УДК 528.88; 519.9; 004.932
№ держ. реєстрації 0120U104886
Інв. №

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Державне космічне агентство України
Інститут космічних досліджень
(ІКД НАН України та ДКА України)
03187, Київ 187, проспект Академіка Глушкова, 40, к. 4/1,
тел./факс 526 41 24, e-mail: ikd@ikd.kiev.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
ІКД НАН України та ДКА України,
д.ф.-м.н., член-кор. НАН України
_____ О. П. ФЕДОРОВ
«14» грудня 2021 р.

Звіт
про науково-дослідну роботу
за договорами від 28 жовтня 2020 № 81/01.2020 та від 30 квітня 2021 № 83/01/0268

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ У ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Грантова підтримка Національного фонду досліджень України
у межах конкурсу «Наука для безпеки людини та суспільства»

(остаточний)

Науковий керівник НДР
д.т.н., проф. _____ Н. М. КУССУЛЬ
"14" грудня 2021 р.

2021

Результати роботи розглянуто Вченою радою ІКД НАН України та ДКА України, протокол від 09.12.2021 р. № 6

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР
Доктор технічних наук, професор — (підпис) 14.12.21 — Н. М. Куссуль (вступ, реферат, розділи 1–6, висновки)

Виконавці:
Доктор технічних наук, професор — (підпис) 14.12.21 — А. Ю. Шелестов (підрозділи 1.1, 2.4, 2.5, 4.3, 6.1)

Доктор фізико-математичних наук, член.-кор. НАНУ — (підпис) 14.12.21 — О. П. Федоров (підрозділи 1.1, 2.3, 3.3, 5.4)

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник — (підпис) 14.12.21 — Я. І. Зєлик (підрозділи 1.2, 2.1, 2.3, 3.3, 4.3, 5.4)

Доктор технічних наук — (підпис) 14.12.21 — В. В. Лукін (виконавець з 30.04.2021, підрозділи 3.4, 6.3, 6.4, 6.5)

Кандидат технічних наук — (підпис) 14.12.21 — Б. Я. Яйлимов (підрозділи 1.5, 2.1, 2.6, 3.2, 5.2)

Доктор філософії з прикладної математики — (підпис) 14.12.21 — М. С. Лавренюк (підрозділи 1.2, 2.1, 2.5, 4.2, 5.5)

Кандидат технічних наук — (підпис) 14.12.21 — Л. В. Підгородецька (підрозділи 1.4, 2.4, 3.3, 4.3, 5.5)

Кандидат технічних наук — (підпис) 14.12.21 — Л. М. Колос (підрозділи 1.5, 2.4, 3.3, 5.5)

Доктор філософії з прикладної математики — (підпис) 14.12.21 — Г. О. Яйлимова (підрозділи 1.3, 2.1, 4.4, 5.3)

Магістр — (підпис) 14.12.21 — Л. Л. Шуміло (виконавець до 30.08.2021 р., підрозділи 1.3, 1.4, 2.2, 2.3, 2.6, 3.1)

Магістр — (підпис) 14.12.21 — Ю. В. Білоконська (виконавець до 15.12.2020 р., підрозділи 1.1, 2.2, 2.4)

Кандидат технічних наук — (підпис) 14.12.21 — А.В. Чирков (виконавець з 01.10.2021, підрозділи 4.1, 5.1)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 199 стор., містить 6 розд., 83 рис., 13 табл., 236 джерел.

Об'єкт дослідження – пожежна небезпека та моніторинг пожеж у природних екосистемах.

Предмет дослідження – методи оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж у природних екосистемах на основі супутникових даних.

Мета роботи – розроблення інформаційної технології оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж за супутниковими даними з підвищеною точністю та достовірністю на основі нового індексу пожежної небезпеки, узагальненого на основні типи природних екосистем, і нової ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж на базі карт температури земної поверхні підвищеного просторового розрізнення та поєднання різнотипних геопросторових продуктів з картами індексу пожежної небезпеки.

Методи дослідження – методи та інформаційні технології аналізу великих даних, методи машинного навчання, методи хмарної обробки інформації, системний аналіз, геопросторовий аналіз, статистичний аналіз.

Результати та їх новизна:

Вперше:

– розроблено метод підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення

– розроблено метод виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення

– розроблено метод оцінювання пожежної небезпеки для різних типів природних екологічних систем

– побудовано ймовірнісну модель локалізації зон виявлення та поширення пожеж

– створено робочі програмні реалізації методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення, методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення, методу оцінювання пожежної небезпеки для різних типів природних екологічних систем, ймовірнісної моделі локалізації місця зон виявлення та поширення пожеж.

Ключові слова: ІНДЕКС ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ, МОНІТОРИНГ ПОЖЕЖ, ПРИРОДНІ ЕКОСИСТЕМИ, ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ, СУПУТНИКОВІ ДАНІ, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ШАРИ, МАШИННЕ/ГЛИБИННЕ НАВЧАННЯ, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, МАСКУВАННЯ ХМАР, ТЕМПЕРАТУРА ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ, КЛАСИФІКАЦІЯ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ

ABSTRACT

Report SRW: 199 p., there are 6 chapters, 83 fig., 13 tables, 236 sour.

Research object – is fire danger and fire monitoring in natural ecosystems.

Purpose of work – development of information technology for fire danger assessment and fire monitoring based on satellite data with increased accuracy and reliability on the base of new fire danger index, generalized to main types of natural ecosystems, and new probabilistic model for fire detection and spread zones localization based on the land surface temperature maps with increased spatial resolution and on combination of heterogeneous geospatial products with fire danger index maps.

Research methods – is a set of methods and information technologies for big data analysis, machine learning methods, cloud processing methods, system analysis, geospatial analysis, statistical analysis.

Results and novelty:

First:

– the method for spatial resolution enhancement of the land surface temperature maps of low spatial resolution is developed

– the method for cloud detection on satellite data of high and low spatial resolution is developed

– fire danger assessment method for different types of natural ecological systems is developed

– probabilistic model for localizing of zones fire detection and spread is developed

– working software implementations of the method for spatial resolution enhancement of land surface temperature maps of low spatial resolution, the method for cloud detection on satellite data of high and low spatial resolution, fire danger assessment method for different types of natural ecological systems, probabilistic model for localizing of zones fire detection and spread are developed.

Keywords: FIRE DANGER INDEX, FIRE MONITORING, NATURAL ECOSYSTEMS, INFORMATION TECHNOLOGY, SATELLITE DATA, GEOINFORMATION LAYERS, MACHINE/DEEP LEARNING, NEURAL NETWORKS, CLOUD MASKING, LAND SURFACE TEMPERATURE, LAND COVER CLASSIFICATION.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ 9
ВСТУП 11
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ І МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ НЕОБХІДНИХ СУПУТНИКОВИХ, СТАТИСТИЧНИХ І НАЗЕМНИХ ДАНИХ 13
1.1 Аналіз та порівняння існуючих систем пожежної небезпеки, доступних баз даних пожеж та термальних аномалій 13
1.2 Аналіз методів оцінювання ризику виникнення пожеж 26
1.3 Аналіз методів виявлення та відновлення пропусків від хмар, що можуть бути використані для обробки мультисенсорної колекції супутникових даних з високим та низьким просторовим розрізненням 32
1.4 Аналіз чинників та передумов виникнення пожеж у різних типах екосистем 36
1.5 Визначення джерел необхідних супутникових, статистичних і наземних даних для оцінювання пожежонебезпеки та моніторингу пожеж .. 42
2 ЗБИРАННЯ, ОБРОБКА СУПУТНИКОВИХ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ДАНИХ, НЕОБХІДНИХ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАНЬ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ У ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ 45
2.1 Завантаження та попередня обробка супутникових даних за період 2017–2020 рр. для території України 45
2.2 Завантаження погодних даних з сервісу Copernicus Atmosphere Monitoring Service та глобальної атмосферної моделі NASA Power 52
2.3 Аналіз інформативних ознак, що є причинами надзвичайних подій, у колекції супутникових та погодних даних 53

2.4 Створення набору даних про надзвичайні ситуації, пов'язані з вогнем, у векторному вигляді на основі наявної інформації ДСНС України за період 2017–2020 рр. 56
2.5 Гармонізація супутникових даних високого та низького просторового розрізнення, формування спільного часового ряду на їх основі 58
2.6 Обробка супутникових даних для виявлення, маскування та відновлення пропусків від хмар у колекції супутникових знімків 61
3 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ РІЗНИХ ТИПІВ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ 67
3.1 Розроблення методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення гармонізованої колекції супутникових даних на основі наявних мультиспектральних даних високого просторового розрізнення 67
3.2 Розроблення методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення 78
3.3 Розроблення методу оцінювання пожежної небезпеки, що ґрунтується на індексі FWI, з використанням супутникових даних, погодних даних, карт характеристик земного покриву та його узагальнення на інші класи земного покриву 80
3.4 Розроблення ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж на основі супутникових даних низького просторового розрізнення та карт пожеженебезпеки і характеристик земного покриву високого просторового розрізнення 95
4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ ДЛЯ РОЗВ’ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАВДАНЬ СТОСОВНО РІЗНИХ ТИПІВ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ 100

4.1 Реалізація методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення гармонізованої колекції супутникових даних на основі наявних мультиспектральних даних високого просторового розрізнення 100
4.2 Реалізація методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення 103
4.3 Реалізація та узагальненння методу оцінювання пожежної небезпеки, що ґрунтується на індексі FWI, з використанням супутникових даних, погодних даних, карт характеристик земного покриву та його узагальнення на інші класи земного покриву 106
4.4 Реалізація ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж на основі супутникових даних низького просторового розрізнення та карт пожежної небезпеки і характеристик земного покриву високого просторового розрізнення 110
5 АПРОБАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ ДЛЯ ВИБРАНИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ СТОСОВНО З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ 114
5.1 Тестування методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні методом співставлення із наявними даними Landsat-8 та оцінки точності на штучно зменшеному розрізненні даних високого просторового розрізнення 114
5.2 Тестування методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення 119
5.3 Побудова результуючих карт рівнів пожежної небезпеки за узагальненим індексом для різних типів природних екологічних систем на основі порогової сегментації 126
5.4 Верифікація методу оцінювання пожежної небезпеки на основі співставлення обчисленого узагальненого індексу з наявними індексами .. 132

5.5 Тестування ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж з використанням даних ДСНС та супутникових даних . 147
6 СТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ У ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ 152
6.1 Визначення джерел та форматів вхідних даних для інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж і форматів вихідних даних інформаційної технології, що підтримуються WMS та WFS стандартами передачі геопросторових даних 152
6.2 Розробка структурної схеми інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж 160
6.3 Розробка схеми інформаційних потоків інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж, що може бути реалізована в хмарному середовищі Amazon 163
6.4 Реалізація інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки на основі розробленої програмної реалізації методу оцінки пожежної небезпеки 166
6.5 Реалізація інформаційної технології моніторингу пожеж на основі розробленої програмної реалізації ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та розповсюдження пожеж 168
ВИСНОВКИ 171
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 174

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AOI	area of interest
API	Antecedent Precipitation Index
BA	Burned Area
BOA	Bottom of the Atmosphere
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BUI	Buildup Index
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CCDS	Copernicus Climate Data Store
CEMS	Copernicus Emergency Management Service
CFFDRS	Canadian Forest Fire Danger Rating System
CFFWIS	Canadian Forest Fire Weather Index System
CGLS	Copernicus Global Land Service
DC	Drought Code
DEM	digital elevation model
DMC	Duff Moisture Code
DOS	Dark Object Subtraction
EFFIS	European Forest Fire Information System
EO	Earth Observation
EOS	Earth Observing System
EOSDIS	Earth Observing System Data and Information System
FFDI	McArthur Forest Fire Danger Index
FFMC	Fine Fuel Moisture Code
FIRMS	NASA's Fire Information for Resource Management System
FPI	Fire Potential Index
FWI	Fire Weather Index
GEE	Google Earth Engine
GFED	Global Fire Emissions Database
GML	Geography Markup Language
GPM	Global Precipitation Measurement
GRAS	Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System

GWIS	Global Wildfire Information System
HLS	Harmonized Landsat i Sentinel-2
ISI	Initial Spread Index
KBDI	Keetch- Byram Drought Index
LP DAAC	The Land Processes Distributed Active Archive Center
LST	Land Surface Temperature
LSTM	Long Short Term Memory
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASA POWER	NASA's Prediction Of Worldwide Energy Resources
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NFDRS	National Fire Danger Rating System
OGC	Open Geospatial Consortium
RG	Relative Greenness
RMSD	root-mean-square deviation
SLSTR	Sea Land Surface Temperature Radiometer
SMD	Soil Moisture Deficit
SMOS	Soil Moisture Ocean Salinity
SNAP	Sentinel Application Platform
SSM	Surface Soil Moisture
TOA	Top-of-Atmosphere
USFS	Wildland Fire Assessment System
USGS	U.S. Geological Survey
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
WFS	Web Feature Service
WIMS	Weather Information Management System
WMS	Web Map Service
ДСНС	Державна служба України з надзвичайних ситуацій
КПН	комплексний показник пожежної небезпеки В.Г. Нестерова
РГМ	рослинні горючі матеріали

ВСТУП

Для України однією з актуальних проблем збереження довкілля та забезпечення безпеки життєдіяльності є усунення ризиків виникнення пожеж, зменшення їх негативних наслідків, гарантування безпеки людей. Про масштабність проблеми пожеж у природних ландшафтах України свідчать низка документів щодо запобігання пожежній небезпеці, зокрема результати засідання РНБО з розгляду питань про заходи щодо запобігання та протидії лісовим пожежам у пожежонебезпечний період 2021 (23 березня 2021 року). Наявна аналітична інформація свідчить про те, що на рівні державного управління відсутні джерела своєчасної та достовірної інформації про стан проблем. Зокрема, аналіз інформації про пожежі навесні 2020 р. показав, що дані з різних джерел суттєво відрізняються: за офіційними даними площа згоряння становить сотні гектарів, за неофіційними – тисячі гектарів.

Серед нагальних проблем забезпечення пожежної безпеки є раннє виявлення пожеж, а також їх передбачення. Наявність точної і часто оновлюваної інформації про визначення місця розташування потенційної пожежі та її розвиток надає принципово нових можливостей управлінню ризиками в цій сфері. Залучення даних супутникових спостережень є унікальним джерелом інформації з точки зору точності, достовірності, своєчасності та охоплення території. Наразі на глобальному та регіональному рівні створені сучасні інформаційні системи оцінки пожежної небезпеки та моніторингу пожеж з використанням супутникових даних зокрема апаратів Terra, Aqua, Suomi NPP, NOAA-20, PROBA-V, Landsat-8, Sentinel-2, 3

Ці інформаційні системи здійснюють в операційному режимі аналіз пожежної ситуації, на основі щоденних карт рівня пожежної небезпеки та її прогнозів до 10 днів із застосуванням метеорологічних моделей, карт температурних аномалій та периметрів пожеж і згарищ. Однак операційний характер надання інформаційних сервісів такими системами має низку обмежень, пов’язаних з низьким просторовим розрізненням зйомки

(продукти MODIS та VIIRS), метеорологічними даними з просторовим розрізненням порядку десятка кілометрів. Крім того, використовуваний погодний індекс пожежної небезпеки FWI справедливий для лісів, а для інших типів природних екосистем необхідна його модифікація.

Саме на усунення зазначених недоліків спрямована дана робота. На основі аналізу сучасного стану проблематики вирішено застосувати методи просторово-часового злиття супутникових даних від різних сенсорів з залученням даних високого просторового розрізнення та відновленням інформації про пожежі на часових інтервалах, для яких відсутні дані високого просторового розрізнення. Ідеологія, покладена у послідовність кроків дослідження реалізована наступним чином.

Розділи 1 та 2 присвячені аналізу стану реальних інформаційних систем і методів моніторингу пожежної безпеки. Крім того у Розділі 2 розглянуті релевантні джерела супутникових, статистичних і наземних даних, процедури їх оброблення та виявлення характерних ознак можливих пожеж.

У Розділі 3 викладається основна ідея та методи модифікації індексу пожежної небезпеки FWI шляхом підвищення його точності з використанням мультиспектральних даних високого просторового розрізнення, погодних та геоінформаційних даних; наведена ймовірнісна модель локалізації зон виявлення та поширення пожеж.

Розділи 4 і 5 присвячені програмній реалізації та апробації розроблених методів, а розділ 6 – створенню відповідної інформаційної системи.

Отримані результати слугуватимуть підґрунтям для створюваної інформаційної технології оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж за супутниковими даними з підвищеною точністю та достовірністю на основі нового індексу пожежної небезпеки, узагальненого на основні типи природних екосистем. Проведена апробація розроблених методів дозволяє прогнозувати реалістичність задуму щодо створення запропонованої інноваційної інформаційної системи.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ І МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ НЕОБХІДНИХ СУПУТНИКОВИХ, СТАТИСТИЧНИХ І НАЗЕМНИХ ДАНИХ

На сьогоднішній день на глобальному та регіональному рівні наявні сучасні інформаційні системи оцінки пожежної небезпеки та моніторингу пожеж, зокрема, і з використанням супутникових даних [1]. У більшості країн в основу таких систем покладено оцінювання пожежної небезпеки за умовами погоди. Зокрема, Канада, Нова Зеландія, Фіджі, Мексика, Аляска, Флорида, Мічиган, Хорватія, країни Південно-Східної Азії використовують канадську систему оцінки небезпеки лісових пожеж CFFDRS, Австралія – показник лісової пожежної небезпеки FFDI. У США використовується національна система оцінки пожежної небезпеки NFDRS. Нижче коротко викладені результати аналізу зазначених систем та методів оцінювання ризику виникнення пожеж, що використовуються в цих системах.

1.1 Аналіз та порівняння існуючих систем пожежної небезпеки, доступних баз даних пожеж та термальних аномалій

Служба надання інформації про пожежі для системи управління ресурсами NASA (FIRMS). Система FIRMS (NASA's Fire Information for Resource Management System,) була розроблена для надання інформації про місцезнаходження активних загорянь в режимі реального часу менеджерам природних ресурсів, які зіткнулися з проблемами отримання своєчасної супутникової інформації про пожежі [2]. FIRMS надає дані про активні пожежі в режимі, близькому до реального часу, протягом 3 годин після супутникових спостережень за допомогою спектрорадіометра з середнім просторовим розрізненням MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на борту супутників NASA Terra і Aqua і комплекту

радіометрів видимого інфрачервоного зображення VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) на борту супутників Національного партнерства по полярній орбіті NASA/NOAA Suomi NPP і NOAA-20. Система також надає продукти про активні пожежі за останні 24, 48 годин і 7 днів в форматах шейп-файлів.

За даними Лісової служби США [3], сухе деревне паливо запалюється при досягненні температури близько 540° F, а встановлена лісова пожежа виникає при температурі, яка може перевищувати 1500° F. Це тепло є маяком для орбітальних датчиків, таких як MODIS і VIIRS, які виявляють випромінювану енергію. Кожна гаряча точка / виявлення активної пожежі є центром пікселя, зазначеного як такий, що містить одну або кілька пожеж або інші теплові аномалії (наприклад, вулкани). Розмір пікселя залежить від приладу зйомки: для MODIS розмір складає приблизно 1 км, а для VIIRS – приблизно 375 м. «Місцезнаходження» – це центральна точка пікселя (не обов'язково координати фактичної пожежі), рис. 1.1.

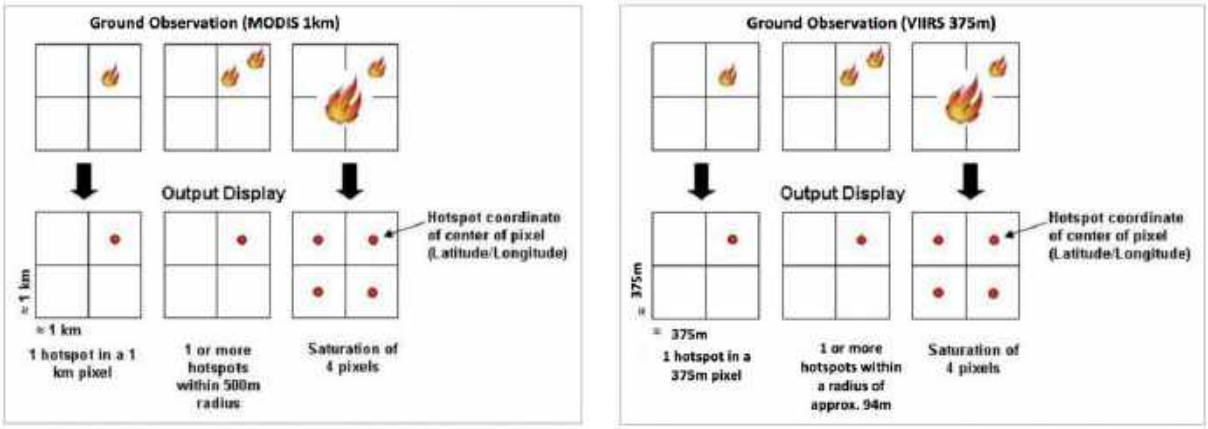


Рисунок 1.1 – Виявлення пожежі на Землі за допомогою датчиків MODIS і VIIRS [1]

У будь-якій конкретній сцені мінімальний розмір пожежі, що виявляється, є функцією багатьох різних змінних (кута сканування, біоми, положення сонця, температури поверхні землі, хмарного покриву, кількості диму та напрям вітру тощо), і тому точність визначення розміру пожежі буде

дещо різнитися за цими умовами. MODIS регулярно виявляє як палаючі, так і тліючі пожежі площею 1000 м^2.

Слід враховувати, що оцінювати площу пожежі (вигоряння) за даними про активну пожежу не рекомендується через нетривіальні проблеми формування просторової та часової вибірки. Для деяких додатків, однак, може бути досягнута прийнятна точність, хоча ефективна площа вигоряння на піксель вогню не просто постійна, а варіюється в залежності від декількох різних змінних, пов'язаних з рослинністю і пожежами [4].

Діаграма на рис. 1.2 показує денну і нічну залежність розміру пожежі і температури пожежі в різних біомах від ймовірності виявлення за допомогою MODIS [5].

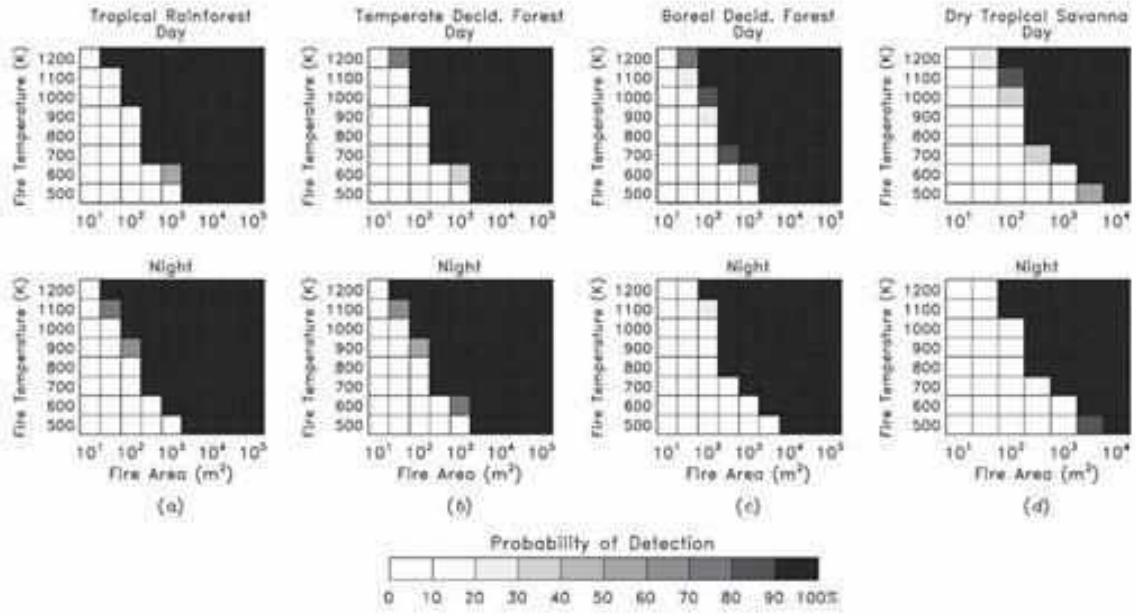


Рисунок 1.2 – Приклад денної і нічної залежності розміру пожежі і температури спалаху

Продукт MODIS для пожежних і теплових аномалій MCD14DL є основою продуктів FIRMS (починаючи з 2007 р.). Коли MODIS виявляє теплову аномалію, яка може вказувати на лісову пожежу або будь-яке значне джерело тепла, комп'ютерний алгоритм визначає центр області площею 1 км^2, в якій виявлено аномалію. Важливо відзначити, що геолокація

виявленої точки доступу основана на прогнозованій, а не на остаточній інформації про орбіту супутника.

Продукт VIIRS I-band (375 м) про активні пожежі був доданий в колекцію FIRMS у 2016 р. і був розроблений з використанням продукту MODIS для пожежних і теплових аномалій. Це означає, що продукти VIIRS і MODIS по пожежах доповнюють один одного, а продукт VIIRS 375 m і продукт MODIS по пожежах показують гарний збіг у виявленні гарячих точок. Виявлення пожежі супутником виконується з використанням контекстного алгоритму, який використовує високий рівень випромінювання в середній інфрачервоній області в результаті пожеж [5,6].

Відповідно до політики відкритих даних NASA, всі дані і продукти даних MODIS і VIIRS повністю доступні та відкриті. Ця політика також стосується алгоритмів, що використовуються для обробки даних, а також інтерфейсів прикладних програм, що полегшують використання даних.

Європейська інформаційна система про лісові пожежі (European Forest Fire Information System, EFFIS) і Лісова служба Індії – це лише деякі з всесвітніх урядових організацій і агентств, що використовують дані FIRMS про пожежі і теплові аномалії. Лісова служба США використовує дані FIRMS як невід'ємний компонент своєї програми картування активних пожеж, яка забезпечує виявлення і характеристики стану лісових. Велика частина протипожежних робіт Інституту світових ресурсів (World Resources Institute) пов'язана з моніторингом навмисного спалювання землі для потреб сільського господарства і дані FIRMS не тільки забезпечують швидке реагування на виявлені пожежі, а й допомагають ідентифікувати незаконне спалювання землі та дозволяють притягти до відповідальності винних у незаконному палінні.

Центр активного архівування інформації про наземні процеси LP DAAC (The Land Processes Distributed Active Archive Center) – один із декількох спеціалізованих центрів обробки даних у рамках системи даних та інформації системи спостереження Землі NASA (Earth Observing System Data

and Information System, EOSDIS) [7]. LP DAAC надає два продукти, пов'язані з пожежами: *MCD64A1v006* та *VNP64A1v001*.

Щомісячний комбінований продукт даних супутників Terra і Aqua *MCD64A1 Version 6 Burned Area* з глобальною сіткою 500 м містить інформацію про випалену площу на піксель та якісну інформацію. Інформаційний продукт *VNP64A1 Version 1* Suomi National Polar-Orbiting Partnership (S-NPP) NASA VIIRS Burned Area є щомісячним продуктом з глобальною сіткою 500 м, що містить інформацію про випалену площу на піксель та якісну інформацію. Шари даних, представлені в продуктах MCD64A1 і VNP64A1, включають дату горіння, невизначеність даних горіння, контроль якості, а також перший і останній день надійного виявлення змін року.

Глобальна земельна служба CGLS (Copernicus Global Land Service) з квітня 2014 р. надає продукт «випалені площі» (burned area, BA) з просторовим розрізненням 300 м, що генерується кожні 10 днів на основі супутникових даних PROBA-V [8]. Продукт пройшов валідацію відповідно до протоколів CEOS Land Product Validation, опублікованих у відкритій рецензованій літературі [9]. Дослідження якості продукту BA PROBA-V 300 м за 2017 і 2018 рр. показали [11], що оцінки площ вигорілих ділянок можна порівняти з оцінками площ вигорілих ділянок, отриманих з продуктів MODIS MCD64, хоча є деякі розбіжності в часі і просторовому розташуванні виявлених вигорілих ділянок. Виявлені зони пожеж у порівнянні з рядом пожеж, виявлених Службою управління надзвичайними ситуаціями Copernicus CEMS (Copernicus Emergency Management Service) та Європейською системою інформації про лісові пожежі EFFIS (European Forest Fire Information System), дають хороші результати: істотних змін, помітних в континентальному масштабі, в оцінках площі вигорілих пожеж немає.

Глобальна база даних по викидах від пожеж GFED (Global Fire Emissions Database) містить супутникову інформацію (500 м MODIS) про

пожежну активність і продуктивність рослинності для оцінки щомісячної спаленої площі і викидів від пожеж з прив'язкою до сітки, а також дані, які можна використовувати для розрахунку викидів з більш високим часовим дозволом [12]. Серед основних наборів даних GFED: спалена площа [13], спалена площа від "невеликих" пожеж на основі виявлень активних пожеж поза картами спалених площ [14, 15], викиди вуглецю тощо. Поточна версія 4 має просторове розрізнення 0,25° і доступна з 1997 р. по 2016 р. Щомісячні дані про викиди доступні і за період після 2016 рр. GFED містить Глобальний атлас пожеж – набір даних, який відстежує щоденну динаміку окремих пожеж для визначення часу та місця розташування загорянь, розміру і тривалості пожежі, а також добового розширення, довжини лінії вогню, швидкості і напрямку поширення.

Канадська система оцінки небезпеки лісових пожеж CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System) розробляється з 1968 р. [16]. На даний час дві її підсистеми – Канадська система погодного індексу лісових пожеж FWI (Forest Fire Weather Index) [17] та Канадська система прогнозу поведінки лісових пожеж FBP (Forest Fire Behavior Prediction) [18], широко використовуються в Канаді та на міжнародному рівні.

На рис. 1.3 наведено компоненти системи CFFDRS.

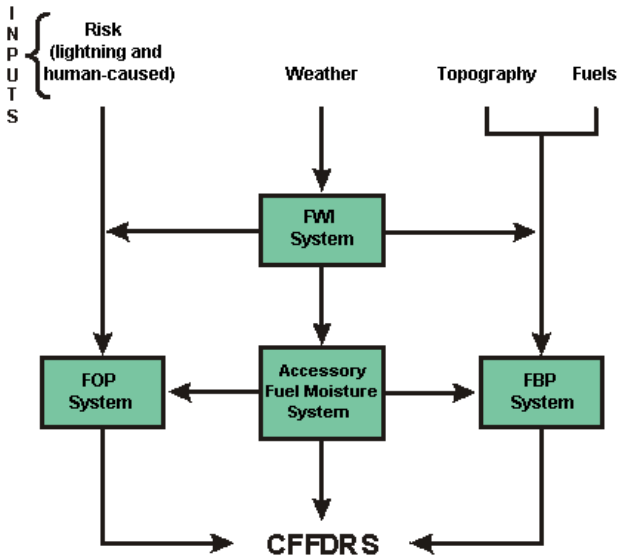


Рисунок 1.3 – Діаграма компонентів системи CFFDRS [16]

Ризик, погода, паливо та топографія забезпечують необхідні вихідні дані для прогнозування «пожежонебезпечної» погоди, виникнення пожежі та поведінки вогню. Під терміном «пожежонебезпечної» розуміють погодні умови, які підвищують ризик і сприяють поширенню лісових пожеж.

У даний час для ряду канадських типів лісів розробляються моделі вологості палива. Разом підсистеми CFFDRS передбачають потенційну пожежну небезпеку в лісі

Система FWI складається з шести компонентів, що враховують вплив вологості палива та погодних умов на поведінку вогню (рис. 1.4). Розрахунок компонентів системи FWI базується на послідовних щоденних спостереженнях за температурою, відносною вологістю, швидкістю вітру та добовими опадами. Перші три компоненти (коди) є бальними оцінками вмісту вологи в трьох шарах лісового палива: підстилці та інших видах тонкого палива; в слабо ущільненому органічному (duff) шарі, що розкладається; глибокому щільному органічному шарі.

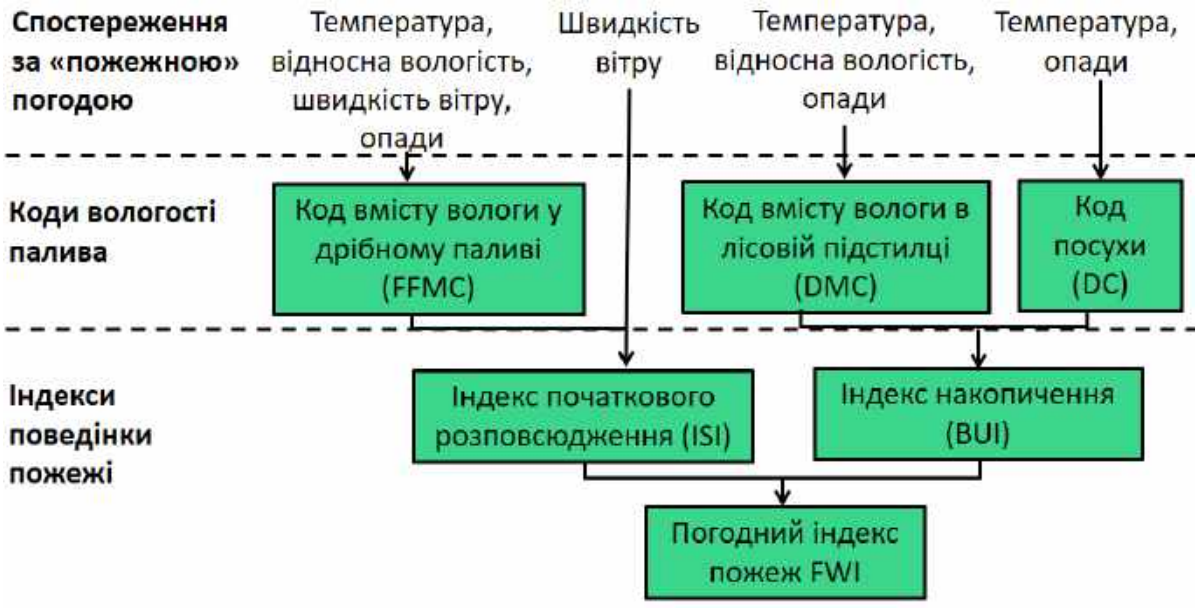


Рисунок 1.4 – Компоненти системи FWI [17]

Три інші індекси системи, значення яких зростають зі збільшенням пожежної небезпеки, відповідають за поведінку вогню, а саме: швидкість

поширення вогню; кількість палива, доступного для горіння; інтенсивність пожежі.

Ці шість стандартних компонентів забезпечують кількісне оцінювання відносної ймовірності виникнення лісових пожеж. Докладніше ці індекси розглянуто у підрозділі 1.2 Звіту.

Європейська інформаційна система лісових пожеж EFFIS є веб-орієнтованою географічною інформаційною системою, що надає інформацію про лісові пожежі та режими пожеж у регіонах Європи, Близького Сходу та Північної Африки у часі, близькому до реального, та в історичному плані [19]. Моніторинг пожеж в EFFIS включає повний цикл спостереження пожежі з наданням інформації про передумови пожежі, сам процес пожежі, та оцінку збитків від пожежі. Додаток «Переглядач поточної ситуації» системи EFFIS дозволяє користувачу запитувати і переглядати поточну та архівну інформацію у формі карт пожежної небезпеки та її прогнозу до 9 днів, щоденно оновлюваних карт гарячих точок та периметрів пожежі (рис. 1.5) [20].

Рисунок 1.5 – Інтерфейс додатку «Переглядач поточної ситуації»

На даний час модуль прогнозу пожежної небезпеки EFFIS забезпечує доступ до індексів пожежної небезпеки з використанням числового прогнозу погоди на основі двох детермінованих моделей. Зокрема, індекс FWI обчислюється за моделлю Європейського центру середньотермінових прогнозів погоди ECMWF (сітка з елементами 8 км), яка забезпечує прогнози на 1–9 днів, та за французькою моделлю MeteoFrance (сітка з елементами 10 км), яка забезпечує прогнози до 3 днів. Компоненти індексу FWI відображаються у 6 класах пожежної небезпеки та наведені у табл. 1.1. Вказані класи однакові для всіх країн, і карти показують узгоджену картину просторового розподілу рівня пожежної небезпеки.

Таблиця 1.1 – Обмеження на значення індексу FWI та його компонентів, які визначають 6 класів пожежної небезпеки

Класи пожежної небезпеки	*FWI*	*FFMC*	*DMC*	*DC*	*ISI*	*BUI*
дуже низький	$FWI < 5{,}2$	$FFMC < 82{,}7$	$DMC < 15{,}7$	$DC < 256{,}1$	$ISI < 3{,}2$	$BUI < 24{,}2$
низький	$5{,}2 \le FWI < 11{,}2$	$82{,}7 \le FFMC < 86{,}1$	$15{,}7 \le DMC < 27{,}9$	$256{,}1 \le DC < 334{,}1$	$3{,}2 \le ISI < 5{,}0$	$24{,}2 \le BUI < 40{,}7$
помірний	$11{,}2 \le FWI < 21{,}3$	$86{,}1 \le FFMC < 89{,}2$	$27{,}9 \le DMC < 53{,}1$	$334{,}1 \le DC < 450{,}6$	$5{,}0 \le ISI < 7{,}5$	$40{,}7 \le BUI < 73{,}3$
високий	$21{,}3 \le FWI < 38{,}0$	$89{,}2 \le FFMC < 93{,}0$	$53{,}1 \le DMC < 140{,}7$	$450{,}6 \le DC < 749{,}4$	$7{,}5 \le ISI < 13{,}4$	$73{,}3 \le BUI < 178{,}1$
дуже високий	$38{,}0 \le FWI < 50{,}0$	$FFMC \ge 93{,}0$	$DMC \ge 140{,}7$	$DC \ge 749{,}4$	$ISI \ge 13{,}4$	$BUI \ge 178{,}1$
екстремальний	$FWI \ge 50{,}0$					

Для *виявлення активних пожеж* в системі EFFIS використовуються супутникові продукти, які надаються системою FIRMS [24]: MODIS (MCD14DL, 1 км) [25] і VIIRS (VNP14IMGTDL_NRT, 375 м) [26]. Активні пожежі локалізуються на основі так званих теплових аномалій, що спричиняються ними. Алгоритми порівнюють температуру потенційної пожежі з температурою земного покриву навколо місця її локалізації. Якщо різниця температур перевищує заданий поріг, потенційний пожежа підтверджується як активний вогонь або «гаряча точка».

