsu, C. H. (2020). Evaluation of crop mapping on fragmented and complex slope farmlands through random forest and object-oriented analysis using unmanned aerial vehicles. *Geocarto International*, 35(12), 1293-1310. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1559886>.
  29. Mesas-Carrascosa, F. J., Clavero Rumbao, I., Torres-Sánchez, J., García-Ferrer, A., Peña, J. M., & López Granados, F. (2017). Accurate ortho-

- mosaicked six-band multispectral UAV images as affected by mission planning for precision agriculture proposes. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2161-2176. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2016.1249311>.
30. Ruwaimana, M., Satyanarayana, B., Otero, V., M. Muslim, A., Syafiq A, M., Ibrahim, S., ... & Dahdouh-Guebas, F. (2018). The advantages of using drones over space-borne imagery in the mapping of mangrove forests. *PloS one*, 13(7), e0200288. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200288>.
  31. Nasirzadehdizaji, R., Sanli, F. B., Cakir, Z., & Sertel, E. (2019, July). Crop mapping improvement by combination of optical and SAR datasets. In *2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)* (pp. 1-6). *IEEE*. DOI: <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820604>.
  32. Gaetano, R., Cozzolino, D., D'Amiano, L., Verdoliva, L., & Poggi, G. (2017, July). Fusion of SAR-optical data for land cover monitoring. In *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 5470-5473). *IEEE*. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8128242>.
  33. Dusseux, P., Corpetti, T., Hubert-Moy, L., & Corgne, S. (2014). Combined use of multi-temporal optical and radar satellite images for grassland monitoring. *Remote Sensing*, 6(7), 6163-6182. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6076163>.
  34. Wu, M., Zhang, X., Huang, W., Niu, Z., Wang, C., Li, W., & Hao, P. (2015). Reconstruction of daily 30 m data from HJ CCD, GF-1 WFV, Landsat, and MODIS data for crop monitoring. *Remote Sensing*, 7(12), 16293-16314. <https://doi.org/10.3390/rs71215826>.
  35. Wang, Q., Li, J., Jin, T., Chang, X., Zhu, Y., Li, Y., ... & Li, D. (2020). Comparative analysis of Landsat-8, Sentinel-2, and GF-1 data for retrieving soil moisture over wheat farmlands. *Remote Sensing*, 12(17), 2708. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172708>.
  36. Blaschke, T., Lang, S., Lorup, E., Strobl, J., & Zeil, P. (2000). Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and

- perspectives for environmental applications. *Environmental information for planning, politics and the public*, 2(1995), 555-570. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:6468398> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
37. Watts JD, Lawrence RL. Merging random forest classification with an object-oriented approach for analysis of agricultural lands. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008;37(B7):2008. URL: [https://www.researchgate.net/publication/266879416\\_Merging\\_random\\_forest\\_classification\\_with\\_an\\_object-oriented\\_approach\\_for\\_analysis\\_of\\_agricultural\\_lands](https://www.researchgate.net/publication/266879416_Merging_random_forest_classification_with_an_object-oriented_approach_for_analysis_of_agricultural_lands) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
38. Lu, H., Liu, C., Li, N., Fu, X., & Li, L. (2021). Optimal segmentation scale selection and evaluation of cultivated land objects based on high-resolution remote sensing images with spectral and texture features. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 27067-27083. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-12552-2>.
39. Luo, K., Li, B., & Moiwo, J. P. (2018). Monitoring Land-Use/Land-Cover changes at a provincial large scale using an object-oriented technique and medium-resolution remote-sensing images. *Remote Sensing*, 10(12), 2012. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10122012>.
40. Goodin, D. G., Anibas, K. L., & Bezymennyi, M. (2015). Mapping land cover and land use from object-based classification: An example from a complex agricultural landscape. *International Journal of Remote Sensing*, 36(18), 4702-4723. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1088674>.
41. Long, J. A., Lawrence, R. L., Greenwood, M. C., Marshall, L., & Miller, P. R. (2013). Object-oriented crop classification using multitemporal ETM+ SLC-off imagery and random forest. *GIScience & Remote Sensing*, 50(4), 418-436. DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2013.817150>.

