

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий фізико-технічний інститут
Кафедра математичного моделювання та аналізу даних**

«На правах рукопису»
УДК 004.93

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри

«__» _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Математичні методи моделювання,
розпізнавання образів та комп'ютерного зору»
зі спеціальності 113 «Прикладна математика»
на тему: «Метод оцінювання індикаторів цілі сталого розвитку 15.3.1 на
основі супутникових даних для території України»**

Виконав (-ла):

студент 2 курсу, групи ФІ-11мп
Дякун Олексій Олегович

Керівник: Професор, д.т.н., Шелестов Андрій Юрійович

Рецензент:

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»

Факультет/ІНІ Навчально-науковий фізико-технічний інститут
(повна назва)

Кафедра Кафедра математичного моделювання та аналізу даних
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність, спеціалізація 113 прикладна математика
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Математичні методи моделювання, розпізнавання образів та комп'ютерний зір»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Дякуну Олексію Олеговичу

1. Тема дисертації «Метод оцінювання індикаторів цілі сталого розвитку 15.3.1 на основі супутникових даних для території України»
науковий керівник дисертації Шелестов Андрій Юрійович, професор, д.т.н
затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Строк подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження Ціль сталого розвитку 15.3.1 _____
4. Предмет дослідження (Вихідні дані – для магістерської дисертації за ОПП/ОНП) Методи оцінювання індикаторів ЦСР 15.3.1 _____
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1 Ознайомлення з методологією підрахунку обчислення індикатора 15.3.1

2 Підрахунок для України індикатора

3 Порівняння з річними результатами

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій 35

8. Дата видачі завдання 05.10.2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Дослідження документації Trends.Earth.	01.09 – 15.09	Виконано
2	Дослідження попередніх робіт, пошук датасетів.	16.09– 23.09	Виконано
3	Аналіз глобальних продуктів	24.09– 08.10	Виконано
4	Розрахунок ЦСР 15.3.1 з земним покривом ІКД НАНУ-ДКАУ з більшим просторовим розрширенням та порівняння з глобальними даними	09.10 – 23.10	Виконано
5	Аналіз отриманої карти деградації при збільшеному масштабі за власними даними для сільськогосподарських культур, міст та річок.	24.10-8.11	Виконано
6	Написання магістерської дисертації.	9.11-23.11	Виконано

Студент _____ Дякун Олексій Олегович

Науковий керівник дисертації _____ Шелестов Андрій Юрійович

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить: 59 сторінок, 50 рисунків, 1 таблицю, 36 посилань на літературні джерела.

Актуальність дослідження: дослідження сучасних методів, моделей та технологій класифікації земного покриву та оцінювання індикаторів цілей сталого розвитку 15.3.1. Наразі ця область активно розвивається по всьому світу і, зокрема, в Україні, під егідою ООН, комітетом GEO тощо. Саме тому тема магістерської дисертації є актуальною.

Зв'язок дослідження з науковими програмами, планами, темами: Роботу виконано в межах проекту e-Share програми HORIZON 2020 та програми ЦСР (Цілі сталого розвитку), яка була прийнята Генеральною асамблеєю ООН у 2015.

Об'єкт дослідження: методи підрахунку ЦСР 15.3.1

Мета і задачі дослідження: у цій роботі описані існуючі методи розрахунку субіндикаторів для індикатора ЦСР 15.3.1. Розраховується зміна земного покриву за даними відділу космічних інформаційних ІКД НАНУ-ДКАУ та порівнюється з раніше порахованими і перевіреними UNCCD результатами. Дослідження методів покращення результатів.

Методи дослідження: методи системного аналізу, інтелектуальні методи обчислень, методи обробки геопросторової інформації, метрики оцінки якості моделей.

Наукова новизна одержаних результатів: серед глобальних даних ЦСР 15.3.1 матеріали щодо України відсутні. Існують інші роботи, які спеціалізовані на посухах на півдні України та вирубки лісів у Карпатах. Даний індикатор дозволяє побачити значно більше деградаційних процесів та змін, які ватро взяти до уваги та дослідити. Однією з особливостей те, що у якості вхідних даних використовуються карти класифікації, надані відділом космічних інформаційних ІКД НАНУ-ДКАУ.

Практичне значення одержаних результатів: надання інформації про території, які потребують заходів для покращення стану та зупинки процесів деградації.

Ключові слова: індикатор ЦСР 15.3.1, карта деградації, супутникові дані, лінійна регресія, земновий покрив, органічний вуглець, рівень вегетативності.

ABSTRACT

The thesis contains: 59 pages, 50 figures, 1 table, 36 references.

Relevance of the study: research of modern methods, models and technologies for the classification of the Land Cover and evaluation of indicators of Sustainable Development Goals 15.3.1. Currently, this area is actively developing around the world and, in particular, in Ukraine, under the auspices of the UN, the GEO committee, etc. That is why the topic of the master's thesis is relevant.

Connection of the study with scientific programs, plans, topics: The work was carried out within the framework of the e-Shape project of the HORIZON 2020 program and the SDG (Sustainable Development Goals) program, which was adopted by the UN General Assembly in 2015.

Research object: methods for counting SDG 15.3.1

The purpose and objectives of the study: this paper describes the existing methods for calculating subindicators for the SDG indicator 15.3.1. The change in Land Cover is calculated according to the Space Information Department of the NAS of Ukraine and is compared with the previously calculated and verified UNCCD results. Research methods for improving results.

Research methods: methods of system analysis, intelligent methods of computation, methods of processing geospatial information, metrics for assessing the quality of models.

Scientific novelty of the obtained results: among the global data of SDG 15.3.1 there are no materials for Ukraine. There are other works that are specialized in droughts in southern Ukraine and deforestation in the Carpathians. This indicator allows you to see much more degradation processes and changes that you can take into account and investigate. One of the features is that classification maps are used as input data, provided by the Institute of Space Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The practical significance of the results: providing information about the territories that need measures to improve the condition and stop the processes of degradation.

Keywords: SDG INDICATOR 15.3.1, DEGRADATION MAP, SATELITE DATA, LINEAR REGRESSION, LAND COVER, SOIL ORGANIC CARBON, PRODUCTIVITY.

Зміст

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ ТА ТЕРМІНИ	10
ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІНДИКАТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ	16
1.1 Індикатор ЦСР 15.3.1	16
1.2 Висновки за розділом 1.....	18
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА СХЕМА ОЦІНКИ ІНДИКАТОРУ 15.3.1	19
2.1 Підрахунок ЦСР 15.3.1 за субіндикаторами	19
2.2 Висновки за розділом 2.....	20
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА ГЕОПРОСТОРОВИХ ПРОДУКТІВ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ	22
3.1 Продуктивність або вегетація рослинності	22
3.2 Розрахунок продуктивності	28
3.3 Зміна земного покриву.....	30
3.4 Обчислення зміни земного покриву.....	30
3.5 Органічний вуглець ґрунту	31
3.6 Підрахунок органічного вуглецю	32
3.7 Висновки за розділом 3.....	33
РОЗДІЛ 4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕНЬ ІНДИКАТОРУ ЦСР 15.3.1 ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ.....	34
4.1 Нейронні мережі для задачі класифікації.....	34
4.2 Оцінка впливу субіндикаторів на підрахунок індикатору ЦСР 15.3.1 ..	46
4.3 Оцінка індикатора порашованого за глобальними продуктами	48

4.4 Аналіз отриманих результатів	52
4.5 Висновки за розділом 4	61
ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	63

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ ТА ТЕРМІНИ

ЦСР	— цілі сталого розвитку;
NPP (Net Primal Productivity)	— чиста первинна продуктивність;
UNCCD (UN Convention to Combat Desertification)	— Конвенція ООН по боротьбі з опустелюванням;
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	— нормалізований диференційний вегетаційний індекс;
Land Cover	— класифікаційна карта земного покриву;
Productivity	— субіндикатор та класифікаційна карта вегетації рослинності;
LPD (Land Productivity Dynamics)	— у деяких джерелах так позначається Productivity;
SOC (Soil Organic Carbon)	— субіндикатор та класифікаційна карта органічного вуглецю ґрунту;
Land Cover Change	— субіндикатор та класифікаційна карта зміни земного покриву;
ІКД НАНУ-ДКАУ	— Інститут космічних досліджень національна академії наук України та Державного космічного агенства ;

FAO WOCAT (Food and Agriculture Organization and the World Overview of Conservation Approaches and Technologies)	— Продовольча та сільськогосподарська організація і Всесвітній огляд підходів і технологій збереження;
JRC (Joint Research Centre)	— Об'єднаний дослідницький центр;
RNN (Recurrent Neural Network)	— рекурентна нейронна мережа;
LSTM (Long short-term memory)	— довга коротка мережа.

ВСТУП

На сьогоднішній день постала проблема деградації земель. Ця проблема стосується індикатору 15.3.1 «Відношення площі деградованих земель до загальної площі земель». Взагалі деградація землі — зниження біологічної чи економічної продуктивності врожайних земель, зрошуваних культур, ріллі, пасовища, лісових масивів. Таке визначення надає Конвенція Організації Об'єднаних націй по боротьбі з опустелюванням (UNCCD). Стосовно деградації землі ще одним важливим індикатором є 2.4.1 «Відношення продуктивних та стійких сільськогосподарських земель до всієї площі сільськогосподарських земель».

Технології оцінювання деградації земель за супутникових даних були розроблені UNCCD. Вони полягають у наступному підході: є джерело та методи, за допомогою яких отримуємо розрахунки у вигляді продукту. Даний продукт допомагає оцінити ступінь деградації згідно визначення ЦСР 15.3.1. У цьому допомагає плагін Trends.Earth для QGIS, що був розроблений Conservation International. Взагалі Trends.Earth надає можливість будувати часові ряди та індикатори зміни землі. Також є можливість будувати карти для індикаторів ЦСР 2.4.1, 11.3.1, 15.3.1 та інших. Продукт реалізовано в Google Earth Engine та масово використовується, особливо агенцією NASA. Але основним недоліком є має просторове розширення 300 метрів. Окрім цього наявно багато шуму.

Для геопросторових карт класифікації використовується фільтрація шумів. Але, на виході змінюється форма об'єктів, зникнення об'єктів визначених як шум. Ці фільтри використовуються до бінарного зображення.

Однією з серйозних проблем в Україні є вирубка лісів, що впливає на екологічні та соціально-економічні показники країни. Втрати України складають 1,08 млн. га лісів згідно «Global Forest Watch» з 2000 до 2020 року. Сучасними методами рішення є детекція змін між знімками (change detection), на часових рядах індексу вегетативності та пошук зміни тренду (breakpoints detection). Основною

проблемою є пошук правильного порогу для детекції вирубок. Така класифікація не дозволяє визначити поступову деградацію лісів.

Мета полягає у розробці нової методології оцінки сільськогосподарських земель та виявлення зон деградації лісів. Базуються вони на супутникових даних та біофізичного моделювання з використанням карт класифікації, що мають більші просторове розширення та точність. Дані карти отримані за допомогою нейромережових методів, враховують сівозміни та вегетаційні індекси при дослідженні часових рядів. Це дозволяє оцінити вплив людини на земний покрив, особливо виявляти деградацію землі в аграрному секторі. Також це дозволить протидіяти опустелюванню землі точною оцінкою індикаторами сталого розвитку.

Посуха та деградація землі є одними з найпоширеніших проблем України через зміну клімату а також людську діяльність.

Деградація землі, як визначено UNCCD, означає будь-яке зменшення або втрату біологічної чи економічної продуктивної здатності бази земельних ресурсів. Як правило, це спричинено діяльністю людини, посилюється природними процесами та тісно пов'язане зі зміною клімату і втратою біорізноманіття. Деградація земель знижує продуктивність сільського господарства та підвищує вразливість тих територій, які вже знаходяться під загрозою впливу мінливості та зміни клімату, особливо в регіонах світу.

Деградація земель — це «зменшення або втрата біологічної або економічної продуктивності та складності богарних орних угідь, зрошуваних орних угідь або пасовищ, пасовищ, лісів і лісистих угідь у результаті поєднання тиску, включаючи землекористування та методи управління» (UNCCD 1994, Стаття 1). [3]

Посуха – це складне явище, що починається повільно, і відбувається в різних часових масштабах. Характеризується зменшенням доступності води, що призводить до впливу на засоби існування людей та економічні сектори. Посуху

іноді спрощено визначають як період посушливої погоди, який достатньо тривалий, щоб викликати гідрологічний дисбаланс. Крім того, посуха не вникає як правило сама по собі. Вона швидше пов'язана з іншими небезпеками, такими як хвилі спеки, лісові пожежі, піщані/пилові бурі або повені.

Посуха все більше впливає на все більшу кількість людей, засоби до існування, екосистеми та економіку в усьому світі. Коли це відбувається одночасно з деградацією земель, це може піддати і без того вразливе населення шкідливим засобам існування, екологічним, соціально-економічним ризикам і ризикам для здоров'я та знизити стійкість населення та громади.

ЦСР — основні задачі, які були поставлені на саміті ООН у 2015 році на термін починаючи з 2015 року і закінчуючи 2030. Ці задачі містять 17 Глобальних цілей.

Документ «Перетворення нашого світу: Порядок денний в області сталого розвитку на період до 2030 року» генеральної асамблеї ООН має у собі план покращення стану світу таким чином, щоб у далекому майбутньому ми подолали проблеми, які заважають сталому та життєстійкому розвитку.