Картографування випалених територій на основі даних MODIS включає розмежування масштабів лісових пожеж на основі

напівавтоматичної класифікації супутникових знімків MODIS із використанням допоміжних наборів просторових даних.

У системі оцінки лісових пожеж лісової служби США WFAS (Wildland Fire Assessment System) збирається та відображається інформація про небезпеку пожеж для території США [27]. Система грунтується на даних спостережень за погодою, що проводяться на пожежних метеостанціях по всій території США, і вводяться в Систему управління метеорологічною інформацією WIMS (Weather Information Management System). Веб-сайт WFAS містить: щоденні карти пожежної небезпеки з використанням значень системи NFDRS з WIMS; доступ до історичних карт пожежної небезпеки та деяких табличних даних, історичні метеорологічні продукти, інформацію про вологість палива тощо.

Рівень оцінки пожежної небезпеки враховує поточну і попередню погоду, типи палива, а також вологість так званих «живого» (life fuel) та «відмерлого» (dead fuel) палива. За визначенням [28] «відмерле» паливо – це паливо, в якому вологість контролюється виключно температурою навколишнього середовища, випромінюванням, відносною вологістю та опадами. «Живе» паливо – це паливо, вміст вологи в якому контролюється фізіологічними процесами в рослині. Зміни вологості двох класів живого палива (трав'янистих рослин і деревних чагарників) є сезонними і короткостроковими.

Для побудови карт паливна модель, вибір індексу і рівні пожежної небезпеки (табл. 1.2) встановлюються місцевими менеджерами метеостанцій. Близько 90 % використовують індекс горіння, інші використовують компонент вивільнення енергії. Супутникові продукти в даний час є самостійними індикаторами пожежонебезпеки і не враховуються при розрахунках, за винятком експериментальних проектів.

Таблиця 1.2– Шкала оцінки пожежної небезпеки [29]

Класи пожежної небезпеки та код кольору (на карті)	Опис
низький (L) (темнозелений)	Паливо не легко запалюється від дрібних підпалів, хоча більш інтенсивне джерело тепла, таке як блискавка, може спричинити пожежу в деревині. Пожежі на відкритих луках можуть виникати через кілька годин після дощу, але лісові пожежі можуть повільно поширюватися (повзучи та тліючи) в непердбачуваних напрямах. Небезпека виникнення таких ділянок незначна
середній (M) (світлозелений або блакитний)	Пожежі можуть починатися з більшості випадкових причин, але за винятком пожеж через блискавки у деяких районах, як правило, їхня кількість зазвичай невелика. Пожежі на відкритих луках будуть інтенсивно горіти і швидко поширюватись у вітряні дні. Лісові пожежі можуть поширюватись як повільно, так і швидко. Пожежі навряд чи стануть серйозними, а боротьба з ними відносно проста.
високий (H) (жовтий)	Все дрібне відмерле паливо легко запалюється, і пожежі легко починаються з більшості причин (залишене непогашене багаття). Пожежі поширюються швидко, і виявлення їх зблизька є звичайним явищем. Високоінтенсивне горіння може розвиватися на схилах або при скупченні дрібного палива. Пожежі можуть стати серйозними, а боротьба з ними ускладнена, якщо вчасно їх не погасити, поки вони невеликі
дуже високий (VH) (помаранчевий)	Пожежі легко починаються з усіх причин і відразу після займання швидко поширюються і швидко посилюються. Точкові пожежі становлять постійну небезпеку. Пожежі на легких видах палива можуть швидко досягти високих значень хакактеристик інтенсивності, таких як поширення на великі відстані та вогняні вихори, коли пожежі разповсюджуються завдяки більш важких видів палива
екстремальний (E) (червоний)	Пожежі починаються швидко, інтенсивно поширюються і характеризуються високим рівнем горіння.Усі пожежі потенційно серйозні. Розвиток горіння високої інтенсивності зазвичай відбувається швидше і виникає від менших пожеж, ніж у нижчому класі) пожежної небезпеки. Пряме гасісіння пожеж можливе рідко і може бути небезпечним, за винятком випадків відразу після загоряння. Пожежі, які розвиваються на територіях сильних рубок або хвойних насаджень, можуть бути некерованими, поки триває надзвичайно сильне горіння. У цих умовах єдиною ефективною та безпечною дією контролю є фланги, поки погода не зміниться або не зменшиться подача палива

Система WFAS запитує інформацію WIMS кожен день і створює карти спостережуваної та прогнозованої погоди, вологості палива і пожежної небезпеки (рис. 1.6). Розташування передавальних станцій вказано на картах маркером. Значення між станціями оцінюються на основі методу зворотних квадратів відстані на сітці 10 км.

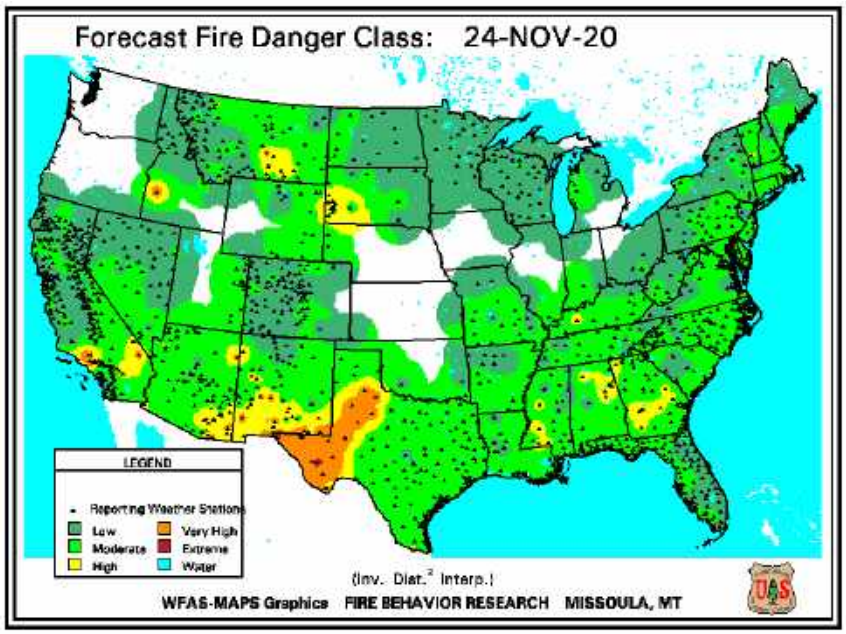


Рисунок 1.6 – Прогноз класу пожежної небезпеки

Система моделювання пожеж BehavePlus Міністерства сільського господарства США є однією з широко використовуваних систем прогнозування лісових пожеж. Вона розроблена для вирішення ряду проблем, включаючи прогнозування поведінки вогню при лісових пожежах, моніторинг пожеж, оцінку небезпеки пожежі залежно від типу земного покриву, моделювання поведінки пожежі. BehavePlus базується на математичних моделях поведінки вогню в середовищі, в якому відбувається пожежа. У якості вхідних даних у системі використовуються температура, відносна вологість повітря, швидкість і напрям вітру, рельєф, вологовміст земної поверхні та номер моделі горючих матеріалів. У BehavePlus використовуються 13 різних моделей горючих матеріалів, які застосовуються для моделювання пожежі певного типу земного покриву в кожному конкретному випадку [30]. На основі моделі Ротермеля BehavePlus забезпечує обчислення наступних вихідних параметрів: швидкість поширення та інтенсивність пожежі, кількість тепла на одиницю площі, розмір безпечної зони, висота факела полум’я, площа і периметр пожежі.

Досвід створення центру моніторингу пожеж і системи моніторингу та прогнозування пожежної небезпеки в Україні. У 2013 р.

на базі Навчально-наукового інституту лісового і садово-паркового господарства Національного університету біоресурсів і природокористування України відбулося відкриття Регіонального Східноєвропейського Центру моніторингу пожеж (REEFMC) у результаті співпраці науковців інституту з Глобальним Центром моніторингу пожеж (GFMC) та Групою фахівців з лісових пожеж Європейської Економічної Комісії ООН/ФАО. Метою центру є координація наукових досліджень у галузі природних пожеж, забезпечення інформаційного обміну, навчання та надання консультаційної підтримки з питань управління пожежами. На даний час розроблено науково-методичне забезпечення створення геопорталу для оцінювання ризику, прогнозування та попередження природних пожеж у Поліссі України [31].

Українським гідрометеорологічним інститутом Державної служби України з надзвичайних ситуацій розроблено автоматизовану систему коротко- і середньотермінового прогнозу природної пожежної небезпеки за метеорологічними умовами в Україні (АСППН) [32]. Система враховує регіональні особливості пірологічніих характеристик клімату, умови формування пожежної небезпеки і дозволяє оцінити напруженість природної пожежної небезпеки території та клас пожежної небезпеки за регіональними шкалами. Система прогнозування природної пожежної небезпеки дозволяє отримати оперативну прогностичну інформацію із завчасністю 20 годин про клас та ступінь природної ожежної небезпеки, особливості її формування, відстежувати у режимі реального часу, розвиток та поширення природної пожежної небезпеки. Прогноз природної пожежної небезпеки за метеорологічними умовами реалізовано за даними чисельної моделі погоди WRF ARW-3.0 на 120 год (5 діб). При використанні даних моделі GFS можна отримати прогноз на 384 год (16 діб). Слід зауважити, що вихідні карти, що розміщуються на сайті УкрГМЦ, можна отримати лише через код доступу.

Висновки. Аналіз систем інформування про пожежі та прогнозування пожежної небезпеки показав, що у цих системах приділено більшу увагу погодним даним, що робить їхні оцінки більш складними. Найбільш вдалими

до застосування є системи, реалізовані в Європі та Північній Америці (EFFIS, FIRMS, CFFDRS), які використовують у своїх методологіях супутникові дані. Проте, ці системи розроблялися загалом з урахуванням конкретних природних умов і горючості певної території та не можуть бути автоматично перенесені на будь-яку місцевість. Тому Україна не може повністю запозичувати їхній досвід без відповідної модернізації.

1.2 Аналіз методів оцінювання ризику виникнення пожеж

Проблема прогнозу пожежної небезпеки у різних типах екосистем у зв'язку з природними (посуха, грозові розряди) або антропогенними (навмисний підпал, халатне поводження з вогнем людей тощо) чинниками наразі є досить актуальною. Кожна з розглянутих вище систем оцінки пожежонебезпеки має свої основоположні підходи до оцінювання за певними параметрами та за встановленими індексами пожежної небезпеки.

Індекси пожежної небезпеки – це математичні формули, що формалізують вплив метеорологічних умов (опадів, температури та вологості повітря, швидкості вітру тощо), вологовмісту горючих матеріалів та інших чинників, і дозволяють прогнозувати можливість виникнення пожеж на певній території.

Метою огляду, проведеного у даному підрозділі Звіту, є аналіз методів розрахунку індексів лісової пожежної небезпеки та проведення їх порівняння.

Сучасний стан прогнозування природної пожежної небезпеки в Україні. З 60-х років минулого століття природну пожежну небезпеку в Україні визначають за комплексним показником пожежної небезпеки В.Г. Нестерова (КПН) [33], який характеризує ступінь посушливості погоди і враховує комплексний вплив температури повітря та температури точки роси на лісові горючі матеріали за бездощовий період.

Установлені початкові класи та ступені пожежонебезпечності для території України було змінено у 2007 р. Внаслідок таких змін поріг класу пожежної небезпеки – надзвичайна пожежна небезпека, який належить до стихійних гідрометеорологічних явищ погоди, було зменшено вдвічі. За оцінками експертів зміни термічного режиму та режиму зволоження в Україні будуть суттєво посилюватись до середини століття і призведуть до збільшення природної пожежної небезпеки, що вимагає удосконалення описаної методики її прогнозування [34].

Проведена оцінка залежності наявності і повторюваності лісових пожеж від величини КПН Нестерова у районах оперативного реагування Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) показала, що КПН Нестерова має дуже слабкий і нестійкий зв'язок з наявністю лісової пожежі. З аналізу робіт [34–35] випливає, що діюча в Україні методика прогнозування природної пожежної небезпеки за КПН не відображає реальний стан горючості лісу за умовами погоди

Визначення погодного індексу лісових пожеж FWI канадської системи CFFDRS. Як вже було зазначено в підрозділі 1.1 Звіту, шість стандартних компонентів забезпечують числові оцінки відносної ймовірності виникнення лісових пожеж (рис. 1.4). Вихідними даними для обчислення субіндексів є полуденні температура, відносна вологість, опади (накопичені за 24 години) та / або швидкість вітру. Система FWI та її компоненти виявилися придатними для відображення різних аспектів перебігу пожежі, зокрема, *FFMC* добре корелює з ймовірністю виникнення пожежі; *ISI* з площею вигорілої ділянки; *BUI* і *FWI* з активністю вогню загалом [36].

*Код вмісту вологи у дрібному паливі (*Fine Fuel Moisture Code, *FFMC*) є числовим показником вологості в підстилці та інших видах дрібного палива, і є індикатором відносної легкості загоряння та займистості дрібного палива. *FFMC* розраховується шляхом зміни його попереднього значення на величину, яка представляє собою будь-які вагомі опади або атмосферне зволоження / висихання, які відбулися за день. *Код вмісту вологи в*

органічному шарі (Duff Moisture Code, DMC) є числовим показником вологості в слабо ущільненому органічному (duff) шарі, що розкладається, помірної глибини, та є індикатором вмісту палива в duff-шарі та деревному матеріалі середнього розміру. *Код посухи* (Drought Code, DC) є числовим показником вологості в глибокому щільному органічному шарі (глибшому за шар, представлений кодом DMC) та є індикатором сезонного впливу посухи на лісове паливо та тління у глибоких duff-шарах і великих колодах. Передбачається, що описані три коди $FFMC$, DMC, DC обчислюються щодня.

Другий рівень системи FWI складається з трьох індексів поведінки пожежі [36] (рис. 1). Два проміжні індекси поведінки пожежі відображають швидкість поширення пожежі та кількість доступного палива. *Індекс початкового розповсюдження* (Initial Spread Index, ISI) – це числова оцінка очікуваної швидкості поширення пожежі, коли дрібне паливо (лісова підстилка) висихає, а висихання у глибшому шарі не враховується. Індекс базується на швидкості вітру (не більшій 100 км/год) і $FFMC$. Як і інші компоненти системи FWI, ISI не враховує тип палива. *Індекс накопичення* (Buildup Index, BUI) – це числова оцінка загальної кількості палива, доступного для згоряння, яка поєднує коди DMC та DC. BUI зазвичай менш ніж в два рази перевищує значення DMC, і припускається, що вміст вологи в шарі DMC допоможе запобігти вигорянню в більш глибокому матеріалі. Код DMC реагує на опади або їх відсутність швидше, ніж DC, який характеризує більш глибокий duff-шар [36, 37].

Результуючий індекс пожежної поведінки, *погодний індекс пожежі* FWI, поєднує ISI та BUI і є бальною оцінкою інтенсивності пожежі. FWI – це додатне число, при цьому низькі значення вказують на погодні умови з низькою пожежною небезпекою, а більш високі значення – на погодні умови з підвищеною пожежною небезпекою.

Ці шість стандартних компонентів системи FWI є предикторами добового потенційного загоряння. Оскільки для кожного компонента

визначається одне значення в день, система FWI не вказує погодинні зміни, а також не враховує зміни в типі палива від сезону до сезону або від місця до місця [36]. Проте, система надає довідкові шкали, які дозволяють порівнювати пожежну небезпеку з іншими днями та іншими місцями. Система FWI дозволяє реконструювати минулі умови пожежної небезпеки, якщо доступні відповідні історичні метеорологічні записи.

Методика обчислення компонентів системи FWI досить громіздка і детально описана у [37–39]. Компоненти системи FWI відображаються у 6 класах пожежної небезпеки (дуже низький, низький, середній, високий, дуже високий та екстремальний).

Система FWI виявилась достатньо пристосованою до впровадження та адаптування у країнах з відмінним від Канади кліматом, включаючи країни, близькі до Австралії, такі як Нова Зеландія, Індонезія та Малайзія [40, 41], а також інших країнах [42]. Однак процес адаптування та валідації системи FWI до кліматичних умов конкретної країни є трудомістким і вимагає побудови певних регресійних залежностей.

Індекс лісової пожежної небезпеки FFDI (Австралія). Даний індекс [21, 43, 44] широко застосовується для прогнозування впливу погоди на передумови та поведінку пожеж, яке регулярно надає Бюро метеорології Австралії. Індекс FFDI дозволяє оцінити екстремальні значення показника пожежної небезпеки за максимальної добової температури та мінімальної відносної вологості повітря. У 1980 р. було запропоновано реалістичний емпіричний набір рівнянь для обчислення індексу пожежної небезпеки [51], який також реалізовано в системі пожежної небезпеки Mark 5 [21, 51, 52]. Класифікацію індексу FFDI наведено у табл. 1.3 [52].

Індекс Кітча-Байрама KBDI, що використовується для обчислення індексу FFDI, є емпіричним співвідношенням [45–48], що описує кумулятивний дефіцит вологи у глибоких (duff) шарах, наприклад, лісової підстилки (опале листя та хмиз) або у верхніх шарах ґрунту. KBDI є спрощеним виразом для добового балансу вмісту вологи у ґрунті [52] та

реалізує спосіб визначення дефіциту вологи у верхньому шарі ґрунту Замість оцінки дефіциту вологи у duff-шарі індекс Кітча-Байрама дає відносну оцінку загальної займистості лісу, а не паливних матеріалів поверхні.

Таблиця 1.3 – Відповідність категорії пожежної небезпеки діапазону значень індексу FFDI для Австралії [52]

Категорія пожежної небезпеки	Діапазон значень *FFDI*
Низька-помірна	0–11
Висока	12–23 (12–31 у східній Австралії)
Дуже висока	24–49 (32–49 у східній Австралії)
Важка	Від 50 до 74
Екстремальна	75–99
Катастрофічна	> 100

Індекс пожежного потенціалу FPI (США). Індекс FPI (Fire Potential Index) – це показник займистості рослинності на основі вологості [63], який використовується у системі NFDRS (рис. 1.7). Це функція наявної зеленої живої рослинності як частки максимуму зеленого покрива. Це також функція поточної вологості з 10-годинною затримкою відмерлого палива як частки вологості при висиханні рослин. Тобто, FPI приймає високі значення, коли жива рослинність майже повністю або частково відмирає, а вологість відмерлого палива за 10 годин є низькою.

Модель індексу FPI було розроблено для включення як супутникових, так і наземних спостережень в індекс, який добре корелює з виникненням пожежі та може використовуватися для картування потенційного загоряння в національному та місцевому масштабі за допомогою ГІС [64].

Індекс FPI корелює з пожежею і добре пристосований для відображення пожежного потенціалу як на великих територіях, так і для районів до декількох квадратних кілометрів.

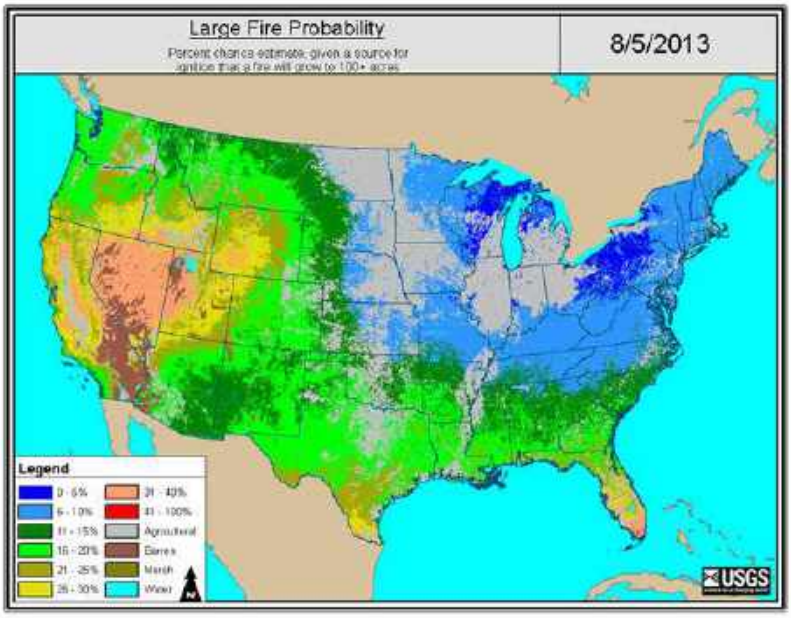


Рисунок 1.7 – Карта ймовірності великих пожеж для континентальної частини США, розрахована на основі FPI

Більш детальний огляд та аналіз методів оцінювання пожежної небезпеки викладено у проміжному Звіті по проєкту [1].

Висновки. При аналізі методів оцінювання пожежної небезпеки на основі метеорологічних умов та відповідних індексів, ставилась мета розглянути, перш за все, ті з них, які можуть враховувати властивості паливних матеріалів підстильної поверхні чи, принаймні, сухість верхнього шару ґрунту, тобто інші фактори, крім метеорологічних, які впливають на передумови виникнення пожеж на визначених ділянках. Крім того, істотним фактором при виборі індексу пожежної небезпеки такого роду для подальшого застосування його не тільки стосовно лісу, а й до інших типів природних екосистем на великих територіях, є можливість залучення до його оцінювання супутникових даних.

Проведений аналіз показав, що у світі більшого поширення, ніж індекс FFDI, набув канадський погодний індекс лісових пожеж FWI [17], а його система оцінювання впроваджена, зокрема, і в Австралії [21]. У штатних режимах виникнення і розвитку пожежі індекси FFDI та FWI дають

порівнянні результати, але індекс FWI є кращим за ознакою оцінювання екстремальної поведінки пожежі [65].

Індекси FWI і FFDI дають значною мірою подібні результати у великих масштабах. У дрібніших масштабах похідні індексів показують, що австралійський індекс FFDI є відносно більш чутливим до температури та відносної вологості і менш чутливим до швидкості вітру та опадів, ніж канадський індекс FWI [21]. Ці відмінності чутливості вказують на можливість взаємного доповнення вказаних індексів і спільного їх застосування (або їх складових), оскільки кожен з індексів відповідає дещо відмінному один від одного набору умов. Наведені міркування та результати проведеного аналізу було покладено в основу створення модифікованого індексу пожежної небезпеки, описаного у підрозділі 3.3 Звіту.

1.3 Аналіз методів виявлення та відновлення пропусків від хмар, що можуть бути використані для обробки мультисенсорної колекції супутникових даних з високим та низьким просторовим розрізненням

При роботі з оптичними супутниковими даними основною проблемою є наявність хмар та тіней від них на зображеннях. Для подолання цієї перешкоди потрібно спочатку ідентифікувати хмари та тіні, а після цього відновити ці дані за рахунок даних з інших близьких по даті знімків. Основними джерелами оптичних даних для даного дослідження є супутники Landsat-8, Sentinel-2 та Sentinel-3.

Зазвичай використовують порогові алгоритми для знаходження хмар та їх тіней на основі мультиспектральних даних [66]. Наявність термального каналу в сенсора дозволяє більш точно ідентифіковувати хмари та тіні. Найбільш популярний метод знаходження хмар та тіней був запропонований для сімейства супутників Landsat, зокрема, і для Landsat-8 під назвою Fmask [67]. В той же час для супутників Sentinel-2 розроблено метод атмосферної корекції Sen2cor, що включає в себе етап класифікації сцени, в межах якого

відбувається знаходження хмар та тіней на знімку [68]. Ідея алгоритму так само, як і більшість, базується на підборі порогових значень для різних каналів та вегетаційних індексів [69]. У статті [70] автори запропонували покращену версію алгоритму Fmask, який перевершив попередні версії Fmask для даних Landsat-8. Дана версія алгоритму також застосовна для супутникових даних Sentinel-2, і продемонструвала значно вищу точність, ніж алгоритм Sen2Cor. Для даних Sentinel-3 використовується, крім звичайного підходу по підбору порогових значень для мультиспектру, також значення атмосферних даних, що отримуються з додаткових джерел [71].

Альтернативними до вищеперерахованих методів є методи, що базуються на машинному навчанні. Так, наприклад, в роботі [72] запропоновано підхід на основі нейронних мереж під назвою SPARCS (Spatial Procedures for Automated Removal of Cloud and Shadow), що дозволив отримувати більш точні результати в порівнянні з Fmask алгоритмом. У [73] запропоновано метод для ідентифікації хмар і тіней на супутникових знімках, що базується на згорткових нейронних мережах. Запропонований метод продемонстрував кращі результати на 38 тестових ділянках у порівнянні з Fmask алгоритмом. Для більш точного знаходження хмар та тіней за допомогою згорткових нейронних мереж у роботі [74] запропоновано «навчити» 3 окремі згорткові нейронні мережі з різними архітектурами, а після цього для конструювання фінальної маски тіней та хмар використовувати метод голосування на основі виходів кожної з мереж.

Для подолання проблеми присутності хмар та тіней на оптичних знімках використовують різні підходи. Найбільш поширені – це видалення захмарених знімків, композитування (створення одного безхмарного знімку з декількох захмарених шляхом об’єднання незахмарених частин) та відновлення пропусків від хмар і тіней за допомогою різних математичних методів та підходів. Для відновлення пропусків найпростіший метод, що може бути використаний, – це інтерполяція значень зі знімків, що отримані до та після даного знімку. Для більш якісного відновлення пропусків від

хмар використовують методи машинного навчання. Наприклад, у статті [75] автори запропонували «навчання без учителя» за допомогою карт Кохонена на незахмареному часовому ряді знімків, після чого для відновлення пропусків від хмар використано навчену модель. У роботі [76] запропоновано нейронну мережу на основі conditional Generative Adversarial Networks для відновлення пропусків від хмар на RGB знімках (рис. 1.8).

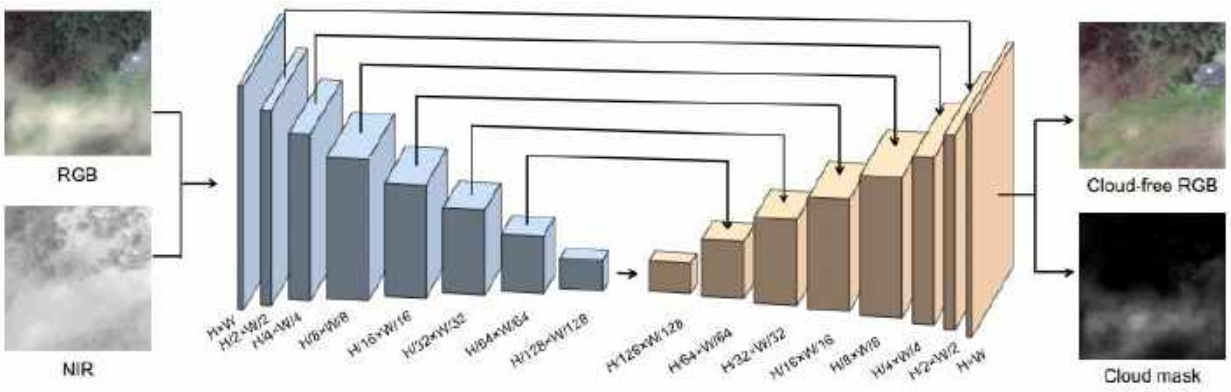


Рисунок 1.8 – Архітектура генератора нейронної мережі для відновлення пропусків від хмар [76]

У роботі [77] запропоновано використати глибинну згорткову нейронну мережу, що працює на основі ResNet мережі. Також в якості входу автори подають не лише саме зображення з усіма мультиспектральними каналами, а й радарні дані для відновлення оптичних даних за ними (рис. 1.9).

У роботі [78] запропоновано використати глибинну згорткову нейронну мережу на основі Generative Adversarial Networks, генератор якої базується на стандартній U-net архітектурі. Аналогічно до роботи [77] автори також використали не часовий ряд оптичних даних, як це робиться зазвичай, а радарні дані для тієї ж території, що й оптичні дані. На рис. 1.10 наведено алгоритм навчання та застосування навченої моделі для відновлення пропусків від хмар за допомогою симуляції оптичних даних на основі радарних та злиття їх з реальними оптичними даними.

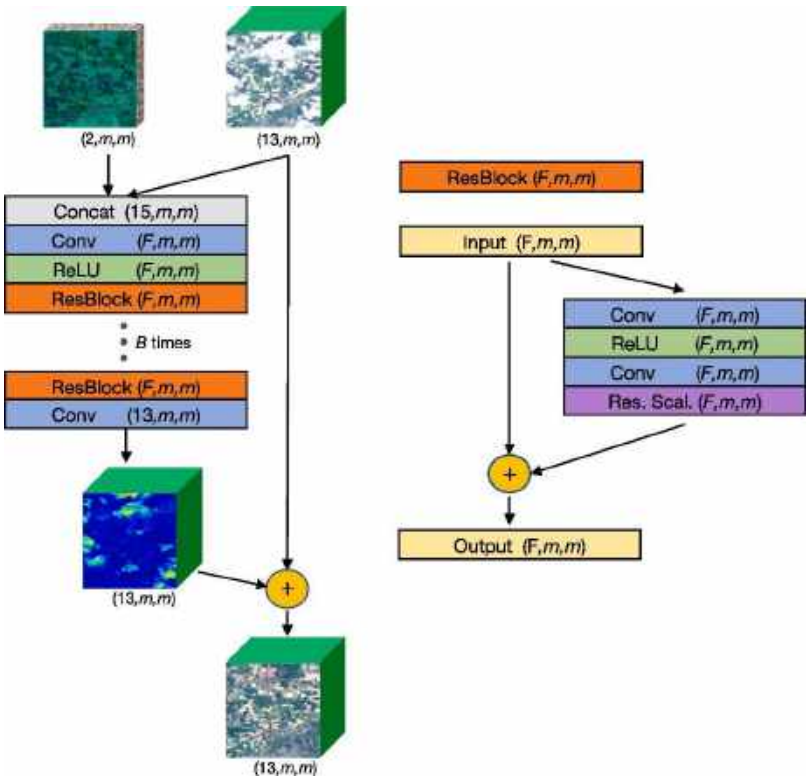


Рисунок 1.9 – Архітектура нейронної мережі для відновлення пропусків від хмар на основі ResNet мережі та радарних даних [77]

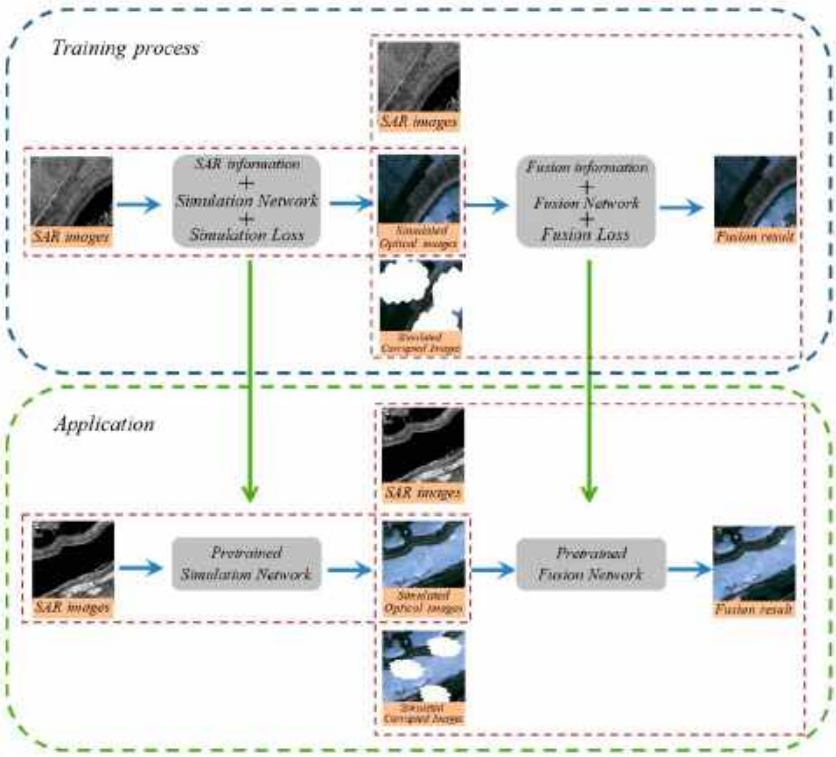


Рисунок 1.10 – Алгоритм навчання та застосування нейронної мережі для відновлення пропусків від хмар на основі Generative Adversarial Networks та радарних даних [78]

1.4 Аналіз чинників та передумов виникнення пожеж у різних типах екосистем

Аналіз існуючих підходів оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж у світі (підрозділи 1.1–1.2 Звіту) дозволяє виокремити три елементи, що є основними чинниками виникнення та перебігу пожежі в природній екосистемі: *паливо*, *погодні умови* та характеристики рельєфу місцевості – *топографія*.

Паливо – це рослинні горючі матеріали (РГМ) або їхні рештки, що можуть горіти. Характеристики палива визначально впливають на поведінку вогню та наслідки пожежі для екосистеми. Термін РГМ об'єднує більш поширене в пірології та існуючих системах оцінювання пожежної небезпеки поняття «лісові горючі матеріали», а також горючі матеріали сільськогосподарських угідь (пожнивні залишки, стерня, сухі зернові культури на корені тощо).

Склад палива, включаючи рівень вологи, хімічний склад і щільність, визначає ступінь його займистості. *Вологовміст* є найважливішим фактором. Живі дерева зазвичай містять багато вологи, а колоди (вітролом) – дуже мало. Вміст вологи та співвідношення цих видів палива визначають, наскільки швидко пожежа може поширюватися та наскільки інтенсивним може стати вогонь. Високий вміст вологи сповільнюєь процес горіння, оскільки тепло від вогню спочатку повинно усунути вологу.

Погодні умови, такі як швидкість вітру, опади, температура та вологість повітря також є визначальними чинниками виникнення та розповсюдження пожежі в природній екосистемі. Вітер є одним з найважливіших факторів, оскільки він може принести новий запас кисню до вогню та розповсюдити вогонь на нові джерела палива. Температура палива визначається температурою навколишнього середовища, оскільки паливо одержує тепло, поглинаючи зовнішнє сонячне випромінювання. Температура палива впливає на його сприйнятливість до займання.А загалом паливо горить легше при високих температурах, ніж при низьких. Опади та вологість

повітря впливають на рівень *вологовмісту* палива. При низькому рівні вологості повітря та відсутності опадів паливо стає сухим а, отже, легше загоряється і горить швидше, ніж при високому рівні вологості та опадах.

Топографія може впливати на поведінку пожежі. Зазвичай пожежа рухатиметься швидше вгору, ніж вниз або по рівнинній місцевості. Топографія описує форму суходолу – рельєф. Вона може включати висоти над рівнем моря; схил, крутизну; аспект, напрямок, на який спрямований схил; особливості, такі як долини, річки тощо. Ці топографічні характеристики можуть допомогти або перешкодити поширенню вогню. ***Аналіз характеристик горючих матеріалів підстильної поверхні різних типів природних екосистем.*** Пожежна небезпека в природних екосистемах і можливість виникнення пожеж в першу чергу визначаються вологовмістом горючих матеріалів надґрунтового покриву (при низових пожежах), підстилки та торфу (при ґрунтових пожежах), деревинно-чагарникового ярусу (при верхових пожежах). Переважна більшість пожеж у природних екосистемах України виникає в результаті загоряння надґрунтового покриву [79].

Пірологічна класифікація природних екосистем у світі здійснюється за двома напрямками: класифікація видів РГМ як пірологічної основи і класифікація природної екосистеми як об'єкта, де формуються однорідні комплекси РГМ. До *гігроскопічних* відносять відмерлі РГМ (сухостій, суху траву, опад, пні, порубкові залишки, хмиз, підстилку), а також несудинні рослини з відсутньою (лишайники) або погано розвиненою (мохи) кореневою системою. Вміст вологи в них постійно змінюється в залежності від гідрометеорологічних умов. Максимальний вологовміст гігроскопічних РГМ залежить від їх пористості та може змінюватися від 100 (деревина) до 3000 % (сфагнум) [80, 81]. *Негігроскопічні* РГМ – це живі судинні рослини (дерева, самосів, підріст, підлісок, чагарники, трави), здатні за рахунок добре розвиненої кореневої системи підтримувати в своїх тканинах певний рівень вмісту вологи. В шарі надґрунтового покриву з негігроскопічних РГМ

зазвичай переважають чагарники і трави. Чагарники мають здерев'янілі стебла, містять смоли і ефірні масла. Вони підтримують свій вологовміст на рівні 80 ... 150 %. Згораючи у полум'ї пожежі, вони підсилюють горіння і підтримують його поширення [82]. Вегетуючі трави відрізняються високим вмістом вологи, що зазвичай перевищує 200 %, а навесні, на початку вегетації, може досягати 700 % [83], тому всі види вегетуючих трав перешкоджають горінню.