42. Законодавство України. Земельний кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
43. Про охорону земель: Закон України від 19 червня 2003 р. № 962-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
44. Про Державний земельний кадастр: Закон України від 07.07.2011 № 3613-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
45. Про оцінку земель: Закон України від 11.12.2003 № 1378-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1378-15#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
46. Про меліорацію земель: Закон України від 14.01.2000 № 1389-XIV URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1389-14#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
47. Цивільний кодекс України. Кодекс України; Закон, Кодекс від 16.01.2003 № 435-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
48. Кодекс України про адміністративні правопорушення (статті 1 - 212-24): Кодекс України; Закон, Кодекс від 07.12.1984 № 8073-X: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
49. Кримінальний кодекс України. Кодекс України; Кодекс, Закон від 05.04.2001 № 2341-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
50. Про землеустрій: Закон України від 22.05.2003 № 858-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
51. Попрозман Н. В., Коробська А. О. Стан та тенденції використання земельних ресурсів сільськогосподарського призначення в контексті



- національної безпеки держави. Державне управління: удосконалення та розвиток. 2018. № 11. DOI: 10.32702/2307-2156-2018.11.3.
52. Новаковська І.О., Іщенко Н.Ф., Скрипник Л.Р. Проблеми збереження та охорони земель на сучасному етапі. *Проблеми системного підходу в економіці*. 2021. № 5. DOI: <https://doi.org/10.32782/2520-2200/2021-5-6>.
53. Третяк А. М., Третяк В. М., Трофименко П. І., Прядка Т. М., Трофименко Н. В. Стале (збалансоване) землекористування: понятійний базис та методологія інституціалізації. *Агросвіт*. 2021. № 24. С. 11–22. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2021.24.11>
54. Кохан, С. С. (2011). Застосування вегетаційних індексів на основі серії космічних знімків IRS-1D LISS-III для визначення стану посівів сільськогосподарських культур. *Космічна наука і технологія*, 17(5), 58-63. URL: <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2011-17/knit-2011-17-5-07.pdf> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
55. Kokhan, S., Vostokov, A., Drozdovskyi, O., Dorozhynskyy, O., & Burshtynska, K. (2020). Improved approach to the development of the crop monitoring system based on the use of multi-source spatial data. *Journal of Ecological Engineering*, 21(7), 108-114. DOI: <http://dx.doi.org/10.12911/22998993/125442>.
56. Кохан С.С., Востоков А.Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи. –К.: Вища шк. –2009. –511 с.
57. Лазоренко-Гевель Н. Ю. Геоінформаційне забезпечення моніторингу природних комплексів / Н. Ю. Лазоренко-Гевель // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. ; відп. ред. М. М. Осетрін. - Київ : КНУБА, 2012. - Вип. 44. - С. 291 - 299. - Бібліогр. : 10 назв. URI: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/10374>.
58. Лазоренко, Н. Ю. (2010). Аналіз стану організації системи моніторингу навколишнього природного середовища в Україні. *Інженерна геодезія*,

- (56), 187-194. URL: <https://www.researchgate.net/publication/354373960> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
59. Карпінський Ю. О., Лазоренко-Гевель Н. Ю. (2018) Методи збирання геопросторових даних для топографічного картографування. *Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. Збірник наукових праць*, 2018. Вип. I (35). С. 204–211. URL: <http://gki.com.ua/ua/metodi-zbirannja-geoprostorovih-danih-dlja-topografichnogo-kartografuvannja>.
  60. Karpinskyi, Y., Lyashchenko, A., Patrakeyev, I., & Ziborov, V. (2023, March). Poly-scale principle of urban environment geoinformation monitoring. In IOP Conference Series. *Earth and Environmental Science* (Vol. 1150, No. 1, p. 012006). IOP Publishing. DOI: 10.1088/1755-1315/1150/1/012006.
  61. Pilarska-Mazurek, M., Bakula, K., Górka, J., Czernic, P., Lejzerowicz, A., Ostrowski, W., & Chetverikov, B. (2024). Synergy of remote sensing data collected with low-cost mobile mapping platform for detection and prediction of damages: a park alley case study. *ARCHIVES OF CIVIL ENGINEERING*, 70(3). DOI: <http://dx.doi.org/10.24425/ace.2024.151006>.
  62. USDA ERS - Land Use, Land Value & Tenure. (n.d.). Retrieved from <https://www.ers.usda.gov/topics/farm-economy/land-use-land-value-tenure/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
  63. Farmland Protection Policy Act | Natural Resources Conservation Service. URL: <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/land/cropland/farmland-protection-policy-act> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
  64. Farm Security and Rural Investment Act of 2002 (2002 - H.R. 2646). Retrieved from <https://www.govtrack.us/congress/bills/107/hr2646> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
  65. USDA ERS - Agricultural Act of 2014: Highlights and implications. Retrieved from <https://www.ers.usda.gov/agricultural-act-of-2014-highlights-and-implications/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).