Такі цілі включають у собі:

- 1) Подолання бідності.
- 2) Подолання голоду, розвиток сільського господарства.
- 3) Міцне здоров'я та благополуччя
- 4) Якісна освіта
- 5) Гендерна рівність
- 6) Чиста вода та належні санітарні умови
- 7) Доступна та чиста енергія
- 8) Гідна праця та економічне зростання
- 9) Промисловість, інновації та інфраструктура
- 10) Скорочення нерівності. Сталий розвиток міст і громад

- 11) Відповідальне споживання та виробництво
- 12) Пом'якшення наслідків зміни клімату
- 13) Збереження морських ресурсів
- 14) Захист та відновлення екосистем суші
- 15) Мир, справедливість та сильні інститути
- 16) Партнерство заради сталого розвитку

На національному рівні Україна буде запроваджувати нові програми та проекти, які допоможуть вирішувати проблеми відносно цілей. Ця дипломна робота стосується цілі номер 15 [17]. Це може допомогти у боротьбі з опустелюванням земель, що відповідає цілям UNCCD, які були прийняті у 2015 та підтримана усіма її членами. Іншими словами ця робота підтримує програму нейтральна деградація земель, яка запобігає деградації та сприяє розумному використанню та управлінню природними ресурсами. Суттєві та узгоджені позитивні тенденції можуть підкреслити належні сільськогосподарські заходи або підвищення стійкості в екосистемі та продуктивності. Аналогічним чином негативні тенденції дають інформацію про те, на що слід звернути свою увагу.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІНДИКАТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

Одна з найвагоміших серед ЦСР є ціль 15. Описані існуючі рішення, частина з них - на основі геопросторової інформації. До складу напрямку ЦСР 15 входять наступні підцілі [19]:

15.1 Збереження та відновлення наземних та прісноводних екосистем;

15.2 Сприяння сталому управлінню лісами та його відновлення;

15.3 Припинення опустелювання та відновлення деградованих земель

15.4 Забезпечення гірських екосистем;

15.5 Захист біорізноманіття та природні середовища;

У цій роботі ми досліджуємо ціль 15.3 а саме індикатор 15.3.1 створені глобальні продукти, але є необхідність побудови більш точних продуктів для індикатора ЦСР 15.3.1 на основі регіональних продуктів або продуктів на рівні окремих країн.

1.1 Індикатор ЦСР 15.3.1

Основним завданням ЦСР 15 є моніторинг динаміки процесів деградації та запобігання їх виникненню в майбутньому. Основна задача полягає в оцінці ступеня деградації земель, що може бути використано особами, що приймають рішення, для забезпечення розумного використання природних ресурсів в інтересах країни, регіону тощо.

Роботи, на які є посилання нижче, мають розрахунки індикатора ЦСР для цілих країн.

У одній з попередніх робіт гіпотеза полягала в тому, що субіндикатори з вищим просторовим розширенням краще визначають загальну частку деградованих земель і забезпечать більш чітке уявлення про масштаби деградованих земель за період дослідження. Використання субіндикаторів порохованими за даними

відмінними від стандартних наборів, дозволила виявити на 25–40 % більше деградованих земель. Гіпотеза полягала в тому, що субіндикатори з вищим просторовим розрізненням краще визначають загальну частку деградованих земель. Були використані різні порогові значення для класифікації деградованості. Результати показали, що необхідні додаткові заходи для поліпшення ситуацій на інших територіях. У цій роботі акцент був зроблений на субіндикаторах: продуктивності та органічному вуглецю. У нащій роботі на зміні земного покриву [10].

Проведений схожий аналіз за датасетами, але розглядаються інший метод підрахунку продуктивності. Замість оціночної функції Тейла-Сена та статичного тесту Манна-Кендала використано коефіцієнт Хьорста (Hurst exponent) для розрахунку субіндикатора продуктивності для Басейну річки Хан з 2001 по 2019 рік [11].

Серед наявних робіт та даних на офіційних ресурсах, деякі дані стосовно України відсутні. Незважаючи на активний розвиток методології підрахунку, для оцінки та дослідження трендів країн не проводиться детально. – Отже, ця робота додатково робить внесок, досліджуючи дані території України [18].

На Trends.Earth були розміщені глобальні дані індикатора ЦСР 15.3.1. за субіндикатором продуктивність: FAO-WOCAT LPD та JRC LPD. Їх можна порівняти з Trends.Earth. На рис. 1.1 видно візуальну різницю між картами [2].



Рисунок 1.1 – Глобальні дані для території України.

Є дослідження покращення обчислення субіндикатора продуктивність [20]. Також є розрахунки органічного вуглецю [21].

Класифікація може бути виконаною за допомогою згорткової нейромережі. Наявний перелік існуючих рішень за допомогою інших нейромереж [23].

1.2 Висновки за розділом 1

Проведено аналіз методів, які застосовуються для обчислення ЦСР. З огляду на великий масштаб розв'язання задачі часто застосовуються геопросторові дані, а їх обробка здійснюється на основі інтелектуальних методів, зокрема, нейронних мереж.

На даний момент вже розроблено багато методик обчислення індикаторів ЦСР, в той же час для покращення якості та точності відповідних геопросторових продуктів використовують більш точні регіональні дані, або дані окремих країн.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА СХЕМА ОЦІНКИ ІНДИКАТОРУ 15.3.1

У цьому розділі розглянуто загальний робочий процес обчислення індикатору ЦСР 15.3.1. Та описані джерела даних, які можуть бути використані для розв'язання цієї задачі.

У кожного індикатора ЦСР є своє завдання. Індикатор ЦСР 15.3 спрямований на боротьбу з опустелюванням та посухами до 2030 року. Індикатор ЦСР 15.3.1 використовує інформацію з 3-ох інших субіндикаторів:

Productivity (Вегетації рослинності).

Land Cover (Ґрунтового покриву).

SOC (Органічного вуглецю ґрунту).

Індикатор ЦСР 15.3.1 є двійковою кількісною оцінкою (деградація/не деградація) на основі аналізу доступних даних для трьох субіндикаторів, які мають бути оцінені та надані національними органами влади. Субіндикатори (вегетація рослинності, зміна земного покриву та органічний вуглець) були прийняті керівним органом UNCCD у 2013 році в рамках підходу до моніторингу та оцінки ЦСР 15.3.1 [4].

2.1 Підрахунок ЦСР 15.3.1 за субіндикаторами

Використовується правило «One out — all out». Якщо спостерігається деградація на одному з субіндикаторів — індикатор відображає деградацію. На рис. 2.2 зеленим кольором відображається покращення, жовтим та фіолетовим — стабільний стан та погіршення відповідно.

Продуктивність	Земний покрив	Органічний вуглець		ЦСР 15.3.1
Покращення	Покращення	Покращення		Покращення
Покращення	Покращення	Стабільно		Покращення
Покращення	Покращення	Деградація		Деградація
Покращення	Стабільно	Покращення		Покращення
Покращення	Стабільно	Стабільно		Покращення
Покращення	Стабільно	Деградація		Деградація
Покращення	Деградація	Покращення		Деградація
Покращення	Деградація	Стабільно		Деградація
Покращення	Деградація	Деградація		Деградація
Стабільно	Покращення	Покращення		Покращення
Стабільно	Покращення	Стабільно		Покращення
Стабільно	Покращення	Деградація		Деградація
Стабільно	Стабільно	Покращення		Покращення
Стабільно	Стабільно	Стабільно		Стабільно
Стабільно	Стабільно	Деградація		Деградація
Стабільно	Деградація	Покращення		Деградація
Стабільно	Деградація	Стабільно		Деградація
Стабільно	Деградація	Деградація		Деградація
Деградація	Покращення	Покращення		Деградація
Деградація	Покращення	Стабільно		Деградація
Деградація	Покращення	Деградація		Деградація
Деградація	Стабільно	Покращення		Деградація
Деградація	Стабільно	Стабільно		Деградація
Деградація	Стабільно	Деградація		Деградація
Деградація	Деградація	Покращення		Деградація
Деградація	Деградація	Стабільно		Деградація
Деградація	Деградація	Деградація		Деградація

Рисунок 2.2 – Таблиця агрегації продуктивності, земного покриття та органічного вуглецю.

Карту деградації можна отримати шляхом агрегації продуктивності, земного покриття та органічного вуглецю ми маємо. Для обчислення відсотку деградованої землі, необхідно скористатися наступною формулою:

$$D = \frac{d+s}{T},$$

де D – відсоток деградованої землі, d – кількість пікселів зі станом деградації, s – у деяких випадках обчислюється кількість пікселів зі стабільним станом, T – загальна кількість пікселів [1,2].

2.2 Висновки за розділом 2

На основі аналізу методики обчислення індикаторів ЦСР 15.3.1 було отримано перелік складових геопросторових продуктів, які потрібно використовувати для розв'язання цієї задачі, а саме продуктивність, органічний вуглець та земний покрив. Для отримання субіндикатора по оцінці вмісту вуглецю можна скористатись глобальними продуктами: Harmonized World Soil Database (HWSD), SoilGrids250m Global SOC Map, Version 1.0. Вони мають просторове розширення 1 км, 250 м та 1 км відповідно. Через велике просторове розширення вибір зупиняється на SoilGrids250m, який пропонується Trends.Earth[2]. В якості основи для оцінки змін земного покриву можуть бути використані карти класифікації, які були отримані для території України з просторовим розрізненням 10 м [35]. Більш детально ці питання будуть розглянуті в наступних розділах. ЦСР 15.3.1 відображає ступінь посухи, деградації земель та зміни ландшафту. Дана оцінка отримується на основі продуктивності, земного покриву та органічного вуглецю, які пов'язані зі змінами ступеню вегетативності, земного покриву та залишками органічного вуглецю.

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА ГЕОПРОСТОРОВИХ ПРОДУКТІВ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

У цьому розділі описана методологія підрахунку субіндикаторів. За підрахунком кожного з субіндикаторів стоять супутникові дані та їх класифікація за допомогою математичної статистики і машинним навчанням.

3.1 Продуктивність або вегетація рослинності

Продуктивність відображає збільшення або зменшення рівня вегетації. Чиста первинна продуктивність (NPP) — це кількість вуглецю, асимільованого після фотосинтезу та автотрофного дихання за певний період часу. Його можна замінити нормалізованим різницеvim вегетаційним індексом NDVI. Саме він в більшості випадків і використовується.

Нормалізований різницеvim вегетаційним індексом (NDVI) — це індекс, який розраховується на основі коефіцієнта відбиття, виміряного дистанційними датчиками. NDVI не вимірює безпосередньо біомасу чи NPP. NDVI лінійно пов'язаний із часткою радіації, поглиненої зеленим листям під час фотосинтезу, що, у свою чергу, визначає значення NPP. Тому NDVI використовувався в багатьох дослідженнях для оцінки NPP. Зв'язок між NDVI та біомасою, як правило, також має позитивну кореляцію, але NDVI насичується (тобто перестає реагувати), коли біомаса висока. Залежність між NPP та NDVI зображена на рис. 3.1.

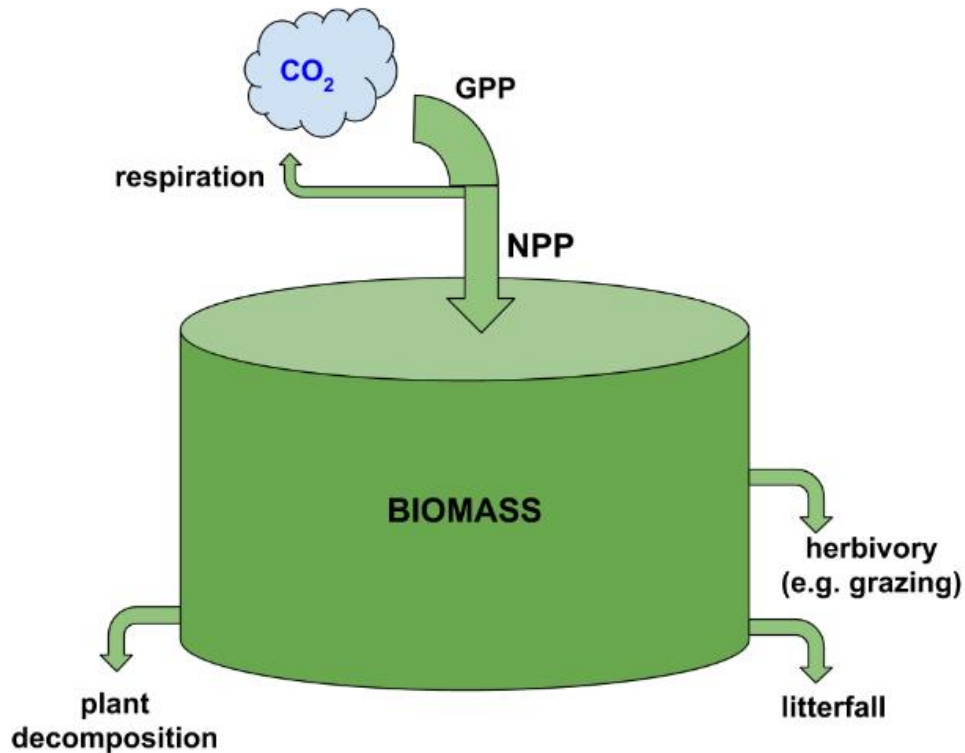


Рисунок 3.1 – Зв'язок NPP та NDVI [1].

Для обчислення продуктивності можуть бути використанні наступні дані [4]:

1. Продукти даних [MODIS](#), з усередненим просторовим розрізненням 250 м починаючи з 2000 року;
2. Продукти [Copernicus Global Land Service](#), з усередненим просторовим розрізненням 1 км. Дані наявні – починаючи з 1998 р.

Ці дані пов'язані з рівнем вегетації, які можна оцінити за допомогою лінійної регресії та статичних даних і провести необхідну класифікацію. Тобто, необхідно для початку отримати числові значення, які задаватимуть інтервал для кожного класу. Тобто, якщо значення пікселю потрапляє у інтервал класу — призначаємо йому цей клас.

Наступні три показники розраховується на основі NDVI:

1. Productivity Trajectory/Trend (траєкторія/тренд продуктивності) — підраховує швидкість зміни з часом за допомогою лінійної регресії, щоб визначити області пікселів, які зазнають змін у первинній продуктивності.
2. Productivity State (стан продуктивності) — показує поточні зміни первинної продуктивності у порівнянні з базовим періодом.
3. Productivity Performance (результат продуктивності) — порівнює первинну продуктивність локальної території з однаковим типом рослинності по всій досліджуваній території за інший період.