При верхових пожежах можуть згоряти живі хвоя і листя в кроні дерев разом з несучими гілками товщиною до 7 мм і сухий хмиз. Вологовміст хвої в кронах в пожежонебезпечний сезон зазвичай коливається від 90 до 130 %, але її хороша горючість забезпечується за рахунок порівняно високого вмісту в ній ефірних олій.

Існують такі підходи до класифікації РГМ:

– за можливістю і швидкістю їх висихання, використовується в Національній системі оцінки пожежної небезпеки лісів США NFDRS [84];

– за місцем розташування у фітоценозі (Франція);

– за їх походженням (генетична класифікація, запропонована у [85];

– за функцією РГМ при поширенні і розвитку пожежі, з урахуванням їх фізичних властивостей і місця розташування у фітоценозі [82].

Класифікація РГМ складається з трьох рівнів:

а) класифікація елементарних частин комплексів РГМ, включаючи окремі рослини з надґрунтового покриву, б) класифікація шарів РГМ всередині лісових ділянок;в) класифікація однорідних лісових ділянок як складних комплексів РГМ [86].

«Генетичну» класифікацію РГМ для лісових ділянок за типами горючих матеріалів запропоновано у [85, 87]. За походженням і з урахуванням подальшої трансформації всі РГМ в ній поділяють на два класи: вихідні (первинні) і трансформовані (вторинні). У роботі [85] наведено 16 типів РГМ.

Відмінності в підходах і формах представлення класифікацій свідчать про те, що до теперішнього часу в пірології природних екосистем немає загальноприйнятої класифікації РГМ, що перешкоджає уніфікації нормативно-довідкового матеріалу і можливості застосування як даних наземних спостережень, так і супутникових даних, а також ускладнює формалізацію вихідних даних, необхідну при використанні сучасних інформаційних технологій.

Для вирішення завдань прогнозування пожеж в природних екосистемах класифікація РГМ повинна бути прив'язана до загальноприйнятої класифікації пожеж в природних екосистемах і єдиної шкали пожежної небезпеки за умовами погоди або до місцевої шкали. Найбільш логічно класифікувати РГМ відповідно до загальноприйнятої класифікації пожеж, тобто за місцем знаходження конкретного горючого матеріалу в багатоярусному рослинному покриві природної екосистеми і його ролі в процесі поширення горіння. Одна з таких класифікацій РГМ розроблена австралійськими фахівцями [88] (табл. 1.4). Зазначена класифікація стосується лише оцінки тонкого палива.

При оцінці ролі різних РГМ в поширенні горіння дотримуються категорій, наведених у табл. 1.5. Такий же підхід застосовують і більшість українських фахівців [89, 90]. При наявності джерела вогню провідники горіння кожної виділеної групи РГМ забезпечують поширення відповідного виду пожежі, але при певних обмеженнях їх вологовмісту і запасу.

Граничний вологовміст, при якому припиняється поширення низової пожежі, залежить в основному від середнього поверхнево-об'ємного відношення частинок, складових провідника горіння [91]. Перехід низової пожежі у верхову можливий при висоті полум'я кромки горіння, що досягає нижньої межі крони деревостану. Розроблена класифікація (табл. 1.5) при наявності інформації про РГМ дозволяє прогнозувати можливі види пожеж в природних екосистемах.

Таблиця 1.4 – Розподіл рослинного покриву на шари РГМ [88]

Шар РГМ	Опис	Вплив на характер пожежі
РГМ крони	–крони найвищого шару дерев –за певних умов РГМ крони може відігравати значну роль у поведінці вогню та труднощах із гасінням. В даний час цей вид РГМ не оцінюється як пожежонебезпечний	
РГМ кори	–кора на стовбурах та гілках дерев, від рівня землі до крони.	Осередковий
РГМ надземного рівня	–РГМ переважно вертикально орієнтоване –зазвичай більша частина рослинної сировини знаходиться ближче до верху цього шару –іноді містить звисаюче листя, кору або гілочки –РГМ з чітким зазором між ним та РГМ поверхні –може сильно змінюватися залежно від типу ґрунтового покриву –низова пожежа (висота полум'я менше 0,5 м) може проходити під цим шаром, не діставши його, якщо він є	Впливає на висоту полум’я та швидкість поширення вогню
РГМ приповерхневого рівня	–живі та відмерлі РГМ, ефективно торкаються землі, але не лежать на ній –РГМ мають як вертикальну, так і горизонтальну орієнтацію –основна частина РГМ знаходиться ближче до землі, ніж до верху цього шару, або розподіляється рівномірно –іноді містить звисаюче листя, кору або крону –покрив може варіюватися від безперервного до наявності зазорів, які в рази перевищують розмір плями РГМ –пожежа низької інтенсивності (висота полум'я менше 0,5 м) споживатиме більшу частину або весь цей РГМ –РГМ цього шару завжди будуть горіти, якщо РГМ поверхні згорають	Впливає на швидкість поширення та висоту полум’я пожежі
РГМ поверхні (опад)	–листя, гілочки, кора та інші дрібні РГМ, що лежать на землі –переважно горизонтальна орієнтація	Впливає на швидкість поширення пожежі

Таблиця 1.5 – Рекомендована класифікація РГМ при прогнозуванні поведінки пожеж [82]

Група РГМ	Категорія РГМ		
	Провідники горіння	Підтримуючі горіння	Затримуючі горіння
Ґрунтові	Підстилка, перегній, торф, дернина	Коріння сухостою	Живе коріння деревостану
Надґрунтові	Мохи, лишайники, невеликий суцільний опад (не товще 2 см), суха трава, верес	Деякі види чагарників (богун болотний, верес, брусниця, лохина тощо), самосів, підріст і підлісок хвойних порід (висотою до 3 м), горючі чагарники, хмиз, пні, порубкові залишки	Вегетуючі трави, листя підросту, деякі чагарники (наприклад, мучниця)
Кронові	Хвоя і несучі пагони (товщиною 7 мм) в кронах деревостану, підросту і підліску (висотою понад 3 м)	Сухостій, стовбури (особливо засмолені і дуплисті), товсті гілки і сухі гілки вегетуючих дерев	Листя деревних порід

Висновки. При оцінюванні пожежної небезпеки в природних екосистемах ключову роль відіграє інформація про стан палива – РГМ, що утворюють природну екосистему. Також важливими чинниками є погодні умови, що визначають вологовміст палива або пов'язаних з ним показників пожежної небезпеки та характеристики рельєфу місцевості, що можуть впливати на перебіг пожежі в природній екосистемі, а саме напрямок і швидкість розповсюдження вогню. В наш час супутникові дані можуть стати надійним джерелом значної частини зазначеної інформації – від карт земного покриву та метеорологічних показників до цифрової моделі рельєфу місцевості.

1.5 Визначення джерел необхідних супутникових, статистичних і наземних даних для оцінювання пожежонебезпеки та моніторингу пожеж

Джерела супутникових даних. Загальновизнаною є критична важливість супутникових спостережень Землі як джерела інформації для підтримки багатьох управлінських проблем [92–95]. Супутникові дані забезпечують точною та достовірною інформацією про стан, зокрема, атмосфери, ґрунтів, сільськогосподарських культур, лісів, екосистем, природних ресурсів тощо, та їх змін з часом, що прямо або опосередковано використовується у різних галузях економіки та практично у всіх сферах суспільної діяльності [96]. За визначенням саміту ООН зі сталого розвитку (2019 рік) залучення супутникової інформації є революційним кроком на шляху досягнення цілей сталого розвитку.

Наступні характеристики супутникової інформації таку високу оцінку. *Масштаб (* супутники можуть надавати дані у всіх масштабах від локального до національного, регіонального та глобального); д*Довготривалий часовий ряд та безперервніст;послідовність та порівнянність;різноманітність вимірювань;взаємодоповнюваність (компліментарність) із традиційними статистичними методами; доступність та відкритість даних*. Наразі з’явилось чимало різних ресурсів, які безкоштовно надають знімки з різних супутників. У даному підрозділі Звіту розглянуто джерела супутникових даних, що можуть використовуватися для оцінювання пожежонебезпеки та моніторингу пожеж.

EarthExplorer від USGS. U.S. Geological Survey, USGS володіє найстарішою колекцією безкоштовних різноманітних супутникових та ГІС-даних. Доступ до них можна отримати за допомогою сервісу EarthExplorer, який працює через Google Maps [97]. EarthExplorer пропонує супутникові знімки за 40-річний період, отримані із супутників USGS-NASA: Terra і Aqua MODIS, ASTER, VIIRS і багато інших. У сервісі є набори даних з відкритим вихідним кодом, які були отримані в результаті співпраці з Індійської

організацією космічних досліджень і Європейським космічним агентством. Це дані супутників Resourcesat-1, 2 і Sentinel-2. Також є багато даних з комерційних супутників з високом просторовим розрізненням – IKONOS-2 OrbView-3 та історичних даних SPOT.

LandViewer від EOS – це сучасне джерело супутникових даних і аналітики на основі штучного інтелекту. Сервіс представлений одним з ключових офіційних дистриб'юторів супутникових знімків високого розрізнення EOS [98] та охоплює величезну кількість загальнодоступних бібліотек. Це знімки із супутників CBERS-4, Sentinel-1, 2, MODIS / NAIP, Landsat-7, 8, а також Landsat-4, 5 для історичних знімків. Серед наборів знімків SPOT-5-7, Pleiades-1, Kompsat-2,3, 3A, SuperView-1. Максимальне просторове розрізнення досягає 40 см на піксель.

EO Browser і Sentinel Playground від Sentinel Hub. За допомогою Sentinel Hub відкриті супутникові знімки доступні через два основних сервіси: EO Browser і Sentinel Playground [99, 100]. У EO Browser можна отримати знімки з середнім і низьким просторовим розрізненням. До них відносяться необмежені колекції від всіх місій Sentinel, Landsat, Envisat, Meris, MODIS, GIBS і Proba-V.

Copernicus Open Access Hub. Ще одна унікальна колекція безкоштовних знімків з усіх супутників Sentinel міститься на Copernicus Open Access Hub [101]. Колекція містить радарні знімки Sentinel-1, оптичні мультиспектральні знімки Sentinel-2, а також дані про земну поверхню Sentinel-3 для спільного аналізу навколишнього середовища з даними про атмосферу та якість повітря в Sentinel-5P.

ASF Data Search. Даний сервіс надає доступ до завантаження супутникових знімків Sentinel-1, ALOS PALSAR, ALOS AVNIR-2, SIR-C, S1 InSAR, SMAP, UAVSAR, RADARSAT-1, ERS, JERS-1, AIRSAR, SEASAT [102].

Джерела наземних та статистичних даних. Крім супутникових даних, для оцінювання пожежонебезпеки необхідні наземні дані (зокрема,

для завірки та верикікації), а саме: температура повітря, швидкість вітру, відносна вологість та кількість опадів. Ці дані бажано отримувати з географічною прив’язкою. Розглянемо декілька сервісів, які повністю або частково надають архів таких даних.

Meteopost – це сервіс, що надає архів метеоданих за певну дату з періодом заміру 30 хвилин [103]. Дані доступні з 2010 р. по теперішній час та оновлюються кожного дня.

RP5 – український сервіс також надає архів метеоданих з періодом вимірювання 3 години [104]. Дані доступні з 2005 р. по теперішній час та оновлюються кожного дня. Серед потрібних даних RP5 надає температуру повітря, відносну вологість, швидкість вітру та кількість опадів, а також можливість вибрати діапазон дат та формат для завантаження даних

NASA POWER (NASA's Prediction Of Worldwide Energy Resources) містить дані, отримані із супутникової метеорології та аналізу сонячної енергії [105 -106].

CCDS (Copernicus Climate Data Store) забезпечує легкий доступ до широкого спектру наборів кліматичних даних через пошуковий каталог [107].

ДСНС України надає дані щодо пожеж, що сталися в природних екосистемах, на своєму офіційному сайті у вигляді опису, коли відбулася надзвичайна подія, населений пункт (без вказування координат), площу пожежі та її походження [108].

2 ЗБИРАННЯ, ОБРОБКА СУПУТНИКОВИХ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ДАНИХ, НЕОБХІДНИХ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАНЬ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ У ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Для розв'язання завдань оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж у природних екосистемах необхідним є збирання великих обсягів супутникових даних, їх обробка з використанням глибинного навчання, створення набору наземних даних для завірки та верифікації отриманих результатів. Опису цього присвячено даний розділ.

Завантажені та попередньо оброблені супутникові дані разом з наборами наземних даних у вигляді геоінформаційних шарів з атрибутивною інформацією про пожежі для території України за період 2017–2020 рр. зберігатимуться у хмарному сховищі Amazon Web Services за адресою: s3://fire-project.

2.1 Завантаження та попередня обробка супутникових даних за період 2017–2020 рр. для території України

Завантаження та попередня обробка даних супутника Sentinel-2. Одним із основних супутників, дані з якого можуть бути використані при оцінюванні пожежної небезпеки та моніторингу пожеж, є Sentinel-2 [109]. Дані, отримані з супутника, мають просторове розрізнення 10 м, період зйомки кожні 5 днів, і наявні у вільному доступі [110]. Обробка цих даних включає наступні рівні:

Level-0 – це стислі дані, які містять всю інформацію, необхідну для створення рівнів продукту Level-1.

Level-1A – нестиснені вихідні дані з грубо закріпленими спектральними смугами, та з доданими додатковими даними.

Дані Level-1B –дані випромінювання з радіометричною корекцією. Фізична геометрична модель уточнюється з використанням наявних наземних контрольних точок і додається до продукту, але не застосовується.

Продукти Level-0, Level-1A і Level-1B не розповсюджуються серед користувачів.

Продукт Level-1C забезпечує орторектифіковану відбивну здатність від верхніх шарів атмосфери TOA (Top-of-Atmosphere) з субпіксельною багатоспектральною реєстрацією. Маски з хмар та Землі / води входять до складу продукту. Для отримання продукту Level-1C здійснюються дві послідовні операції над продуктом Level-1B (рис. 2.1): передискретизація зображення Level-1B для досягнення орієнтації зображення TOA; розрахунок масок хмар і землі / води для плитки в геометрії рівня 1C.

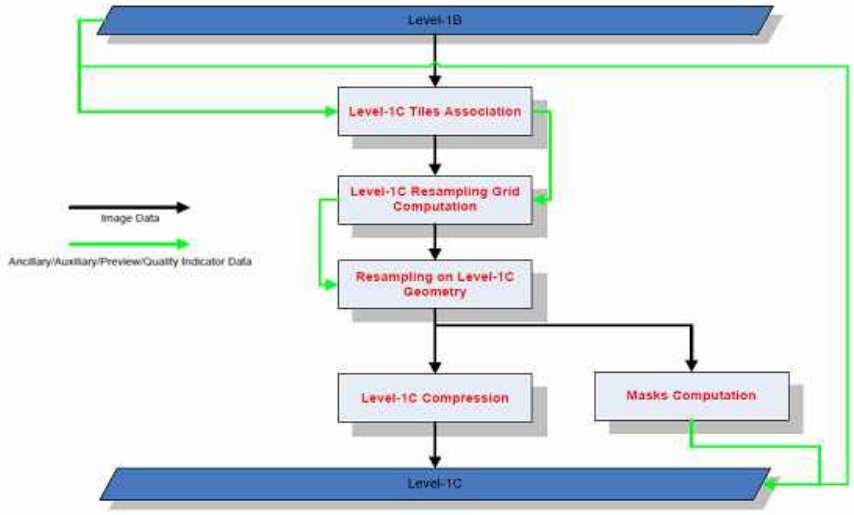


Рисунок 2.1 – Отримання продукту рівня 1C від продуктів рівня 1B для даних Sentinel-2

Продукт Level-2A забезпечує орторектифіковану відбивну здатність нижньої зони атмосфери BOA (Bottom of the Atmosphere) з субпіксельною багатоспектральною реєстрацією. Карта класифікації сцен (хмари, тіні від хмар, рослинність, грунти / пустелі, вода, сніг тощо) входить до складу продукту.

Level-2A також може генеруватися користувачем з продукту Level-1C, використовуючи Sentinel-2 Toolbox або автономну версію процесора Sen2Cor (рис. 2.2).

Продукти Level-1C і Level-2A доступні користувачам через портал із відкритим доступом Copernicus [112].

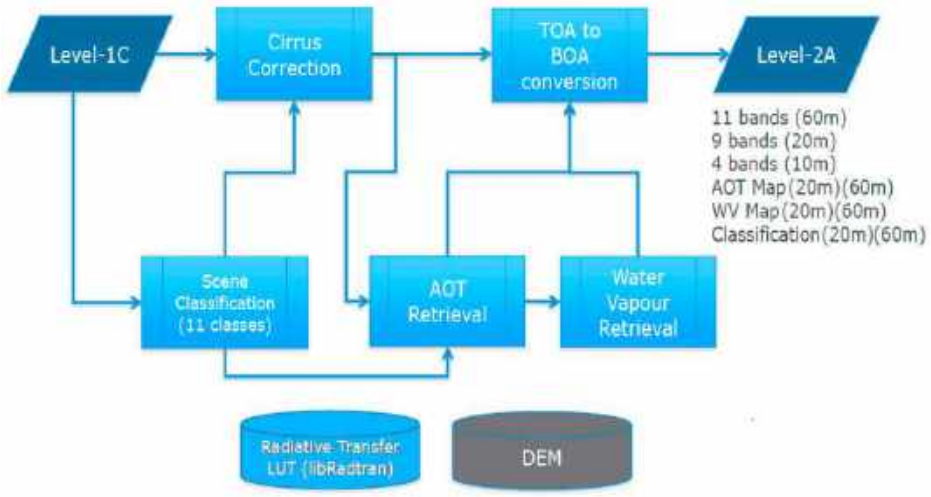


Рисунок 2.2 – Схема обробки даних за допомогою Sen2Cor

Обробка супутникових даних включає ряд процесів, які необхідно виконати для отримання коректних даних, що залежить від подальшого їхнього використання та розв'язання прикладних задач [113–116]. У випадку оптичних даних необхідно використовувати продукти Level-2A. Для завантаження цих даних оптимальним є використання сервісів через Amazon, оскільки із офіційного сайту [112] вони завантажуються значно довше. Існують і інші хмарні платформи для надання доступу до супутникових даних, зокрема Google Earth Engine [117], проте вона має обмеження, щодо завантаження даних. Створена маска хмар після корекції містить помилки, тому необхідно її покращувати або змінити підхід під час класифікації даних (наприклад: використання всіх супутникових даних, підрахунок індексів, пошук трендів).

Наступним етапом обробки оптичних знімків є відновлення пропусків в даних у випадку їхньої значної захмареності, використовуючи часовий ряд даних. Ідея цього підходу полягає в послідовному застосуванні нейронних мереж різного типу для відновлення невизначеностей (хмар на знімках). Процедура відновлення може виконуватися одним із розроблених методів, наприклад, на основі самоорганізованих карт Кохонена (SOM) [119] або іншими методами описаними вище. Після обробки результуючий файл зберігається у форматі GeoTIFF, що містить набір значень всіх оптичних знімків, причому оптичні дані мають значення пікселів, яких не було в місцях, де була захмареність (за рахунок відновлення пропусків даних).

Завантаження та попередня обробка даних супутника Sentinel-3. Для оцінювання пожежної небезпеки у природних екосистемах будуть використовуватися попередньо оброблені дані приладу SLSTR (Sea Land Surface Temperature Radiometer) супутника Sentinel-3 [120]. Основною метою місії приладів SLSTR на борту Sentinel-3 є надання еталонних даних про поверхню суші та температуру поверхні моря для записів кліматичних даних [121, 122, 123].

Для отримання потрібних даних було створено граф попередньої обробки знімків з приладу SLSTR супутника Sentinel-3 (рис. 2.3) за допомогою програмного забезпечення SNAP (Sentinel Application Platform). Завдяки графу та вбудованих методів в програмному забезпеченні SNAP виконується попередня обробка знімків супутника Sentinel-3. Основним етапом обробки є приведення супутникових знімків до однієї проекції EPSG:4326, адже це є важливим моментом для отримання подальших результатів. Наступним етапом, представленим у графі, є вирізання хмар, а саме заміна значень на 0 за допомогою маски хмар, яка пропонується для даних супутника Sentinel-3. Так як карта температур для супутника Sentinel-3 надається в Кельвінах, тому ще одним важливим етапом є перетворення цієї температури в Цельсія.

Рисунок 2.3 – Граф обробки знімків Sentinel-3 LST

Важливим етапом попередньої обробки супутникових даних є зведення їх до одного формату, тобто, запис результатів в формат netCDF, адже дані, з якими будуть проводитись подальші обчислення, знаходитимуться саме в цьому форматі. Наведений граф використовуватиметься для подальших розрахунків не для одного знімка, а для цілого часового ряду знімків з колекції супутникових даних.

Завантаження даних далекого інфрачервоного та оптичного діапазонів Landsat-8 та перерахунок у температуру земної поверхні. Зантажено дані Landsat-8 рівня обробки L1 сенсора OLI – каналів B2-B7 та сенсора TIRS – каналу B10 і здійснено перерахунок цифрових значень каналу B10 у температуру земної поверхні. Для перерахунку цифрових значень каналу B10 у значення термодинамічної температури земної поверхні необхідно реалізувати процедуру, що складається з кількох етапів.

Першим з них є *радіометричне калібрування та атмосферна корекція зображень*, яке полягає у перетворенні цифрових значень пікселів рівня обробки L1 в оптичних каналах у спектральну густину енергетичної яскравості на апертурі сенсора [124–126]. Далі здійснювався *перерахунок значень спектральної густини енергетичної яскравості у коефіцієнт спектрального відбиття земної поверхні* для оптичних каналів видимого та інфрачервоного діапазонів сенсора Landsat-8 OLI. Для цього проводиться атмосферна корекція зображень за методом віднімання темного об'єкта (Dark Object Subtraction, DOS) [124, 127–130], зокрема, DOS1) на основі відносних показників яскравості конкретного супутникового зображення. На основі спектральних густин енергетичних яскравостей, розрахованих для каналів 2–7 сенсора Landsat-8 OLI, визначався спектральний коефіцієнт відбиття земної поверхні [127, 132].

У космічних системах серії Landsat здійснюється прямий перерахунок спектральної густини енергетичної яскравості у тепловому інфрачервоному каналі в ефективну радіаційну температуру біля сенсора у градусах Кельвіна шляхом обернення формули закону теплового випромінювання Планка [122, 127, 130, 131, 133].

Наступним етапом є *маскування хмар у даних Landsat у видимому та інфрачервоному (включаючи далекий інфрачервоний (тепловий)) діапазонах випромінювання.* Для коректного здійснення класифікації земного покриву за даними видимого, ближнього і середнього інфрачервоного діапазонів випромінювання сенсорів Landsat 7 ETM+, Landsat-8 OLI формували маску хмарності, яка б маскувала пікселі, що відповідають хмарам, тіням від хмар, снігу. Створена маска застосовується також до даних ефективної радіаційної температури біля сенсора для її коректного перерахування у термодинамічну температуру земної поверхні з врахуванням замаскованих ділянок.

Далі здійснювалась *контрольована класифікація земного покриву за растрами спектрального коефіцієнта відбиття* з множини оптичних каналів 2–7 Landsat-8 OLI за методом максимальної правдоподібності [126, 134]. В результаті реалізації процедури класифікації створюється растр з 4 основними макрокласами земного покриву (п'ятий клас – некласифіковані області), яким присвоюються певні ідентифікатори ID – номери макрокласів: некласифіковані області (unclassified) – 0; вода (water) – 1; забудова (built-up) – 2; рослинність (vegetation) – 3; відкритий грунт (bare soil) – 4.

Наступним кроком макрокласам растру класифікації земного покриву присвоюються відповідні значення *коефіцієнта теплового випромінювання e*, отримані на основі in situ і супутникових даних [126]: вода (water) – e = 0,98; забудова (built-up) – e = 0,93; рослинність (vegetation) – e = 0,97; відкритий грунт (bare soil) – e = 0,92. В результаті отримували растр коефіцієнтів теплового випромінювання 4-ох макрокласів земного покриву.

Замасковані від хмар і тіней від хмар пікселі набувають значення «No data» і не беруть участі у перерахунку ефективної радіаційної температури

біля сенсора з використанням растра коефіцієнта теплового випромінювання у растр термодинамічної температури земної поверхні.

На останньому етапі здійснювали *перерахунок ефективної яскравісної температури біля сенсора у термодинамічну температуру земної поверхні з використанням значень коефіцієнта теплового випромінювання.* Ефективна радіаційна температура T_B біля сенсора перераховується у термодинамічну температуру T земної поверхні з використанням значень коефіцієнта теплового випромінювання e для певних класів земного покриву відповідно до математичної моделі [126, 131, 132]:

$$T = T_B / [1 + (\lambda * T_B / c_2) * \ln(e)],$$

де константа $c_2 = 14388 \mu m K$, а для каналу 10 Landsat-8 TIRS $\lambda = 10.8\ \mu m$.

На основі наведеної вище моделі будували растр поля термодинамічної температури земної поверхні. На рис. 2.4 наведено растр поля термодинамічної температури земної поверхні за знімком Landsat-8 від 17.10.2019, отриманий у результаті перерахування ефективної радіаційної температури біля сенсора з використанням растру коефіцієнта теплового випромінювання згідно з математичною моделлю [126, 131, 132]

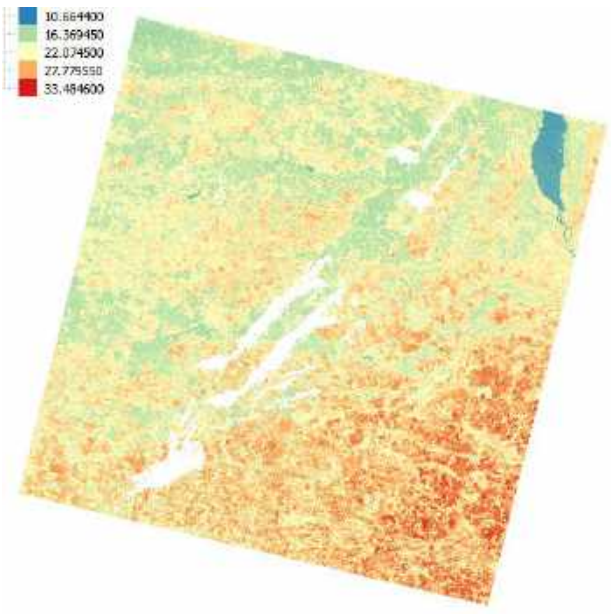


Рисунок 2.4 – Растр поля термодинамічної температури земної поверхні (Landsat-8, 17.10.2019)

2.2 Завантаження погодних даних з сервісу Copernicus Atmosphere Monitoring Service та глобальної атмосферної моделі NASA Power

Для обчислення індексу FWI використовували такі дані, як температура повітря на висоті 2 м, швидкість вітру на висоті 10 м, відносна вологість повітря та кількість опадів за останні 24 години [36]. Ці дані завантажено за 2017–2020 рр. з сервісу CAMS та глобальної атмосферної моделі NASA Power.

Завантаження даних з сервісу CAMS. Дані завантажуються із набору даних «ERA5-Land». ERA5-Land – це набір даних реаналіза, що забезпечує узгоджене уявлення про еволюцію змін Землі за кілька десятиліть із підвищеним просторовим розрізненням порівняно з ERA5 [135]. Часова та просторова роздільна здатність ERA5-Land, а також фіксована сітка, яка використовується для розподілу даних за будь-який період, робить цей набір даних дуже корисним для отримання більш точної інформації про стан суші.

У подальшому 10 м u- і v- компоненти вітру будуть поєднані для отримання швидкості горизонтального вітру. Дані ресурсу завантажуються з 2017 по 2020 рік.

Завантаження даних з NASA POWER. Проект NASA POWER надає набори сонячних і метеорологічних даних для прогнозування світових енергетичних ресурсів в глобальному масштабі з просторовим розрізненням 0.5°×0.5° [106].

Завантаження даних було реалізовано скриптом на Python, який використовує POWER API та викачує дані в форматі NetCDF.

Так як в подальшому ці дані використовуються для обрахунку FWI, для зручності вирішено завантажувати всі дані за один календарний рік одним файлом. Дані ресурсу завантажуються з 2017 по 2020 рік.

2.3 Аналіз інформативних ознак, що є причинами надзвичайних подій, у колекції супутникових та погодних даних

Згідно з результатами проведеного аналізу методів оцінювання пожежної небезпеки у підрозділі 1.2, зокрема, індексів *FWI* і *FFDI*, доцільним і обґрунтованим є залучення до розроблювального модифікованого індексу пожежної небезпеки, і вологості верхнього шару ґрунту, обчисленої на основі супутникових даних. Інформативними змінними – предикторами індексу *FWI* є: *RH* – відносна вологість повітря (%), *T* – температура (°C), *V* – швидкість вітру (км/год) та добова кількість опадів *P* (мм) з урахуванням порогового значення 2 мм.

Нижче розглянуто вказані інформативні ознаки, що є причинами пожежної небезпеки, у колекції супутникових та погодних даних.

Температура повітря та земної поверхні. Метеорологічні супутники визначають температуру повітря шляхом вимірювання яскравості в різних діапазонах довжин хвиль. Температуру земної поверхні визначають за допомогою вимірювання інфрачервоного випромінювання, проте супутникам для цього зазвичай необхідні безхмарні умови. Деякі з супутників включають вдосконалений радіометр з дуже високою роздільною здатністю (AVHRR), радіометри зі скануванням по треку (AASTR), набір радіометрів для візуалізації видимого інфрачервоного зображення (VIIRS), атмосферний інфрачервоний зонд (AIS) і спектрометр з перетворенням Фур'є ACE (ACE-FTS).

Швидкість вітру. У даний час для вимірювання характеристик вітру використовуються стаціонарні наземні станції. Крім того, дані можна отримувати, запускаючи стратостати з науковим обладнанням. Однак наземні станції прив'язані до конкретної території і не підходять для постійного спостереження за вітрами над океанами, які мають істотний вплив на формування погоди, а стратостати не дозволяють збирати дані регулярно [138].

Спутник ADM-Aeolus покликаний заповнити бракуючий об'єм даних про характеристики вітру в нижній половині стратосфери – до 30 км. Для збору даних супутник обладнаний доплеровским лідаром ALADIN, який. може визначати не тільки швидкість, але і напрям вітру.

Вологість повітря. Спостереження за атмосферною температурою і вологістю можна виконувати за допомогою GRAS (Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding) – нового європейського приймача глобальної навігаційної супутникової системи (Global Navigation Satellite System, GNSS), який працює як ехолот атмосфери [139]. Обробка навігаційних сигналів, отриманих GRAS, дозволяє щодня одержувати близько 500 високоточних профілів температури, вологості і тиску атмосфери. Спостереження GRAS відрізняються високим вертикальним розрізненням та високою точністю у поєднанні з глобальним охопленням.

Кількість рідких опадів. Global Precipitation Measurement (GPM) – це спільна місія JAXA і NASA, а також інших міжнародних космічних агентств, яка проводить часті (кожні 2–3 години) спостереження за опадами на Землі. Вимірювання опадів проводить безпосередньо датчик GMI (GPM Microwave Imager) [140], який реєструє мікрохвильову енергію, що випромінюється Землею і атмосферою, в 13 різних частотних / поляризаційних каналах. Ці дані дозволяють скласти кількісні карти опадів у смузі шириною 885 км.

Дефіцит вологи у ґрунті. Базуючись на результатах досліджень [52], для обчислення дефіциту вологи у ґрунті може бути використано вологість ґрунту, оцінену за супутниковими даними. Проаналізуємо предиктор пожежної небезпеки – дефіцит вологи у ґрунті, виражений через вологість верхнього шару ґрунту глибиною переважно ~5 см, отриману за допомогою радарів з синтезованою апертурою. Дана глибина верхнього шару ґрунту враховується при визначенні дефіциту вологи у ньому і береться до уваги максимально можлива до насичення кількість вологовмісту, характерна для певного типу ґрунту. Таким чином, дефіцит вологи у ґрунті пов’язаний з певним типом ґрунту, а для його оцінювання, крім супутникових даних

вологості ґрунту, необхідні дані класифікації ґрунтів. Відповідно і розроблювальний індекс пожежної небезпеки теж буде пов’язаний з типом ґрунту.

Отримання карти класифікації ґрунтів у масштабах України у формі векторного геоінформаційного шару для ефективного використання у ГІС стикається з технічним труднощами. Зокрема, у відкритому джерелі даних Публічної кадастрової карти України [141] дані шару «ґрунти» доступні для користувачів лише за протоколом WMS і являють собою мозаїку grunt-wmsc-8 формату image/png, що містить інформацію про ґрунтовий покрив України, але не допускається перетворення мозаїки у векторний shape-файл. Ручне оцифрування мозаїки з формуванням векторного шару всіх типів ґрунтів навіть для території адміністративної області пов’язане з значними труднощами. Таким чином, існує проблема побудови карти ґрунтів у формі векторного геоінформаційного шару.

Вологість верхнього шару ґрунту може бути отримана з низки джерел супутникових даних та з використанням даних гідрологічних моделей у комбінації з метеорологічними даними.

Інформацію про вологість ґрунту у верхньому шарі глибиною ~5 см можна отримати за даними супутникової місії SMOS [58]. Нижче розглянуто продукти вологості ґрунту глобальної земельної служби CGLS:

Вологість верхнього шару ґрунту SSM (Surface Soil Moisture) [142] характеризує відносний вміст води у шарі ґрунту ~5 см, який визначається відношенням об’ємної (масової) частки води до об’ємної (масової) частки сухого ґрунту. Продукт *SSM* з просторовим розрізненням 1 км (Version 1), отриманий від сенсора Sentinel-1 C-SAR,охоплює континентальну Європу та надається щодня.

Індекс вологи ґрунту SWI [143] кількісно визначає стан вологи на певній глибині ґрунту. Вологість шару ґрунту глибиною 5\ см визнана істотною кліматичною змінною. Продукт *SWI* надається для континентальної Європи з просторовим розрізненням 1 км на основі продукту *SSM* від сенсора

Sentinel-1 C-SAR та продукту *SSM* від сенсора H SAF Metop ASCAT супутника EUMETSAT протягом двох днів після спостереження.

Визначення вологості ґрунту на основі застосування гідрологічних моделей у комбінації з геопросторовими метеорологічними даними розглянуто у джерелах [144–147].

Висновки. Проаналізовано предиктори пожежної небезпеки: температура повітря та земної поверхні, вологість повітря, швидкість вітру, добова кількість опадів та дефіцит вологи у ґрунті, у колекції супутникових і погодних даних.

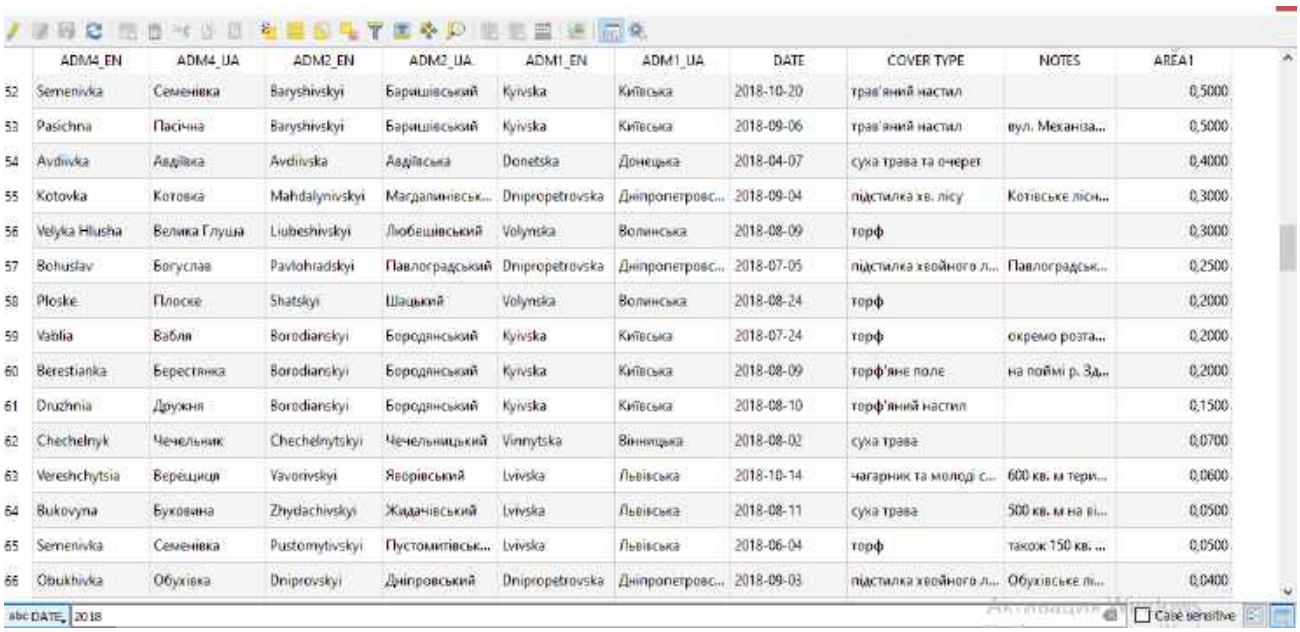
2.4 Створення набору даних про надзвичайні ситуації, пов'язані з вогнем, у векторному вигляді на основі наявної інформації ДСНС України за період 2017–2020 рр.