66. Sorensen, A., & Daukas, J. (2010). Policy approaches to energy and resource use in US agriculture. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25(2), 109-117. doi:10.1017/S1742170510000086.
67. Liu, X., Zhao, C., & Song, W. (2017). Review of the evolution of cultivated land protection policies in the period following China's reform and liberalization. *Land use policy*, 67, 660-669. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.07.012>
68. Lichtenberg, E., & Ding, C. (2008). Assessing farmland protection policy in China. *Land use policy*, 25(1), 59-68.
69. Shi, X., Gao, X., & Fang, S. (2022). Land System Reform in Rural China: Path and Mechanism. *Land*, 11(8), 1241. <https://doi.org/10.3390/land11081241>.
70. Liu, S. (2023). The First Half of China's Land Reform, and the Next Stage. In *Land System Reform and China's Economic Development* (pp. 3-51). Singapore: Springer Nature Singapore. DOI: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-99-6733-9>.
71. Wang, J., Lin, Y., Glendinning, A., & Xu, Y. (2018). Land-use changes and land policies evolution in China's urbanization processes. *Land use policy*, 75, 375-387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.011>.
72. Sun, Y., Li, H., Guo, G., Semple, K. T., & Jones, K. C. (2019). Soil contamination in China: Current priorities, defining background levels and standards for heavy metals. *Journal of environmental management*, 251, 109512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109512>.
73. Zhang, L., Wang, W., Ma, Q., Hu, Y., Ma, H., & Zhao, Y. (2024). CCropLand30: High-resolution hybrid cropland maps of China created through the synergy of state-of-the-art remote sensing products and the latest national land survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108672. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108672>.
74. Waldner, F., Fritz, S., Di Gregorio, A., Plotnikov, D., Bartalev, S., Kussul, N., ... & Defourny, P. (2016). A unified cropland layer at 250 m for global

- agriculture monitoring. *Data*, 1(1), 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/data1010003>.
75. Liu, F., Dong, L., Chang, X., & Guo, X. (2022). Remote sensing image classification based on object-oriented convolutional neural network. *Frontiers in Earth Science*, 10, 988556. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.988556>.
76. Tang, J., Zhang, X., Chen, Z., & Bai, Y. (2022). Crop Identification and Analysis in Typical Cultivated Areas of Inner Mongolia with Single-Phase Sentinel-2 Images. *Sustainability*, 14(19), 12789. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912789>.
77. Wang, L., Zhao, X., Engel, B., Wang, L., Xu, C., & Zhao, Y. (2022, July). A Review of Crop Recognition Methods Based on Multi-source Remote Sensing Data. In International Conference on Artificial Intelligence and Security (pp. 571-585). Cham: Springer International Publishing. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-06764-8\\_44](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-06764-8_44).
78. Rosle, R., Che'Ya, N. N., Ang, Y., Rahmat, F., Wayayok, A., Berahim, Z., ... & Omar, M. H. (2021). Weed detection in rice fields using remote sensing technique: A review. *Applied sciences*, 11(22), 10701. <https://doi.org/10.3390/app112210701>.
79. Xiong, D. (2014). Crop growth remote sensing monitoring and its application. *Sensors & Transducers*, 169(4), 174. URL: [https://www.researchgate.net/publication/286819608\\_Crop\\_Growth\\_Remote\\_Sensing\\_Monitoring\\_and\\_its\\_Application](https://www.researchgate.net/publication/286819608_Crop_Growth_Remote_Sensing_Monitoring_and_its_Application).
80. Cheng, T., Yang, Z., Inoue, Y., Zhu, Y., & Cao, W. (2016). Preface: Recent advances in remote sensing for crop growth monitoring. *Remote Sensing*, 8(2), 116. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8020116>.
81. Tian, Y., Yang, C., Huang, W., Tang, J., Li, X., & Zhang, Q. (2021). Machine learning-based crop recognition from aerial remote sensing imagery. *Frontiers of Earth Science*, 15, 54-69. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11707-020-0861-x>.