Тенденція продуктивності описує траєкторію зміни продуктивності в довгостроковій перспективі на піксельному рівні. Тренд розраховується за допомогою надійної непараметричної моделі лінійної регресії (рис. 3.2), такої як медіана Тіель-Сена [6], яка нагадує метод найменших квадратів та лінійну регресію, але є більш надійним методом Використовується показник Манна-Кендала 'Z' [8] для визначення нахилу тренду. Позитивні оцінки Z вказують на тенденцію до зростання продуктивності, а негативні – на зниження продуктивності. Z-оцінки відображають величину нахилу, причому більші позитивні або негативні бали вказують на більш статистично значущий нахил. Чорні точки даних показують незначну тенденцію зростання річної продуктивності протягом базового періоду. Сині точки показують значне збільшення, а червоні точки показують значне зменшення за той самий період. Тобто, відрізки, які використовуються у п'ятирівневій шкалі для інтерпретації нахилу градієнта тренду продуктивності відображає ймовірність того, що випадкове значення належить нормально розподіленій вибірці NPP. У певному сенсі Z-показник представляє кількість стандартних відхилень від середнього значення вибірки. Значення Z також можна інтерпретувати з точки зору ймовірності появи значення даних за межами цієї відстані від середнього (значення P) і статистичної впевненості в тому, що значення не виникло випадково. Більш детально про це у [9].

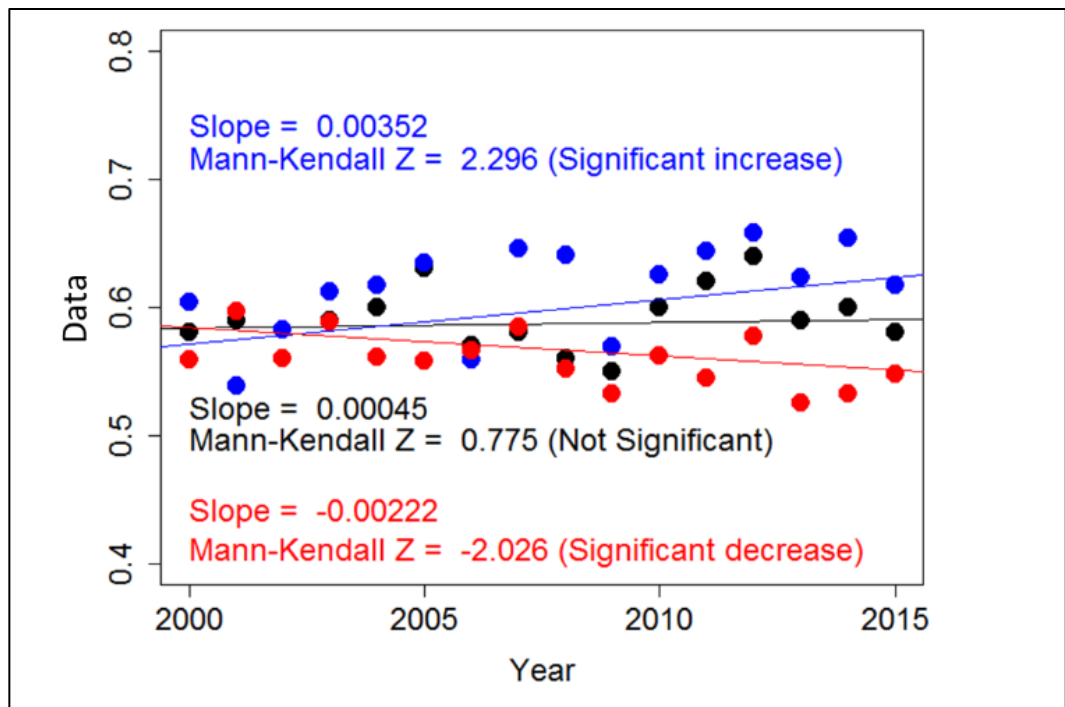


Рисунок 3.2 — Mann-Kendall 'Z' [1].

Оцінка Тіель-Сена — незміщена оцінка істинного відхилення у простій лінійній регресії.

Для пари (x_i, y_i) та (x_j, y_j) , які належать виборці A , рахується значення медіани наступним чином.

$$m_i = \operatorname{median}_{j \in A} \left(\frac{(x_i - x_j)}{(y_i - y_j)} \right) \quad i \neq j,$$

$$m = \operatorname{median}_{i \in A} (m_i).$$

m є кутом нахилу. При цьому спотворення даних не перевищує 29.3% [6,7].

Нульова гіпотеза полягає в тому, що дані є незалежними та однаково розподіленими. Для двостороннього тесту альтернативна гіпотеза полягає в тому, що дані належать монотонному тренду. Статистика тесту Манна-Кендала рахується наступним чином:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_k),$$

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} -1, & \text{if } x < 0, \\ 0, & \text{if } x = 0, \\ 1, & \text{if } x > 0, \end{cases}$$

де S – Статистика тесту Манна-Кендала, Середнє значення S є $\mu = 0$.
Дисперсію рахуємо наступним чином:

$$\sigma^2 = \left\{ n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right\} / 18,$$

де σ^2 – дисперсія, p — кількість пов'язаних груп у наборі даних, а t_{ij} — кількість точок даних у j -й зв'язаній групі. Статистика S розподілена нормально. Маємо

$$z = S / \sigma \text{ або } z = \operatorname{sgn}(S)(|S| - 1) / \sigma [8].$$

Тренд продуктивності в базовому періоді слід розраховувати з використанням усіх 16 щорічних вимірювань продуктивності за 2000-2015 роки (приклад за такі роки).

Значимість балів Z нахилу тренду для даних звітного періоду можна інтерпретувати за п'ятирівневою шкалою на таблиці 3.1

Таблиця 3.1 — приклад п'ятирівневої шкали для карти деградації

Z score < -1.96	Тенденція деградації
Z score < -1.28 AND \geq -1.96	Потенційна деградація

Z score ≥ -1.28 AND ≤ 1.28	Без змін
Z score > 1.28 AND ≤ 1.96	Потенційне покращення
Z score > 1.96	Тенденція покращення

Для підрахунку індикатора необхідно привести цю шкалу до трьохзначної: деградація, покращення та стабільний стан.

Для розрахунку стану продуктивності береться рівень продуктивності за період дослідження порівнюється з рівнем продуктивності за звітний період та встановлюється ступінь деградації. Обчислюється середнє (μ) та стандартне відхилення (σ) річних вимірювань NPP для обраного періоду за кожен рік включно.

Нехай у нас є вибірка карт за певний період з порахованим рівнем продуктивності.

Для обчислення стану продуктивності можуть бути використані наступні формули:

$$\mu = \frac{\sum_{y=a}^b x_y}{b - a + 1},$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{y=a}^b (x_y - \mu)^2}{b - a + 1}},$$

де μ – середнє значення базового періоду, σ – середньоквадратичне відхилення, x_y – NDVI пікселя або інша величина для розрахунку, a – початковий рік, b – останній рік.

Далі рахуємо для меншої вибірки карт середнє з порахованим рівнем продуктивності за менший період:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{y=b}^c x_y}{c - b + 1},$$

де \bar{x} – середнє значення цільового періоду, x_y – NDVI пікселя або інша величина для розрахунку, a – початковий рік, b – останній рік, c – проміжний рік (за цей рік та останній рік необхідно обчислити тренд) $a > c > b$. Також $b - a > c - b$, $c - b$ – менший період ніж $b - a$.

Оцінку Z рахуємо за формулою нижче і отримуємо стан продуктивності:

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{c - b + 1}},$$

де μ – середнє значення базового періоду, \bar{x} – середнє значення цільового періоду, x_y – NDVI пікселя або інша величина для розрахунку, a – початковий рік, b – останній рік, c – проміжний рік (за цей рік та останній рік необхідно обчислити тренд) $a > c > b$. Також $b - a > c - b$, $c - b$ – менший період ніж $b - a$.

Рівень продуктивності вказує на рівень вегетативності місцевих рослин порівняно з іншими регіонами з подібним потенціалом вегетативності у тому з подібним земним покривом за досліджуємий період. Рахується за наступною формулою:

$$Performance = \frac{Observed\ NPP}{NPP_{max}},$$

де *Observed NPP* – первинна продуктивність, що спостерігається за рік спостереження; *NPP_{max}* – максимальна продуктивність за період; *Performance* – рівень продуктивності. Тобто, береться NPP, який спостерігається за останній рік та ділиться на максимальне значення за досліджуємий періоду. Якщо значення менше 0.5, то спостерігається деградація.

3.2 Розрахунок продуктивності

Розрахунок продуктивності відбувається за допомогою таблиці, наведеної нижче, використовуючи розраховані раніше карти тренд, стан та результат. Тобто, порівнюються значення, які приймаються для однієї координати на трьох картах.

Нижче наведена таблиця агрегації (рис. 3.2), де зеленим кольором відображається покращення, жовтим та фіолетовим — стабільний стан та погіршення відповідно.

Тренд	Стан	Рівень продуктивності	Продуктивність
Покращення	Покращення	Покращення	Покращення
Покращення	Покращення	Стабільний	Покращення
Покращення	Покращення	Деградація	Покращення
Покращення	Стабільний	Стабільний	Покращення
Покращення	Стабільний	Деградація	Покращення
Покращення	Деградація	Стабільний	Покращення
Покращення	Деградація	Деградація	Деградація
Стабільний	Покращення	Стабільний	Стабільний
Стабільний	Покращення	Деградація	Стабільний
Стабільний	Стабільний	Стабільний	Стабільний
Стабільний	Стабільний	Деградація	Стабільний
Стабільний	Деградація	Стабільний	Деградація
Стабільний	Деградація	Деградація	Деградація
Деградація	Покращення	Стабільний	Деградація
Деградація	Покращення	Деградація	Деградація
Деградація	Стабільний	Стабільний	Деградація
Деградація	Стабільний	Деградація	Деградація
Деградація	Деградація	Стабільний	Деградація
Деградація	Деградація	Деградація	Деградація

Рисунок 3.3 – Таблиця агрегації для продуктивності.

У зоні екосистеми на первинну продуктивність можуть суттєво впливати фактори, що змінюються в часі. Це температура, інтенсивність світла, поживних речовин і особливо мінлива — вода.

Методи для підрахунку продуктивності (окрім даних NDVI), які використовують лінійну регресію та наразі реалізовані в Trends.Earth у ЦСР 15.3.1:

1. Residual Trend Analysis (RESTREND) — Прогнозує NDVI, використовуючи дані про кількість опадів.

2. Rain Use Efficiency (RUE) — Розраховує співвідношення між річною NPP та річною кількістю опадів. У результаті можна передбачити погіршення або позитивні зміни.
3. Water Use Efficiency (WUE) — На відміну від систем, де NDVI не залежить від опадів, тут WUE використовує у розрахунках евапотранспірацію (сумарне випаровування).

3.3 Зміна земного покриття

Для оцінки змін у земному покритті Trends.Earth використовує класифікаційні карти ESA CCI. Виконується аналіз переходу ґрунтового покриття, для визначення пікселів, які змінили клас. Цих класів 7 — ліси, луки, орні угіддя, болота, штучні території, гола земля та вода.

У [4] наведені такі дані для підрахунку змін ґрунтового покриття дані беруться з:

1. [ESA-CCI-LC](#), що містить щорічні дані про площу земельного покриття з просторовим розрізненням 300 м за період з 1992 року по теперішній час, створені Catholic University of Louvain Geomatics у рамках Climate Change Initiative of the European Space Agency (ESA);
2. [SEEA-MODIS](#), що містить щорічні дані про площу земельного покриття з просторовим розрізненням 500 м за період 2001-2019 рр., отримані з International Geosphere-Biosphere Programm (IGBP) з набором даних наземного покриття MODIS (MCD12Q1).

3.4 Обчислення зміни земного покриття

Обчислення змін земного покриття здійснюються на основі двох карт класифікації для цільової території за ті роки, які порівнюються. Надалі визначається таблиця переходів (рис. 3.3), щоб у подальшому визначати значення

пікселя (покращення, стабільний стан та деградація). Trends.Earth пропонує наступну таблицю переходів.

		Land cover in target year						
		Tree-covered	Grassland	Cropland	Wetland	Artificial	Other land	Water body
Land cover in initial year	Tree-covered	0	-	-	-	-	-	0
	Grassland	+	0	+	-	-	-	0
	Cropland	+	-	0	-	-	-	0
	Wetland	-	-	-	0	-	-	0
	Artificial	+	+	+	+	0	+	0
	Other land	+	+	+	+	-	0	0
	Water body	0	0	0	0	0	0	0

Legend

Degradation	Stable	Improvement
-	0	+

*The "Grassland" class consists of grassland, shrub, and sparsely vegetated areas (if the default aggregation is used).

Reset table Load saved table... Save table to file...

Рисунок 3.4 – Інтерфейс плагіну Trends.Earth, де реалізовано таблицю переходів [2].

Де рядки «відповідають» початковому року, а стовпчики — останньому року. Наприклад, на перетині Artificial та Cropland у нас буде «+», тобто буде покращення через перехід штучних споруд до орних земель.

3.5 Органічний вуглець ґрунту

Субіндикатор кількісно оцінює зміни органічного вуглецю (SOC) у ґрунті за звітний період. Через високу мінливість та малку кількість даних — важко вимірюється. Великі площі лісу накопичують вуглець. В результаті розкладання він виділяється у вигляді вуглекислого газу. За допомогою цього можна побачити деградаційні процеси.