Найбільш раціональним підходом до формування надійних моделей визначення пожежної небезпеки природних екосистем та моніторингу пожеж на основі супутникових даних є завірка та верифікація отриманих результатів за наземними даними про пожежі, що сталися в природних екосистемах з відкритих та офіційних джерел інформації. Найбільш вірогідним і повним джерелом такої інформації є дані обласних управлінь ДСНС [108].

Аналіз інформації щодо викликів підрозділів ДСНС на пожежі в природних екосистемах дозволив визначити необхідну структуру запису про конкретну пожежу, а саме: населений пункт, дата, тип рослинного горючого матеріалу, площа вигорілої ділянки, примітки для зазначення можливої додаткової інформації. Реалізувати збір такої інформації найбільш раціонально у вигляді геоінформаційного шару у форматі shape-файлу. Це широко розповсюджений векторний формат географічних файлів. Він розробляється і підтримується компанією ESRI з метою інтероперабельності між продуктами ESRI та іншими програмами [148].

Отже, в якості вихідної основи для формування геоінформаційних шарів з даними про пожежі в природних екосистемах України за період 2017–2020 рр. обрано полігональний shape-файл населених пунктів (адміністративного поділу 4 рівня станом на 2018 р.) з відкритої бази геоданих Управління ООН з координації гуманітарних справ / UN OCHA Ukraine [149]. Дані надано в географічній системі координат WGS84.

Формування shape-файлів з даними про пожежі здійснювалося у середовищі відкритої крос-платформенної геоінформаційної системи QGIS, що є однією з найбільш функціональних і зручних настільних геоінформаційних систем. В процесі обробки з вихідного шару було видалено атрибутивну інформацію, що не відповідала меті поставленого завдання (дані щодо площі населених пунктів, приналежність до об'єднаних територіальних громад тощо). В той же час було додано необхідні поля атрибутивної інформації щодо пожеж, які відбулися у природних екосистемах, зокрема: дата (поле DATE), тип рослинного горючого матеріалу, що горів (поле COVER TYPE), площа пожежі в га (поле AREA) та примітки (поле NOTES) (рис. 2.5).



	ADM4_EN	ADM4_UA	ADM2_EN	ADM2_UA	ADM1_EN	ADM1_UA	DATE	COVER TYPE	NOTES	AREA1
52	Semenivka	Семенівка	Baryshivskyi	Баришівський	Kyivska	Київська	2018-10-20	трав'яний настил		0,5000
53	Pasichna	Пасічна	Baryshivskyi	Баришівський	Kyivska	Київська	2018-09-06	трав'яний настил	вул. Механіза...	0,5000
54	Avdiivka	Авдіївка	Avdiivska	Авдіївська	Donetska	Донецька	2018-04-07	суха трава та очерет		0,4000
55	Kotovka	Котовка	Mahdalynivskyi	Магдалинівськ...	Dnipropetrovska	Дніпропетровс...	2018-09-04	підстилка хв. лісу	Котівське лісн...	0,3000
56	Velyka Hlusha	Велика Глуша	Liubeshivskyi	Любешівський	Volynska	Волинська	2018-08-09	торф		0,3000
57	Bohuslav	Богуслав	Pavlohradskyi	Павлоградський	Dnipropetrovska	Дніпропетровс...	2018-07-05	підстилка хвойного л...	Павлоградськ...	0,2500
58	Ploske	Плоске	Shatskyi	Шацький	Volynska	Волинська	2018-08-24	торф		0,2000
59	Vablia	Вабля	Borodianskyi	Бородянський	Kyivska	Київська	2018-07-24	торф	окремо розта...	0,2000
60	Berestianka	Берестянка	Borodianskyi	Бородянський	Kyivska	Київська	2018-08-09	торф'яне поле	на поймі р. Зд...	0,2000
61	Druzhnia	Дружня	Borodianskyi	Бородянський	Kyivska	Київська	2018-08-10	торф'яний настил		0,1500
62	Chechelnyk	Чечельник	Chechelnytskyi	Чечельницький	Vinnytska	Вінницька	2018-08-02	суха трава		0,0700
63	Vereshchytsia	Верещиця	Yavorivskyi	Яворівський	Lvivska	Львівська	2018-10-14	чагарник та молоді с...	600 кв. м тери...	0,0600
64	Bukovyna	Буковина	Zhydachivskyi	Жидачівський	Lvivska	Львівська	2018-08-11	суха трава	500 кв. м на ві...	0,0500
65	Semenivka	Семенівка	Pustomytivskyi	Пустомитівськ...	Lvivska	Львівська	2018-06-04	торф	також 150 кв. ...	0,0500
66	Obukhivka	Обухівка	Dniprovskyi	Дніпровський	Dnipropetrovska	Дніпропетровс...	2018-09-03	підстилка хвойного л...	Обухівське лі...	0,0400

abc DATE 2018 Case sensitive

Рисунок 2.5 – Структура атрибутивної інформації геоінформаційних шарів з даними про пожежі в природних екосистемах України

Таким чином, було сформовано 4 полігональних shape-файла населених пунктів України з даними про пожежі у природних екосистемах, на гасіння яких підрозділами обласних управлінь ДСНС здійснювалися виїзди з 2017 по 2020 рр. відповідно.

2.5 Гармонізація супутникових даних високого та низького просторового розрізнення, формування спільного часового ряду на їх основі

Ефективним є спільне використання супутникових знімків низького та високого просторового розрізнень для виконання задач супутникового моніторингу Землі [150–154]. Така тенденція зумовлена різним набором характеристик та спектральних каналів супутників, що використовують оптичні та радарні способи зйомки поверхні Землі. Поєднуючи високе просторове розрізнення оптичних супутників та можливість радарних супутників зондувати Землю крізь хмари, можна отримати безперебійний інформаційний набір геопросторових даних [155], який буде використовуватись в задачі оцінки та виявлення пожежонебезпечних ділянок різних природних систем.

У дослідженні, що проводиться, використовуються дані оптичних супутників Sentinel-2, що має просторове розрізнення 10 м, Sentinel-3 з просторовим розрізненням 300 м та Landsat-8, з просторовим розрізненням 30 м. У процесі їх спільного використання виникає необхідність попередньої обробки, створення композитів/гармонізації різнорідних даних і верифікації отриманих результатів – постобробки. Досвід з гармонізації супутникових даних різного просторового розрізнення розглянуто нижче.

У роботі [156] розглянуто синтез супутникових даних Landsat-7, Landsat-8 та Sentinel-2. Описано розроблену робасну обробку потоків для гармонізації даних вказаних супутників у хмарній платформі Google Earth

Engine, що поєднує переваги узгодженої структури даних, вбудованих функцій та обчислювальної потужності в Google Cloud.

Загальний процес обробки супутникових даних включає в себе декілька основних етапів: попередня обробка супутникових знімків Landsat-7 TOA, Landsat-8 TOA, Sentinel-2 L1C; гармонізація сенсорів; постобробка супутникових даних. Другий етап включає в себе повторне масштабування супутникових знімків Sentinel-2 та регулювання діапазону Landsat-7,8.

Значну увагу автори приділили попередній обробці отриманих знімків: загальній фільтрації, атмосферній корекції (використовуючи API Python), маскуванню хмар та тіней, перепроекції, перереєстрації, топографічній корекції та корекції двонаправленої функції розподілу відбиття BRDF (bidirectional reflectance distribution function). Для останніх перетворень необхідні дані цифрової моделі висоти DEM. Саме тому корекція відбувалась тільки тоді, коли автори мали доступ до зареєстрованих знімків.

Сезонні зміни та дефіцит даних вимагають від ГІС-розробників використання додаткових математичних засобів для отримання даних з можливістю моніторити природні об’єкти (залежно від задачі геопросторового аналізу) та з високою точністю прогнозувати подальшу поведінку досліджуваної території [157]. Для підвищення точності виявлення посівів застосовано підхід часового ряду для NDVI. Використовуючи дані, отримані на різних етапах росту рослин, можна збільшувати розмірність інформації. Для характеристики сезонних циклів та змін у використанні земель / типах покривів землі, було використано гармоніку (або ряд Фур'є) – гармонічний аналіз на щільних часових рядах NDVI, отриманих із гармонізованого набору даних (Landsat-7, Landsat-8 та Sentinel-2). Математичне визначення гармонічного аналізу представлено в роботі [158].

До уваги також береться гармонізований продукт NASA HLS (Harmonized Landsat/ Sentinel-2) [159], який орієнтовано на отримання зображення поверхні за допомогою бортових приладів OLI та MSI супутників Landsat-8 та Sentinel-2 відповідно. Продукти HLS використовують

набори алгоритмів для отримання композитів від обох приладів з урахуванням таких процесів обробки: атмосферна корекція, маскування хмар, загальна сітка, нормалізація функції розподілу, регулювання спектральної смуги пропускання. Також враховувалась відповідність цільової геометрії приладів при знаходженні спрямованості сонячного відбиття.

При правильній попередній обробці зображень Sentinel та Landsat такий підхід дозволяє провести послідовний аналіз часових рядів та отримати робочий набір даних – мультисенсорні зображення.

Задачею побудови гармонізованого набору даних є нівелювання відмінностей Landsat 8 / OLI та Sentinel-2 / MSI, які, в цілому, надають подібні вимірювання з точки зору спектральних, просторових та кутових характеристик, а також розміщені на синхронних орбітах.

У даній роботі чітко визначено, що під гармонізованими продуктами маються на увазі лише ті, що пройшли такі етапи обробки: прив'язка до загального просторового розрізнення, проекції карти та просторової протяжності (тобто, тайлу); атмосферна корекція та хмарне маскування; нормалізація загальної геометрії надиру за допомогою оцінки BRDF; налаштування для відображення відгуку від загальних спектральних смуг.

Метод гармонізації включає радіометричну та геометричну корекції, що створює процес послідовного запису відбивної здатності поверхні для отримання часового ряду зображень. У цьому випадку враховувались особливості кожного джерела даних та розроблено алгоритм роботи із супутниковими даними:

1. Радіометрія Seninel-2 (S2) / MSI налаштована для відтворення спектральної смуги частот Landsat 8 / OLI для смуг, спільних для обох датчиків. Для унікальних смуг (тобто червоного краю MSI) та для атмосферних смуг спектральне налаштування не проводиться.
2. Узгоджені продукти (S30, L30) мають сітку із загальним просторовим просторове розрізнення даних MSI 10 м і 20 м, але при цьому воно забезпечує узгодженість з архівом Landsat.

3. Узгоджені продукти прив'язані до загальної проекції UTM і просторової протяжності на основі тайлової системи Sentinel-2, що забезпечує розумний підхід для відтворення даних на рівні місцевого масштабу.

Ланцюжок обробки HLS структурований у чотири етапи обробки. Алгоритми обробки відображають найсучасніші методи обробки оптичних супутникових даних середнього просторового розрізнення. Атмосферна корекція супутникових зображень з урахуванням відбивної здатності поверхні стала стандартною практикою і є основою стандарту CEOS Analysis Ready Data for Land (CARD4L).

Використання точних і послідовних геометричних наземних еталонів при обробці продуктів даних дистанційного зондування є одним із сучасних методів обробки супутникових даних [162]. Такий підхід дозволяє полегшити врахування відмінностей між продуктами даних з різних місій супутників. Саме тому були прийняті спроби по гармонізації наземних еталонних даних Landsat з глобальними еталонними зображеннями (Global Reference Image, GRI) Sentinel-2 для покращення спільної реєстрації продуктів даних двох глобальних місій середнього просторового розрізнення.

Таким чином, аналіз методів гармонізації супутникових даних дає ряд алгоритмів, які при відповідній їх комбінації можуть бути використані для обробки даних Sentinel-2 (10 м), Sentinel-3 (300 м) та Landsat-8 (30 м) для виконання наступних етапів проєкту.

2.6 Обробка супутникових даних для виявлення, маскування та відновлення пропусків від хмар у колекції супутникових знімків

Обробка супутникових даних – це процес виконання операцій над аерокосмічними знімками, що включає їхню корекцію, перетворення та поліпшення, дешифрування, візуалізацію. Вона складається з двох основних етапів: попередньої обробки та тематичної обробки. *Попередня обробка космічних знімків* – це комплекс операцій зі знімками, спрямований на

усунення різних спотворень зображення. Зокрема, це: геометрична корекція супутникових зображень; радіометричне калібрування знімків; радіометрична корекція впливу атмосфери; відновлення пропущених пікселів; контрастування; фільтрація. *Геометрична корекція* включає в себе усунення на зображенні геометричних спотворень (орторектифікацію) та географічну прив'язку. Серед причин геометричних спотворень можуть бути кривизна поверхні Землі (спотворення форми об'єктів або масштабу), нерівність рельєфу, обертання Землі або рух космічного апарату.

Радіометричне калібрування знімків полягає у приведенні «сирих значень» яскравості на знімках DN (Digital Number) у фізичні одиниці. Формула для калібрування багатоспектральних знімків в оптичному діапазоні:

$$B \times X = KX \times DN + CX,$$

де $B \times X$ – це енергетична яскравість для спектральної зони X; KX – калібрувальний коефіцієнт; DN – сирі значення яскравості; CX – калібрувальна константа, відповідна мінімальній величині реєстрованої яскравості.

Радіометрична корекція – усуває варіювання значень яскравості пікселів, яке відбувається в результаті неправильної роботи детекторів, впливу рельєфу і атмосфери. При проходженні через атмосферу електромагнітні хвилі поглинаються і розсіюються, причиною поглинання і розсіювання є озон, водяна пара, вуглекислий газ, кисень, метан, пил, дим.

Атмосферна корекція – корекція впливу атмосфери, яка визначає розташування діапазонів зйомки за рахунок вікон прозорості. Хмари і туман добре видно на тлі води, оскільки в червоній та інфрачервоній ділянках спектра поверхня води за своїми оптичними характеристиками близька до абсолютно чорного тіла. Тому вміст в атмосфері водяної пари та аерозолів (диму) можна оцінити по знімках, що включають ділянки морів і океанів.

Тематична обробка космічних знімків – це процес дешифрування або розпізнавання об'єктів і явищ на космічних знімках. Способи тематичної

обробки: кольорові перетворення, індексні зображення, аналіз головних компонентів, метод спектрального розділення, класифікації та ін. Тобто, після попередньої обробки супутникових даних буде здійснюватися тематична обробка, в результаті чого буде створено карти пожежонебезпеки для території України.

Обробка даних дистанційного зондування за міжнародними стандартами включає наступні рівні:

Рівень 0. «Сирі» дані, отримані датчиками знімальних камер в процесі зйомки, без будь-яких перетворень. Цей рівень є базовим для подальших рівнів обробки. На цьому рівні стандарт формату файлів зображень невизначений і може бути визначеним компанією–оператором супутникової системи.

Рівень 1А. Включає тільки радіометричну корекцію спотворень, викликаних різницею в чутливості окремих датчиків знімальної системи. Надаються коефіцієнти абсолютного радіометричного калібрування.

Рівень 1В. Включає радіометричну корекцію рівня обробки 1А, а також геометричну корекцію систематичних помилок датчиків системи сканування (панорамні спотворення, спотворення, викликані обертанням і кривизною Землі, коливанням висоти орбіти супутника). Застосовується абсолютне радіометричне калібрування.

Рівень 2А. Зображення приведені до стандартної географічної проекції без використання наземних опорних точок. Проєктування зображення виконується на середню площину, або використовується глобальна цифрова модель рельєфу зі кроком на місцевості 1 км.

Рівень 2В. Зображення рівня 2А приведені до стандартної картографічної проєкції з використанням наземних опорних точок. Проєктування зображення виконується на середню площину, або використовується глобальна цифрова модель рельєфу з кроком на місцевості 1 км.

Рівень 3А. Зображення проєктуються в задану картографічну проекцію шляхом ортотрансформування, з використанням моделі знімка, опорних наземних точок і моделі рельєфу місцевості. Отримані зображення є ортоскоригованими із заданою точністю.

Рівень 3В передбачає об'єднання зображень рівня 3А в єдині растрові мозаїки, які покривають великі території.

Згідно зі стандартом України [163] необхідно використати такий набір рівнів обробки зображень ДЗЗ: рівень 0 (формування вихідного зображення з первинних даних і доповнення його необхідними метаданими); рівень 1 (виконання необхідних процедур геометричного і радіометричного коригування та просторової прив'язки за орбітальними даними); рівень 2 (просторова прив'язка зображення з використанням наземних опорних точок); рівень 3 (набуття значень дешифрувальних ознак або визначення фізичних параметрів об'єктів зондування); рівень 4 (дешифрування зображень і складання опису).

При попередній обробці оптичних даних для подолання проблем, що пов'язані із хмарами та тінями від них, необхідно здійснювати відновлення пропусків у тих місцях, де немає даних, або ж створювати композити для вирішення цієї проблеми. Розглянемо різні підходи побудови композитів для оптичних даних, зокрема, Sentinel-2. Одним з підходів побудови композитів є використання сервісу «Copernicus Sentinel-2 Global Mosaic (S2GM)», опис алгоритму якого міститься у документі [164]. Основні етапи обробки даних представлено на рис. 2.6).

Вхідними даними для побудови композиту є атмосферно-скореговані L2A продукти супутника Sentinel-2. Для отримання таких продуктів використовується програма Sen2Cor ESA. Атмосферно-скореговані L2A продукти містять канали з 10 м розрізненням (без BRDF корекції) та канал із класифікацією (містить інформацію про захмареність, сніг, аерозолі), який використовується під час побудови мозаїки. Для створення мозаїки необхідно зареєструватися на сайті: https://apps.sentinel-hub.com/mosaic-

hub/#/, обрати необхідну територію (по якій буде створено композит), дату, по якій буде створено композит та зробити замовлення. Через деякий час буде отримано посилання на завантаження результуючого композиту. Композит завантажується по гранулам та по каналам (B02, B03, B04, B08).

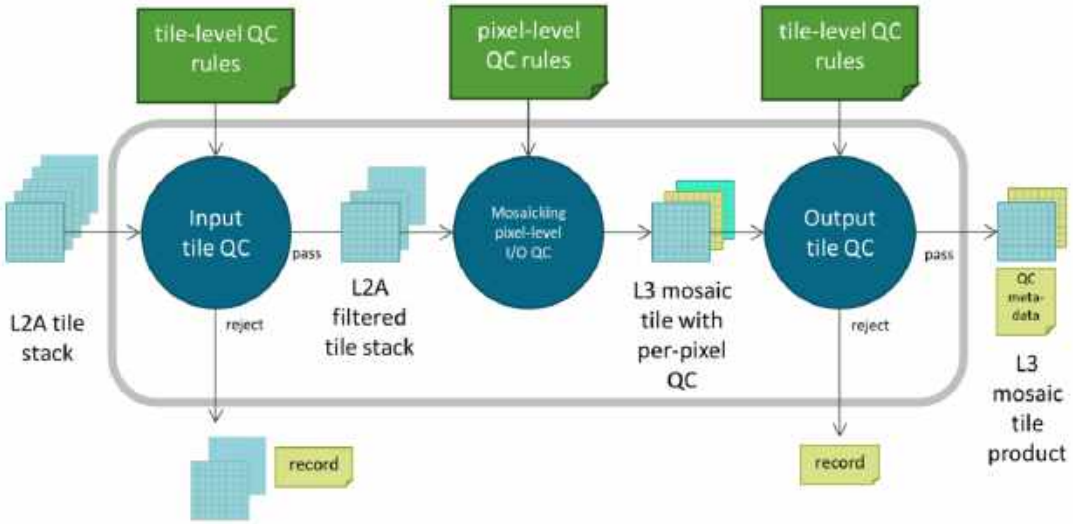


Рисунок 2.6 – Основні етапи побудови композитів для оптичних даних

Іншим підходом до створення композитів є використання програми S2M (Sentinel-2 Mosaic) [165]. Вона складається з трьох етапів: завантаження даних, атмосферна корекція даних та композитування. Перші два кроки можна виконувати в межах цієї програми, або ж окремими засобами самостійно. Для побудови композитів необхідно завантажити дані, що покривають необхідну територію з вказаним відсотком хмар. Результатом є композити за вказані проміжки часу. Основні етапи обробки супутникових даних наведено на рис. 2.7, які практично такі ж як і представлені на рис. 2.6.

Ще одним із популярних алгоритмів композитування супутникових даних є алгоритм на основі «зеленості пікселя». Ідеєю цього підходу є те, що рахуються максимальні значення NDVI по всій колекції супутникових даних, після чого у композит додаються пікселі зі знімка, на якому було визначено максимальне значення NDVI [166].

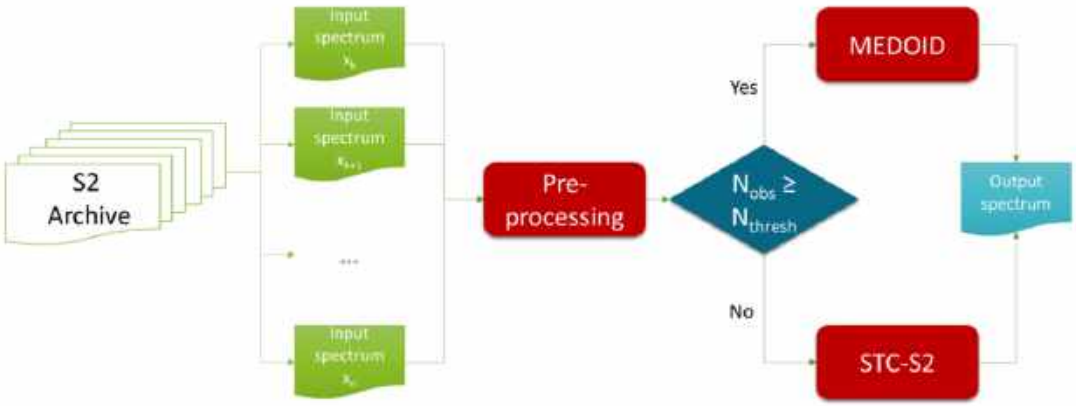


Рисунок 2.7 – Загальна схема композитування

Висновки. Проведений аналіз існуючих методів та алгоритмів попередньої обробки супутникових даних показав, що для оптичних даних одним із найважливіших етапів є виявлення хмар та тіней від них у колекції супутникових знімків. Від якості створеної маски хмар та тіней від них залежить кількість артефактів та інформації, яка залишиться на супутникових даних, та пропусків, які доведеться заповнювати (використовуючи методи відновлення пропусків, описані у підрозділі 1.3 Звіту або при створенні композитів, описаних вище). При побудові композитів ефективним підходом є використання методу, що базується на використанні максимального значення NDVI. Проте його недоліком є те, що неможливо відслідкувати початкову стадію вегетації, що може негативно вплинути на подальші результати при використанні таких даних. Тому варто розробити метод, в основі якого буде не лише використання максимальних значень NDVI, а й інші показники, середнє значення, медіана тощо.

3 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ РІЗНИХ ТИПІВ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

3.1 Розроблення методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення гармонізованої колекції супутникових даних на основі наявних мультиспектральних даних високого просторового розрізнення

Постановка задачі збільшення просторового розрізнення супутникових продуктів. Температура земної поверхні LST (Land Surface Temperature) є важливим показником стану поверхні, що може використовуватися для виявлення та моніторингу природних лих, зокрема, виявлення підземних та наземних пожеж. Супутникові дані є єдиним джерелом інформації, що надають можливість проводити аналіз LST для великих територій. Для цього використовуються алгоритми моделювання LST на основі термальних каналів мультиспектральних супутникових даних.

Однією із головних характеристик супутникових продуктів є просторове розрізнення, яке вказує на мінімальний розмір земельної ділянки, що займає на супутникову знімку один піксель. Просторове розрізнення в залежності від розміру пікселя можна розділити на 4 класи [167]: низьке (>100 м), середнє (100–1000 м), високе (5–100 м) та дуже високе (<5 м). Зазвичай супутникові місії з високим просторовим розрізненням мають низьке часове розрізнення, а місії, що мають високе часове розрізнення, часто мають низьке просторове розрізнення (табл. 3.1). Вибір класу просторового розрізнення залежить від задачі, в якій ці дані використовуються. На сьогодні у відкритому доступі є три найбільш часто використовувані супутникові місії, які є джерелом інформації для моделювання температури земної поверхні. Також важливою місією моніторингу Землі, що не містить температуру земної поверхні, але корисна

для її моделювання, є місія Sentinel-2, яка надає RGBN знімки із просторовим розрізненням 10 м.

Таблиця 3.1 – Характеристики супутникових місій, що використовуються для аналізу LST

Місія (супутник)	**Просторове розрізнення**	**Часове розрізнення**
MODIS Aqua та Terra	250 м (RGBN) **1 км** (термальний канал)	2 знімки в день
Landsat-8	30 м (RGBN) 15 м (панхроматичний канал) 100 м (термальний канал) – інтерполюється до **30 м**	16 днів
Sentinel-3 A та B	300 м (RGBN) **1 км** (термальний канал)	2 знімки в день

Двома основними актуальними місіями, які надають мультиспектральні дані для моделювання температури земної поверхні, є місії Sentinel-3 та Landsat-8. Місія MODIS розпочалася у 1999 р. і запланований час її функціонування вже закінчився, але супутники досі знаходяться на своїх орбітах та надають на постійній основі супутникові дані. Різне просторове та часове розрізнення спричиняє складнощі у поєднані даних, отриманих від цих супутникових місій. Landsat-8 надає супутникові дані, що дозволяють отримувати карти температури земної поверхні з високим просторовим розрізненням термального каналу 30 м., проте має низьке часове розрізнення 16 днів, що є недостатнім для сервісів моніторингу температури земної поверхні в режимі, близькому до реального часу. Місія Sentinel-3 дає можливість отримувати карти температури земної поверхні з просторовим розрізнення 1 км, що робить ці дані мало інформативними для аналізу поверхні, при цьому дана місія має високе часове розрізнення – 2 знімки на день (ранковий та вечірній час).

Враховуючи цю специфіку даних, виникає актуальна задача збільшення просторового розрізнення супутникових даних Sentinel-3 (LST), на основі злиття різнорідних даних Sentinel-2, Landsat-8 та Sentinel-3. Це є можливим

при застосуванні сучасних методів злиття мультиспектральних супутникових даних та методів глибинного навчання.

Моделювання температури земної поверхні на основі супутникових даних. *Застосування процедури пан-шарпенінгу.* Пан-шарпенінг – це метод об'єднання мультиспектральних і панхроматичного супутникових каналів для збільшення просторового розрізнення мультиспектральних каналів до просторового розрізнення панхроматичного каналу. Для багатьох супутникових оптичних сенсорів високого просторового розрізнення – це звичайна практика, і тому в багатьох описах продуктів (наприклад, для WorldView-2) вказується просторове розрізнення для мультиспектральних даних рівне панхроматичному, оскільки для багатьох провайдерів даних пан-шарпенінг – це одна із основних процедур обробки даних.

Серед глобальних супутникових місій, дані яких надаються у відкритому доступі, хорошим прикладом є місія Landsat-8. Супутникові знімки Landsat-8 мають просторове розрізнення 30 м, при цьому розрізнення пан-хроматичного каналу дорівнює 15 метрам [168].

Пан-шарпенінг здійснюється за рахунок об'єднання інформації, яка зберігається у пікселях вищого просторового розрізнення панхроматичного каналу, пікселях нижчого просторового розрізнення мультиспектральних даних та інтенсивності мультиспектрального світла, яка детектується сенсором. Ця інтенсивність I для Landsat-8 вираховується за формулою

$$I = \frac{0{,}6 \cdot Red + 0{,}98 \cdot Green + 0{,}42 \cdot Blue}{2},$$

де $Red, Green, Blue$ – це інтенсивність випромінювання, зафіксована у червоному, зеленому та синьому спектральних каналах. Для Landsat-7 при застосуванні NIR каналу інтенсивність I вираховується за формулою

$$I = \frac{0{,}6 \cdot Red + 0{,}98 \cdot Green + 0{,}42 \cdot Blue + NIR}{3}.$$

Таким чином відбувається злиття інформації мультиспектральних каналів супутникових знімків, в ході якого отримуються знімки вищого просторового розрізнення, ніж оригінальні знімки. Існує велика кількість різних модифікацій методів пан-шарпенінгу [169, 170]. При цьому існує правило – при застосуванні методу пан-шарпенінгу збільшується просторове розрізнення, але втрачається мультиспектральне розрізнення і навпаки. Не існує ідеального методу, який одночасно збільшує просторове розрізнення та мультиспектральне розрізнення. Тому для розв'язання різних задач дистанційного зондування Землі є можливість підвищити інформативність саме тих даних, яких потребує задача [171, 172].

Злиття растрових і векторних даних також можна вважати збільшенням просторового розрізненням, при якому супутникові характеристики поверхні Землі в растровому вигляді усередньоються по об'єктам, що визначаються геопросторовою геометрією [173–175]. Важливим аспектом у застосуванні даного методу є те, що просторове розрізнення в такому випадку буде вимірюватися не в одиницях квадратних метрів, а в одиницях площі мінімального об'єкта.

Основні підходи до моделювання температури земної поверхні на основі супутникових даних. Основою для моделювання температури земної поверхні є термальні інфрачервоні канали супутникових знімків. Зазвичай сенсори, що використовуються для вимірювання інтенсивності електромагнітних хвиль у термальних діапазонах мають не менше двох каналів з різними діапазонами довжини хвилі. Це необхідно для використання точних алгоритмів, що вираховують поглинання термальної енергії атмосферою. Для моделювання температури земної поверхні є два основних підходи, на основі яких будуються всі можливі варіації алгоритмів: алгоритм Split Window [176] та рівняння радіаційного переносу [177].

Алгоритм Split Window є алгоритмом з найбільшою точністю моделювання температури земної поверхні та потребує для реалізації дані, отримані із двох

термальних супутникових каналів, та додаткову інформацію про стан атмосфери та характеристику земної поверхні.

Рівняння радіаційного переносу. Даний підхід використовує лише один термальний канал і є простим для реалізації сервісу моніторингу LST у режимі, наближеному до реального часу. Підрахунок відбувається на основі коефіцієнту випромінювання та яскравісної температури одного термального каналу. Найпоширенішим та найбільш практичним в плані реалізації є алгоритм, що складається із 7-ми кроків [179]

Моделювання температури земної поверхні на основі супутникових даних не є тривіальною задачею. Перший підхід – Split Window Algorithm, для вирішення цієї задачі використовує два термальних канали і дає найвищу точність моделювання, але потребує додаткових наземних вимірювань та атмосферну інформацію, що сильно ускладнює реалізацію підходу в операційних цілях. Другий підхід – рівняння радіаційного переносу, використовує тільки термальний канал і при цьому є дуже простим та зручним в реалізації, тому його буде використано як основний алгоритм для подальших досліджень.

Нейронно-мережева методологія збільшення просторового розрізнення температурних продуктів Sentinel-3. Рекурентні нейронні мережі – це особливий тип нейронних мереж, що використовує зворотній зв’язок у нейронах для симуляції пам’яті, таким чином додаючи зв’язок між входами для різних нейронів. Ця особливість створює перевагу даних типів нейронних мереж над іншими типами у задачах, де використовуються дані, що мають часову структуру. Оскільки супутникові дані у більшості прикладних задач використовуються як часові ряди мультиспектральних даних (наприклад, у задачах класифікації земного покриву, прогнозу врожайності), використання даного типу нейронних мереж має високу перспективу. Але необхідно враховувати, що для отримання коректного результату вхідні дані потребують гармонізації та формування часових рядів інформативних ознак для розв’язання поставлених прикладних задач.

За допомогою штучних нейронних мереж розв’язується велика кількість прикладних задач у великій кількості наукових напрямів, починаючи від розпізнавання обличчя до вирішення задач класифікації сільськогосподарських культур на основі супутникових даних [183, 184], прогнозування врожайності сільськогосподарських полів [185, 186,] а також для обробки супутникових даних [187, 188] та постобробки супутникових продуктів [189].

Використання архітектури рекурентної штучної нейронної мережі LSTM для збільшення просторового розрізнення температурних карт. Вхідними даними для моделі штучної нейронної мережі LSTM є вектори, які є часовими рядами вимірювань, тобто тривимірні вектори. Ці вектори формуються на основі пікселів NDVI та LST, обчислених на основі гармонізованих часових рядів супутникових знімків Sentinel-2, Landsat-8 та Sentinel-3, наступним чином:

Оптимальна кількість дат для роботи алгоритму дорівнює трьом. Перша дата – це дата, для якої відбувається збільшення просторового розрізнення даних. Друга дата – це минула дата.

Максимальна кількість дат для роботи алгоритму – 25 дат. При збільшені кількості дат точність алгоритму починає падати. До того ж велика кількість дат призводить до виникнення великої розмірності даних, через що модель перенавчається і має в результаті дуже низьку дисперсію.

Кожна дата містить в собі 4 виміри: NDVI даних високого розрізнення із набору даних Sentinel-2 та Landsat-8; LST даних високого розрізнення із набору даних Landsat-8 та збільшене розрізнення Sentinel-3, NDVI, обрахований на даних Sentinel-3, LST, обрахований на даних Sentinel-3.

Для останньої дати в наборі даних LST високого розрізнення замінюється на растр, який обчислюється за формулою:

$$LST_{last} = \frac{\partial LST}{\partial t} \cdot \Delta t + LST_{pre},$$

де $\frac{\partial LST}{\partial t}$ – це диференціал функції залежності LST високого розрізнення від часу, Δt – це кількість днів між датою збільшення розрізнення та останім знімком LST з високим просторовим розрізненням LST_{pre}. Також це значення можна отримати за допомогою середньої за день різниці температур, помноженої на кількість днів, та доданої до останьої карти температури земної поверхні

$$LST_{last} = \frac{LST_{t2} - LST_{t1}}{t_2 - t_1} \cdot (t_3 - t_2) + LST_{t2},$$

де t_3 – дата, для якої відбувається моделювання температури земної поверхні, а t_1, t_2 – 2 послідовні минулі дати з наявними даними.

Дані перед навчанням необхідно нормалізувати за допомого мінімум-максимум скейлу, тобто: вирахувати мінімальне та максимальне значення каналу для кожного вимірювання, створити таким чином вектор максимальних та мінімальних значень і після цього нормалізувати за формулою

$$Data_{norm} = \frac{Data - V_{\min}^{-}}{V_{\max}^{-} - V_{\min}^{-}}.$$

Після ініціалізації нейронної мережі LSTM вона навчається робити прогноз на основі векторів у формі $N \times T \times 4$, повертаючи одне число, яке інтерпритується як температура земної поверхні для визначеного дня. Тобто стек карт NDVI та LST за T дат є входом, а виходом є карта температури земної поверхні за дату T, для того щоб збудувати карту за дату $T+1$ необхідно видалити із стеку 1-у дату і додати дані за дату $T+1$. Для покращення роботи алгоритму навчену модель не потрібно ініціювати заново, достатньо її донавчити на нових даних, при цьому окремо виділяючи навчальні дані (у нашому випадку, по пожежам) та створюючи новий датасет, який буде завжди додаватися до датасетів кожного дня моделювання. Ця операція збільшить ймовірність розпізнати подію

(активний вогонь або підземну пожежу) при збільшенні розрізнення супутникових знімків Sentinel-3.

Далі необхідно провести калібрування моделі на реальних прикладах з підбором гіперпараметрів. Експериментальним чином було отримано результат, що деякі параметри можна залишити статичними, а деякі необхідно підбирати в залежності від довжини входу. Статичними параметрами є: функція втрат, на місце якої при ініціалізації можна вибрати середню квадратичну помилку; функція активації, яку визначити як гіперболічний тангенс; рекурентна функція активації як сігмоїд; алгоритм оптимізації Adam, що використовує експоненційні середні значення ковзних вікон, отримані на градієнті за поданим батчем та має швидкість навчання 0,01

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + g_t - \beta_1 g_t,$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + g_t - \beta_2 g_t,$$

де m_t та v_t – середні значення ковзних вікон для батчу під номером t, g_t – градієнт для батчу t, а β_1, β_2 – гіперпараметри алгоритму, які можна підбирати або використати стандартні значення $\beta_1 = 0{,}9$, а $\beta_2 = 1$ або 0,999. Для запобігання перенавчання можна встановити dropout параметр з ймовірністю 25 %, який реалізується як множення функції активації f_{act} на випадковий вектор D, елементи якого розподілені за законом Бернулі:

$$f_{act}^{new} = D \cdot f_{act}.$$

Таким чином, можна випадковим чином на кожному батчі навчальних даних вибирати тільки частину нейронів, що буде навчатися. Такий спосіб регуляризації також сприяє підвищенню точності роботи алгоритму на різних входах, враховуючи, що повністю викинути із навчальних даних пікселі, пошкоджені хмарами та тінями, є неможливим.

В якості архітектури LSTM було обрано схему «Всі в один». Вибір гіперпараметрів може здійснюватися за допомого методів крос-валідації та

Grid Search. Основним гіперпараметром, який найбільше впливає на точність отриманого результату, є кількість прихованих шарів нейронної мережі. Дані параметри можуть змінюватися для різних територій моделювання. Для невеликих територій або територій, для яких один клас земного покриву є домінуючим, тобто кількість пікселів інших класів є відносно несуттєвою або відсутньою, можна використовувати одношарову архітектуру, або обмежити кількість шарів для перебору.