82. Gonzalo-Martín, C., Lillo-Saavedra, M., Menasalvas, E., Fonseca-Luengo, D., García-Pedrero, A., & Costumero, R. (2016). Local optimal scale in a hierarchical segmentation method for satellite images: An OBIA approach for the agricultural landscape. *Journal of Intelligent Information Systems*, 46, 517-529. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10844-015-0365-4>.
83. Sarker, I. H. (2021). Deep learning: a comprehensive overview on techniques, taxonomy, applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(6), 420. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-021-00815-1>.
84. Yao, J., Wu, J., Xiao, C., Zhang, Z., & Li, J. (2022). The classification method study of crops remote sensing with deep learning, machine learning, and Google Earth engine. *Remote Sensing*, 14(12), 2758. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14122758>.
85. Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 152, 166-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>.
86. CAP at a glance. (2023, September 21). Retrieved from [https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-glance\\_en](https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-glance_en) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
87. Integrated Administration and Control System (IACS) / IACS-GIS geographical information techniques. (n.d.). Retrieved from [https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/financing-cap/assurance-and-audit/managing-payments\\_en](https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/financing-cap/assurance-and-audit/managing-payments_en) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
88. USDA - National Agricultural Statistics Service - about NASS - mission and core values. (n.d.). Retrieved from [https://www.nass.usda.gov/About\\_NASS/Mission\\_Statement/](https://www.nass.usda.gov/About_NASS/Mission_Statement/) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
89. CropScape - NASS CDL Program. (n.d.). Retrieved from <https://nassgeodata.gmu.edu/CropScape/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).

90. C. Boryan et al., 2011, Monitoring US agriculture: the US Department of Agriculture, National Agricultural Statistics Service, Cropland Data Layer Program, Geocarto International, 26:5, 341-358, DOI: 10.1080/10106049.2011.562309.
91. Annual Crop Inventory - open government portal. (n.d.). Retrieved from <https://open.canada.ca/data/en/dataset/ba2645d5-4458-414d-b196-6303ac06c1c9> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
92. Annual Crop Inventory 2021 - Open Government portal. (n.d.). Retrieved from <https://open.canada.ca/data/en/dataset/199e4ab6-832b-4434-ac39-e4887d7cc4e5> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
93. WU BF, Z. M., & ZENG, H. (2019). Twenty years of CropWatch: Progress and prospect. *Journal of Remote Sensing*, 23(6), 1053-1063.
94. Young, S. (2023, July 11). How many satellites are in space? The spike in numbers continues. Retrieved from <https://blog.ucs.org/syoung/how-many-satellites-are-in-space-the-spike-in-numbers-continues/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
95. Houska, T. (2012). *earthexplorer* (No. 136). US Geological Survey.
96. GEOSS Portal. (n.d.). GEOSS Portal. Retrieved from <https://www.geoportal.org/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
97. China Remote Sensing Satellite Ground Station Data Sharing Portal . Retrieved from <https://www.chinageoss.cn/rsgs/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
98. Earth on AWS. Retrieved from <https://aws.amazon.com/earth> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
99. CODE DE. Retrieved from <https://code-de.org/en/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
100. CBAS China. Retrieved from <https://sdg.casearth.cn/en> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
101. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for

- everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
102. Introducing Google Earth Engine. Retrieved from <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/introducing-google-earth-engine/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
103. Earth Engine Pricing | Google Cloud. (n.d.). Retrieved from <https://cloud.google.com/earth-engine/pricing> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
104. PIE-Engine. Pixel Information Expert Engine <https://engine.piesat.cn/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
105. Planetary computer. Retrieved from <https://planetarycomputer.microsoft.com/> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
106. Multi-Mission Algorithm and Analysis Platform (MAAP). Retrieved from <https://www.earthdata.nasa.gov/esds/maap> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
107. Biomass EarthData Dashboard. Retrieved from <https://www.earthdata.nasa.gov/maap-biomass/products> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
108. Mahdianpari, M., Salehi, B., Mohammadimanesh, F., Homayouni, S., & Gill, E. (2018). The first wetland inventory map of newfoundland at a spatial resolution of 10 m using sentinel-1 and sentinel-2 data on the google earth engine cloud computing platform. *Remote Sensing*, 11(1), 43.
109. Geography of Ukraine. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Geography\\_of\\_Ukraine](https://en.wikipedia.org/wiki/Geography_of_Ukraine) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
110. «Про Державну службу України з питань геодезії, картографії та кадастру»: Постанова Кабінету Міністрів України; Положення від 14.01.2015 № 15. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15-2015-%D0%BF#Text> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
111. Global administrative boundaries <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/jrc-10112-10004> (дата звернення: 06.09.2024 р.).

112. Україна отримала статус кандидата на членство в ЄС <https://www.kmu.gov.ua/news/ukrayina-otrimala-status-kandidata-na-chlenstvo-v-yes> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
113. Loveland, T. R., & Irons, J. R. (2016). Landsat 8: The plans, the reality, and the legacy. *Remote Sensing of Environment*, 185, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.033>.
114. Pour, A. B., Ranjbar, H., Sekandari, M., Abd El-Wahed, M., Hossain, M. S., Hashim, M., ... & Muslim, A. M. (2023). Remote sensing for mineral exploration. In *Geospatial analysis applied to mineral exploration* (pp. 17-149). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95608-6.00002-0>
115. Landsat Missions. Landsat Collection 2 Level-1 Data. URL <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-1-data> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
116. Jarvis, A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara. 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database: <https://srtm.csi.cgiar.org> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
117. MCD12Q1.061 MODIS Land Cover Type Yearly Global 500m. URL: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS\\_061\\_MCD12Q1](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MCD12Q1) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
118. LUCAS - Land use and land cover survey. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=LUCAS\\_-\\_Land\\_use\\_and\\_land\\_cover\\_survey](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=LUCAS_-_Land_use_and_land_cover_survey) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
119. Ren, L. (2023). Дослідження змін типів земельного покриття в Україні на основі даних дистанційного зондування землі. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*, (1), 127-140. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2023.01.12>
120. Weih, R. C., & Riggan, N. D. (2010). Object-based classification vs. pixel-based classification: Comparative importance of multi-resolution imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(4), C7. URL:



[https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/4-c7/pdf/weih\\_81.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/4-c7/pdf/weih_81.pdf) (дата

звернення: 06.09.2024 р.).

121. Olaode, A., Naghdy, G., & Todd, C. (2014). Unsupervised classification of images: a review. *International Journal of Image Processing*, 8(5), 325-342. URL: <https://www.researchgate.net/publication/265729668>  
[Unsupervised Classification of Images A Review](#) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
122. Pritt, M., & Chern, G. (2017, October). Satellite image classification with deep learning. In *2017 IEEE applied imagery pattern recognition workshop (AIPR)* (pp. 1-7). IEEE. URL: <https://arxiv.org/pdf/2010.06497>
123. Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (2017). *Classification and regression trees*. Routledge. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315139470>.
124. Talukdar, S., Singha, P., Mahato, S., Shahfahad, Pal, S., Liou, Y.-A., & Rahman, A. (2020). Land-Use Land-Cover Classification by Machine Learning Classifiers for Satellite Observations—A Review. *Remote Sensing*, 12(7), 1135. <https://doi.org/10.3390/rs12071135>
125. Supervised Classification: <https://developers.google.com/earth-engine/guides/classification> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
126. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>.
127. Slagter, B., Tsendbazar, N. E., Vollrath, A., & Reiche, J. (2020). Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: A case study in the St. Lucia wetlands, South Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 86, 102009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102009>.
128. Cracknell, M. J., & Reading, A. M. (2014). Geological mapping using remote sensing data: A comparison of five machine learning algorithms, their response to variations in the spatial distribution of training data and the use of explicit spatial information. *Computers & Geosciences*, 63, 22-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.008>.

129. Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., & Skakun, S. (2017). Exploring Google Earth Engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping. *frontiers in Earth Science*, 5, 232994. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>.
130. Burges, C. J. (1998). A tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data mining and knowledge discovery*, 2(2), 121-167. URL: <https://www.di.ens.fr/~mallat/papiers/svmtutorial.pdf>
131. Oommen, T., Misra, D., Twarakavi, N. K., Prakash, A., Sahoo, B., & Bandopadhyay, S. (2008). An objective analysis of support vector machine based classification for remote sensing. *Mathematical geosciences*, 40, 409-424. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11004-008-9156-6>.
132. Landsat URL: <https://woodcare.tistory.com/m/entry/%EC%9B%90%EA%B2%A9%ED%83%90%EC%82%AC-Landsat-%EC%9C%84%EC%84%B1-%EC%A0%95%EB%A6%AC> (дата звернення: 06.09.2024 р.).
133. Kshetri, T. (2018). NDVI, NDBI & NDWI calculation using Landsat 7, 8. *GeoWorld*, 2, 32-34. URL: [https://www.researchgate.net/publication/327971920\\_NDVI\\_NDBI\\_NDWI\\_Calculation\\_Using\\_Landsat\\_7\\_8](https://www.researchgate.net/publication/327971920_NDVI_NDBI_NDWI_Calculation_Using_Landsat_7_8) (дата звернення: 06.09.2024 р.).
134. Liu, J., Ren, Y., & Chen, X. (2023). Regional Accuracy Assessment of 30-Meter GLC\_FCS30, GlobeLand30, and CLCD Products: A Case Study in Xinjiang Area. *Remote Sensing*, 16(1), 82. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16010082>.
135. Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 159-174. DOI: <https://doi.org/10.2307/2529310>.
136. Fitzgerald, R. W., & Lees, B. G. (1994). Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data. *Remote sensing of Environment*, 47(3), 362-368. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90103-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90103-1).

137. Tsendbazar, N. E., de Bruin, S., Mora, B., Schouten, L., & Herold, M. (2016). Comparative assessment of thematic accuracy of GLC maps for specific applications using existing reference data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 44, 124-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.08.009>.
138. Cui, P., Chen, T., Li, Y., Liu, K., Zhang, D., & Song, C. (2023). Comparison and Assessment of Different Land Cover Datasets on the Cropland in Northeast China. *Remote Sensing*, 15(21), 5134. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15215134>.

## ДОДАТКИ

## Додаток А.

## Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження



Вих. № \_\_\_\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Жень Лея

на тему «Застосування методів ДЗЗ для моніторингу використання земель сільськогосподарського призначення»

Державне підприємство «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії» в особі т.в.о. директора Дьоміна Станіслава Володимировича підтверджує, що результати дисертаційного дослідження Жень Лея на тему «Застосування методів ДЗЗ для моніторингу використання земель сільськогосподарського призначення» за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» були впроваджені у науковій та виробничій діяльності підприємства.

Розроблена технологічна модель застосування методів ДЗЗ моніторингу земель сільськогосподарського призначення на основі супутникових знімків Landsat за 2000-2021 роки на територію України з роздільною здатністю 30 м, а також геопросторові дані класифікованих знімків за типом земного покриття були враховані під час створення сервісів національного геопорталу Національної інфраструктури геопросторових даних, а саме моніторинг посівів.

Розроблена технологія дозволяє оперативно виявляти зміни площ типів земельного покриття, забезпечення контролю та охорони земель сільськогосподарського призначення за цільовим призначенням у реальному часі.

ТВО директора



Станіслав ДЬОМІН