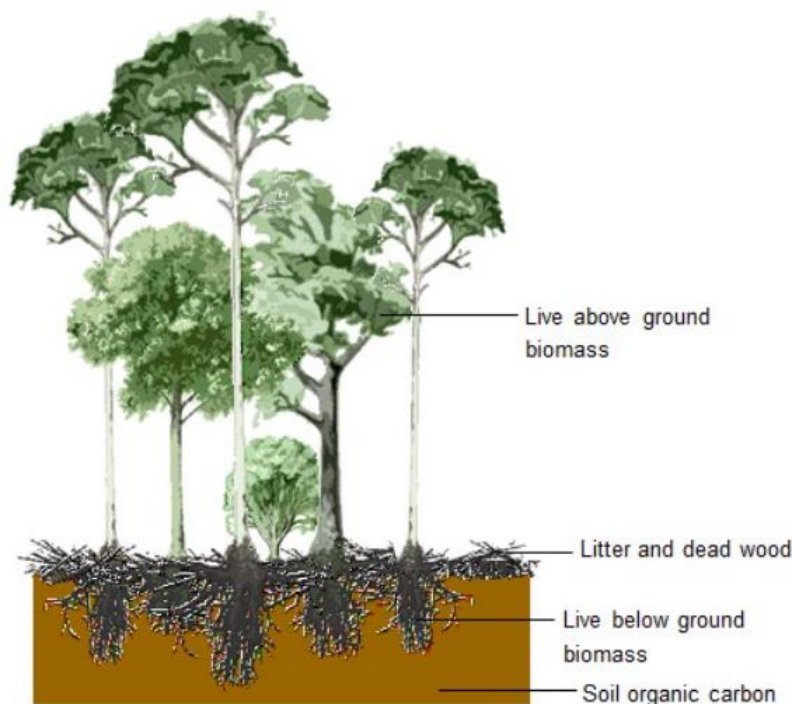


Рисунок 3.5 – Органічний вуглець ґрунту [1].

У [4] наведені такі посилання на для підрахунку органічного вуглецю ґрунту:

1. [Harmonized World Soil Database \(HWSD\)](#) версія 1.2 —стандартна сітка ґрунтів з просторовим розрізненням близько 1 км;
2. [SoilGrids250m](#), глобальна 3D-інформаційна система ґрунту з просторовим розрізненням 250 м, що містить просторові прогнози для вибору властивостей ґрунту (на шести стандартних глибинах), включаючи запас SOC;
3. [Global SOC Map, Version 1.0](#), яка складається з національних карт SOC, розроблених як ґрунтові сітки розміром 1 км, що охоплюють глибину 0-30 см.

3.6 Підрахунок органічного вуглецю

Щоб порахувати зміни у органічний вуглець Trends.Earth пропонує скористатися таблицею переходів наданою UNCCD. Вона відображає коефіцієнти переходів за останні 20 років, використовуючи додатково дані зміни земного

покриву. Для підрахунку береться базовий період та той, який нас цікавить (див. стан продуктивності).

LU coefficients	Forest	Grasslands	Croplands	Wetlands	Artificial areas	Bare lands	Water bodies
Forest	1	1	f	1	0.1	0.1	1
Grasslands	1	1	f	1	0.1	0.1	1
Croplands	1/f	1/f	1	1/0.71	0.1	0.1	1
Wetlands	1	1	0.71	1	0.1	0.1	1
Artificial areas	2	2	2	2	1	1	1
Bare lands	2	2	2	2	1	1	1
Water bodies	1	1	1	1	1	1	1

Рисунок 3.6 – Таблиця переходів, що використовує Trends.Earth [2].

Зміни в SOC краще вивчати для переходів земного покриву, пов'язаних із сільським господарством. Для цього існує інші основні глобальні кліматичні регіони: помірно сухий ($f = 0,80$), помірно вологий ($f = 0,69$), тропічний сухий ($f = 0,58$), тропічний вологий ($f = 0,48$) і тропічний гірський ($f = 0,64$).

3.7 Висновки за розділом 3

В даному розділі розглянуто побудову продуктивності, земного покриву та органічного вуглецю ґрунту. Є обмежений набір даних, які можна використовувати для розрахунку субіндикаторів. Недоліком є низька точність для регіональних та національних продуктів через низьке просторове розширення 250 або 300 метрів, особливо для земного покриву та органічного вуглецю. Підвищення якості оцінювання ступеню деградації земель може бути досягнуто за рахунок використання більш точних геопросторових продуктів — окремих складових в межах основного робочого процесу обчислення індикатору ЦСР 15.3.1. Окрім цього, на основі методології підрахунку, робиться важливий висновок у наступному розділі: якими шляхами можливого покращити підрахунок складових ЦСР 15.3.1.

РОЗДІЛ 4

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЕНЬ ІНДИКАТОРУ ЦСР 15.3.1 ТА ОЦІНКА ТОЧНОСТІ

У цьому розділі порівнюються отримані результати вже з наявними продуктами. Пораховані карти класифікації субіндикатор та оцінюється їх вплив на підрахунок індикатора 15.3.1.

Основні джерела інформації по індикатору ЦСР 15.3.1 для роботи беруться з документації для плагіну Trends.Earth [2], де виконуються основні підрахунки у Quantum GIS.. Основна інформація у статі є базовою і взятою з основної документації [1,3].

4.1 Нейронні мережі для задачі класифікації

У [23] вказано, що для задачі отримання земного покриття можуть бути використані Maximum-likelihood classifier, Distance measure, K-nearest-neighbors, Random Forest, SVM, NN, RNN, CNN, SAEs (stacked autoencoders), DBNs (deep belief networks). Для задачі класифікації земного покриття спеціалісти ІКД НАНУ-ДКАУ використали багат шаровий перцептрон. Тому, у даній роботі він буде розбиратися більш детально.

Навчання з учителем від звичайного відрізняється тим, що система примусово навчається на основі множини прикладів методом «Стимул — реакція», з метою визначення реакції що увійдуть як параметри класифікації у модель.

Для навчання моделі, яка буде обчислювати карти класифікації, ми будемо використовувати супутникові знімки земного покриття, виділяючи у них точки з необхідним класом. У результаті буде отримана карта класифікації земного покриття. Це можна зробити у Google Earth Engine (рис. 4.1.)



Рисунок 4.1 – Приклад отримання карти класифікації земного покриття у середовищі GEE [13].

У якості моделі для навчання береться алгоритм CART, Random Forest який до нього подібний, SVM, K-means [13,14,15]. Random Forest надає найкращі результати і є найпопулярнішим.

Дерево рішень — дводольний граф, у вузлі якого є функція, відносно якої робиться вибір, по якій гілка і нащадок обирається надалі. Результатом спускання по такому графу є класифікація, тобто якщо досягаємо листа, який не має нащадка, то він містить інформацію до якого належить цільова змінна.

CART (Classification And Regression Tree)— алгоритм вирішує задачу регресії та класифікації побудовою бінарного дерева рішень, тобто у вузлі робиться ділення на дві частини (нащадка), один з яких скоріше за все відповідає умові, заданій у вузлі.

Random Forest — ансамблевий метод для задач регресії та класифікації, який будує багато дерев рішень, коли відбувається навчання. З поміж цих дерев обирається один або рахується усереднене (регресія). Основний недолік — перенавчання, але алгоритм є доволі таки точним.

SVM (Support Vector Machine) — ідея методу полягає у переході до простору векторів з більшою розмірністю та пошуком розділяющою гіперплощиною, яка має найбільшу відстань до найближчих точок будь-якого класу.

K-means (Кластеризація методом k середніх) — розподіл n спостережень на k кластерів методом пошуку центрів кластерів, мінімізуючи суму квадратів відстаней від спостереження до центра його кластера.

Багатошаровий перцептрон (MLP) — це нейронна структура, яка досліджує наступну функцію:

$$f(\cdot): R^m \rightarrow R^n,$$

де m — кількість вимірів для введення а n — для виведення. Навчання відбувається по набору ознак $X = x_1, x_2, \dots, x_m$ та очікуваного результату y , який містить інформацію про клас, до якого належить ознака. Навчаються ваги ω_i у функції активації. Нижче на рис. 4.2. приклад простого перцептронну з однією активаційною функцією.

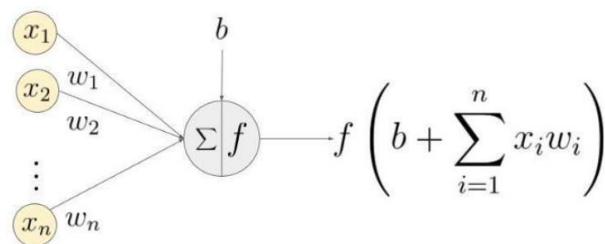


Рисунок 4.2 – Приклад простого перцептрона з активаційною функцією [27].

$$f(\omega_1 x_1, \omega_2 x_2, \dots, \omega_m x_m) = y$$

На рис. 4.3 багатошаровий перцептрон має складнішу архітектуру але принцип той самий.

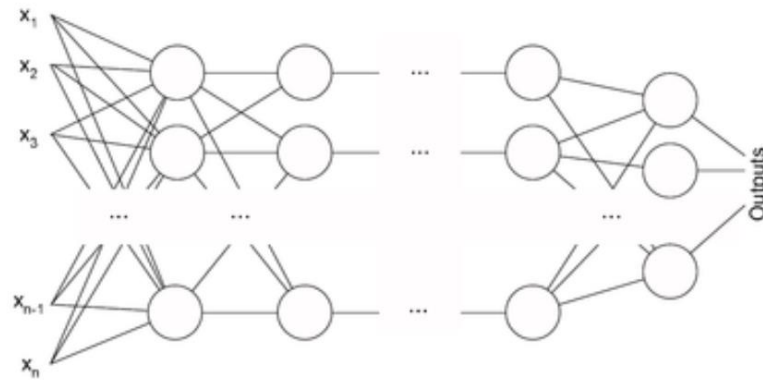


Рисунок 4.3 – Багатошаровий перцептрон [27].

Для навчання використовується метод зворотного backpropagation (поширення помилки), де мінімізується функція витрат за допомогою градієнтного спуску — квадрату помилки [25,26]. Алгоритм на рис. 4.4.

Алгоритм: BackPropagation ($\eta, \alpha, \{x_i^d, t^d\}_{i=1, d=1}^{n, m}, NUMBER_OF_STEPS$)

1. Ініціалізувати $\{w_{ij}\}_{i,j}$ маленькими випадковими значеннями, $\{\Delta w_{ij}\}_{i,j} = 0$
2. Повторити NUMBER_OF_STEPS раз:

Для всіх d від 1 до m :

1. Подати $\{x_i^d\}$ на вхід сітки і підрахувати виходи o_i кожного вузла.

2. Для всіх $k \in Outputs$

$$\delta_k = o_k(1 - o_k)(t_k - o_k).$$

3. Для кожного рівня l , починаючи з останнього:

Для кожного вузла j рівня l поррахувати

$$\delta_j = o_j(1 - o_j) \sum_{k \in Children(j)} \delta_k w_{j,k}.$$

4. Для кожного ребра сітки $\{i, j\}$

$$\Delta w_{i,j} = \alpha \Delta w_{i,j} + (1 - \alpha) \eta \delta_j o_i.$$

$$w_{i,j} = w_{i,j} + \Delta w_{i,j}.$$

3. Видати значення w_{ij} .

Рисунок 4.4 – Алгоритм зворотного поширення помилки [27].

Навчання багатошарового перцептрона має наступні особливості:

1. Навчання нелінійних моделей;

- MLP із прихованими шарами мають невиконувати функцію втрат, де існує більше одного локального мінімуму (рис. 4.5.). Через це різні випадкові ініціалізації ваги можуть призвести до різних результатів при перевірці;

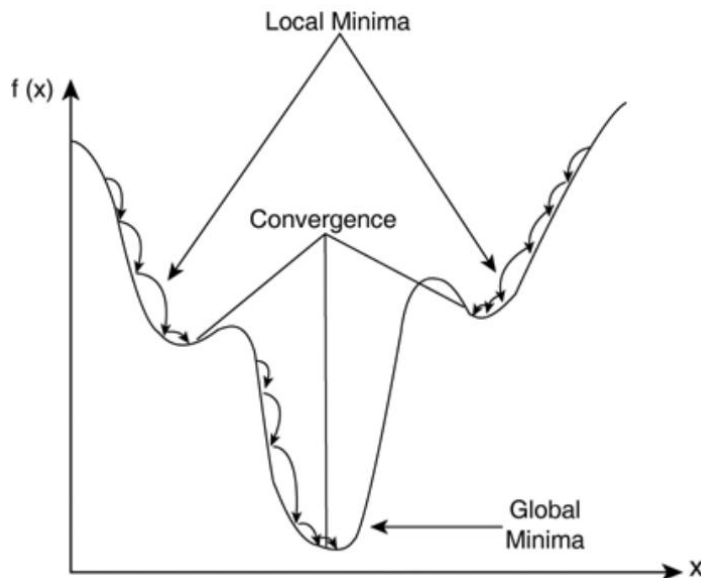


Рисунок 4.5 – Графік зворотнього поширення помилки [27].

- MLP чутливий до масштабування функцій;
- Для перцептрона існує проблема, що через велику кількість шарів, навчання буде затухати на послідовуючому шарі [16].

Значний вплив на точність може внести регуляризація та параметри, які використовуються при розрахунках. Регуляризація використовується, щоб уникнути проблеми перенавчання [27,28].

RNN — Основна відмінність рекурентних нейронних мереж від звичайних полягає у тому, що частина інформації з певного шару подається на вхід для повторного навчання.

Основна проблема у їх виникла, бо MLP не вирішує такі проблеми.

- Не має обробки послідовних даних;
- Враховується лише поточний вхід;

3. Попередні введення не використовуються для подальших розрахунків.

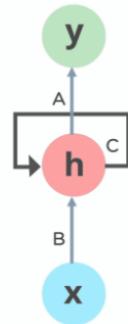


Рисунок 4.6 – Загальна схема RNN [29].

x – значення вектору на вході, y – значення вектору на виході, h – значення вектору прихованого шару, A , B та C — параметри, що шукаються.

Цю схему можна представити у наступному вигляді. При такому вигляді (рис. 4.7) зручніше розуміти роботу нейромережі, при використанні даних, що подаються поступово.