Даний метод є простим у масштабуванні і може бути використаний на рівні країни. Також важливою особливістю є те, що модель LSTM стійка до помилок у вхідних даних та дірок, тому відновлення хмар є необов'язковим кроком, який можна пропустити, проте для отримання максимально високої точності збільшення розрізнення даних Sentinel-3 його варто виконувати. Також при збільшені території можна збільшувати і частоту оновлення даних, оскільки на рівні країни для всієї території є неповне покриття даними Sentinel-2 та Landsat-8 щодня.

Неповне покриття означає, що присутні дані тільки для однієї або декількох смуг. У такому випадку можна використати алгоритм відновлення хмар для моделювання покриття у зонах, де відсутні знімки, і таким чином покрити всю територію країни. Процес відновлення пропущених полос очевидно не має такої високої точності як відновлення хмар, проте дає можливість будувати щоденну карту температури земної поверхні для території країни. Також для збільшення часового розрізнення можна використовувати інші супутникові дані більшого або такого ж просторового розрізнення, проте потрібно враховувати їхнє покриття, оскільки вони можуть мати дані не на кожну територію.

Саме тому вважається, що дані Landsat-8 та Sentinel-2 є універсальним джерелом інформації, оскільки їхні місії гарантовано продовжуються, і після запуску Landsat-9 та Sentinel-2C кількість покритих дат збільшиться. На рис. 3.1 зображено структуру методу збільшення просторового розрізнення температурних карт на основі даних Sentinel-3.

Метод збільшення просторового розрізнення супутникових даних Sentinel-3 на основі злиття різнорідних даних Sentinel-2, Landsat-8 та Sentinel-3 та використання архітектури рекурентної штучної нейронної мережі LSTM включає наступні 10 кроків:

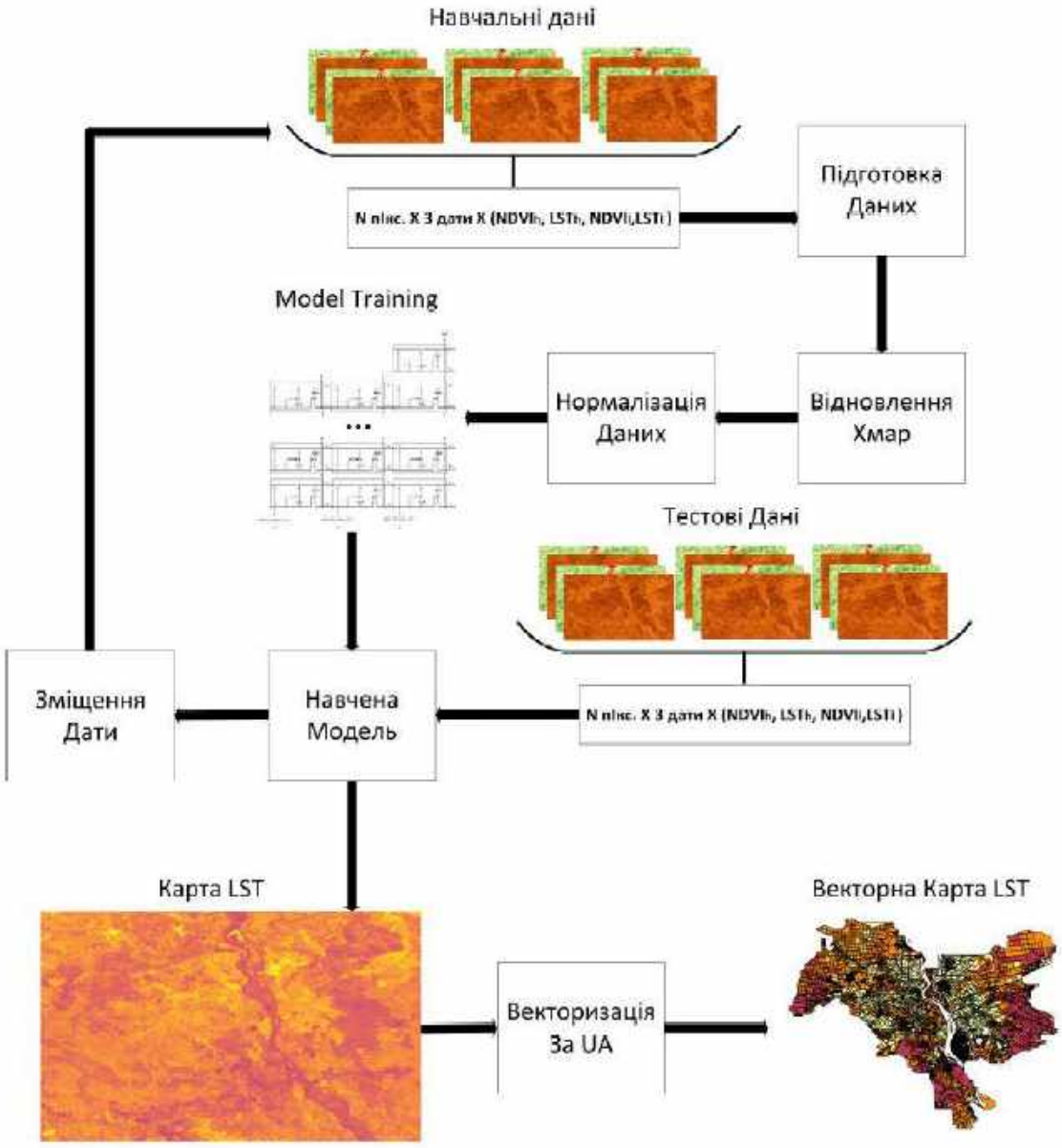


Рисунок 3.1 – Метод збільшення просторового розрізнення даних Sentinel-3

1. Завантаження даних Sentinel-2, Landsat-8 та Sentinel-3 та збереження їх у сховищі даних у зручному для подальшого використання стані.

2. Для оптичних даних Sentinel-2 та Landsat-8 необхідно провести атмосферну та радіометричну корекцію, сформувати маску хмар та

замаскувати хмари, привести до 30-ти метрового просторового розрізнення та зберегти у типі Float32.

3. Для всіх даних необхідно провести відновлення хмар за методом описаним у підрозділі 3.2 Звіту (або за допомогою будь-якого іншого доступного методу відновлення хмар).

4. Супутникові дані вичитуються у формі часових рядів 4-х вимірів: $NDVI_h$ – $NDVI$ високого просторового розрізнення, LST_h – температури земної поверхні високого просторового розрізнення, $NDVI_l$ – $NDVI$ низького просторового розрізнення, отриманий із знімків Sentinel-3, LST_l – температури земної поверхні з низьким просторовим розрізненням.

5. Формування навчального та тестового наборів даних. Якщо необхідно провести збільшення просторового розрізнення для дати t_4, тоді навчальний датасет формується для трьох послідовних доступних дат t_1, t_2, t_3 і навчається на доступній карті температури земної поверхні t_3, а тестування необхідно здійснювати для дат t_2, t_3, t_4. При цьому для тестування необов'язково мати наявну карту температури земної поверхні.

6. Нормалізація отриманих даних за допомогою мінімаксної нормалізації.

7. Ініціалізація та калібрування нейронної мережі або ініціалізація нейронної мережі за вже збереженими вагами відкаліброваної нейронної мережі.

8. Збільшення просторового розрізнення карти температури земної поверхні за тестовим набором, що використовується у роботі з нейронною мережею.

9. Зміщення дати для побудови навчального набору даних для наступної ітерації на основі нової карти температури земної поверхні та нових вхідних даних.

10. Векторизація карти земної поверхні для отримання інтерактивної карти для подальшого аналізу.

Висновки. Розроблено метод збільшення просторового розрізнення супутникових карт температури земної поверхні Sentinel-3 на основі математичної моделі нейронної мережі LSTM з архітектурою «Всі в один». Дана методологія бере на вхід часові ряди карт NDVI та LST за минулі дати та поточну дату. Особливістю розробленогоо методу є формування входу для дня моделювання з використанням обчислення синтетичної карти температури земної поверхні на основі диференціалу функції залежності температури земної поверхні від дня, отриманої при аналізі часових рядів температурних карт. Отже, дану методологію можна використати для збільшення прострового розрізнення карт температури земної поверхні для дат, по яких немає даних Landsat-8, на основі даних Sentinel-2.

3.2 Розроблення методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення

Для створення якісних продуктів на основі супутникових даних необхідно провести їхню попередню обробку та використати щільний часовий ряд спостережень. Однак, використовуючи оптичні супутникові дані, часто стикаємося із проблемою хмарності даних [190, 191]. Для оптичних даних, що існують більше 10 років, вже розроблено певні алгоритми, які дають змогу знаходити хмари та тіні від них (зокрема, для супутникових даних Landsat, MODIS та ін.). Визначення змін, користуючись даними високого просторового розрізнення Landsat, має обмеження (лише 1 раз на 16 днів).

Висока частота зйомки забезпечує важливою інформацією для виявлення щорічних змін земельного покриву на значній площі. Дані місії Sentinel-2 , розпочатої Європейським космічним агентством ESA у 2015 р. дають можливість отримувати дані кожні 5 днів, із високим просторовим розрізненням 10 м, проте при їх використанні виникає декілька проблем. Перша – стандартна маска хмар має певні неточності, пов’язані із

видаленням всіх артефактів на знімку, а друга – це великі об’єми даних, які необхідно обробляти при створенні продуктів, особливо для всієї країни.

Для вирішення другої проблеми пропонується всі процеси обробки виконувати у хмарній платформі, наприклад, GEE (Google Earth Engine). Але залишається питання мінімізації кількості хмар на оптичних даних саме у хмарній платформі.

При виконанні даного дослідження розглядалося кілька підходів до детектування хмар та тіней від них.

Перший підхід базується на використанні стандартної маски хмар QA60. Другий підхід використовує 20 м маску SCL (Scene Classification), отриману засобами Sen2Cor. Враховуючи, що розроблені алгоритми необхідно використовувати у хмарній платформі GEE, алгоритми Fmask та MAJA не розглядалися. Дані два підходи не виділяють хмари на достатньому рівні, тому було адаптовано та вдосконалено алгоритм пошуку хмар та тіней від них на основі відомого методу, що добре себе зарекомендував для обробки даних Landsat.

Аналізуючи дослідження щодо порівняння спектральних характеристик даних Sentinel-2 та Landsat-8 виявлено, що дані Sentinel-2 MSI є такими ж спектрально порівняними з двома типами даних зображення Landsat, як і датчики Landsat ETM+ та Landsat OLI між собою. Значення середньоквадратичного відхилення RMSD (root-mean-square deviation) – від 0,0121 до 0,0398, були отримані між Sentinel-2 MSI та спектральними значеннями Landsat, та значення RMSD від 0,0124 до 0,0372 були отримані між OLI та ETM+ [192]. Отже,незважаючи на різницю просторових, спектральних та часових характеристик Sentinel-2 та Landsat-8, інтеграція їхніх наборів даних можлива. Це означає, що алгоритм виявлення хмар для даних Landsat можливо адаптувати до даних Sentinel-2. Схожа адаптація була проведена до даних MODIS у роботі [193].

Основна ідея алгоритму полягає у використанні індексів NDMI (Normalized Difference Moisture Index), NDSI (Normalized-Difference Snow

Index) та врахуванні того, що хмари досить яскраві у всіх видимих діапазонах. Тому хмари можуть бути замасковані більш детально, використовуючи стандартний канал QA60. У алгоритмі також враховується кут зйомки та зміщення тіні від хмари, а також пошук темних пікселів із використанням інформації з NIR та SWIR каналів. У кінцевому результаті до створених масок додається буфер в кілька пікселів для більшої достовірності вилучення хмари або тіні (оптимальним варіантом є 10–12 пікселів).

Розроблений метод може бути застосований і для інших супутникових даних, зокрема Proba-V, MODIS та Sentinel-3,5.

3.3 Розроблення методу оцінювання пожежної небезпеки, що ґрунтується на індексі FWI, з використанням супутникових даних, погодних даних, карт характеристик земного покриву та його узагальнення на інші класи земного покриву

Результати проведеного аналізу систем і методів оцінювання пожежної небезпеки у підрозділах 1.1–1.2 Звіту дали можливість зробити обгрунтований висновок, що найбільш розповсюджений індекс *FWI,* який базється виключно на погодних даних, доцільно модифікувати шляхом підвищення його точності на основі використання супутникових даних високого розрізнення та узагальнення індексу на різні типи природних екосистем.

Індекс пожежної небезпеки FWI. Система погодного індексу лісових пожеж FWI була розроблена у 1970-х роках у Канаді на основі досліджень лісових пожеж, і з того часу декілька раз модифікувалася та вдосконалювалася [36]. У підрозділі 1.2 Звіту коротко описано її шість стандартних компонент (рис. 1.4). Методика їхнього розрахунку досить громіздка [37–39], тому для представлення процесу обчислення індексу *FWI* розглянемо її у загальних рисах.

Код вмісту вологи у дрібному паливі $FFMC$ було спочатку розроблено як двозначний код (від 00 до 99), але з часом модифіковано для діапазону від максимального вмісту вологи 0 до мінімального вмісту вологи 101. Обчислення коду $FFMC$ за день t відбувається наступним чином: спочатку розраховується вміст вологи у дрібному паливі за попередній день – m_{t-1}, а потім застосовуються поправки на вплив опадів, атмосферне зволоження / висихання за день t.

Код $FFMC$ за день t обчислюється за формулою

$$FFMC_t = 59.5 \cdot \frac{250 - m_t}{147.2 + m_t},$$

де m_t – вміст вологи у дрібному паливі у день t.

Обчислення *вмісту вологи в органічному шарі* DMC за день t відбувається майже аналогічно з обчисленням коду $FFMC$: спочатку розраховується вміст вологи у duff-шарі за попередній день – m_{t-1}, а потім застосовуються поправки з урахуванням фази опадів або фази висихання за день t [37–39]:

$$DMC_t = \begin{cases} DMC_{t-1} + 100 \cdot K_t, \text{ для } P \le 1{,}5 \\ DMC_{t_r} + 100 \cdot K_t, \text{ для } P > 1{,}5 \end{cases},$$

де K_t – інтенсивність висихання duff-шару за день t, яка обчислюється з урахуванням тривалості світлового дня; P – опади (мм).

DMC – це додатна величина без верхньої межі, яка збільшується зі збільшенням сухості. Оцінка DMC вище 40 вказує на те, що інтенсивне горіння відбуватиметься у паливі з середньою вологістю.

Для визначення коду *посухи* DC за день t, в залежності від фази опадів чи висихання, використовується формула [37–39]:

$$DC_t = \begin{cases} DC_{t-1} + 0{,}5 \cdot V_t, \text{ для } P \le 2{,}8 \\ DC_{t_r} + 0{,}5 \cdot V_t, \text{ для } P > 2{,}8 \end{cases},$$

де V_t – потенційна евапотранспірація глибокого duff-шару за день t, яка є функцією температури та сезонного коригування тривалості світлового дня; P – опади (мм).

Індекс початкового розповсюдження ISI за день t обчислюється за формулою [37–39]

$$ISI_t = 0{,}208 \cdot f_t(V) \cdot f_t(FFMC),$$

де $f_t(FFMC)$ – компонента, для обчислення якої використовується вологість дрібного палива m_t за день t, $f_t(V)$ – компонента швидкості вітру за день t.

Шкала оцінювання ISI починається з нуля, а оцінка 10 вказує на високу швидкість розповсюдження вогню відразу після займання; 16 і більше – свідчить про надзвичайно швидкі темпи поширення.

Індекс накопичення BUI за день t виражається головним чином через DMC, а DC має лише обмежену та змінну вагу у рівнянні [37–39]:

$$BUI_t = \begin{cases} 0{,}8 \cdot \dfrac{DMC_t \cdot DC_t}{DMC_t + 0{,}4DC_t}, \text{ для } DMC_t \le 0{,}4DC_t \\ DMC_t - \left(1 - \dfrac{0{,}8 \cdot DC_t}{DMC_t + 0{,}4DC_t}\right) \cdot [0{,}92 + (0{,}0114DMC_t)^{1.7}], \text{ для } DMC_t > 0{,}4DC_t \end{cases}$$

Шкала оцінювання BUI починається з нуля і є необмеженою. Оцінка вище 40 – високий рівень, вище 60 – екстремальний.

Остаточний індекс пожежної поведінки FWI розраховується наступним чином [37–39]:

$$FWI_t = \begin{cases} B_t, \text{ для } B_t < 1 \\ e^{2{,}72 \cdot (0{,}434 \cdot \ln B_t)^{0{,}647}}, \text{ для } B_t \ge 1, \end{cases}$$

де

$$B_t = 0{,}1 \cdot ISI_t \cdot f_t(D)$$

У рівнянні (3.1) функція $f(D)$ є перетворенням індексу BUI у міру вимірювання ваги витраченого палива, оскільки FWI є показником

пожежної небезпеки і тому потребує для обчислення коефіцієнтів, що відображають швидкість поширення та витрат палива. Індекс ISI відображає швидкість поширення, але це не стосується BUI.

$$f_t(D) = \begin{cases} 0{,}626 \cdot BUI_t^{\,0{,}809} + 2, \text{ для } BUI_t \le 80 \\ \dfrac{1000}{25 + 108{,}64 \cdot e^{-0{,}023 \cdot BUI_t}}, \text{ для } BUI_t > 80 \end{cases}. \quad (3.1)$$

Методологія модифікації індексу пожежної небезпеки FWI. Попри відносну універсальність та значне поширення у світі, канадський погодний індекс лісових пожеж *FWI* має суттєві обмеження, пов'язані з тим, що його компоненти визначаються тільки за метеорологічними даними та без врахування типу палива чи, принаймні, типу земного покриву. Іншою важливою обставиною є те, що метеорологічні дані мають невелику просторову розрізненість, отже прогноз пожежної небезпеки здійснюється для відносно великих територій. Тому нагальною проблемою підвищення ефективності оцінок пожежної небезпеки видається як підвищення просторової розрізненості, так і точності оцінки. Це особливо актуально для умов України, що ілюструється у підрозділ 5.3 Звіту (рис. 5.19, рис. 5.20).

Ідеєю, що покладається в основу покращення методології визначення індексу *FWI*, є залучення до формування узагальненого індексу пожежної небезпеки, фактору дефіциту вологи у ґрунті. Конкретно йдеться про параметр *SMD* (Soil Moisture Deficit) [194], який залежить від типу ґрунту, і може визначатися за дистанційними даними у мікрохвильовому діапазоні. Залучення *SMD* до усталеного набору параметрів системи FWI (схематично представлене на рис. 3.2) вирішує 2 задачі. По-перше, суттєво підвищується просторова розрізненість вихідної інформації (чому сприяє і використання відповідних геоінформаційних даних), а отже і локалізація прогнозної оцінки. По-друге, зростає релевантність кінцевої оцінки, оскільки усталений набір субіндикаторів дійсний для лісової зони, а *SMD* інформативний для поверхні, що не має високої рослинності. Такий підхід видається суттєвим

для території України, де межують значні лісові, степові та лісо-степові масиви.

Реалізація зазначеної процедури при такому підході потребує асиміляції даних оцінювання на основі п’яти компонентів за усталеною методологією та компоненту на основі даних *SMD*. Для визначення останньої складової необхідно також розробити процедуру розрахунку загально прийнятого індексу дефіциту вологи в ґрунті із залученням супутникових даних. Отже, запропонована процедура покращення індексу *FWI* передбачає збереження загальної схеми його визначення і введення процедури урахування усталених параметрів на основі дистанційних даних. При цьому значення *SMD*, виражені у фізичних одиницях, перетворюються у бали, як і значення індексу *FWI*. У результаті згортання вказаних 2-х критеріїв з певними вагами у єдиний критерій отримується оцінка узагальненого індексу пожежної небезпеки у балах.

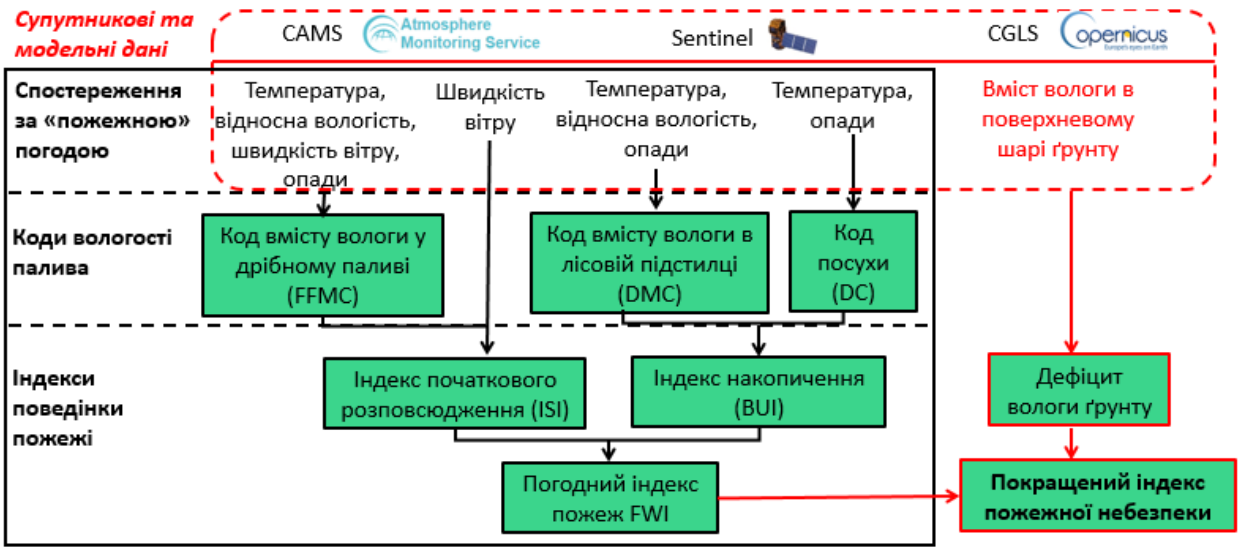


Рисунок 3.2 – Модифікація погодного індексу пожеж FWI з використанням супутникових даних

Визначення дефіциту вологи в поверхневому шарі ґрунту за супутниковими даними. Традиційно при визначенні фактору посухи взагалі і для цілей пожежної небезпеки зокрема, у світовій практиці дефіцит вологи у

ґрунті представляється індексом Кітча-Байрама *KBDI* [195], який визначається на основі виключно погодних даних. При обчисленні KBDI використовують спрощену модель добового водного балансу та емпіричні співвідношення (кумулятивна втрата вмісту вологи у ґрунті внаслідок взаємодії щоденних процесів евапотранспірації та опадів у деякому уніфікованому поверхневому шарі ґрунту).

Для обчислення складової, пов'язаної з дефіцитом вологи[1], розроблена в даному підході процедура передбачає її визначення як різницю між запасом вологи, що відповідає польовій вологоємності[2], яка істотно залежить від типу ґрунту, та фактичним запасом вологи у поверхневому шарі ґрунту, розрахованим на основі радіолокаційних супутникових даних, зокрема Sentinel-1.

Отже, дефіцит вологи у верхньому шарі ґрунту m (мм) визначається як [196, 197]:

$$m = W_{FC} - W_{act}, \tag{3.2}$$

де W_{FC} (мм) – запаси води в ґрунті при польовій вологоємності; W_{act} (мм) – фактичний запас води в ґрунті.

W_{FC} визначається як

$$W_{FC} = 10\rho_b \cdot h \cdot \beta_{FC},$$

кількість води, яка здатна утримуватися в шарі ґрунту глибиною h (м) в стані рівноваги після максимального зволоження його зверху (за рахунок опадів або поливу) і вільного відтоку гравітаційної вологи; ρ_b (т/м^3) –

[1] Дефіцит вологи у ґрунті – це кількість води, що необхідна для відновлення запасів води у ґрунті до їх значень при польовій вологоємності

[2] Польова вологоємність характеризує максимальний обсяг запасу ґрунтової вологи, який повністю забезпечує вегетацію рослинного покриву

густина (об'ємна маса) ґрунту (маса сухого ґрунту на одиницю об'єму); β_{FC} (% від маси сухого ґрунту) – масова польова вологоємність.

Об'ємна і масова вологоємність пов'язані між собою залежністю (3.2) [198]:

$$\theta = \frac{\rho_b}{\rho_w}\beta, \tag{3.3}$$

де θ (м^3/м^3) – об'ємна вологоємність;

β (т/т) – масова вологоємність;

ρ_w(1 т/м^3) – густина води.

Враховуючи співвідношення (3.2) та представляючи об’ємну польову вологоємність θ_{FC} у % від об’єму ґрунту, запасу води W_{FC} у шарі ґрунту глибиною h при польовій вологоємності:

$$W_{FC} = 10 \cdot h \cdot \theta_{FC} \cdot \rho_w. \tag{3.4}$$

Середні значення гідрологічних характеристик ґрунту на стандартних інтервалах глибин, наприклад 0–5 см або 0–30 см, розраховуються як середньозважені в межах інтервалу глибин з використанням чисельного інтегрування, зокрема за методом трапеції [199]:

$$\frac{1}{b-a}\int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{(b-a)}\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{N-1}(x_{k+1}-x_k)(f(x_k)+f(x_{k+1})), \tag{3.5}$$

де N – кількість глибин на інтервалі,

x_k – k-та глибина,

$f(x_k)$ – значення цільової змінної (тобто властивості ґрунту) на глибині x_k.

З урахуванням (3.5) розрахунок середньозваженого значення об’ємної польової вологоємності θ_{FC} для першого стандартного інтервалу глибин 0–5 см зводиться до пошуку середнього арифметичного

$$\theta_{FC_0-5} = \frac{1}{2}\left(\theta_{FC_0} + \theta_{FC_5}\right). \tag{3.6}$$

Фактичний запас води в ґрунті W_{act} згідно [200] розраховується як

$$W_{act} = 10 \cdot w_{act} \cdot \rho_b \cdot h, \tag{3.7}$$

де w_{act} (%) – фактична вологість ґрунту у вагових відсотках на абсолютно сухий ґрунт;

ρ_b (т/м^3) – густина (об'ємна маса) ґрунту;

h (м) – глибина (потужність) шару ґрунту.

Фактичну вологість ґрунту w_{act} в певний момент часу для виразу супутникових радіолокаційних даних, що містять інформацію про ступінь насичення ґрунту – відносний вміст води у верхніх сантиметрах ґрунту у % насичення. Згідно [201] ступінь насичення ґрунту з вологістю ґрунту пов'язаний залежністю:

$$SSM = \frac{w_{act} \cdot \rho_b}{n \cdot \rho_w},$$

де n (у частках одиниці) – пористість (відношення об’єму пор до об’єму всього ґрунту). Звідки випливає вираз фактичної вологості ґрунту в момент супутникової зйомки:

$$w_{act} = \frac{SSM \cdot n \cdot \rho_w}{\rho_b}, \tag{3.8}$$

підставивши який у рівняння (3.7), матимемо:

$$W_{act} = 10\, SSM \cdot n\, \rho_w\, h. \tag{3.9}$$

Таким чином, вираз (3.2) для розрахунку дефіциту вологи у верхньому шарі ґрунту у мм з урахуванням (3.4) та (3.9) на основі актуальних

супутникових радіолокаційних даних про ступінь насичення ґрунту матиме вигляд:

$$m = 10h\rho_w(\theta_{FC} - SSM \cdot n), \tag{3.10}$$

де h (м) – глибина шару ґрунту; зауважимо, що з огляду на обмеження можливостей супутникового радіолокаційного зондування $h = 0{,}05$ м;

ρ_w (т/м^3) – густина води, 1 т/м^3;

θ_{FC} (у % від об'єму ґрунту) – середньозважене значення об'ємної польової вологоємності на заданий інтервал глибин; тут $\theta_{FC} = \theta_{FC_0-5}$ для інтервалу глибин 0–5 см згідно (3.6);

SSM (%) – ступінь насичення ґрунту за супутниковими радіолокаційними даними;

n (у частках одиниці) – пористість: відношення об'єму пор до об'єму всього ґрунту.

Як бачимо з виразу (3.9) добуток $SSM \cdot n$ являє собою фактичну об'ємну вологоємність ґрунту на момент радіолокаційної супутникової зйомки.

Визначення покращеного індексу пожежної небезпеки, що ґрунтується на індексі FWI, з урахуванням дефіциту вологи у ґрунті. Покращений індекс пожежної небезпеки FWI_{impr} як узагальнений критерій формується у вигляді лінійної згортки часткових критеріїв пожежної небезпеки $\tilde{FWI}$ та $\tilde{m}$, нормованих до єдиної шкали [0, 100]:

$$FWI_{impr} = k_1 \cdot \tilde{FWI} + k_2 \cdot \tilde{m}, \tag{3.11}$$

де вагові коефіцієнти k_1 та k_2 задовольняють умовам

$$k_j \geq 0, \sum_{j=1}^{2} k_j = 1 \left(j = 1, 2\right).$$

Для визначення коефіцієнтів k_1 та k_2 можуть бути використані різні методи, з реалізацією машинного навчання і без [202, 203]. За умов відсутності навчання вагові коефіцієнти визначаються, зокрема, безпосередньо за значеннями часткових критеріїв на множині тестових ділянок: $\widetilde{FWI}_i, \tilde{m}_i \ (i=1,n)$.

Для знаходження коефіцієнтів k_1 та k_2 можна застосувати метод головних компонент [202, 203] і використати, так звану, першу модифіковану компоненту набору уніфікованих часткових критеріїв $\widetilde{FWI}_i, \tilde{m}_i \ (i=1,n)$. Ця модифікована перша компонента отримується як відповідна лінійна регресія на множині значень уніфікованих часткових критеріїв на тестових ділянках. За результатами статистичних розрахунків модифікована перша компонента визначається співвідношенням (3.11), у якому вагові коефіцієнти $k_j \ (j=1,2)$ є квадратами відповідних j-их компонент власного вектора коваріаційної матриці змінних $\widetilde{FWI}$ та $\tilde{m}$, що відповідають найбільшому власному значенню цієї матриці.

Отриманий покращений індекс пожежної небезпеки FWI_{impr} є бальною оцінкою інтенсивності пожежі від 0 до 100 та вимірюється у шкалі з шести рівнів. Низькі значення FWI_{impr} вказують на погодні умови з низькою пожежною небезпекою, а більш високі значення – на погодні умови з підвищеною пожежною небезпекою.

Для нормування показника дефіциту вологи m у поверхневому шарі ґрунту глибиною 50 мм та визначення його меж, що відповідають різним рівням пожежної небезпеки, застосуємо шкалу рівнів посухи типу Кітча-Байрама, яка містить 6 діапазонів (на відміну від усталеної шкали, що складається з чотирьох [204]).

Як відомо, індексу посухи Кітча-Байрама відповідає дефіцит вологи у деякому віртуальному шарі ґрунту з запасом вологи при польовій вологоємності $W_{FC_KBDI} = 203{,}2$ мм. Індекс $KBDI$ пов’язаний з процентним

відношенням PFC поточного запасу води у ґрунті W_{act} до запасу води у ґрунті при польовій вологоємності W_{FC} наступним чином (якщо $KBDI$, W_{act}, W_{FC} вимірюються в дюймах – в США) [205, 206]:

$$KBDI = 203{,}2\,(1 - PFC), \tag{3.12}$$

де

$$PFC = \frac{W_{act}}{W_{FC}}, \tag{3.13}$$

У співвідношенні (3.13) W_{act} вимірюється для шару ґрунту певного типу певної глибини, і для цього типу та глибини встановлена об'ємна польова вологоємність і відповідний цій вологоємності вологозапас W_{FC}.

Після підстановки виразів (3.4) і (3.9) з урахуванням (3.13) у формулу (3.12)отримуємо вираз для індексу посухи Кітча-Байрама:

$$KBDI = 203{,}2\left(1 - \frac{SSM \cdot n}{\theta_{FC}}\right) \tag{3.14}$$

Як видно з (3.14), такий зв'язок між індексом $KBDI$ і вказаним відношенням має місце незалежно від глибини шару ґрунту.

Формально індекс посухи $KBDI$ являє собою дефіцит вологи m_{KBDI} у деякому шарі ґрунту, який є різницею між запасом води у ґрунті при польовій вологоємності W_{FC_KBDI} та поточним запасом води у ґрунті W_{act_KBDI}:

$$KBDI = m_{KBDI} = W_{FC_KBDI} - W_{act_KBDI}. \tag{3.15}$$

З урахуванням (3.14) і (3.15) отримуємо такий вираз для дефіциту вологи m_{KBDI}, що відповідає індексу посухи Кітча-Байрама, який обчислюється через дефіцит вологи m у шарі ґрунту глибиною 50 мм:

$$m_{KBDI} = 203{,}2\left(1 - \frac{SSM \cdot n}{\theta_{FC}}\right). \tag{3.16}$$

З урахуванням виразу (3.10) формула (3.16) набуває вигляду

$$m_{KBDI} = 203{,}2\frac{m}{10\cdot\rho_w\cdot h\cdot\theta_{FC}}. \qquad (3.17)$$

Отже, для дефіциту вологи у ґрунті, що визначається за формулою (3.16), можна використовувати шкалу рівнів посухи індексу Кітча-Байрама.

Методологія перетворення фактичного дефіциту вологи у ґрунті, виміряного при фактичній польовій вологоємності на метеостанціях, у дефіцит вологи, що відповідає індексу *KBDI* [205, 206], використовувалась у National Fire Danger Rating System [207].

Перевагою шкали рівнів посухи індексу Кітча-Байрама, до якого може бути зведений дефіцит вологи, визначений для шару ґрунту певної глибини за наземними чи супутниковими даними, є її значне поширення в інформаційних системах пожежної небезпеки і визнана однозначна інтерпретація діапазонів рівнів посухи та її зв'язку з пожежною небезпекою.

Недоліком класичної шкали індексу посухи Кітча-Байрама, є її виключно додатні значення, хоча реальний дефіцит вологи у ґрунті може виявитися від'ємним, що є ознакою перезволоження ґрунту понад польову вологоємність аж до стану повного насичення ґрунту водою, а отже, можна запровадити ще один додатковий рівень пожежної небезпеки – дуже низький. Крім того, для узгодження зі шкалою FWI пропонується виокремити з класу екстремального рівня пожежної небезпеки клас дуже високого рівня пожежної небезпеки. Таким чином, модифікована шкала пожежної небезпеки згідно значень індексу Кітча–Байрама набуває вигляду (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Рівні пожежної небезпеки згідно індексу Кітча-Байрама

Значення індексу (мм)	Рівні пожежної небезпеки	Клас
<0	Дуже низький	1
0–50	Низький	2
50–100	Помірний	3
100–150	Високий	4
150–175	Дуже високий	5
>175	Екстремальний	6

З огляду на використання 100-бальної шкали для інтегрального узагальнюючого показника пожежної небезпеки FWI_{impr}, до його часткових критеріїв також слід застосовувати 100-бальну шкалу. При цьому показник класичного FWI пропонується не нормувати, оскільки діапазон його значень змінюється від 0 для класу дуже низького рівня пожежної небезпеки до понад 70 для класу дуже екстремального рівня, що був запроваджений у червні 2021 р. з метою виокремлення найвищого рівня пожежної небезпеки, який є характерним для літніх місяців на значних територіях Середземноморського регіону [20].

Для нормування дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту, для якого чим більші значення, тим вищий рівень пожежної небезпеки, використаємо формулу [203]:

$$\tilde{m} = \frac{m - m_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} \cdot 100, \tag{3.18}$$

де $\tilde{m}$ – нормоване (приведене до безрозмірної шкали від 0 до 100) значення дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту;

m – дефіцит вологи, розрахований згідно (3.10);

$m_{\min}$ – мінімальне значення дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту, що відповідає дефіциту вологи при найвищому ступені насичення ґрунту ($SSM = 100\%$) та визначається згідно (3.10):

$$m_{\min} = 10h\rho_w(\theta_{FC} - 100 \cdot n). \tag{3.19}$$

$m_{\max}$ – максимальне значення дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту, що відповідає дефіциту вологи при найнижчому ступені насичення ґрунту ($SSM = 0\%$) та визначається згідно(3.10):

$$m_{\max} = 10h\rho_w\theta_{FC}. \tag{3.20}$$

Для визначення меж рівнів пожежної небезпеки для порогової сегментації нормованого дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту скористаємося наступними міркуваннями.

В умовах оптимального стану насичення ґрунту для кореневої системи рослинності, коли дефіцит вологи в поверхневому шарі ґрунту $m = 0$ (досягається за умови $SSM \cdot n = \theta_{FC}$, тобто при вологості ґрунту, що відповідає польовій вологоємності), згідно (3.10) дефіцит вологи $m_{FC} = 0$.

Відповідно до (3.18) нормований дефіцит вологи при вологості ґрунту, що відповідає польовій вологоємності, визначається як

$$\tilde{m}_{FC} = 100 - \frac{\theta_{FC}}{n}. \qquad (3.21)$$

Таким чином визначений поріг першого (дуже низького рівня пожежної небезпеки) за дефіцитом вологи поверхневого шару ґрунту на основі супутникових радіолокаційних даних та геопросторової інформації щодо гідравлічних властивостей ґрунтів.

Для розрахунку решти меж для порогової сегментації нормованого дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту скористаємося виразом (3.17) та модифікованою шкалою рівнів пожежної небезпеки за дефіцитом вологи в ґрунті згідно індексу Кітча-Байрама (табл. 3.2). Відповідність діапазонів значень реального (у мм) та нормованого (у 100-бальній шкалі) дефіциту вологи представлено у табл. 3.3. Нижній числовий індекс при дефіциті вологи m є позначкою значень меж індексу Кітча-Байрама, згідно яких розраховано межі дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту.

Таблиця 3.3 – Рівні пожежної небезпеки згідно діапазонів значень нормованого дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту

Рівень пожежної небезпеки	Клас	Діапазон значень дефіциту вологи, мм	Діапазон значень нормованого дефіциту вологи
Дуже низький	1	$m < 0$	$\tilde{m} < \tilde{m}_{FC}$
Низький	2	$0 \le m \le m_{50}$	$\tilde{m}_{FC} \le \tilde{m} \le \tilde{m}_{50}$
Помірний	3	$m_{50} < m \le m_{100}$	$\tilde{m}_{50} < \tilde{m} \le \tilde{m}_{100}$
Високий	4	$m_{100} < m \le m_{150}$	$\tilde{m}_{100} < \tilde{m} \le \tilde{m}_{150}$
Дуже високий	5	$m_{150} < m \le m_{175}$	$\tilde{m}_{150} < \tilde{m} \le \tilde{m}_{175}$
Екстремальний	6	$m > m_{175}$	$\tilde{m} > \tilde{m}_{175}$

Застосування супутникових і геоінформаційних даних як вхідних даних для обчислення індексу пожежної небезпеки. Для побудови карт пожежної небезпеки на основі модифікованого індексу FWI_{impr} необхідним є збір великих обсягів супутникових даних, їх коректна обробка з використанням методів глибинного навчання та хмарної обробки інформації, створення набору наземних даних для завірки та верифікації отриманих результатів.

Перш за все, для обчислення значень стандартного індексу FWI на поточний день необхідне завантаження щоденних даних за попередній період. Зокрема, таких даних як температура повітря на висоті 2 м, швидкість вітру на висоті 10 м, відносна вологість повітря та кількість опадів за останні 24 год. Ці погодні дані завантажуються з використанням сервісу CAMS [135].

По друге, для обчислення дефіциту вологи верхнього шару необхідні геопросторові дані, зокрема, щодо фізичних і гідравлічних характеристик ґрунтів, а також радіолокаційні супутникові дані, актуальні на день, для якого проводиться оцінювання пожежної небезпеки.

Об’ємну польову вологоємність, необхідну для розрахунку запасу води при польовій вологоємності та безпосередньо дефіциту вологи в поверхневому шарі ґрунту, отримано з 3D Soil Hydraulic Database [208], представленої Європейським центром ґрунтових даних ESDAC у 2017 р. [209, 210]. База містить містить геопросторові дані гідравлічних властивостей ґрунту на 7 стандартних глибинах від 0 до 2 м з просторовим розрізненням 1 км або 250 м на територію Європи.

У якості даних щодо пористості ґрунту використано набір глобальних даних ретроспективного аналізу MERRA-2, створеного для досліджень фізичних процесів в кліматичній системі Землі [211].

Дані щодо ступеня насичення ґрунту, необхідні для розрахунку фактичного запасу вологи у поверхневому шарі ґрунту згідно (3.8), можна отримати з продукту Surface Soil Moisture (SSM) від CGLS, створеного на основі супутникових радіолокаційних даних Sentinel-1 [212].

3.4 Розроблення ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж на основі супутникових даних низького просторового розрізнення та карт пожеженебезпеки і характеристик земного покриву високого просторового розрізнення

На даний час існує більше двадцяти математичних моделей, що описують поведінку лісових пожеж, кожна з яких побудована відповідно до досвіду боротьби з пожежами в різних країнах. Моделі відрізняються одна від одної за вхідними параметрами, зокрема, за параметрами навколишнього середовища (наприклад, кодами палива для розрахунку індексу FWI [213]). Дослідники різних країн використовують деякі з цих моделей або створюють власні методи картографування ландшафту і моніторингу та аналізу поведінки пожежі (наприклад, BehavePlus, FlamMap, FARSITE, Geodatabase та ArcSDE) для того, щоб допомогти пожежникам визначити найкращий спосіб гасіння пожежі.

Основні підходи до виявлення пожеж на основі супутникових даних. У нашому дослідженні пропонується для локалізації зон виявлення та поширення пожеж використовувати модель, схематично наведену на рис. 3.3. Вхідними даними для даної моделі є три складові, що базуються на супутникових продуктах.

На даний час однією з найбільш авторитетних інформаційних систем виявлення пожеж є система FIRMS (Fire Information for Resource Management System), яка надає відповідні карти про місцезнаходження активних загорянь в режимі, близькому до реального часу, у растровому вигляді [1]. Визначення місць активних пожеж відбувається за допомогою стандартного продукту MOD14/MYD14 шляхом аналізу теплових аномалій. Кожне місце активної пожежі представляє собою на карті піксель із просторовою роздільною здатністю 1 км. Для кожної активної точки пожежі FIRMS визначається обмежувальна лінія довжиною 1 км [2].

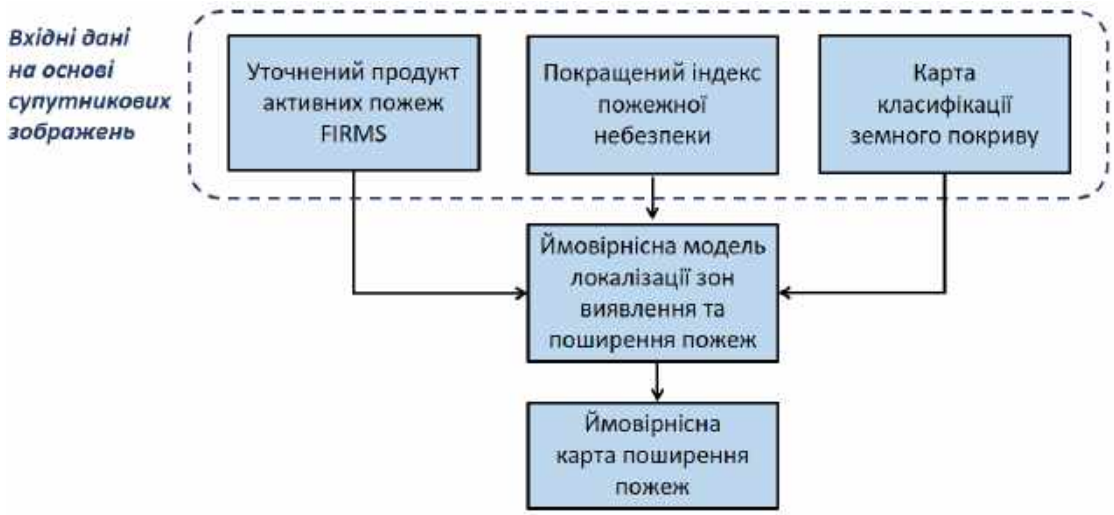


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж

Одним із вхідних даних у розроблювальну модель пропонується використати супутниковий продукт системи FIRMS, який є ймовірнісною маскою пожеж зі шкалою від 0 % до 100 %, що показує ймовірність наявності пожежі. Коли датчик виявляє теплову аномалію, яка може вказувати на лісову пожежу або будь-яке значне джерело тепла, комп'ютерний алгоритм визначає центр області площею 1 км^2, в якій виявлено аномалію. Це місце розташування наноситься на карту і доступне на FIRMS Fire Map протягом 3 годин після спостереження та забезпечує приблизне місце розташування потенційної лісової пожежі або вогнища пожежі.

Для уточнення супутникового продукту системи FIRMS використовуватимуться продукти температури земної поверхні (для виявлення та моніторингу активного вогню), створені на основі методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення, описаного у підрозділі 3.1 Звіту. Також для уточнення даних FIRMS стосовно активних пожеж використовуватимуться продукти, отримані на основі супутникових даних високого просторового розрізнення (Sentinel-2), попередня обробка яких (маскування хмар та тіней від них) здійснюється згідно методу, описаного у підрозділі 3.2 Звіту.

Однією з найбільш розповсюджених у використанні ймовірнісних моделей локалізації зон виявлення та поширення пожеж є канадська система прогнозу поведінки лісових пожеж на основі індексу FWI, розглянута у підрозділі 1.1 Звіту [17]. Модель передбачає ймовірність пожежі та швидкість її розповсюдження на основі спостережень за погодою та визначення вмісту вологи у різних шарах палива.

Другим вхідним компонентом до розроблювальної моделі пропонується застосувати модифікований індекс пожежної небезпеки FWI, описаний у підрозділі 3.3 Звіту, який було нами удосконалено та використано для моніторингу пожеж на території України.

Проаналізовані у підрозділі 1.1 Звіту інформаційні системи використовуються здебільшого для моніторингу пожеж у лісах, а їх застосування для інших типів природних екосистем призводить до оцінок зниженої точності. Тому третім вхідним компонентом розроблювальної системи пропонується використати карту класифікації земного покриву високого просторового розрізнення (10 м), що поряд з модифікованим індексом пожежної небезпеки FWI, дозволить поширити розроблювальну методологію на інші типи природних екосистем.

Методологія моделювання локалізації зон виявлення та поширення пожеж на основі супутникових даних. Для моделювання використовуватимуться вхідні дані з наступним просторовим розрізненням: карта пожеж FIRMS – 1 км; покращений індекс пожежної небезпеки – 1 км;– карта класифікації земного покриву – 10 м.

Множина значень карти пожеж FIRMS – від 0 до 100 (ймовірність того, що в даному пікселі має місце пожежа), множина значень та зміст покращеного індексу пожежної небезпеки аналогічні.

Карта пожеж FIRMS оновлюється кожні 2 дні, і таким чином надає інформацію про наявні пожежі ретроспективно, тобто не є картою реального часу. Проте з іншого боку, ця карта отримується із використанням спеціального обладнання для пошуку температурних аномалій, що зумовлює

низьку ймовірність пропуску наявних пожеж (низьку помилку I роду за умови вибору статистичної гіпотези H_0: «у пікселі (x, y) має місце пожежа»). Таким чином, її доцільно обрати в якості базової для ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж, а помилку II роду (хибні спрацювання – наявність пожежі на карті за відсутності її на місцевості) зменшувати із використанням покращеного індексу пожежної небезпеки.

Позначимо інформацію, яка є в наявності, наступним чином:

FIRMS – карта пожеж FIRMS, уточнена за рахунок продуктів, отриманих з використанням методів, описаних у підрозділах 3.1 і 3.2 Звіту; відповідно, *FIRMS*(x, y) – значення пікселя (x, y) цієї карти;

FWI_{impr} – покращений індекс пожежної небезпеки; відповідно,

$FWI_{impr}(x, y)$ – значення пікселя (x, y) цього індексу;

type(x, y) – тип земного покриву в пікселі (x, y) відповідно до отриманої карти класифікації.

При цьому для задачі оцінювання пожежної небезпеки у природних екосистемах має сенс об'єднати елементарні класи у групи відповідно до їх легкозаймистості. Наприклад, класи «пшениця», «ячмінь» можливо об'єднати в один клас «злакові».

Тоді область допустимих значень $E(type)$ представлятиме скінченну множину:

$E(type)$ = { злакові, бобові, …, ліси, …, торфяники, заболочені території }.

При розрахунку індексу *FWI* однією зі складових його частин є код $FFMC(type)$ [17], який показує, наскільки легко загоряється земний покрив *type*: чим більше значення *FFMC*(*type*), тим більш легкозаймистим є *type*, $E\big(FFMC(type)\big) = \big[\min(FFMC), \max(FFMC)\big]$.

Тоді ймовірнісна карта пожеж *FireMap* в пікселі (x, y) може бути обчислена наступним чином:

$$FireMap(x,y)=\begin{cases} FIRMS(x,y),\ якщо\ FIRMS(x,y) > FIRMS_{threshold} \\ \dfrac{a\cdot FIRMS(x,y)+b\cdot FWI_{impr}(x,y)}{\max(FFMC)-\min(FFMC)},\ FIRMS(x,y) \le FIRMS_{threshold} \end{cases} \quad (3.22)$$

де $FIRMS_{threshold}$ – деяке порогове значення, наприклад, $FIRMS_{threshold} = 60$;

$$a = FFMC\big(type(x,y)\big) - \min\big(FFMC\big); \quad (3.23)$$

$$b = \max\big(FFMC\big) - FFMC\big(type(x,y)\big). \quad (3.24)$$

Висновки. Розроблено методи оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж на основі супутникових даних для різних типів природних екосистем: метод підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення, метод виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення, метод оцінювання пожежної небезпеки для різних типів природних екологічних систем, ймовірнісна модель локалізації місця зон виявлення та поширення пожеж.

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАВДАНЬ СТОСОВНО РІЗНИХ ТИПІВ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

4.1 Реалізація методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення гармонізованої колекції супутникових даних на основі наявних мультиспектральних даних високого просторового розрізнення

Розроблений метод підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення, описаний у підрозділі 3.1 Звіту, було реалізовано мовою Python для гармонізованої колекції супутникових даних. Процес завантаження та попередньої обробки супутникових даних Sentinel-2, Landsat-8 та Sentinel-3 у хмарній платформі GEE описаний у підрозділі 2.1 Звіту. Ці дані використовуються для створення нової колекції супутникових даних температури земної поверхні на основі Sentinel-3 з високим просторовим та часовим розрізненням.

Розроблений підхід грунтується на методах машинного/глибинного навчання і тому необхідно провести аналіз вхідних даних, для того щоб зрозуміти, який розподіл даних, чи підходить він для навчання та валідації моделі. При цьому потрібно зауважити, що основним режимом роботи моделі є отримання часових рядів супутникових даних з високим часовим розрізненням, тобто на вхід у реальному застосуванні будуть подаватися змодельовані дані. А валідація полягає у тому, що кожні 16 днів ми маємо точні карти температури земної поверхні, отримані із супутника Landsat-8. Передбачається також донавчання моделі з кожною новою датою. Разом з цим донавчання моделі на нових датах та використання дат з низькою часовою різницею забезпечує високу точність, яка буде коливатися випадковим чином, в залежності від захмареності даних та точностей відновлення даних у відповідні дні, між мінімальною точністю та

максимальною точністю, яку неможливо визначити одночасно. Мінімальну точність можна оцінити при першому запуску моделі. При цьому запуску використовуються дані Landsat-8 в якості даних високого просторового розрізнення, оскільки дані Sentinel-2 не містять карти температури земної поверхні високого просторового розрізнення.

На рис. 4.1 і рис. 4.2 зображено приклад вхідних даних для одного дня, який складається із карти NDVI високого просторового розрізнення (NDVI hr), LST високого просторового розрізнення (LST hr), NDVI Sentinel-3 (NDVI lr) та LST Sentinel-3 (LST lr), яке збільшує своє просторове розрізнення до високого просторового розрізнення (LST lr).

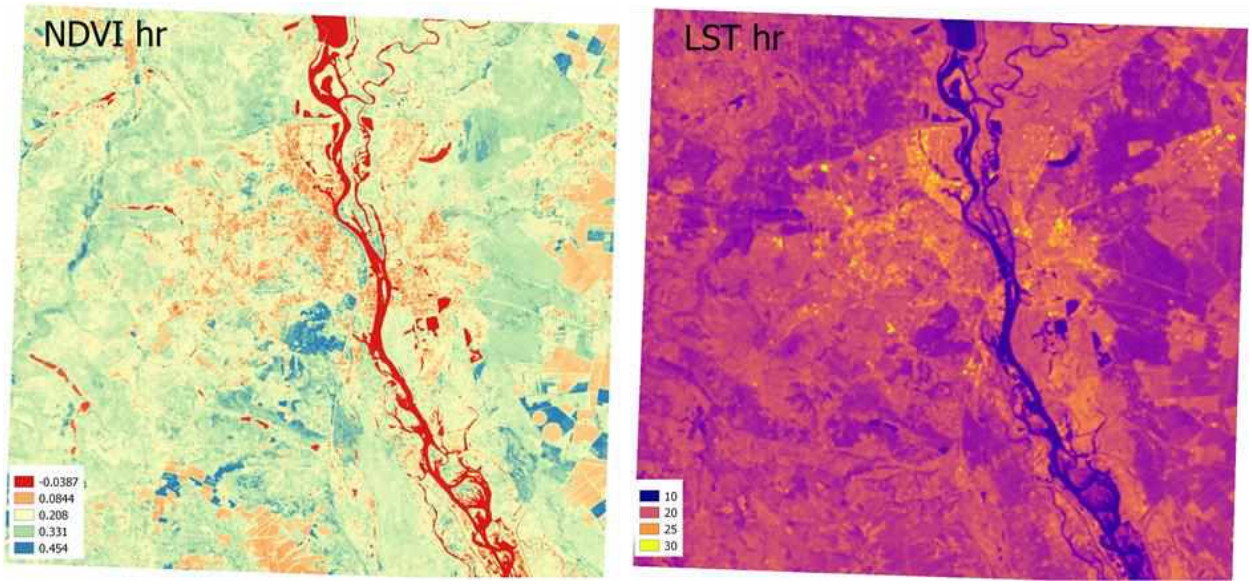


Рисунок 4.1 – NDVI та LST карти високого просторового розрізнення

Кореляційний аналіз показав високу кореляцію між картами температури земної поверхні високого просторового розрізнення та низького просторового розрізнення. Для вибраної дати кореляція температур дорівнює 0,77. При цьому кореляція між NDVI високого і низького просторового розрізнення є середньою і для цього дня дорівнює 0,56. Тобто, інформації NDVI не достатньо для відновлення температури земної поверхні.

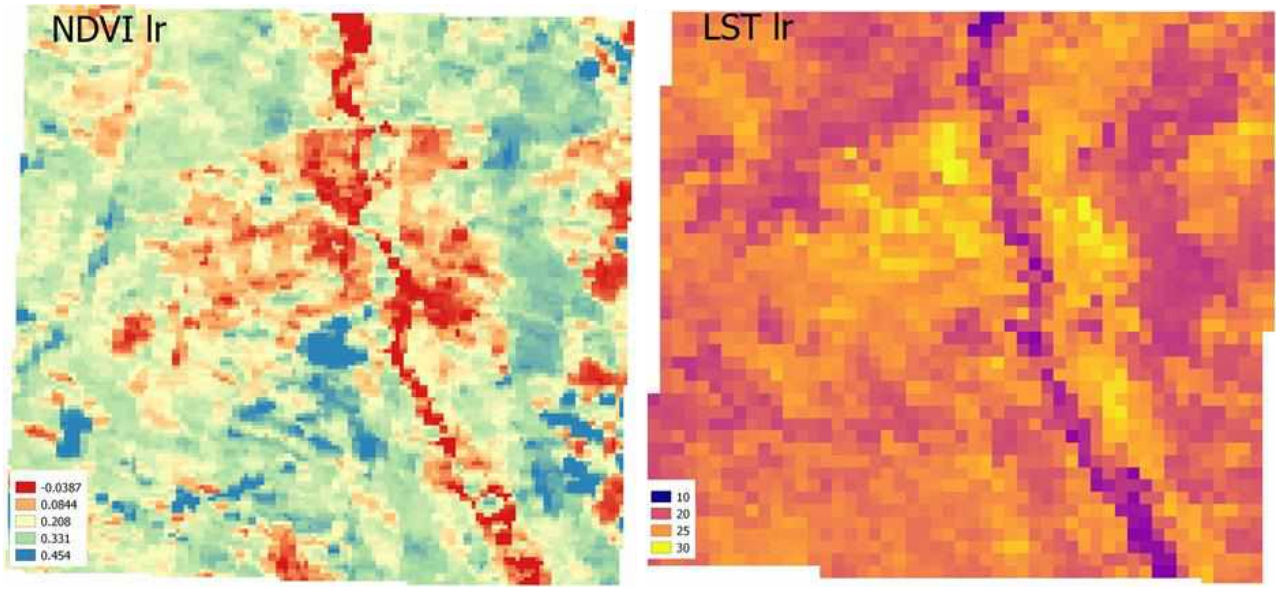
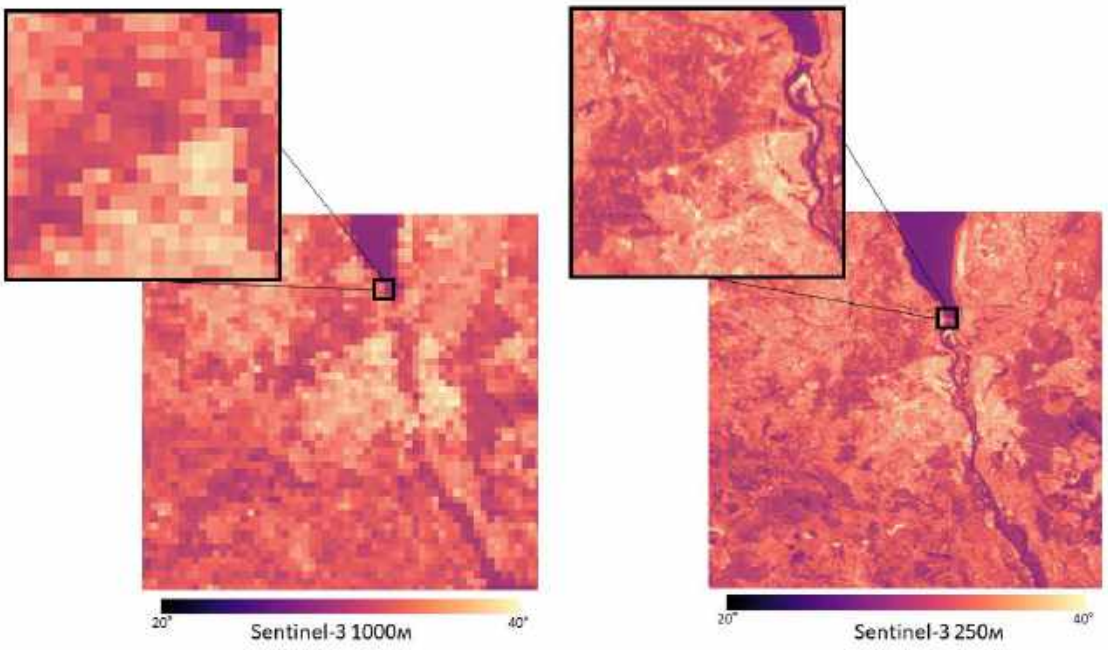


Рисунок 4.2 – NDVI та LST карти, отримані за допомогою Sentinel-3

Підбір гіперпараметрів для моделі нейронної мережі, що використовуватиметься для збільшення просторового розрізнення супутникових даних, є експериментальною задачею для різних територій, в залежності від розподілу класів земного покриву та розмірів території. При цьому розмір території впливає не тільки на кількість вхідних даних, але також на варіативність ознак, оскільки великі території часто відрізняються за погодними та кліматичними умовами і тому для їх коректного запам’ятовування моделлю необхідно збільшувати кількість шарів та кількість епох навчання. Тому для невеликих територій можна використовувати одношарові архітектури, для території розміру області оптимальною є 19-ти шарова архітектура, а при збільшенні території необхідно також експериментувати із кількістю шарів.

На рис. 4.3 наведено приклади температурної карти на основі Sentinel-3 – 1 км розрізнення та із збільшеним просторовим розрізненням до 250 м, тобто результат роботи методу.



а *б*

Рисунок 4.3 – Карти температури земної поверхні на основі Sentinel-3 (27.07.2021): розрізнення 1км (*а*) та із збільшеним просторовим розрізненням до 250 м (*б*)

4.2 Реалізація методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення

Розроблений метод виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення, описаний у підрозділі 3.2 Звіту, було реалізовано в хмарній платформі GEE. На рис. 4.4 і рис. 4.5 зображено фрагменти програмної реалізації розробленого методу.

На рис. 4.6 і рис. 4.7 показано дві маски хмар, застосовані до одного супутникового знімку. На рис. 4.6 – стандартну маску хмар QA60, на рис. 4.7 – знімок із застосуванням маски хмар, отриманої у даному дослідженні. Навіть при візуальному порівнянні видно, що розроблений метод детектує більші площі хмар та тіні від них.

```
function projectShadows(cloudMask,image,cloudHeights){
  var meanAzimuth = image.get('MEAN_SOLAR_AZIMUTH_ANGLE');
  var meanZenith = image.get('MEAN_SOLAR_ZENITH_ANGLE');


  var darkPixels = image.select(['nir','swir1','swir2']).reduce(ee.Reducer.sum()).lt(irSumThresh)
    .focal_min(contractPixels).focal_max(dilatePixels)
  ///.gte(1);



  var nominalScale = cloudMask.projection().nominalScale();

  var azR =ee.Number(meanAzimuth).add(180).multiply(Math.PI).divide(180.0);
  var zenR  =ee.Number(meanZenith).multiply(Math.PI).divide(180.0);

  var shadows = cloudHeights.map(function(cloudHeight){
    cloudHeight = ee.Number(cloudHeight);

    var shadowCastedDistance = zenR.tan().multiply(cloudHeight);
    var x = azR.sin().multiply(shadowCastedDistance).divide(nominalScale);
    var y = azR.cos().multiply(shadowCastedDistance).divide(nominalScale);

    return cloudMask.changeProj(cloudMask.projection(), cloudMask.projection().translate(x, y));


  });


  var shadowMask = ee.ImageCollection.fromImages(shadows).max();

  shadowMask = shadowMask.and(cloudMask.not());
  shadowMask = shadowMask.and(darkPixels).focal_min(contractPixels).focal_max(dilatePixels);

  var cloudShadowMask = shadowMask.or(cloudMask);

  image = image.updateMask(cloudShadowMask.not()).addBands(shadowMask.rename(['cloudShadowMask']));
  return image;
}
```

Рисунок 4.4 – Функція пошуку тіней та темних пікселів

```
function sentinelCloudScore(img) {


  var score = ee.Image(1);


  score = score.min(rescale(img, 'img.blue', [0.1, 0.5]));
  score = score.min(rescale(img, 'img.cb', [0.1, 0.3]));
  score = score.min(rescale(img, 'img.cb + img.cirrus', [0.15, 0.2]));


  score = score.min(rescale(img, 'img.red + img.green + img.blue', [0.2, 0.8]));



  var ndmi = img.normalizedDifference(['nir','swir1']);
  score=score.min(rescale(ndmi, 'img', [-0.1, 0.1]));


  var ndsi = img.normalizedDifference(['green', 'swir1']);
  score=score.min(rescale(ndsi, 'img', [0.8, 0.6]));

  score = score.multiply(100).byte();

  return img.addBands(score.rename('cloudScore'));
}
```

Рисунок 4.5 – Функція пошуку хмар

Рисунок 4.6 – Стандартна маска хмар QA608

Рисунок 4.7 – Маска хмар за розробленим алгоритмом

Розроблений алгоритм детектування хмар та тіней від них було застосовано для одного тайлу супутника Sentinel-2. Враховуючи простоту в реалізації та високу якість роботи, алгоритм було масштабовано на всю територію України.

При порівнянні стандартних масок хмар Sentinel-2 (L1C та L2A) виявлено, що продукт L1C виявляє лише великі хмари (це пов’язано із низьким просторим розрізненням 60 м), а продукт L2A, окрім великих хмар, видаляє частково тіні від хмар (рис. 4.8–4.9).

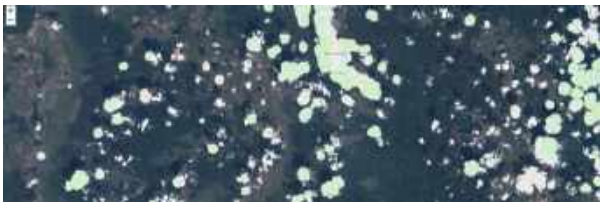


Рисунок 4.8 – Стандартна маска хмар QA608

Рисунок 4.9 – Стандартна маска хмар після обробки Sen2Cor

Аналізуючи результати використання розробленого алгоритму можна стверджувати, що він працює краще ніж стандартні, що надаються із даними L1C та L2A. Зауважимо, що основним недоліком розробленого алгоритму є те, що маска інколи захоплює чисті віх хмар території. Проте, це менші площі у порівнянні із алгоритмом Sen2Cor (рис. 4.9). Також запропонований підхід видаляє темні пікселі та краще визначає тіні від хмар (рис. 4.10).

Рисунок 4.10 – Маска хмар за розробленим алгоритмом

4.3 Реалізація та узагальненння методу оцінювання пожежної небезпеки, що ґрунтується на індексі FWI, з використанням супутникових даних, погодних даних, карт характеристик земного покриву та його узагальнення на інші класи земного покриву

Приклад реалізації методології визначення дефіциту вологи у поверхневому шарі грунту. Викладений у підрозділі 3.3 Звіту підхід визначення дефіциту вологи було реалізовано у вільній крос-платформній геоінформаційній системі QGIS для частини території Київської та Житомирської областей з використанням супутникових даних SSM від CGLS та гідрогічних властивостей ґрунту за даними 3D Soil Hydraulic Database of Europe.

Дату 19.03.2020 та місце дослідження обрано згідно інформації геопросторової бази з даними про пожежі в природних екосистемах України за даними ДСНС у період 2017–2020 рр., створеної під час виконання проєкту [1]. Так, саме 19.03.2020 займання сухої рослинності зафіксоване поблизу відразу кількох населених пунктів Бородянського району Київської області, зокрема: Бородянки, Бабинців, Дружньої, Галинки, Загальців, Майданівки, Нової Буди, Луб'янки (рис. 4.11).

На рис. 4.12 представлено результат розрахунку об'ємної польової вологоємності θ_{FC} за даними 3D Soil Hydraulic Database of Europe для інтервалу глибин 0–5 см.

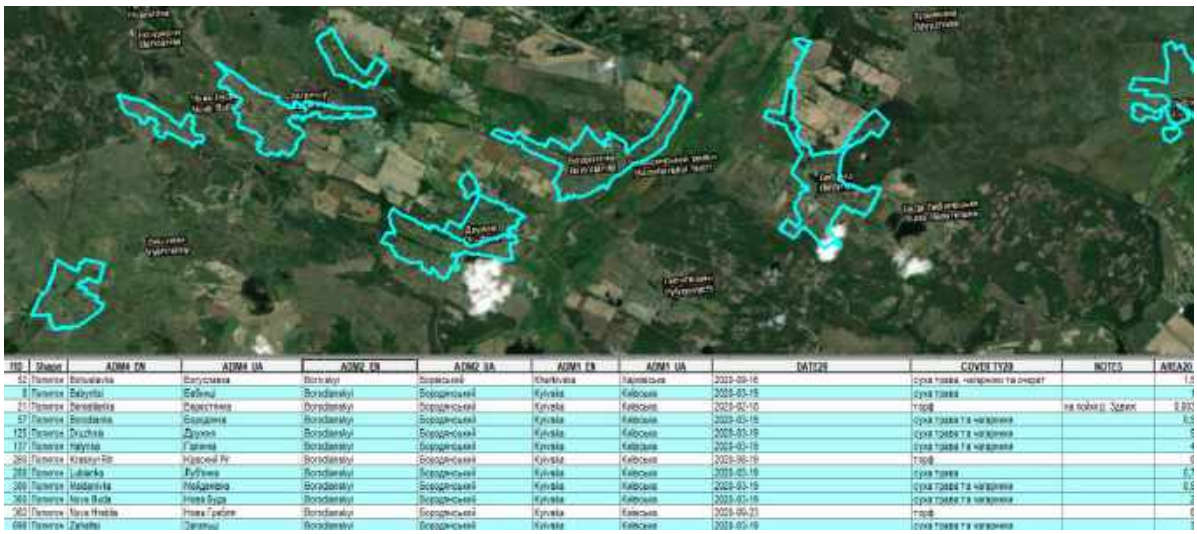


Рисунок 4.11 – Фрагмент геопросторової бази з даними про пожежі в природних екосистемах Бородянського району Київської області за даними ДСНС станом на 19.03.2020

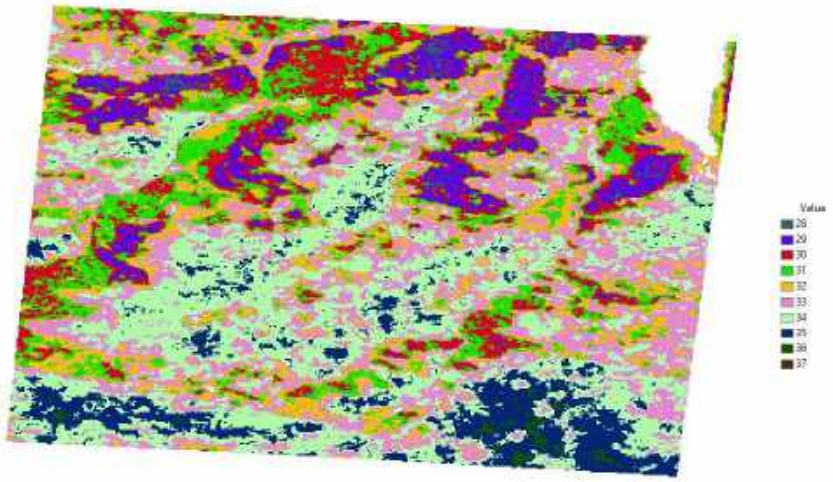


Рисунок 4.12 – Середньозважені значення об’ємної польової вологоємності θ_{FC} (%) на інтервалі глибин 0-5 см (просторове розрізнення 250 м)

На рис. 4.13 представлено растр розрахунку за супутниковими даними SSM від CGLS фактичного запасу вологи у верхніх 5 см ґрунту для частини Київської та Житомирської областей станом на 19.03.2020. Діапазон розрахованих значень складає від 0,1 мм для сухих до понад 21 мм для перезволожених ділянок.

На рис. 4.14 представлено результуючий растр розрахунку дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту для частини Київської та Житомирської

областей станом на 19.03.2020. Діапазон розрахованих значень складає від -6 мм для перезволожених ділянок до 18 мм для максимально сухих.

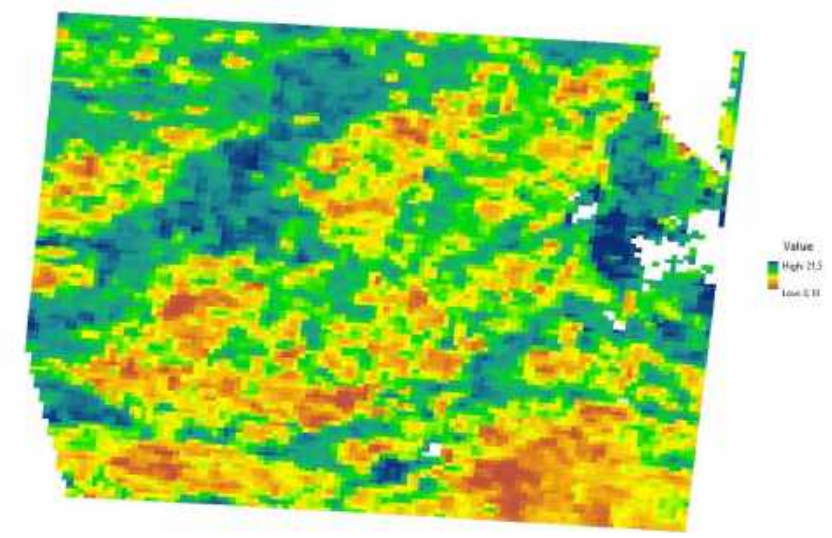


Рисунок 4.13 – Фактичний запас води (мм) у поверхневому шарі ґрунту 0–5 см станом на 19.03.2020 за даними SSM від CGLS

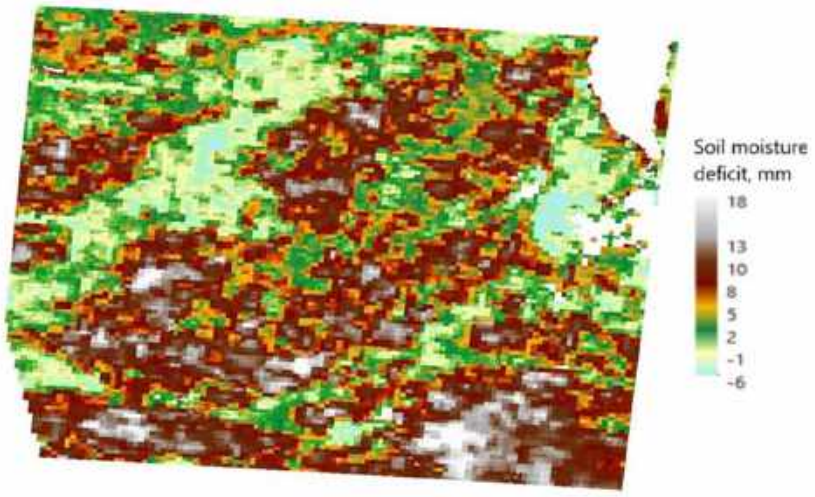
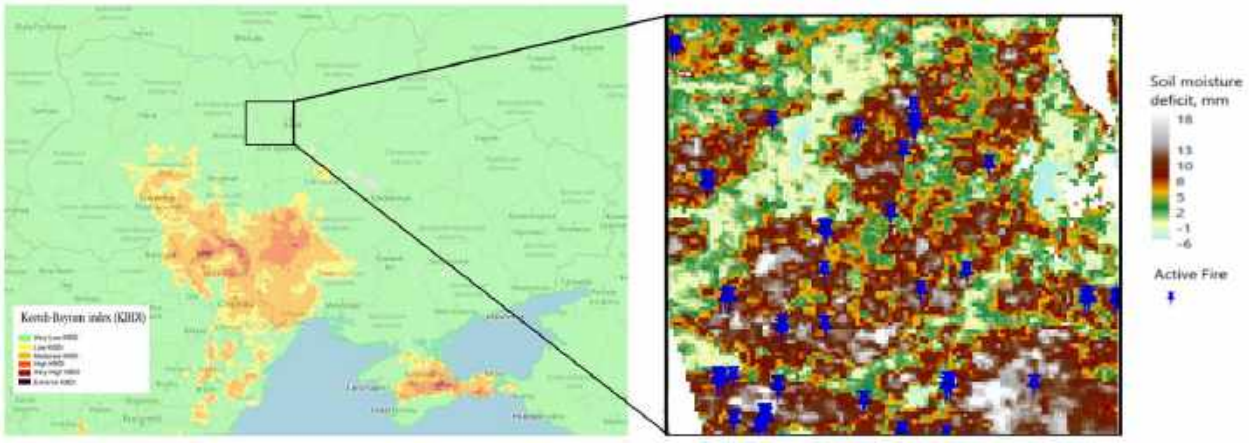


Рисунок 4.14 – Дефіцит вологи (мм) у поверхневому шарі ґрунту 0-5 см станом на 19.03.2020 за даними від CGLS та 3D Soil Hydraulic Database of Europe

Рис. 4.15 наочно доводить ефективність застосування даної методології для визначення передумов виникнення пожеж в природних екосистемах. Оцінку дефіциту вологи в ґрунті станом на 19.03.2020 за індексом Кітча-Байрама, що базується виключно на метеорологічних даних та не враховує

відмінностей фізичних та гідравлічних властивостей ґрунту залежно від його типу, наведено на рис. 4.15, *а*. Згідно карти KBDI на місці дослідження фіксується найнижчий рівень пожежної небезпеки. На рис. 4.15, *б* представлено результат розрахунку дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту 0–5 см станом на ту ж дату за даними від CGLS та 3D Soil Hydraulic Database of Europe з позначеннями активних пожеж, зафіксованих апаратурою MODIS та VIIRS за даними NASA FIRMS.