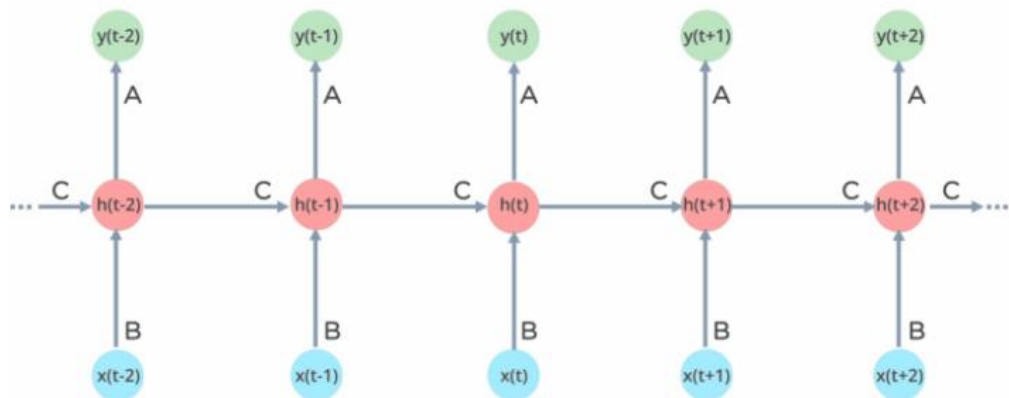


Рисунок 4.7 – Як можна розуміти RNN [29].

Тобто, потреба така виникає якщо необхідно поступово аналізувати кожне слово у тексті, враховуючи зміст попередніх слів. Це використовується також для аналізу супутникових даних у вигляді часових рядів. Як приклад, це робота [30], де на вхід подається шари супутникових знімків за різний час протягом певного

періоду на один вхід. На інший подається група за інший період. Це зображено на рис. 4.8.

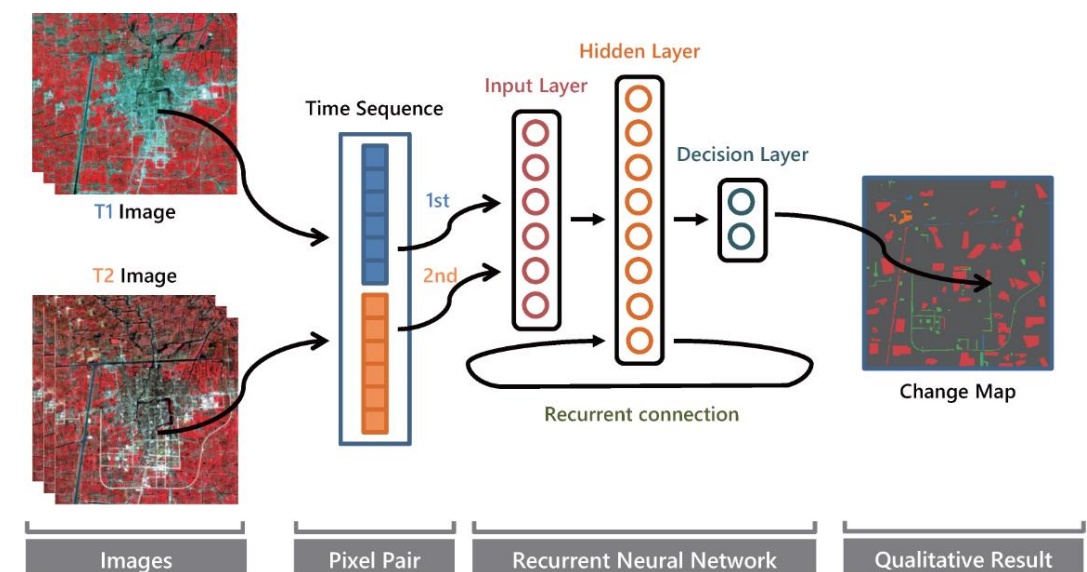


Рисунок 4.8 – LSTM для дослідження земного покриття та отримання зміни земного покриття [30].

Схожими дослідженнями займалися і в ІКД НАНУ-ДКАУ [37].

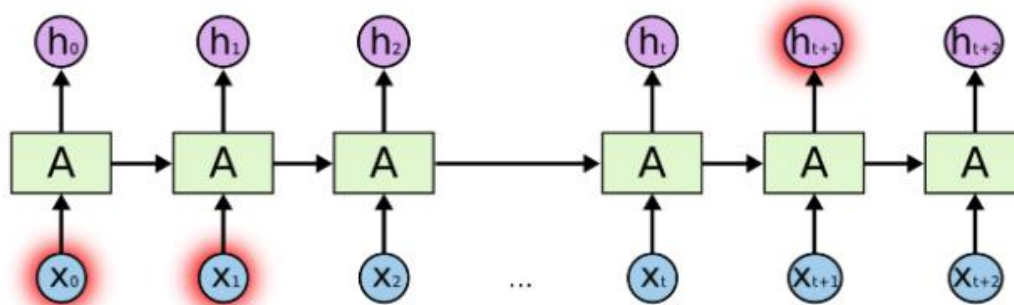


Рисунок 4.9 – Проблема RNN [31].

x – значення вектору на вході, y – значення вектору на виході, A – нейронна мережа.

Для подолання проблеми великої відстані між необхідними даними входу та виходу було винайдено рішення LSTMs (Long Short-Term Memory Network).

Дане рішення представляє собою схему, керування пам'яттю за допомогою булевих операцій та використання шарів (вентилів), які відповідають за збереження, обробку вхідних та вихідних даних.

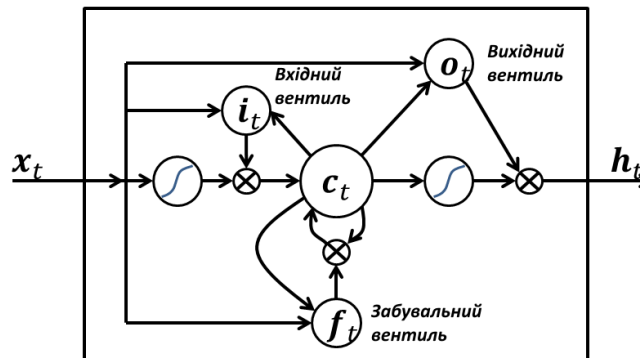


Рисунок 4.10 – Схема LSTM [32].

Позначення, визначення та обчислення значень стандартної LSTM на рис. 4.10:

$$f_t = \sigma_g(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f),$$

$$i_t = \sigma_g(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i),$$

$$o_t = \sigma_g(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o),$$

$$c_t = f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_c(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c),$$

$$h_t = o_t \circ \sigma_h(c_t),$$

де x_t — вхідний вектор, h_t — вихідний вектор, c_t — вектор стану, W, U, b — матриці ваг та оновлення та вектор біосу, f_t — вектор забувального шару, i_t — вектор вхідного шару, o_t — вектор вихідного шару, σ_g — сигмоїда, σ_c —

гіперболічний тангенс, σ_h — гіперболічний тангенс, \circ — поелементний добуток (Адамара).

Сигмойда приймає значення від 0 до 1. Тобто, це значення впливає на те, як багато кожної компоненти має пройти крізь шар: від не пропустити нічого до «пропустити» всю інформацію. Аналогічно й для гіперболічного тангенсу.

Існують також інші представлення LSTM. Ознайомимося для початку з умовними позначеннями на рис. 4.11:

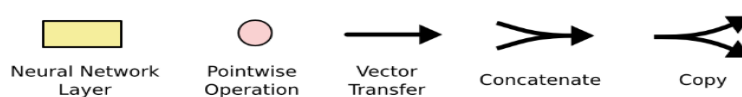


Рисунок 4.11 – Нейронна мережа, операція, вектор передачі, конкатенація, копіювання [31].

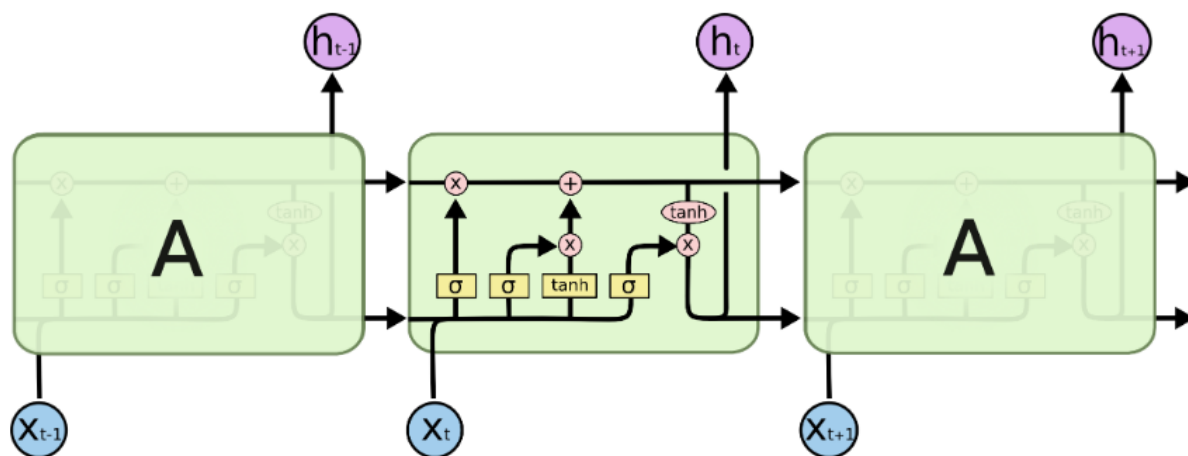


Рисунок 4.12. — LSTM [31].

У порівняння до LSTM зображеної на рис. 4.12 RNN приймає наступний вигляд на рис. 4.13. Тобто LSTM має схожу ідею: модуль з нейронною мережею буде циклічно надсилати собі інформацію для обробки, але принцип обробки цієї інформації відрізняється.

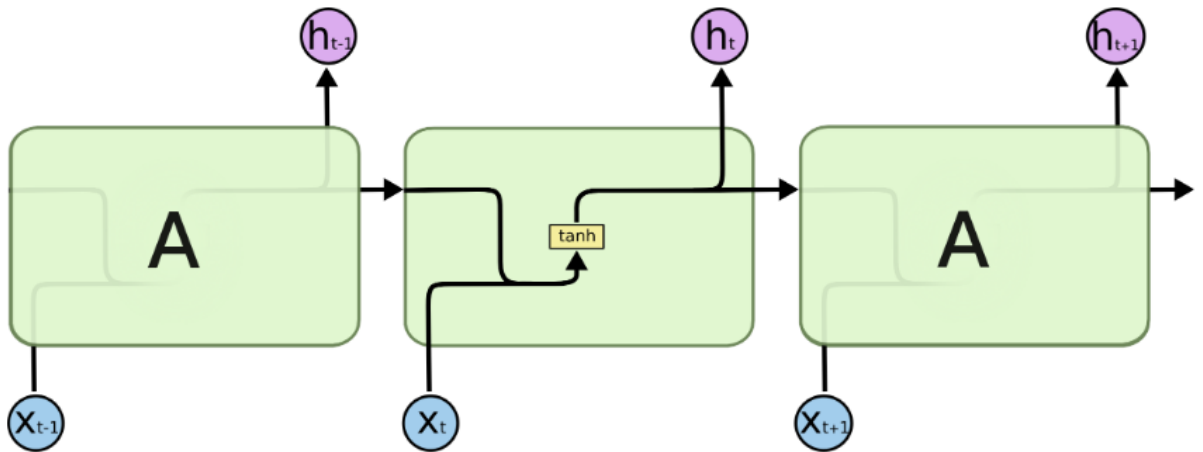


Рисунок 4.13 — RNN [31].

Розберемося з цією схемою та її ключовою ідеєю більш детально.

На рис. 4.14 бачимо горизонтальну лінію, що представляє собою інформацію про стан. За рахунок того, що логічних операцій 2 і немає застосованих функцій сигмоїди або гіперболічного тангенсу, інформація протікає без змін.

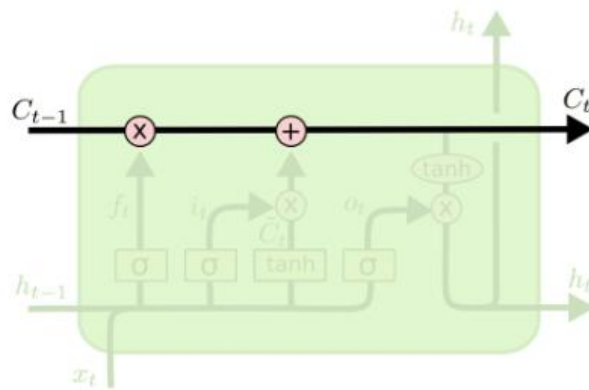


Рисунок 4.14 — Горизонтальна лінія, що являє собою стан [31].

LSTM має здатність додавати або видаляти обережно параметри, обережно регулюючись за допомогою шарів.

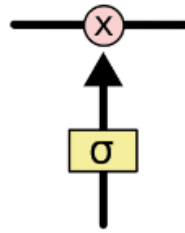
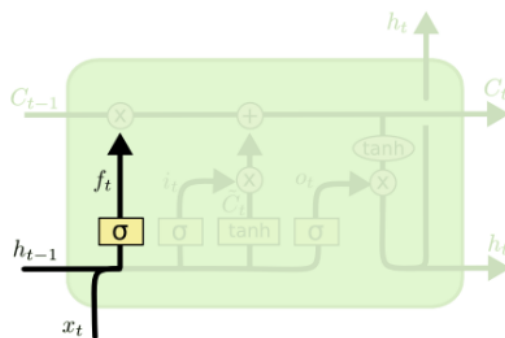


Рисунок 4.15 — Операція множення на значення від 0 до 1 [31].

Як вказувалося вище, дана операція може послабити потік цієї інформації. Тобто зменшується вплив або внесок цієї інформації (рис. 4.14 та 4.15)

На першому кроці (рис. 4.16) вирішується скільки інформація піде далі. Цей шар також називають шаром забування, бо на ньому обчислюється кількісна міра того, яка інформація пройде.