а *б*

Рисунок 4.15– Індекс KBDI згідно погодних даних, http://effis.jrc.ec.europa.eu/ (*а*); дефіцит вологи (мм) у поверхневому шарі ґрунту 0–5 см згідно супутникових даних SSM від CGLS з позначенням активних пожеж за даними NASA FIRMS (*б*)

Приклад реалізації обчислення покращеного індексу FWI на основі погодних даних з сервісу Copernicus Atmosphere Monitoring Service та глобальної атмосферної моделі NASA Power. Розроблений метод оцінювання пожежної небезпеки, що ґрунтується на покращеному індексі FWI_{impr} (підрозділ 3.3 Звіту), було реалізовано у хмарній платформі GEE. У якості вхідних було взято дані з сервісу Copernicus Atmosphere Monitoring Service та глобальної атмосферної моделі NASA Power, завантажені під час виконання проєкту [1]. Приклад порахованого покращеного індексу пожежонебезпеки (для 9–11 серпня 2021 р.) наведено на рис. 4.16.

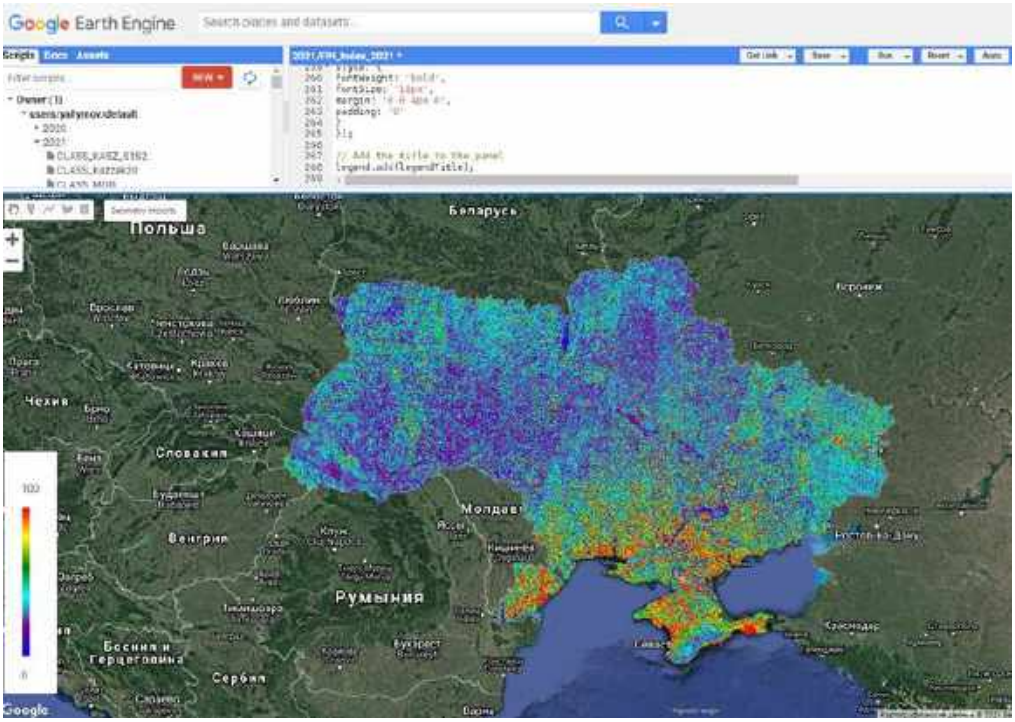


Рисунок 4.16 – Покращений індекс пожежонебезпеки для 9–11 серпня 2021 р.

4.4 Реалізація ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж на основі супутникових даних низького просторового розрізнення та карт пожежної небезпеки і характеристик земного покриву високого просторового розрізнення

Розроблену ймовірнісну модель локалізації зон виявлення та поширення пожеж було реалізовано у хмарній платформі GEE. Побудова ймовірнісної карти поширення пожеж для території України здійснювалась згідно методології, описаній у підрозділі 3.4 Звіту та представленій на рис. 4.17. Основна частина вхідних даних для підрахунку покращеного індексу пожежонебезпеки знаходиться в хмарній платформі GEE. Завантаження та попередня обробка даних описані у [1]. Реалізація підрахунку покращеного індексу FWI_{impr} для території України наведено у підрозділі 3.3 Звіту (рис. 4.16).

Важливим компонентом для локалізації зон виявлення та поширення пожеж є карта земного покриву для України. Дану карту, побудовану по

території України для 2021 р., завантажено в хмарне середовище GEE (рис. 4.18).

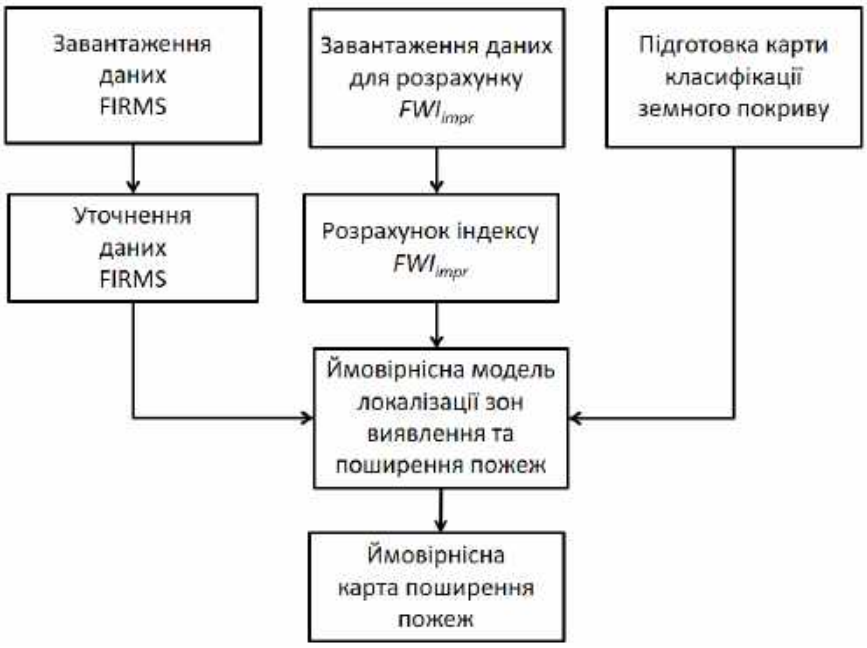


Рисунок 4.17 – Реалізація ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж на основі супутникових даних низького просторового розрізнення та карт пожежонебезпеки

Рисунок 4.18 – Карта земного покриву для України, 2021 р.

Із перелічених класів на карті всі сільськогосподарські культури об’єднаються в один клас, окрім зернових культур, оскільки саме на полях зернових культур найчастіше спостерігаються горіння стерні. Ці операції також виконуються в хмарній платформі GEE.

Останнім необхідним компонентом є реальні пожежі за супутниковими даними. У даному випадку було використано дані низького просторового розрізнення MODIS (FIRMS), рис. 4.19.

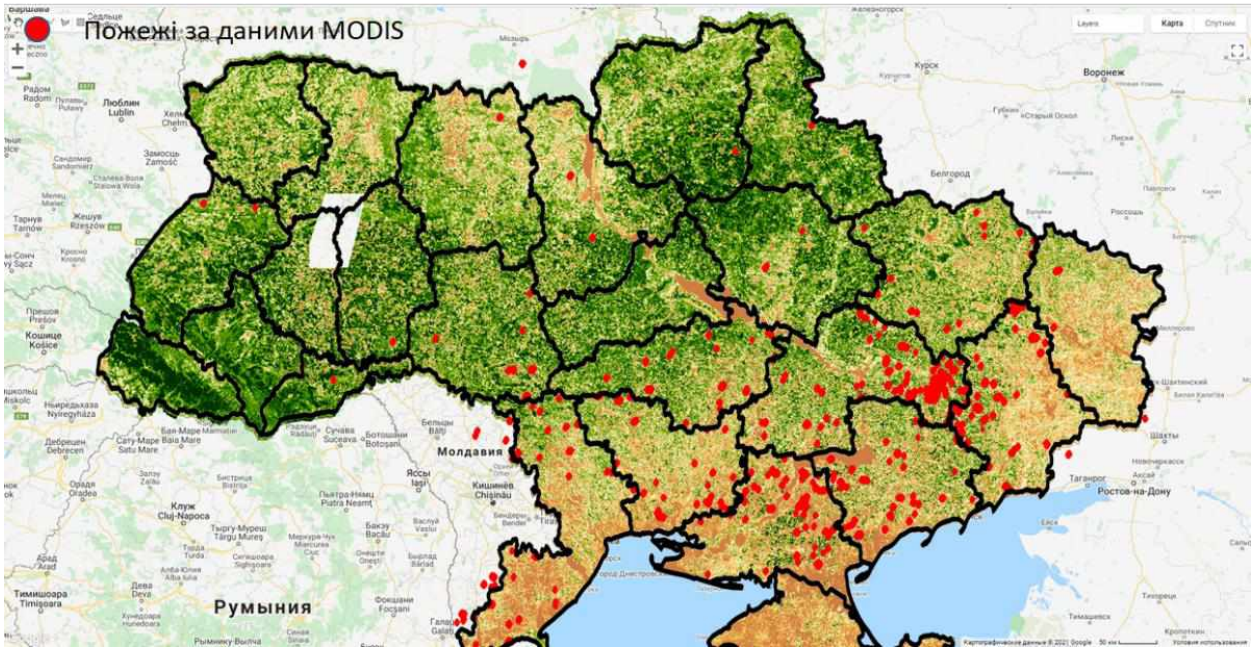


Рисунок 4.19 – Пожежі за даними MODIS (FIRMS) за 15 липня – 12 серпня 2021 р. (підкладка – індекс вологодефіциту)

На основі всіх наведених вище даних та методології моделювання локалізації зон виявлення та поширення пожеж, описаній в підрозділі 3.4 Звіту, здійснюється розрахунок ймовірнісної карти поширення пожеж. Приклад остаточної ймовірнісної карти поширення пожеж для Херсонської області наведено на рис. 4.20.

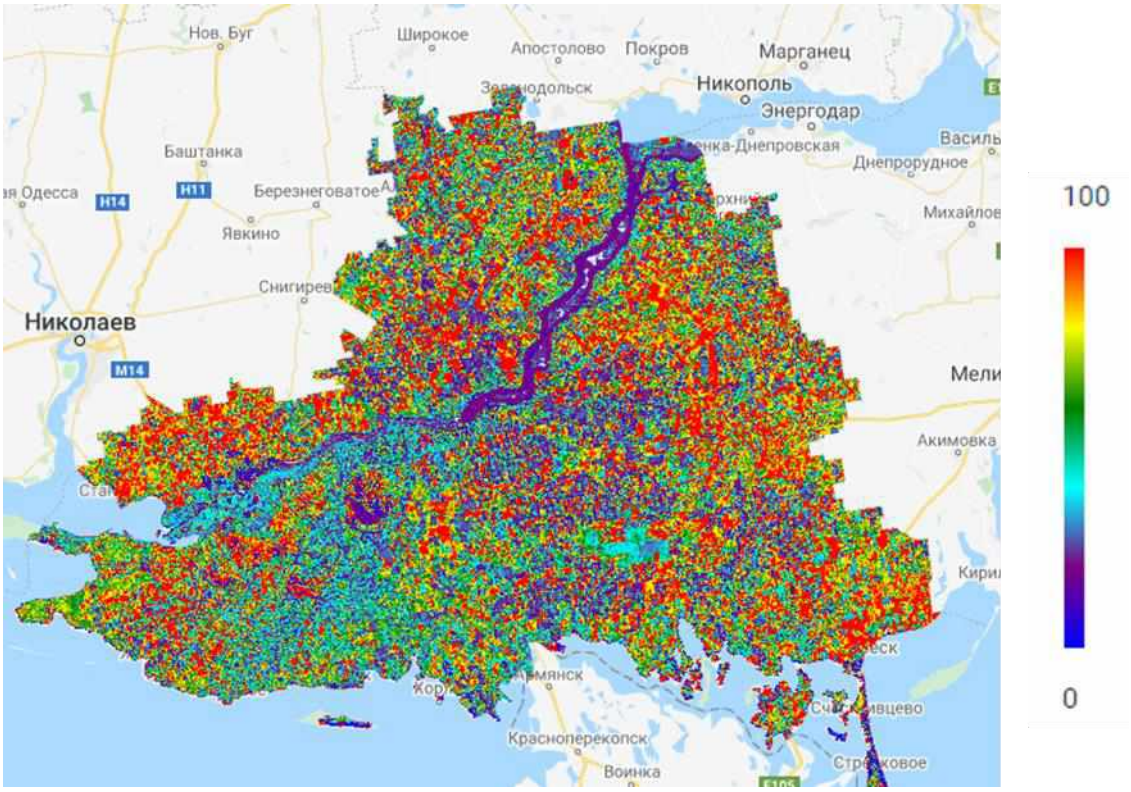


Рисунок 4.20 – Ймовірнісна карта поширення пожеж (15 липня – 12 серпня 2021 р.) для Херсонської області

Отже, у межах другого етапу НДР здійснено робочі програмні реалізації методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення, методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення, методу оцінювання пожежної небезпеки для різних типів природних екологічних систем, ймовірнісної моделі локалізації місця зон виявлення та поширення пожеж.

5 АПРОБАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ ДЛЯ ВИБРАНИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ СТОСОВНО З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

5.1 Тестування методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні методом співставлення із наявними даними Landsat-8 та оцінки точності на штучно зменшеному розрізненні даних високого просторового розрізнення

У ході даного етапу роботи над проєктом проведено тестування методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні LST.

Для порівняння початкових температурних продуктів з покращеними використовують різні підходи. Зокрема, порівняння з результатами вимірювання наземних метеорологічних станцій та порівняння супутникових продуктів на основі оптичних характеристик. Останній використовує індекс структурної подібності для вимірювання відмінності в яскравості контрасту та інших оптичних характеристиках LST до і після поліпшення. Порівняння реальних супутникових LST та покращених LST у цільових просторово-часових масштабах є прямим способом оцінки методів підвищення розрізнення. Однак можливість проведення оцінки на основі супутникових LST вирішальною мірою залежить від наявності даних. Ця вимога не завжди може бути виконана через просторову та часову невідповідність між спостережуваними та покращеними LST. Крім того, пряме порівняння може бути неприйнятним, оскільки зміни LST протягом дня можуть становити більше 10 кельвінів протягом коротких інтервалів часу. Тому оцінка, заснована на отриманих із супутника LST є цінним, але складним процесом.

У свою чергу наземні вимірювання можуть бути ефективно використані для оцінювання рівня поліпшення температурних даних. Точні кількісні оцінки покращених LST вимагають високоякісних наземних

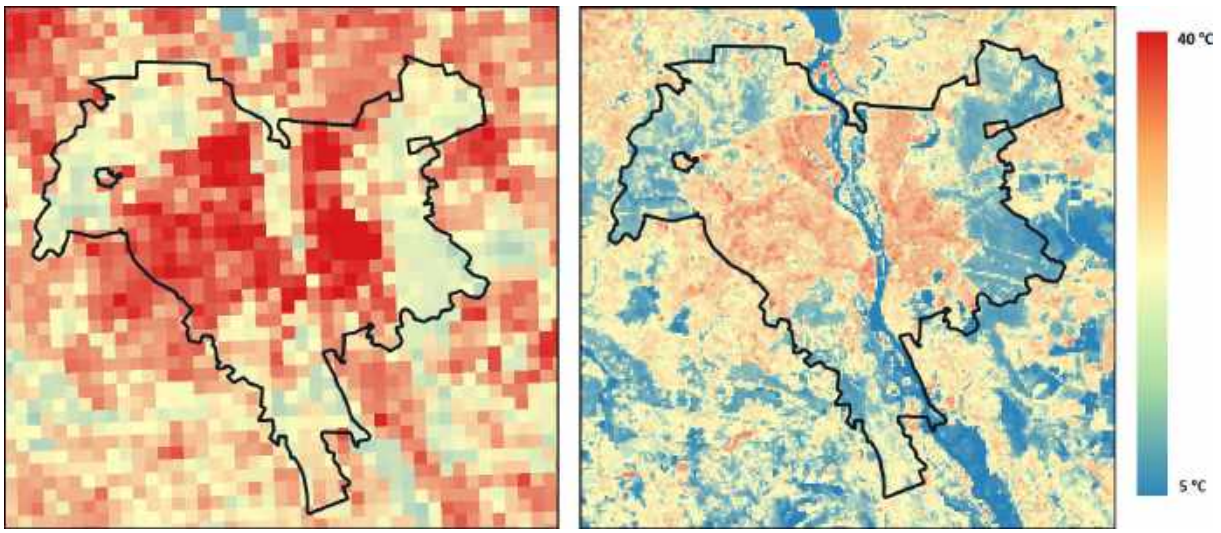
спостережень LST над областями, однорідними у піксельному масштабі. Отже, необхідно враховувати просторову однорідність по всьому пікселю покращеного LST при використанні вимірювань LST на місці проведення оцінки якості.

Завантаження та попередня обробка даних. Для валідації розробленого методу були завантажені та попередньо оброблені супутникові знімки Sentinel-3 з розрізненням 1 км, Landsat-8 з розрізненням 30 м, температурні дані з наземних станцій моніторингу якості повітря, а також створений векторний шар з місцем розташування цих станцій, загалом 57 точок. Всі дані були зібрані за 27.07.2021.

Досліджувані території. У якості області, в межах якої проводилась валідація, була обрана територія м. Києва, через наявність великої кількості близько розташованих станцій вимірювання температури (рис. 5.1).

Рисунок 5.1 – Приклад розташування станцій вимірювання температури

Алгоритм валідації. Після завантаження та попередньої обробки даних, з використанням розробленого методу LSTM проведено підвищення просторового розрізнення температурного продукту Sentinel-3, результати цього процесу показано на рис. 5.2.



а *б*

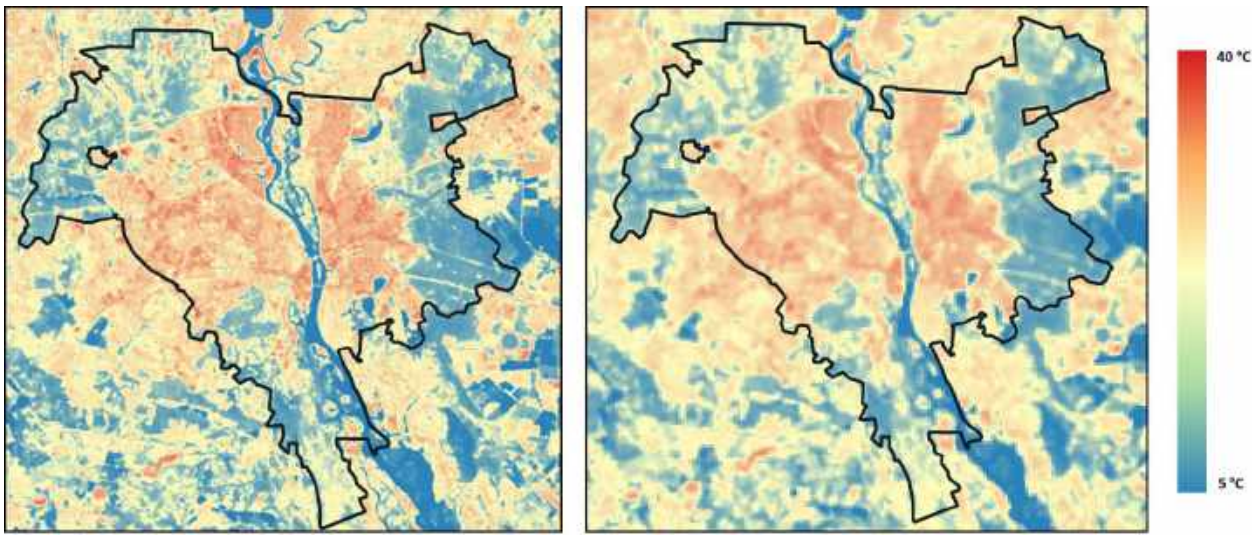
Рисунок 5.2 – Результат збільшення розрізнення температурного продукту Sentinel-3 з 1 км (*а*) до 250 м (*б*) на прикладі м. Києва (27.07.2021)

До початку валідації, з метою визначення наявності кореляції між даними наземних станцій, що вимірюють температуру *повітря* та даними супутникових продуктів, що надають температуру *земної поверхні*, між даними Sentinel-3, Landsat-8 та наземними станціями була розрахована кореляційна залежність, результати якої показали, що наземні дані не корелюють з супутниковими.

На наступному етапі результат покращення просторового розрізнення знімку Sentinel-3 був порівняний зі знімком Landsat-8, розрізнення якого штучно було агреговано (зменшено) з 100 м до 250 м (рис. 5.3).

Такими чином, після проведення усіх необхідних підготовчих процедур отримано 4 окремі температурні продукти:

1. Sentinel-3 з просторовим розрізненням 1 км (рис. 5.2, *а*).
2. Sentinel-3 зі збільшеним до 250 м просторовим розрізненням (рис. 5.2, *б*).
3. Landsat-8 з розрізненням 100 м (рис. 5.3, *а*).
4. Landsat-8 зі штучно погіршеним до 250 м просторовим розрізненням (рис. 5.3, *б*).



а *б*

Рисунок 5.3– Зменшення просторового розрізнення знімку Landsat-8 (*а*) до 250 м (*б*)

Використовуючи інструмент «зональна статистика» для 57 ключових точок для кожного з продуктів обраховані значення температури для однієї дати (27.07.21). Значення перших п'яти вимірів занесені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Значення температури в ключових точках (°С)

№	Температура з наземних станцій	S-3 (1 км)	S-3 (250 м)	L8 (100 м)	L8 (250 м)
1	32,5	37,618	27,72832	27,2691	28,08183
2	27	37,57	29,92264	28,52422	29,84883
3	27	40,53799	30,6291	31,40806	30,65597
4	28,7	39,17001	29,20165	28,89376	28,34134
5	30,4	39,656	29,50457	28,70911	28,70899

Використовуючи отримані показники (табл. 5.1), результати покращення просторового розрізнення були попарно порівняні з даними Landsat-8 у тих точках, де розташовані наземні станції, шляхом розрахунку коефіцієнта детермінації (рис. 5.4, 5.5) та кореляції.

Рисунок 5.4 – Порівняння вхідних та покращених даних Sentinel-3

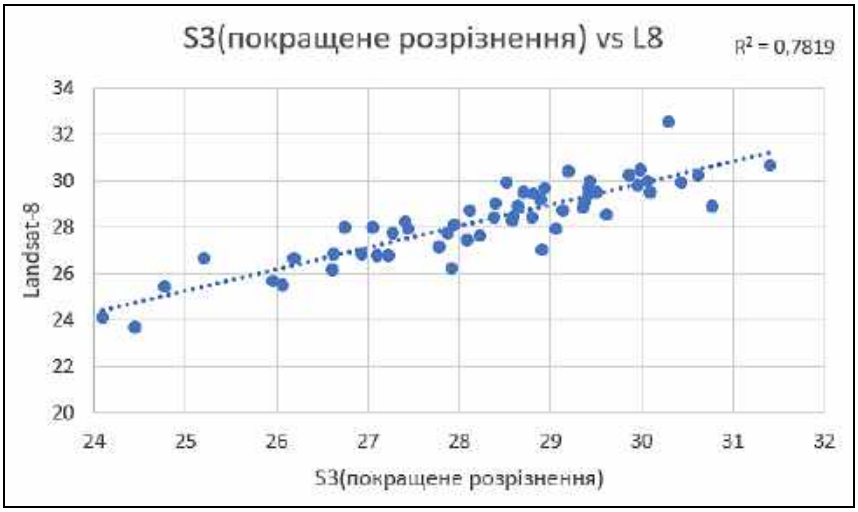


Рисунок 5.5 – Порівняння даних покращеного температурного продукту Sentinel-3 та Landsat-8

Висновки. Хоча на сьогоднішній день супутник Landsat-8 надає температурні продукти з найбільш якісним просторовим розрізненням, його недоліком все ще являється низьке часове розрізнення, що є основною проблемою при використанні в інформаційних технологях для регулярного моніторингу територій земної поверхні та вчасного виявлення пожежної небезпеки. Вирішення такої проблеми полягає у розробці методів покращення просторового розрізнення температурних продуктів супутника Sentinel-3.

За результатами проведеного кореляційного аналізу можна зробити висновок, що покращений шляхом використання розробленого методу знімок Sentinel-3 досить добре корелює з показниками супутника Landsat-8 (R^2 = 0,7819 та коефіцієнт кореляції 0,84), в той час як оригінальний знімок Sentinel-3 має R^2 = 0,52 та коефіцієнт кореляції 0,66 у порівнянні з Landsat-8. Такий результат вказує на можливість вирішення проблеми своєчасного отримання даних з високим просторовим розрізненням шляхом використання даних Sentinel-3.

5.2 Тестування методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення

Під час тестування розроблений метод виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення порівнювався з алгоритмом маскування хмарності Sen2Cor, заснованим на порогових значеннях. Валідація розробленого методу відбуваляся у два етапи з використанням різних підходів до тестування. Перший етап грунтувався на порівнянні маски хмар, створеної з використанням удосконаленого методу виявлення хмар, з маскою хмар, створеною експертним шляхом, на основі супутникових даних Sentinel-2. На другому етапі валідації тестування проводилося з використанням продукту супутника Suomi NPP, що надає маску хмар.

Попередня обробка даних. Для перевірки якості визначення темних пікселелей і тіней від хмар при різному рівні освітленості попередньо територія України була розділена на регіони за рівнем інтенсивності сонячного випромінювання (інсоляції) [224]. Для оцінки рівня інсоляції використано супутникові дані NASA [225] за період 2000–2021 рр. (рис.5.6).

Рисунок 5.6– Кількість сонячного випромінювання по регіонам, кВт*год/м^2

Відповідно до зонування за рівнем інсоляції, для територій з середньою кількістю сонячного випромінювання в 1200, 1300 та 1400 кВт*год/м^2 було обрано тайли Sentnel-2 (рис. 5.7) та завантажено 12 знімків, по одному за кожен місяць 2021 р. для кожного тайлу відповідно. Відсоток хмарності на обраних знімках становив від 0 до 70 %.

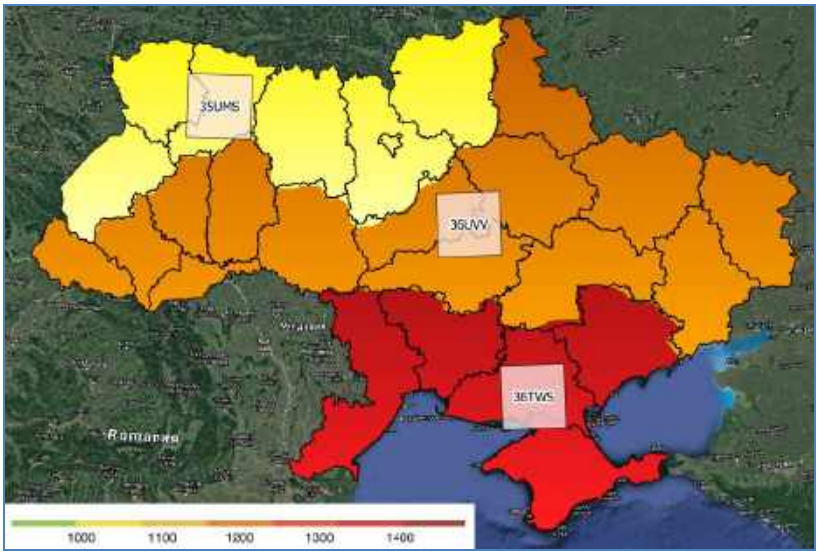
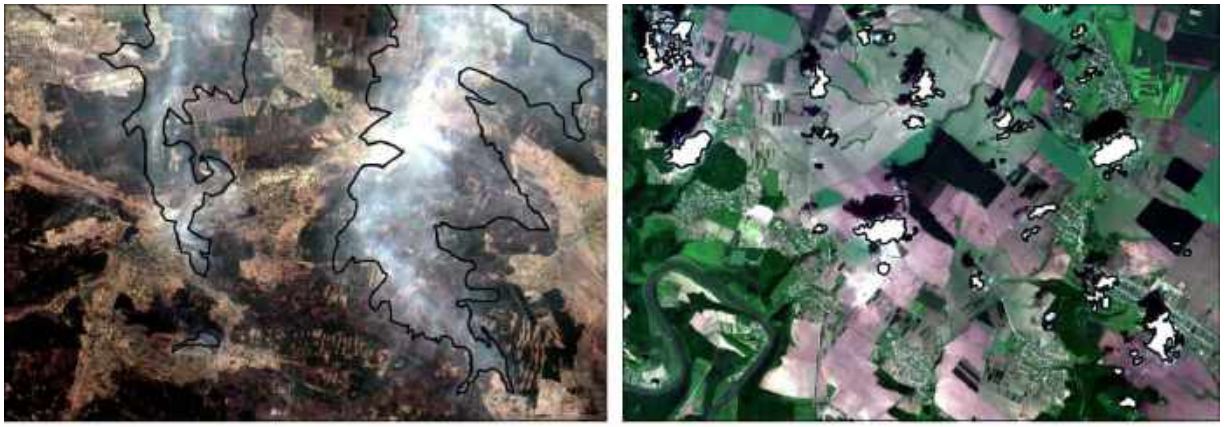


Рисунок 5.7 – Схема розміщення знімків Sentinel-2

Валідація алгоритму з використанням маски хмар, створеної експертним відбором. Для оцінки точності роботи алгоритмів по вже

завантаженим знімкам експертно були виділені контури хмарності. При створенні об'єктів кожному надавався один з 3 класів: напівпрозора хмарність, суцільна хмарність (рис. 5.8) та тіні від хмар. Критерієм поділу стала видимість поверхні Землі та наявність тіні від об'єкта. Всього було оцифровано 3500 об'єктів, включаючи 3300 об'єктів класу «суцільна хмарність» і 200 об'єктів класу «напівпрозора хмарність», а також 1300 об'єктів «тінь від хмари».



а *б*

Рисунок 5.8 – Приклади типів хмарності: напівпрозора (*а*); суцільна (*б*)

Для вибірки було експертно відібрано хмари різних типів, розмірів, щільності та з різним оточуючим середовищем на поверхні Землі, за винятком дуже тонких хмар, які показані на рис. 5.9. Дуже тонкі хмари не розглядалися як хмарні об'єкти оскільки наземні цілі під тонким хмарним покривом можуть бути використані у подальшому.

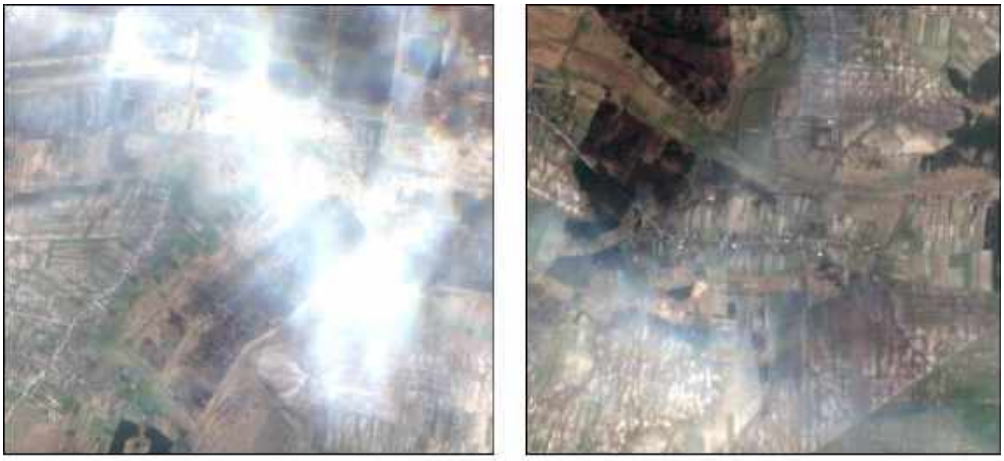
Для оцінки точності масок хмарності, отриманих шляхом використання алгоритмів розробленого методу та Sen2Cor, створені маски хмарності попередньо були переведені в векторний формат для порівняння з хмарними об'єктами, отриманими шляхом експертного виділення.

Після цього була побудована матриця помилок. На її основі розрахована основна метрика для оцінки точності – F-міра ($Fmeasure$), а також її складові – точність ($precision$) і повнота ($recall$). Метрика $precision$ дозволяє оцінити, яка частка об'єктів, розпізнаних як об'єкти позитивного

класу (в даному випадку – хмарності), в дійсності є такими, а *recall* показує, яку частку об'єктів позитивного класу з усіх таких об'єктів знайшов алгоритм:

$$precision = \frac{TP}{TP + FP},\ recall = \frac{TP}{TP + FN},\ accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

де TP – об'єкти, правильно віднесені до потрібного класу; FP – неправильно віднесені до потрібного класу (помилка I роду); FN – невіднесені до потрібного класу (помилка II роду).



а *б*

Рисунок 5.9 – Хмари на знімках Sentinel – 2: тонкі (*а*) та дуже тонкі (*б*)

На першому етапі оцінювалась точність виділення всієї хмарності без поділу на типи. Розрахунки проводилися за допомогою інструментів просторового аналізу. Кращий результат показав алгоритм розробленого методу (середня точність – 89 %), гірший – алгоритм Sen2Cor (середня точність – 82 %). Нижча точність алгоритму Sen2Cor виникає за рахунок великого обсягу помилкового детектування. В основному, на це впливають налаштування буфера навколо хмари, оскільки основна частина помилково виділених об'єктів відноситься саме до буферних зон.

Після загальної оцінки точності була проведена оцінка в розрізі типів хмар (суцільна, напівпрозора) та тіней від них. Оцінка точності для кожного

типу хмар проводилася тільки за допомогою розрахунку показника *recall* (відсоток збігу фактичної і виділеної площі хмарності). Спочатку з контрольного набору вибиралися об'єкти одного з типів, після цього аналізувалося, наскільки повно вони покриваються масками хмар, створеними за допомогою алгоритмів. Для напівпрозорої хмарності такий розрахунок проводився тільки для тих знімків, де присутній цей тип, а площа хмарності перевищувала 1 км^2. В якості загальної оцінки були обчислені середні значення для 36 знімків за кожним типом хмарності.

Вищий відсоток збігу для суцільної хмарності показав алгоритм розробленого методу – 98 %. Таким чином, цей алгоритм практично не пропускає об'єкти даного класу. Алгоритм Sen2Cor дає значно нижчий відсоток збігу – 87 %. При виділенні напівпрозорої хмарності вищий відсоток точності показав також алгоритм розробленого методу – 86 %. Алгоритм Sen2Cor виділяє тільки 1% напівпрозорої хмарності, оскільки напівпрозора хмарність потрапляє в клас «хмарність з низькою ймовірністю» (clouds low probability), який не враховувався при оцінці. Даний клас містить багато хибних об'єктів (доріг і відкритого ґрунту).

Валідація алгоритму з використанням маски хмар VIIRS. Так як створення контрольної вибірки з використанням експертної оцінки може мати неточності при виділенні контурів хмар, то у якості альтернативного методу валідації був використаний інформаційний продукт VIIRS cloud mask (VCM) «CLDMSK_L2_VIIRS_SNPP» сенсора VIIRS супутника Suomi NPP (рис. 5.10). Цей набір даних доступний на веб-сторінці Earthdata [225].

На цьому етапі тестування розробленого методу хмарність була визначена за допомогою алгоритму даного метода та алгоритму Sen2Cor і протестована за допомогою продукту VCM.