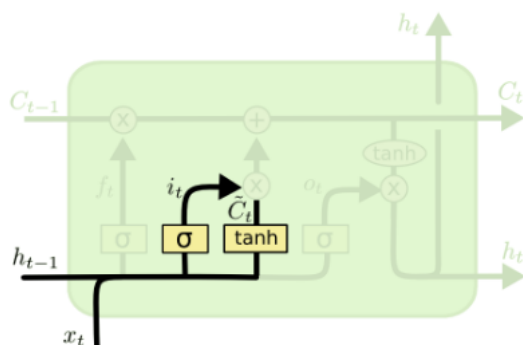


$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f)$$

Рисунок 4.16 — Відкидання інформації [31].

Згадаємо приклад з текстом. Щоб аналізувати наступне слово, нам потрібна лише частина інформації попереднього, яка необхідна для аналізу нового слова. Для класифікації супутникових знімків та отримання земного покриття це може бути суттєвим, адже інформація зі супутникових знімків доволі-таки різноманітна як і робіт по обчисленню цієї інформації. А для аналізу різних показників нам потрібні значення лише частини параметрів.

Повернемося до LSTM. Наступним кроком (рис. 4.17) буде рішення, яку інформацію потрібно зберегти. Цей процес складається з двох кроків.

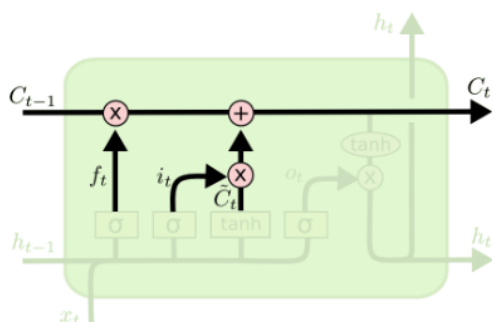


$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C)$$

Рисунок 4.17 — Запам'ятовування інформації [31].

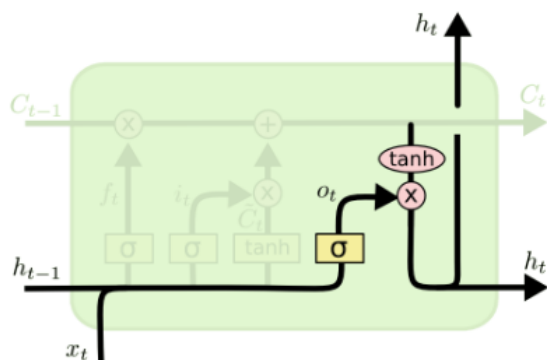
Перший шар називається вхідним шаром і він відповідає за вирішення, яка інформація буде використана. Другий шар гіперболічного тангенсу створює вектор нових значень-кандидатів. На наступному кроці об'єднуються результати цих двох шарів, щоб використати для оновлення стану C_t на рис. 4.18.



$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t$$

Рисунок 4.18 — Оновлення C_t [31].

На третьому кроці вирішується яка інформація буде виводитись. Цей результат базуватиметься на стані клітинки, але буде відфільтрованою версією. Спочатку ми пропускаємо через сигмоподібний шар, який вирішує, які частини стану комірки ми збираємося вивести та множимо на стан комірки, пропущений через гіперболічний тангенс (рис. 4.19)



$$o_t = \sigma(W_o [h_{t-1}, x_t] + b_o)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t)$$

Рисунок 4.19 — Виведення інформації [31].

Таким чином ми отримали оновлений вхід, значення стану для подальшого циклу навчання [30,31].

4.2 Оцінка впливу субіндикаторів на підрахунок індикатора ЦСР 15.3.1

Нижче наведені результати підрахунку субіндикаторів індикатора ЦСР 15.3.1 за допомогою Trends.Earth. Можна побачити, що для території України карти земного покриття та органічного вуглецю найбільшу інформацію несуть лише ті, які порашовані за великий проміжок часу (2000–2020, як приклад). Якщо дивитися на продуктивність, то можна побачити певну динаміку змін. Цей субіндикатор дає найкращі уявлення про зміни. Він має найсуттєвіший вплив на підрахунок індикатора ЦСР 15.3.1 плагіном Trends.Earth.

Для побудови індикатора ЦСР 15.3.1 в роботі використано карти класифікації земного покриття з більшим просторовим розрізненням, побудовані спеціалістами ІКД НАНУ-ДКАУ.

Просторове розширення— це міра найменшого об’єкта або площа землі, яка може бути розпізнана і бути представлена пікселем (рис. 4.20) [22].

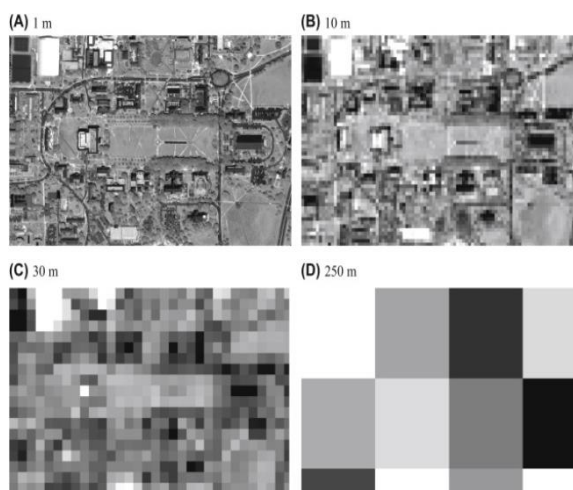


Рисунок. 4.20: — Супутникові зображення з різним просторовим розрізненням [22].

Даний геопросторовий продукт містить також детальну інформацію про сільськогосподарські посіви. Дані Trends.Earth мають просторове розрізнення 250–300 м, в той час як карта класифікації — 10 м. Це дозволило отримати більш точну карту оцінки індикатора 15.3.1.

Для розрахунку продуктивності була використана про інформація про тренд NDVI, що була запропонована у опціях Trends.Earth (рис. 4.21).

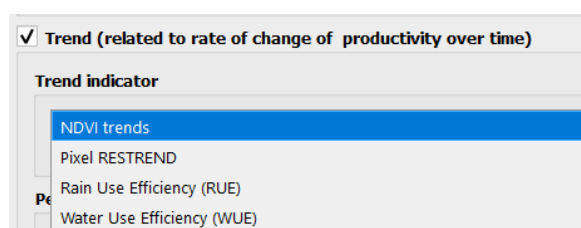


Рисунок 4.21 — Дані для розрахунку продуктивності.

Нижче наведена порівняльна таблиця субіндикаторів, які запропоновані Trends.Earth, з земним покривом за даними ІКД НАНУ-ДКАУ за різні проміжки часу. Ці дані завантажені з плагіну Trends.Earth у Quantum GIS (рис. 4.22).












Дати	Продуктивність	Зміна земного покриву	Органічний вуглець
2016 - 2020			
2010 - 2020			
2000 - 2020			
Порахований Land Cover Change за даними спеціалістів ІКД НАНУ-ДКАУ			
2016 - 2020	✘		✘
2016 - 2021	✘		✘

Рисунок 4.22 — Розрахунок субіндикаторів.

4.3 Оцінка індикатора порахованого за глобальними продуктами

Таблиці на рис. 4.23 та 4.24 демонструють різницю між продуктами Така різниця може бути через те, що при підрахунку продуктивності JRC, FAO та Trends.Earth, використовувалися різні показники Манна-Кендала ‘Z’ для класифікації рівня деградації. Ґрунтовий покрив, наданий спеціалістами ІКД НАНУ-ДКАУ, є спеціалізованим на сільськогосподарських угіддях. Також, даний земний покрив має більше просторове розрізнення: 10 м у порівнянні з 250–300 м.

Детальне порівняння отриманих цифр за даними, представленими на сайті Trends.Earth [2]. На рис. 4.23 розміщена детальна інформація, про субіндикатори,

які були використані для отримання результатів.

Dates of datasets (subindicators)	SDG 15.3.1 using JRC LPD (2005-2019)	SDG 15.3.1 using Trends.Earth LPD (2005-2019)	SDG 15.3.1 using FAO-WOCAT LPD (2015-2019)	SDG 15.3.1 using our data (2016-2020)	SDG 15.3.1 using our data (2016-2021)	SDG 15.3.1 using our data (2000-2020)
1) Productivity	2005-2019	2005-2019	2015-2019	2016-2020	2016-2021	2001-2020
2) Land cover	2015-2019	2005-2019	2015-2019	2016-2020	2016-2021	2000-2020
3) Soil organic carbon	2015-2019	2001-2019	2015-2019	2016-2020	2016-2021	2000-2020

Рисунок 4.23 — Карти субіндикаторів.

Нижче додаткова таблиця з результатами підрахунку ЦСР 15.3.1 на рис 4.24

SDG summary table Total land area: 571 996,9 km ²	SDG 15.3.1 using JRC LPD (2005-2019)	SDG 15.3.1 using Trends.Earth LPD (2005-2019)	SDG 15.3.1 using FAO-WOCAT LPD	SDG 15.3.1 using our data (2016-2020)	SDG 15.3.1 using our data (2016-2021)	SDG 15.3.1 using our data (2000-2020)
Land area with no data:	3,10%	3,14%	3,16%	0%	0%	3,06%
Land area degraded:	29,42%	15,73%	33,14%	33,29%	18,48%	17,62%
Land area stable:	43,57%	55,67%	54,63%	52,05%	57,40%	55,37%
Land area improved:	23,90%	25,46%	9,07%	14,66%	24,12%	23,95%

Рисунок 4.24 — Стан деградованості для різних даних.

Найбільш схожі між собою результати розміщені на двох малюнках нижче. Бачимо, що індикатор, порахований на продуктивності від FAO за 2015-2019 рік є дуже схожим на порахований на основі земного покриття від ІКД НАНУ-ДКАУ за 2016-2020 (рис. 4.25).

ЦСР 15.3.1 з продуктивністю FAO
WOCAT (2015-2019)



Земельної площі покращено:	Земельна площа зі стабільним станом:	Земельної площі деградовано:	Земельної площі покращено:	Земельна площа зі стабільним станом:	Земельної площі деградовано:
9,07%	54,63%	33,14%	14,66%	52,05%	33,29%

ЦСР 15.3.1 порашований з ґрунтовим
покривом наданим спеціалістами ІКД
НАНУ-ДКАУ України (2016-2020)

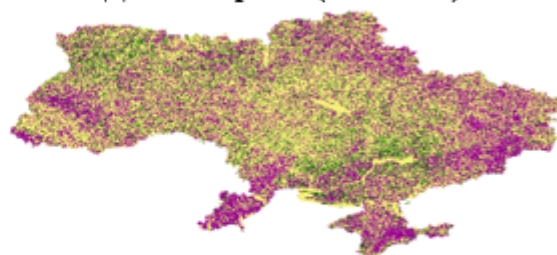


Рисунок 4.25 – Порівняння карт класифікації.

Через метод підрахунку субіндикатора продуктивність, значні зміни спостерігаються лише якщо брати зовсім інший проміжок часу або проміжок значно більший за поточний. Як ми могли бачити на малюнку вище, певний тренд зберігається для території України. Тому продуктивність за 2005-2019 буде дуже схожим на 2000-2021. Це пояснюється статистичними методами, які були використані для підрахунку субіндикатора і описані вище у цій роботі. Органічний вуглець ґрунту не буде мати того самого впливу що і продуктивність. Тому і карти розміщені нижче доволі-таки схожі. Основні відмінності виникають через використання земного покриття, який додає нової інформації (рис. 4.26).

ЦСР 15.3.1 з продуктивністю
Trends.EARTH (2005-2019)



Земельної площі покращено:	Земельна площа зі стабільним станом:	Земельної площі деградовано:	Земельної площі покращено:	Земельна площа зі стабільним станом:	Земельної площі деградовано:
23,90%	55,67%	15,73%	23,95%	55,37%	17,62%

ЦСР 15.3.1 порашований з ґрунтовим
покривом наданим спеціалістами ІКД
НАНУ-ДКАУ (2000-2021)

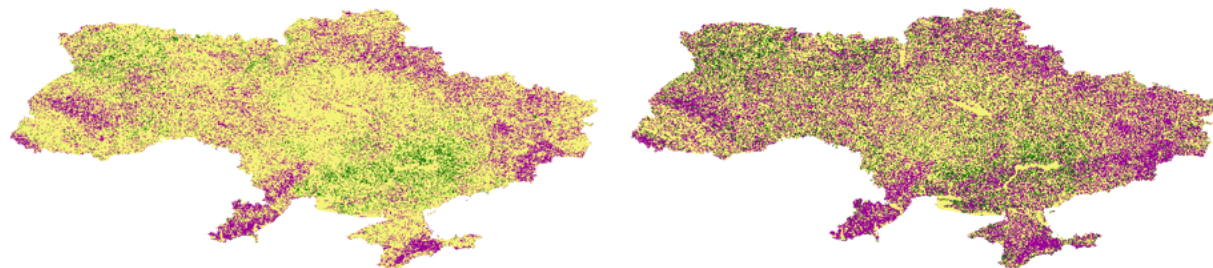


Рисунок 4.26 — Порівняння карт класифікації.

Нижче на рис. 4.27 порівняння індикаторів за 2016-2020, порахованими за різними земним покривом. Тут мета полягає у тому, щоб побачити, який вплив має карта класифікації, побудована на даних з більшим просторовим розширенням.

ЦСР 15.3.1 порахований з Land Cover Change 2016-2020 який пропонує Trends.Earth

ЦСР 15.3.1 порахований з Land Cover Change 2016-2020 наданим спеціалістами ІКД НАН України



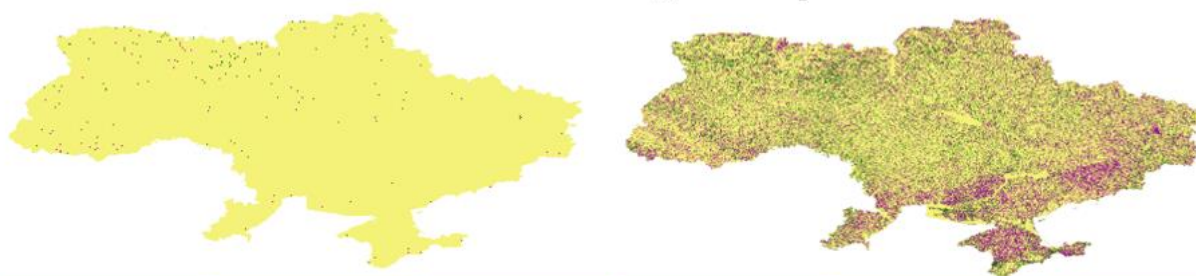
Земельної площі покращенно:	Земельна площа зі стабільним станом:	Земельної площі деградовано:	Земельної площі покращенно:	Земельна площа зі стабільним станом:	Земельної площі деградовано:
6,27%	72,80%	18,16%	14,66%	54,63%	33,14%

Рисунок 4.27 – Порівняння карт індикаторів

Відповідні до цих індикаторів земні покрити наведено на рис. 4.28.

ЦСР 15.3.1 порахований з Land Cover Change 2016-2020 який пропонує Trends.Earth

ЦСР 15.3.1 порахований з Land Cover Change 2016-2020 наданим спеціалістами ІКД НАН України



Земельної площі покращенно:	Земельна площа зі стабільним станом:	Земельної площі деградовано:	Земельної площі покращенно:	Земельна площа зі стабільним станом:	Земельної площі деградовано:
0,17%	99,68%	0,15%	8,63%	53,55%	35,27%

Рисунок 4.28 – Порівняння карт індикаторів

На відміну від земного покриття, порівняння карт індикаторів не є таким очевидним. Можна помітити, що збільшились частки землі, класифіковані як деградована та з процесами покращення.

4.4 Аналіз отриманих результатів

Продукти, отримані на основі земного покриття за даними ESA СІІ, що пропонує Trends.Earth для розрахунку та нашими даними мають суттєві відмінності. Зокрема, при візуальному порівнянню видно, що отримані карти за 2016-2020 та 2016-2021 мають суттєву різницю. Це спричинено тим, що порівнюються лише дві карти, а саме: за останній рік та початковий, що є обмеженням. Вважаю, що потрібно розробити метод, який підраховує зміну земного покриття за множиною карт земного покриття певного періоду (baseline), як це зроблено для продуктивності. Це суттєво допоможе зробити карту більш точною, оскільки на результати підрахунку індикатора ЦСР 15.3.1 буде мати значний вплив не лише субіндикатор продуктивності.

Оскільки земного покриття ІКД НАНУ-ДКАУ спеціалізується на сільськогосподарських культурах, то поля, які не засіваються або втратили врожайність, будуть мати стан деградації. Використовувалися супутникові знімки Sentinel-2 за 2017 та 2020 роки (рис. 4.29 та 4.30)



Рисунок 4.29 – Sentinel-2 2017



Рисунок 4.30 – Sentinel-2 2017

З рис. 4.31 видно, що порахований ЦСП 15.3.1 за іншим земного покриву доповнює інформацію, визначаючи покращення або деградацію на сусідніх пікселях.

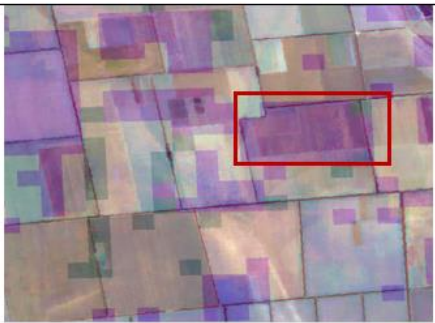



	ІКД Land Cover	ЦСП 15.3.1 Land Cover
Sentinel-2 2017		
Sentinel-2 2020		

Рисунок 4.31 – Порівняння результатів за використання іншого земного покриву

Таким чином можна побачити території, які не використовуються. Скоріше за все, для пошуку таких полів необхідна додаткова інформація про поля, бо методи класифікації можуть давати помилку. У подальшій роботі для сільськогосподарських полів можуть бути використані полігони, щоб надавати більш точну інформацію та корегувати класифікаційну карту та індикатор у результаті. Це для подальшого розвитку. Варто зауважити, що продуктивність, основний субіндикатор, добре надає розуміння ступеню деградації як для країни в цілому, так і для окремих регіонів. Якщо розглядати дані у меншому масштабі для таких об'єктів як поля — точність не є високою.

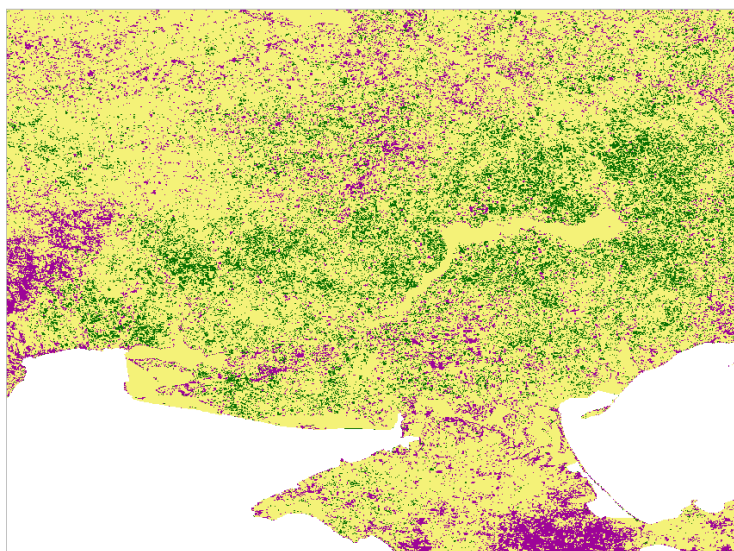


Рисунок 4.32 – ЦСР 15.3.1 за земного покриття Trends.Earth

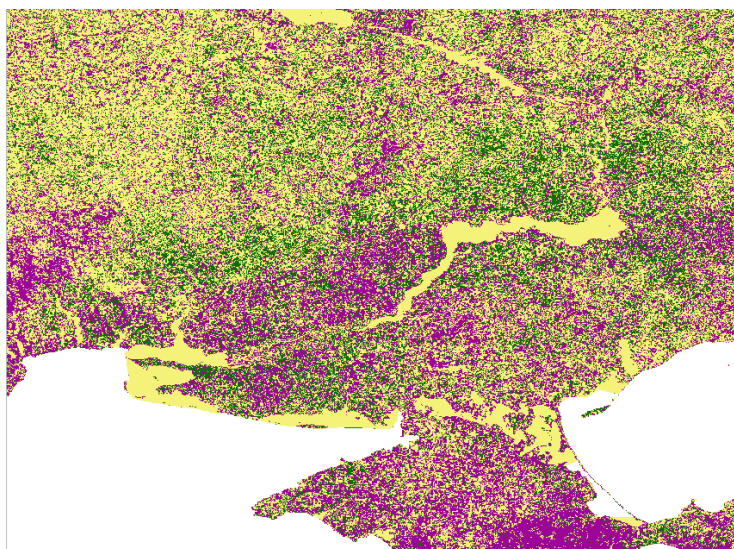


Рисунок 4.33 – ЦСР 15.3.1 за земного покриття ІКД НАНУ-ДКАУ

Вище зображені результати для Херсонської області та Криму (рис. 4.31 та 4.32). Відомо, що зміщення кліматичних зон поширило посуху. Разом із цим на півдні України сільське господарство зазнало значних збитків. Якраз саме це відображає дана карта [24]. Розглянувши LSTM та RNN, робиться гіпотеза, що їх використання може покращити результати побудови субіндикатора підраховує зміну земного покриття або земного покриття, збільшивши точність результатів.

У ході дослідження було помічено, що міста, дороги та інші об'єкти класу Artificial (штучний об'єкт) на карті продуктивності, а отже згідно методології підрахунку і на карті ЦСР 15.3.1. приймають деградований стан, а разом із ними і сусідні пікселі. Звичайно, це могло виникнути внаслідок зростання міста або інших процесів поруч або всередині. Можливо варто у майбутніх роботах враховувати це, щоб не класифікувати стан деградації саме пікселів, що представляють собою Artificial, який не змінюється протягом багатьох років. Це може позбавити зайвих пікселів, які позначені як деградовані, а будуть лише ті, які вказують на суттєві зміни і на конкретні зміни навколо міст. Наприклад — місто збільшилося і були нові новобудови. Індикатор, який існує, корисний для розуміння загальної інформації. Але важливі зміни для своєчасного регулювання можуть залишитися непомітними у такій класифікації. Розглянемо приклад нижче, який наводить на такі думки. Спочатку подивимось на рис. 4.33.



Рисунок 4.34 — Sentinel-2 міста та дороги.

Нижче на рис. 4.35 накладена класифікація індикатора ЦСР 15.3.1.

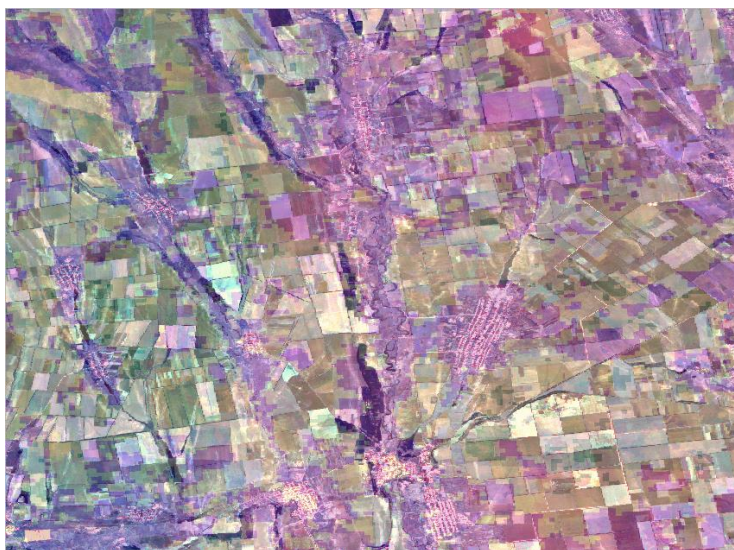


Рисунок 4.35 — ЦСР 15.3.1 Trends.Earth.

При використанні карт земного покриття ІКД НАНУ-ДКАУ та продуктивності Trends.Earth більша частина територій визначається як деградована, що звісно погіршує класифікацію, бо зміни для сільськогосподарських культур, лісів і річок важче побачити. Це видно на рис. 4.36 нижче.



Рисунок 4.36 — ЦСР 15.3.1 за земний покрив ІКД НАНУ-ДКАУ.

Маска може допомогти уточнити класифікацію, а саме — перевіреної за багатьма джерелами та підкорегованої вручну карту класифікації штучних об'єктів (міст), які варто не враховувати при розрахунку індикатора 15.3.1. Це надасть органам влади більш точну інформацію про території, на які варто звернути увагу першочергово.

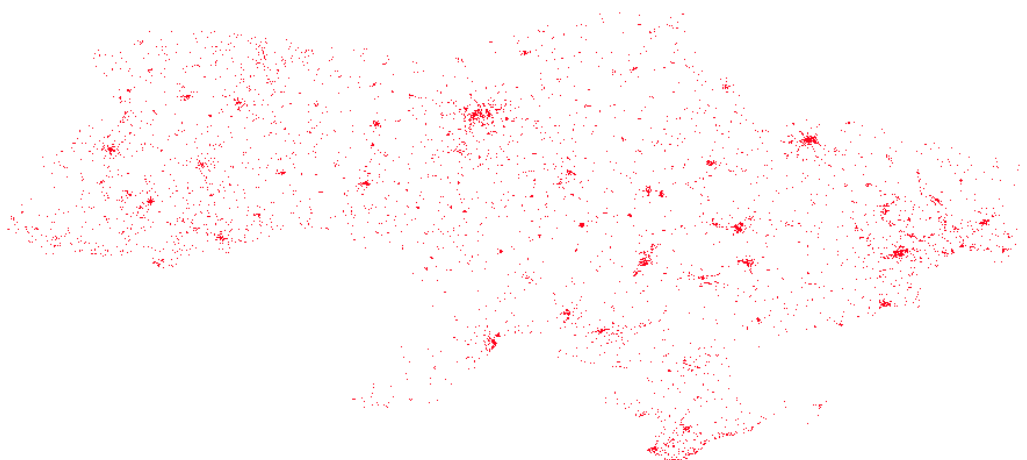


Рисунок 4.37 – Приклад того, як може виглядати карта Artificial, які варто не класифікувати як деградовані для збільшення точності обчислень.

За допомогою цих карт може бути підкорегована навчальна вибірка (рис. 4.37). Інше рішення полягає у тому, щоб ввести нову класифікацію та створити нову таблицю переходів для субіндикатора зміни земного покриву.

На рис. 4.37 нижче можна побачити річку та міста поряд. Розглянемо ЦСР для річок, озер і суміжних територій.

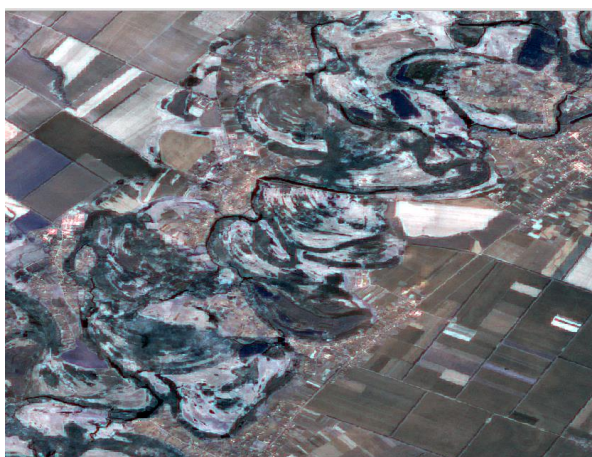


Рисунок 4.38 – Image Sentinel-2 2020.

Видно, що індикатор здатний зафіксувати деградацію біля річки (рис. 4.38). Як правило, там відбуваються значні зміни через осушення, затоплення, зміни ландшафту через різні причини.

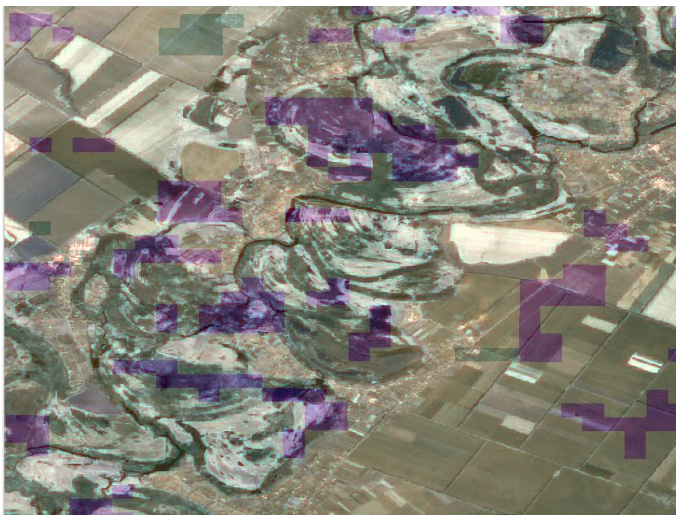


Рисунок 4.38 – ЦСР 15.3.1 Trends.Earth.

Ці зміни підкріплюються субіндикатором зміни земного покриву, який класифікує додаткові території деградації (рис. 4.39).

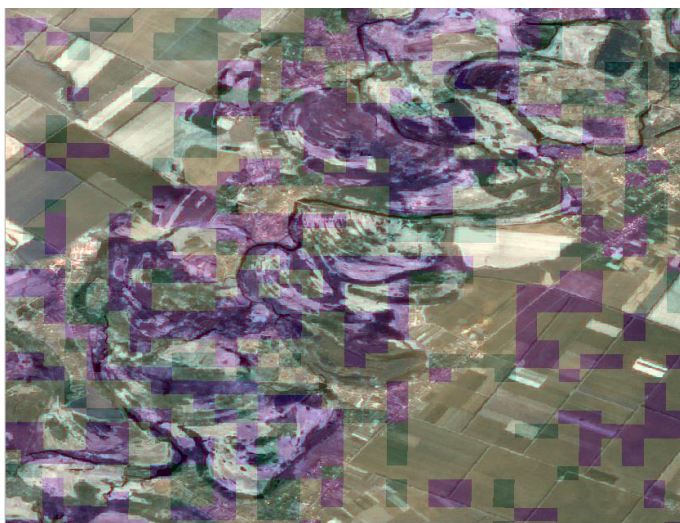


Рисунок 4.39 – ЦСР 15.3.1 за ґрунтовим покривом ІКД НАНУ-ДКАУ.

Як і у випадку з сільськогосподарськими культурами, можливий напрямок майбутніх досліджень для покращення точності визначення деградованих земель.

На рис. 4.40 нижче видно, що можна збільшити просторове розширення для збільшення точності класифікації як річки, так і суміжних територій.

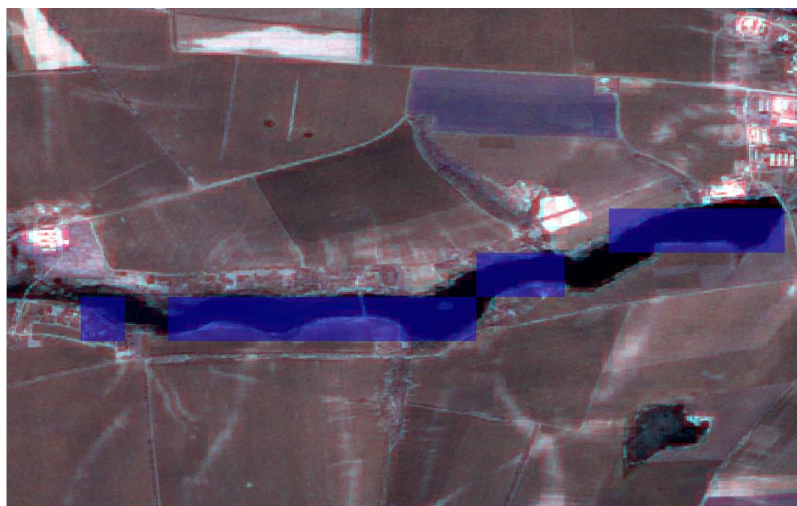


Рисунок 4.40 – Класифікація річки (відмічено синім).

Нижче на рис. 4.41 та 4.42 розраховані індикатори для цих територій.



Рисунок 4.4 – Індикатор 15.3.1 Trends.Earth.

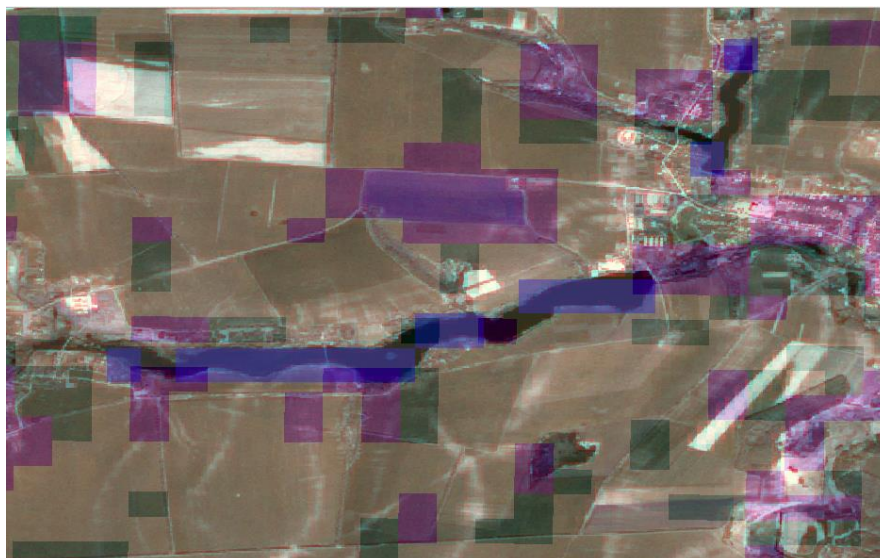


Рисунок 4.42 – Індикатор 15.3.1 за земним покривом ІКД НАНУ-ДКАУ.

Бачимо, що на цій місцевості з'являються пікселі, які визначенні як деградовані або мають покращення. Варто провести додаткові експерименти з просторовим розширенням, щоб отримати більш точні результати для субіндикаторів. За отриманою картою класифікації робиться висновок, що просторове розширення земного покриву могло бути зміненим у ході об'єднання субіндикаторів або розрахунку зміни земного покриву. Незважаючи на це, результат показує у якому напрямку можливі подальші дослідження для покращення.

4.5 Висновки за розділом 4

Для розрахунку зміни земного можуть бути використані інтелектуальні моделі, реалізацію яких можна знайти у Google Earth Engine. Також варто скласти додаткові карти або маски, для вилучення тих об'єктів, класифікація яких деградація/покращення не потрібна. Це зможе отримати більш чіткі уявлення про зміни. Карта продуктивності має значний вплив у розрахунках індикатора ЦСР, але він надає зайву інформацію. У цьому розділі були використані варіанти рішення цієї проблеми.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз методів, які застосовуються для обчислення ЦСР. На даний момент вже розроблено багато методик обчислення індикаторів ЦСР, але вони не є достатньо точними через мале просторове розширення та точність. Вони не є достатньо розрахованими для аналізу територій з великим масштабом.

Було з'ясовано, що метод підрахування субіндикатора зміна земного покриву та продуктивність у перспективі може бути покращеними, що дозволить краще ідентифікувати тренди деградації або покращення. Наявними методами суттєві зміни можна не побачити на картах, які зараз можна отримати запропонованими методами. Варто використати більше просторове розширення.

Для кращої інтерпретації індикатора може бути корисною розбивка території на зони інтересу. Цією зоною може бути поле, річка (частина біля річки), території біля річки. Відповідні значення (стабільний стан, деградація, покращення) пікселів, які належать цій зоні, обчислити в єдине значення. Це значення присвоїти зоні. Наприклад: одне поле має деградацію а інше поруч — покращення. Ця зона лісів під загрозою через вируби.

Дані дослідження можуть відіграти значно більшу роль для ідентифікації проблемних зон і усунення проблем для відновлення позитивного тренду.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Good Practice Guidance ІСР Indicator 15.3.1 Proportion of land that is degraded over total land area Version 2.0 – Advanced unedited version [Electronic resources]. — Access mode: https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2021-03/Indicator_15.3.1_GPG_v2_29Mar_Advanced-version.pdf
2. Trends.Earth User Guide [Electronic resources]. — Access mode: https://docs.trends.Earth/en/latest/for_users/index.html
3. Guidelines for SDG Indicator Calculation [Electronic resources]. — Access mode: https://un-ggim-europe.org/wp-content/uploads/2022/01/1531_UNGGIM_Europe_WG_DataIntegration_SWG1_SDG_IndicatorCalculation-and-Recommendations.pdf
4. SDG indicator metadata [Electronic resources]. — Access mode: <https://unstats.un.org/ІСРs/metadata/files/Metadata-15-03-01.pdf>
5. Trend Analysis of the Variations of Ambient Temperature Using Mann-Kendall Test and Sen’s Estimate in Calabar, Southern Nigeria [Electronic resources]. — Access mode: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1734/1/012016/pdf>
6. Theil-Sen Regression [Electronic resources]. — Access mode: https://scikit-learn.org/stable/auto_examples/linear_model/plot_theilsen.html
7. Theil–Sen estimator [Electronic resources]. — Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Theil%E2%80%93Sen_estimator
8. Package ‘trend’ [Electronic resources]. — Access mode: <https://cran.r-project.org/web/packages/trend/trend.pdf>
9. What is a z-score? What is a p-value? [Electronic resources]. — Access mode: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/what-is-a-z-score-what-is-a-p-value.htm>
10. Evaluation of the United Nations Sustainable Development Goal 15.3.1 indicator of land degradation in the European Union [Electronic resources]. — Access mode: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ldr.4457>

11. Evaluating Trends of Land Productivity Change and Their Causes in the Han River Basin, China: In Support of ICP Indicator 15.3.1 [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/24/13664/htm>
12. Supervised Classification (CART) - Machine Learning with Landsat in Google Earth Engine [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=0wDDmPO73Tk>
13. Processing Hyperspectral Images [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781785481024500041>
14. Random Forests for land cover classification [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167865505002242>
15. Land Cover and Land Use Classification in Google Earth Engine [Electronic resources]. — Access mode: https://openmrv.org/w/modules/mrv/modules_1/land-cover-and-land-use-classification-in-google-Earth-engine
16. Land-cover modelling using CORINE Land Cover data and multi-layer perceptron [Electronic resources]. — Access mode: <https://repozytorium.amu.edu.pl/handle/10593/15948>
17. Цілі сталого розвитку [Electronic resources]. — Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D1%96%D0%BB%D1%96_%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%BA%D1%83
18. SDGs: Indicator 15.3.1 [Electronic resources]. — Access mode: <https://landportal.org/node/52267>
19. Life on land [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.globalgoals.org/goals/15-life-on-land/>
20. Evaluating Trends of Land Productivity Change and Their Causes in the Han River Basin, China: In Support of SDG Indicator 15.3.1 [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/24/13664/htm>

21. Land degradation assessment for sustainable soil management [Electronic resources]. — Access mode: <https://agronomy.it/index.php/agro/article/view/1770>
22. Advanced Remote Sensing [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128158265/advanced-remote-sensing>
23. A Framework for Evaluating Land Use and Land Cover Classification Using Convolutional Neural Networks [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/3/274>
24. ВПЛИВ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА ПЛОЩІ ОСНОВНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2022-28/knit-2022-28-2-03-yemelyanov.pdf>
25. Neural network models (supervised) [Electronic resources]. — Access mode: https://scikit-learn.org/stable/modules/neural_networks_supervised.html
26. АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ КОМПАНІЙ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ [Electronic resources]. — Access mode: <http://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/4059/1/%D0%AF%D0%BA%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B2.pdf>
27. Метод зворотного поширення помилки [Electronic resources]. — Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D0%BE%D1%88%D0%B8%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D0%B%D0%BA%D0%B8
28. L1 and L2 Regularization Methods [Electronic resources]. — Access mode: <https://towardsdatascience.com/l1-and-l2-regularization-methods-ce25e7fc831c>
29. Recurrent Neural Network (RNN) Tutorial: Types, Examples, LSTM and More [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.simplilearn.com/tutorials/deep-learning-tutorial/rnn>

30. Learning a Transferable Change Rule from a Recurrent Neural Network for Land Cover Change Detection [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/506>
31. Understanding LSTM Networks [Electronic resources]. — Access mode: <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>
32. Довга короткочасна пам'ять [Electronic resources]. — Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%B2%D0%B3%D0%B0_%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D0%B0%D0%BC%27%D1%8F%D1%82%D1%8C
33. Азарсков, В. Н., Блохин, Л. Н., Житецкий, Л. С., Кусскуль, Н. Н. Робастные методы оценивания, идентификации и адаптивного управления. К.: НАУ, 2004, 498 с.
34. Кусскуль Н. Н., Шелестов А. Ю. Grid-системы для задач исследования Земли.: Архитектура, модели и технологии. – Наукова думка, 2008, 452 с.
35. Shelestov A. et al. Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 imagery //IEEE Transactions on Big Data. – 2019. – Т. 6. – №. 3. – С. 572-582.
36. Kussul, N., Shelestov, A., Lavreniuk, M., Butko, I., & Skakun, S. (2016). Deep learning approach for large scale land cover mapping based on remote sensing data fusion. Paper presented at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016-November 198-201.
37. Deep Recurrent Neural Network for Crop Classification Task Based on Sentinel-1 and Sentinel-2 Imagery [Electronic resources]. — Access mode: <https://www.semanticscholar.org/paper/Deep-Recurrent-Neural-Network-for-Crop-Task-Based-Kussul-Lavrenyuk/ad10d0e28c516f0a75f51003cdacf07b6599bc92>