Алгоритм VCM складається з порогових тестів виявлення хмар, згрупованих за типом поверхні та умовами сонячного освітлення [226]. Кожен тест виявлення хмарності класифікує хмари на растровому зображенні за рівнями достовірності відсутності хмар: високий, низький та середній рівні

[226]. Зважаючи, що пікселі розподіляються на три класи, загальна достовірність наявності хмар заснована на кубічному корені добутку ймовірностей для цих класів [226]. На підставі цієї загальної ймовірності відсутності хмар, VCM класифікує піксель растрового зображення як достовірно захмарений, можливо чистий або достовірно чистий. Продукт VCM має просторове розрізнення 750 м та надається двічі на день. Згідно з оцінкою валідації маски хмарності VIIRS, загальний відсоток влучань становив 88,4 % в липні і 89 % в жовтні 2007 р. [227].

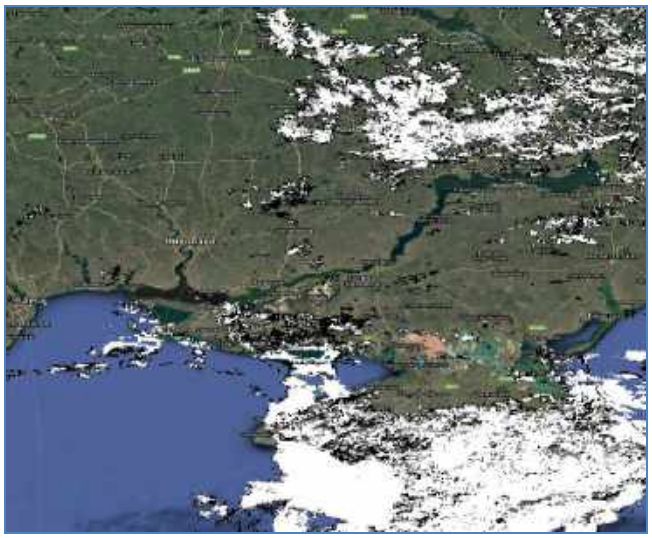


Рисунок 5.10 – Приклад VIIRS cloud mask (південь України)

Під час збору даних продукт VCM був завантажений за дати, що відповідають отриманим раніше знімкам супутника Sentinel-2. Оскільки маска хмарності VCM забезпечує класифікацію хмар за рівнем достовірності згідно з пороговими тестами, аналогічними алгоритму виявлення хмар Sen2Cor та алгоритму розробленого методу виявлення хмар, то при порівнянні ефективності алгоритмів між собою та відносно продукту VCM використовувався лише канал з достовірними хмарами, що є спільним для кожного з продуктів.

Після завантаження даних було проведено попіксельне порівняння шляхом побудови матриці неточності (рис. 5.11) та розрахунку на її основі метрик *precision*, *recall* та *Flscore*.

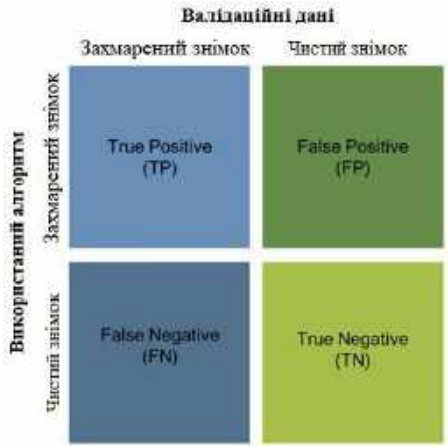


Рисунок 5.11 – Принцип побудови матриці неточності

Таким чином, у ході попіксельного порівняння вихідних результатів розробленого алгоритму з продуктами Sen2Cor та VIIRS за рахунок використання лише одного каналу обидва алгоритми показали високу точність. Проте для алгоритму розробленого методу виявлення хмар все ж *характерний вищий відсоток точності визначення* хмар. Результати валідації наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Результат порівняння з продуктом VCM

VCM продукт	Сезон 2021 р.	Назва алгоритму	*Precision*	*Recall*	*F1score*
VIIRS with confident clouds	Зима	Покращений алгоритм виявлення хмар	0.915	0.972	0.939
		Sen2Cor	0.798	0.743	0.714
	Весна	Покращений алгоритм виявлення хмар	0.851	0.982	0.941
		Sen2Cor	0.654	0.741	0.667
	Літо	Покращений алгоритм виявлення хмар	0.911	0.977	0.943
		Sen2Cor	0.712	0.901	0.857
	Осінь	Покращений алгоритм виявлення хмар	0.842	0.912	0.902
		Sen2Cor	0.807	0.958	0.799

5.3 Побудова результуючих карт рівнів пожежної небезпеки за узагальненим індексом для різних типів природних екологічних систем на основі порогової сегментації

Покращений індекс пожежної небезпеки FWI_{impr} є бальною оцінкою інтенсивності пожежної небезпеки від 0 до 100 та класифікується на 6 рівнів згідно 5 порогів (табл. 1.1 і табл. 3.3). Для побудови результуючих карт рівнів пожежної небезпеки пропонується застосування процедури порогової сегментації результату розрахунку індексу FWI_{impr}.

Розрахунок порогів рівнів пожежної небезпекм FWI_{impr} здійснюється у відповідності до (3.11). Попередньо $k_j\,(j=1,2)$ взяли рівними 0.5, надаючи таким чином рівної ваги як метеорологічним факторам класичного FWI, так і фактору сухості поверхневого шару ґрунту залежно від його типу [39].

Результати розрахунків порогів рівнів пожежної небезпеки для території України за FWI_{impr} представлено на рис. 5.12–5.16.

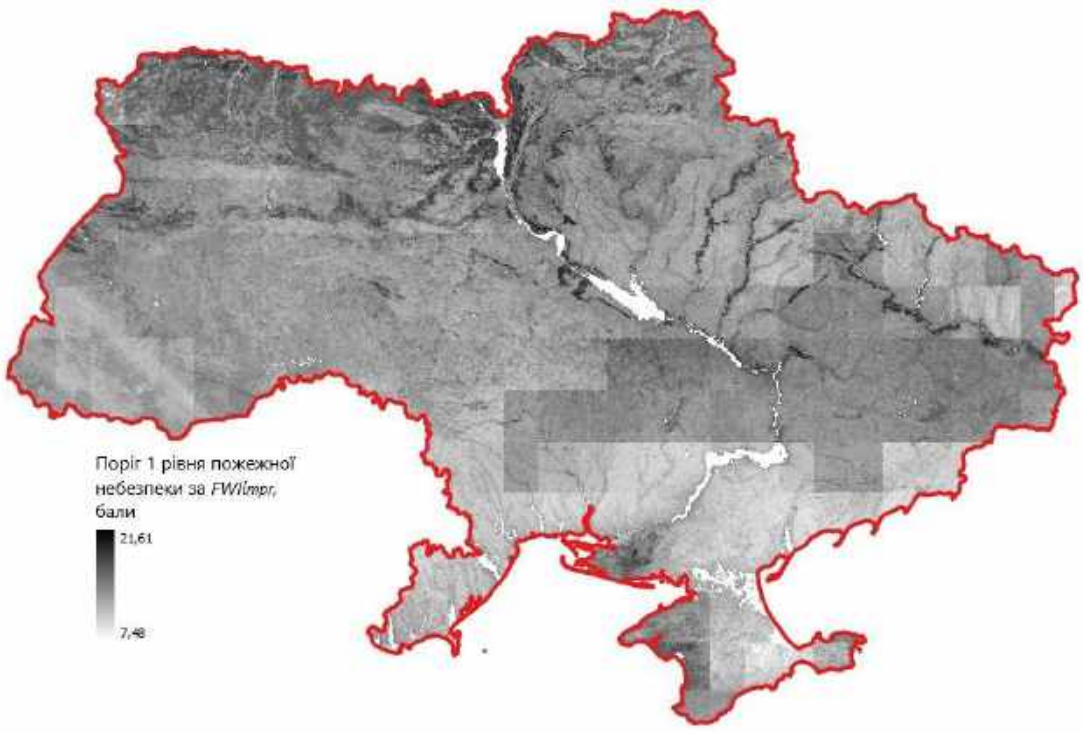


Рисунок 5.12 – Верхній поріг першого (дуже низького) рівня пожежної небезпеки за індексом FWI_{impr}

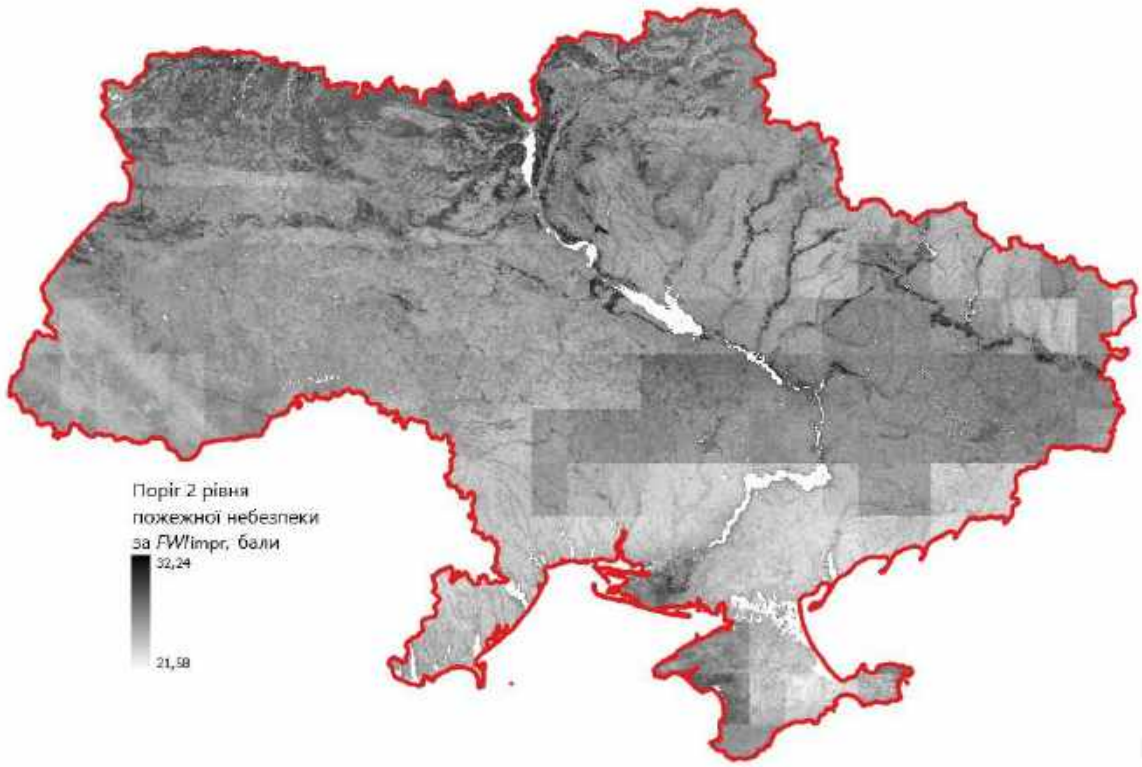


Рисунок 5.13 – Верхній поріг другого (низького) рівня пожежної небезпеки за індексом FWI_{impr}

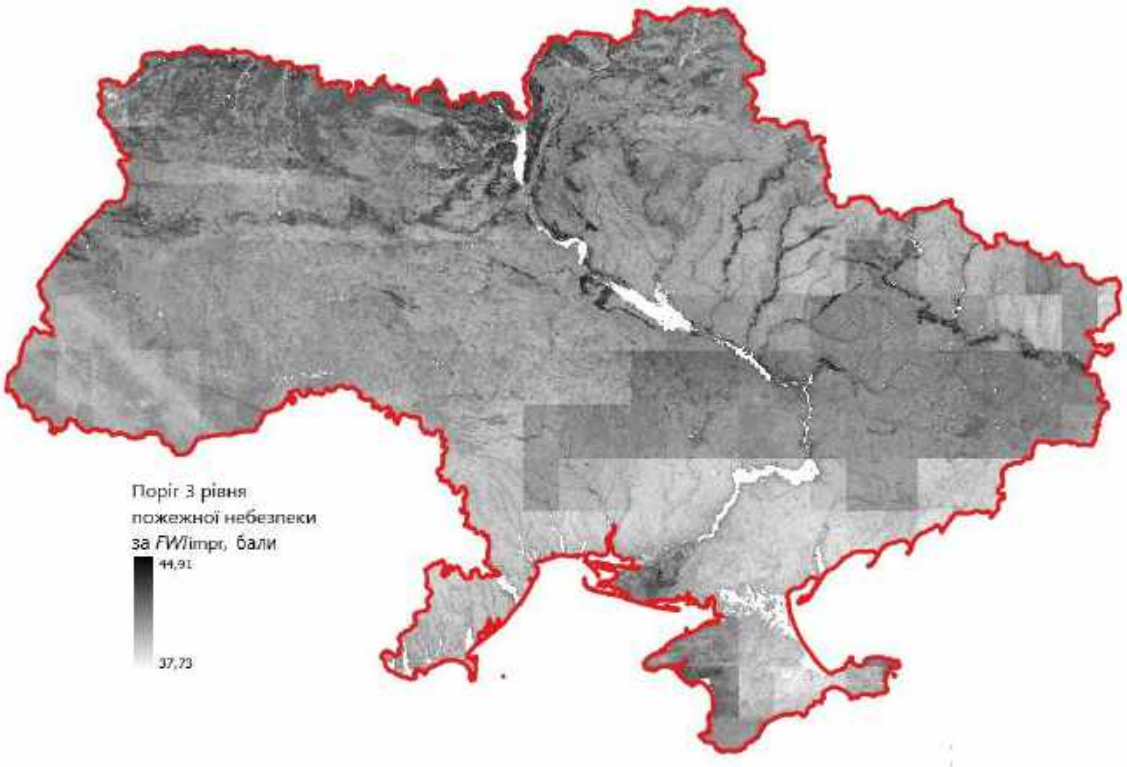


Рисунок 5.14 – Верхній поріг третього (помірного) рівня пожежної небезпеки за індексом FWI_{impr}

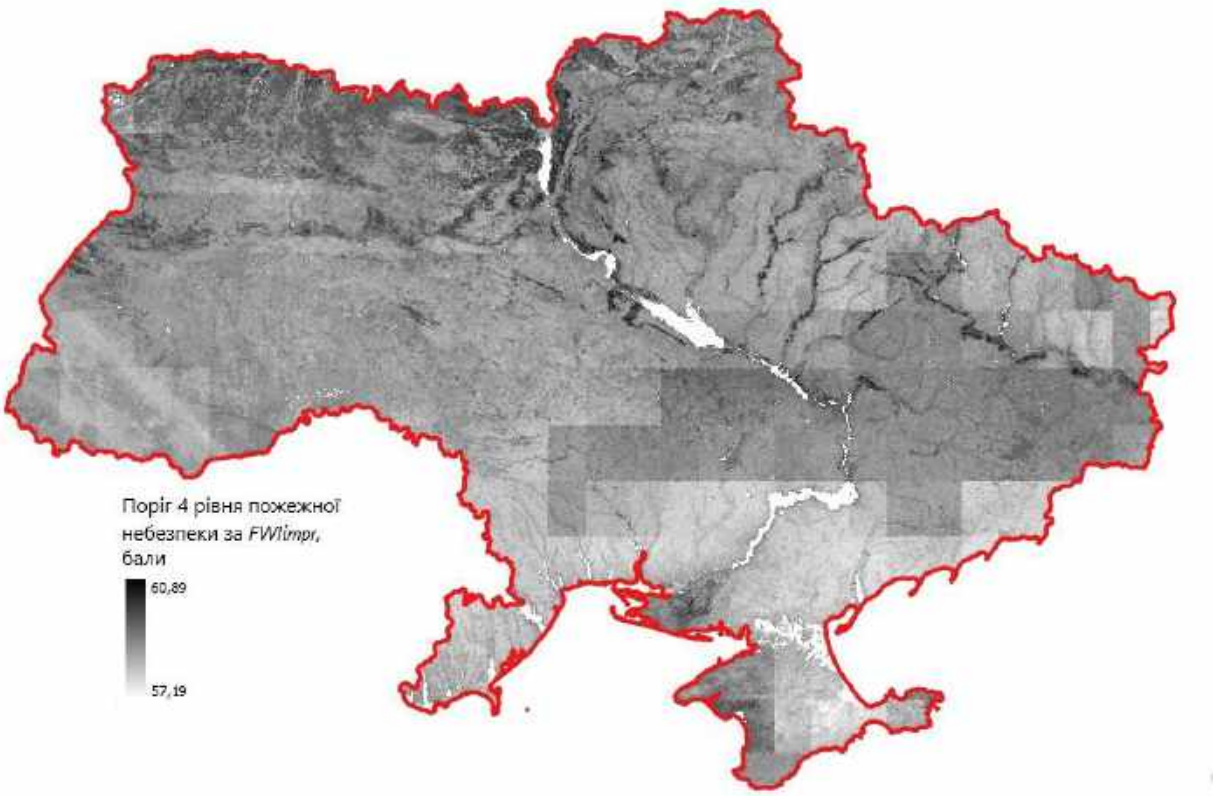


Рисунок 5.15 – Верхній поріг четвертого (високого) рівня пожежної небезпеки за індексом FWI_{impr}

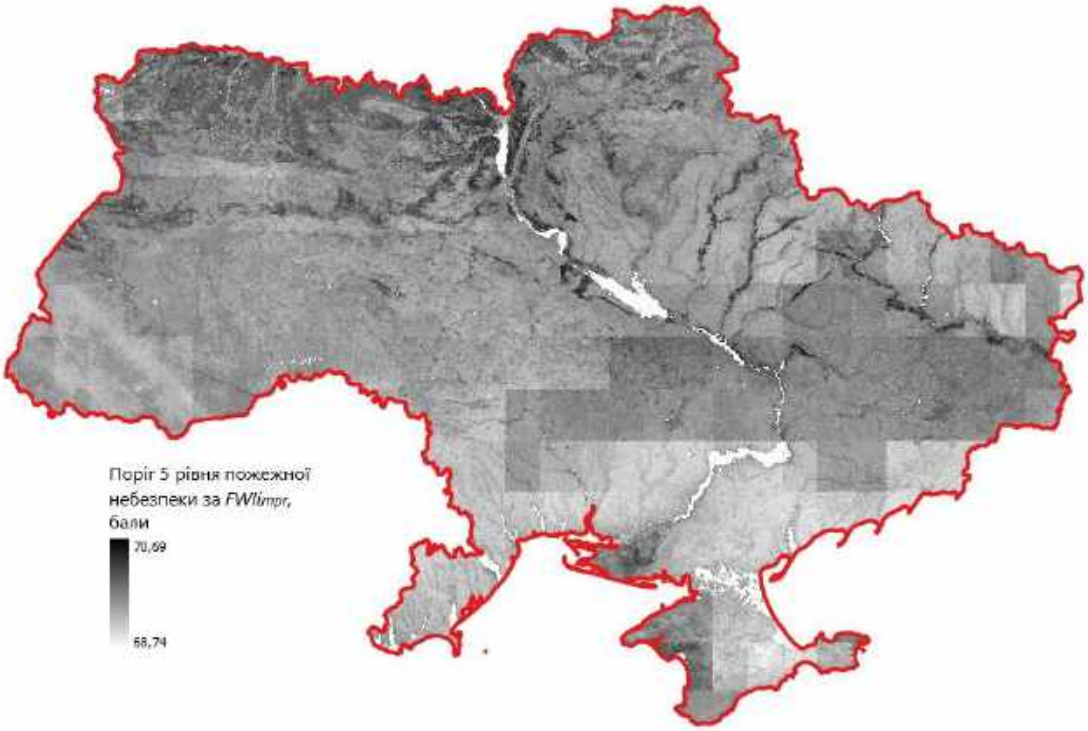


Рисунок 5.16 – Верхній поріг п’ятого (дуже високого) рівня пожежної небезпеки за індексом FWI_{impr}

Шостий (екстремальний) рівень пожежної небезпеки присвоюється усім значенням FWI_{impr}, що перевищують верхній поріг п'ятого рівня. Отже, верхній поріг попереднього рівня пожежної небезпеки є одночасно нижнім порогом наступного рівня пожежної небезпеки.

Таким чином, для території України розраховано 5 меж (порогів) для визначення 6 рівнів пожежної небезпеки.

Побудова результуючих карт рівнів пожежної небезпеки за узагальненим індексом FWI_{impr} здійснювалася в рамках тестування та апробації запропонованої технології для території України на основі даних супутникових спостережень за період 10–15 серпня 2021 р.

Технологія передбачає чотири основні послідовні розрахунки:

1) класичного індексу пожежної небезпеки FWI;

2) дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту m, приведеного до 100-бальної шкали;

3) покращеного індексу пожежної небезпеки FWI_{impr};

4) рівнів пожежної небезпеки на основі порогової сегментації результату розрахунку покращеного індексу FWI_{impr}.

Для розрахунку класичного індексу пожежної небезпеки *FWI* використано дані CAMS за 15.08.2021 щодо температури повітря на висоті 2 м, швидкості вітру на висоті 10 м, відносної вологості повітря та кількості опадів за останні 24 год. Результат розрахунку класичного *FWI*, що базується виключно на погодних даних, представлено на рис. 5.17.

Для розрахунку дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту на основі супутникових даних обрано продукт SSM CGLS за період 10–15 серпня 2021 р. із просторовим розрізненням 1 км та використано дані бази гідрологічних властивостей ґрунтів розрізненням 250 м [210] та набору глобальних даних [211]. Результат розрахунку дефіциту вологи у шарі ґрунту глибиною до 5 см (в мм) було переведено до 100-бальної шкали та наведено на рис. 5.18.

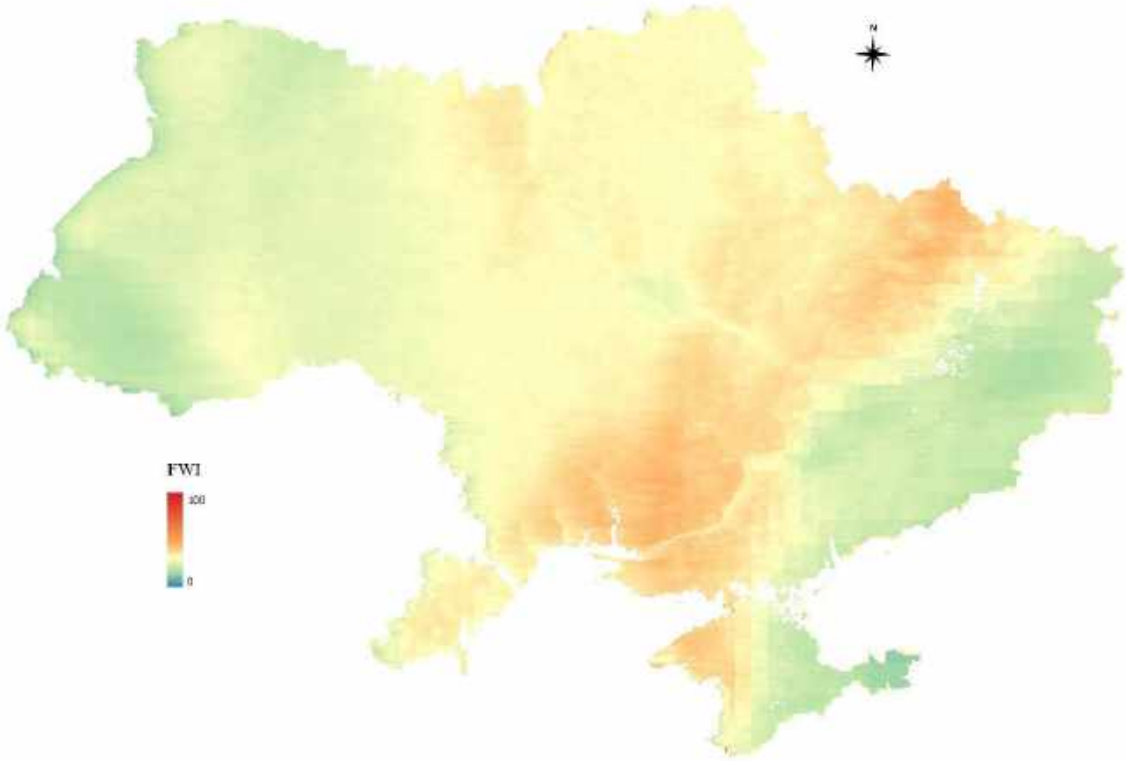


Рисунок 5.17 – Класичний *FWI* станом на 15.08.2021 р. (просторове розрізнення 1 км)

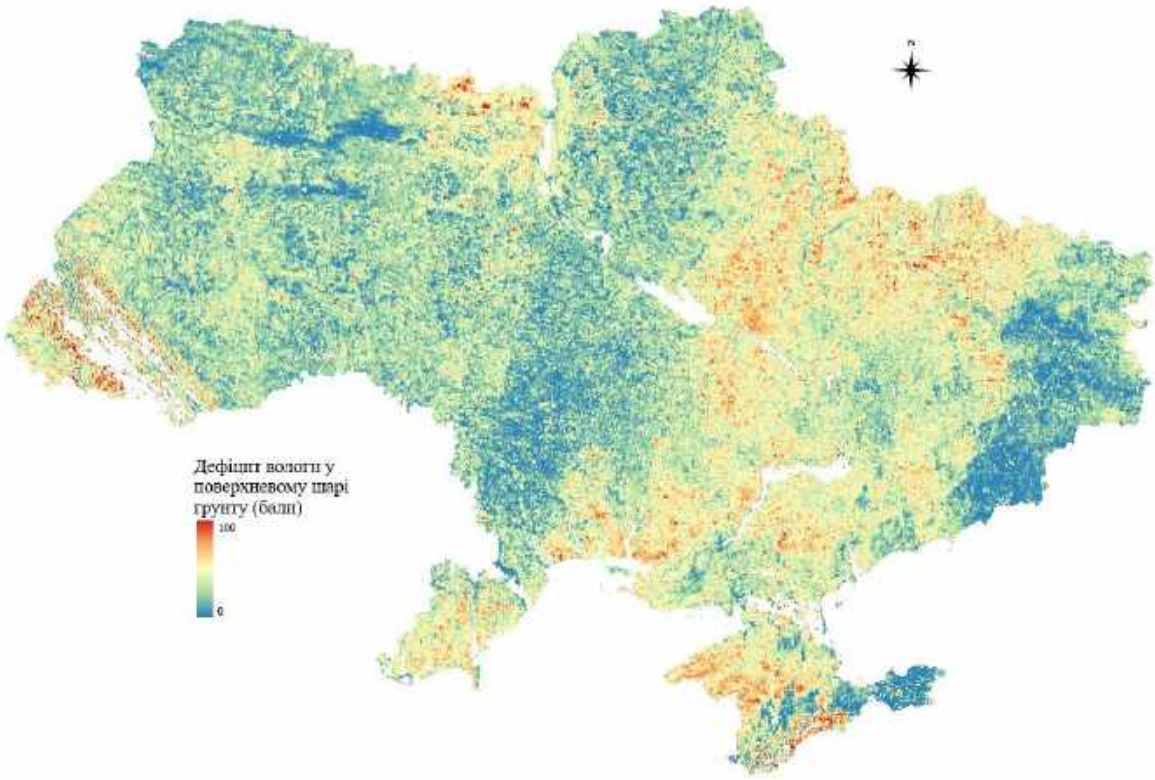


Рисунок 5.18 – Дефіцит вологи у поверхневому шарі ґрунту (бали), 10–15 серпня 2021 р. (просторове розрізнення 250 м)

Результат розрахунку покращеного індексу пожежної небезпеки FWI_{impr} представлено на рис. 5.19.

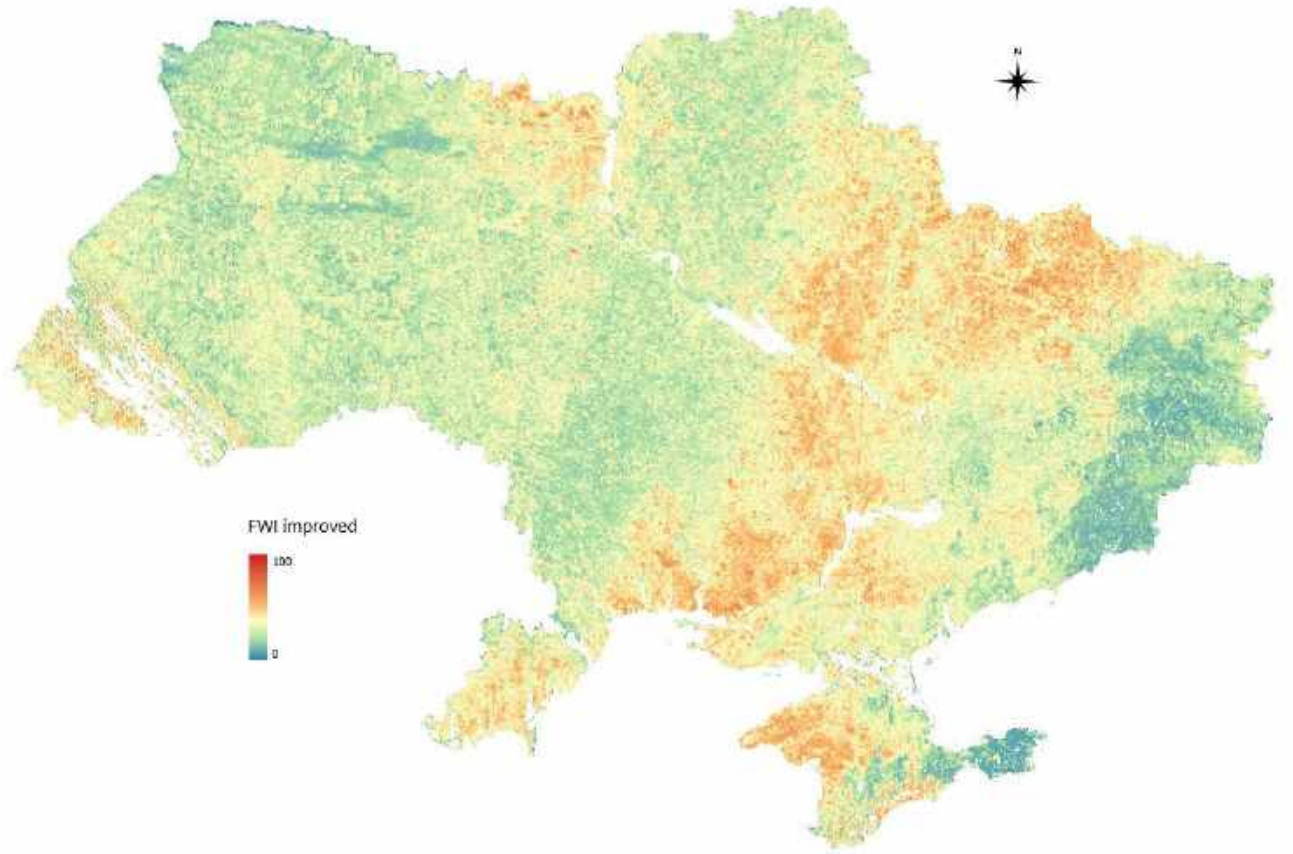


Рисунок 5.19 – Покращений індекс FWI_{impr} на 15.08.2021

Як бачимо, отриманий результат FWI_{impr} (рис. 5.19) є більш деталізованим порівняно з класичним FWI (рис. 5.17) та враховує рівною мірою як погодні дані, так і рівень дефіциту вологи в ґрунті залежно від його типу.

Класифікацію на 6 рівнів пожежної небезпеки растру покращеного індексу FWI_{impr} здійснено із застосуванням порогової сегментації та наведено на рис. 5.20. Клас 1 відповідає дуже низькому рівню пожежної небезпеки (зелений), клас 2 – низькому рівню (жовтий), клас 3 – помірному рівню (помаранчевий), клас 4 – високому рівню (червоний), клас 5 дуже високому рівню (фіолетовий) та клас 6 – екстремальному рівню пожежної небезпеки (чорний).

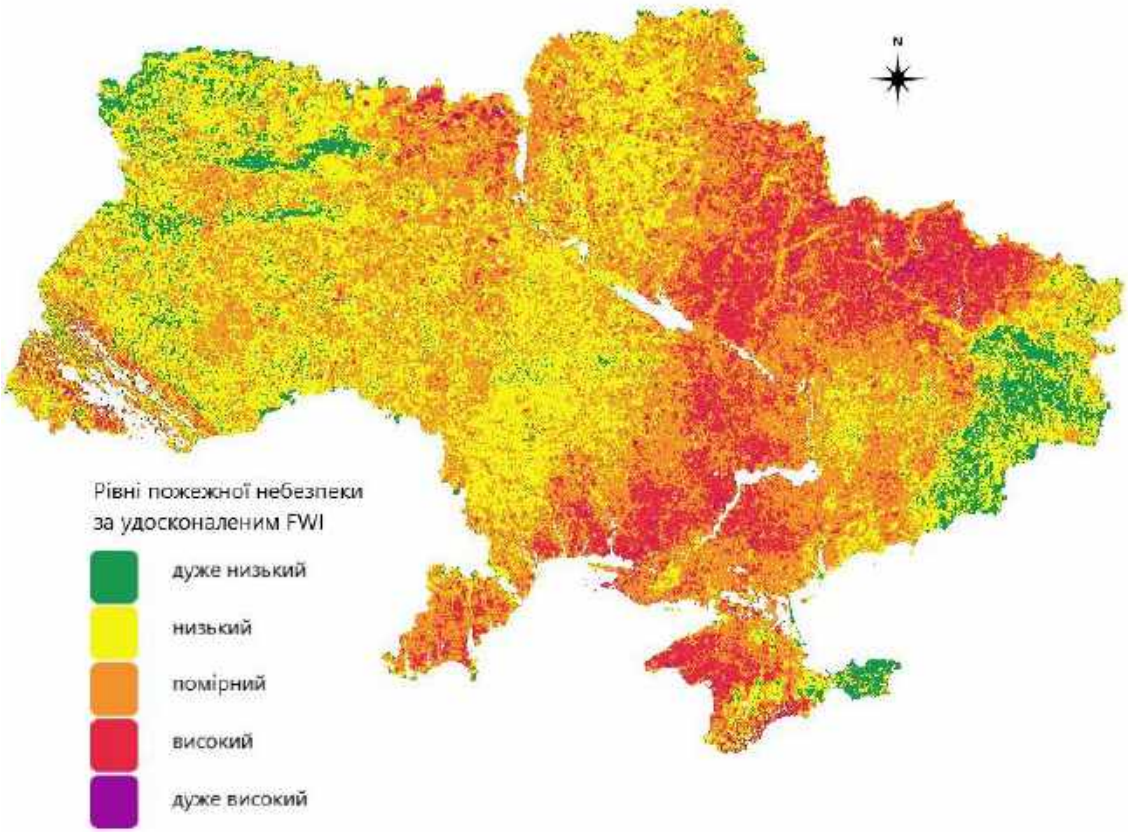


Рисунок 5.20 – Карта рівнів пожежної небезпеки території України за покращеним індексом пожежної небезпеки FWI_{impr}, 15.08.2021 р.

5.4 Верифікація методу оцінювання пожежної небезпеки на основі співставлення обчисленого узагальненого індексу з наявними індексами

У даному підрозділі розглянуті процедури верифікації методу оцінювання пожежної небезпеки на основі FWI_{impr} як уніфікованого критерію, обчисленого у результаті згортки двох часткових критеріїв пожежної небезпеки, яка здійснена двома способами: перший спосіб – як середнього арифметичного часткових критеріїв; другий спосіб – із застосуванням методу головних компонент спільного набору даних часткових критеріїв і обчисленням узагальненого критерію як першої головної компоненти [39]. Перший спосіб злиття часткових критеріїв є інтуїтивно простим, базується на процедурі середнього арифметичного при їх злитті і не передбачає вибору вагових коефіцієнтів з якихось властивостей

оптимальності обчисленого узагальненого критерію, що забезпечуються вибором вагових коефіцієнтів з обґрунтованих умов оптимальності на основі вхідних і вихідних статистичних даних. Другий спосіб застосовний у випадку, коли неможливо організувати процедури статистичного навчання для обґрунтованого вибору вагових коефіцієнтів за даними вхідних часткових і вихідного узагальненого критерію пожежної небезпеки, спостережуваного на деяких навчальних ділянках земної поверхні. Дійсно, у нашому випадку неможливо оцінити значення вихідного узагальненого критерію на основі даних спеціально організованих спостережень на навчальних ділянках: у кількісній формі – балах чи у категоріальній формі – у значеннях рівнів пожежної небезпеки – мітках класів. Можна лише зафіксувати на визначених ділянках факт самої пожежі, що не є умовою пожежонебезпеки у кількісній чи категоріальній формі. До того ж, загоряння значною мірою пов’язане з наявністю антропогенного чинника, а не об’єктивних передумов пожежі.

У підрозділі проведено верифікацію узагальненого індексу пожежної небезпеки, отриманого способом злиття часткових уніфікованих критеріїв із застосуванням середнього арифметичного з продуктом класичного індексу *FWI*, що надається службою CEMS [214]. Проведено перевірку оцінених растрів часткових уніфікованих критеріїв пожежонебезпеки *FWI* і дефіциту вологи у ґрунті на мультиколінеарність компонент і встановлено її відсутність, що дає можливість коректно здійснювати їх злиття у єдиний критерій узагальненого індексу пожежної небезпеки. Застосовано та перевірено на прикладі метод головних компонент для злиття часткових уніфікованих критеріїв *FWI* та дефіциту вологи у ґрунті у результуючий критерій покращеного індексу пожежної небезпеки. Класифіковано растри за рівнями пожежної небезпеки при застосуванні методу головних компонент для злиття часткових уніфікованих критеріїв. Проведено верифікацію методу оцінювання пожежної небезпеки на основі зіставлення обчисленого

узагальненого індексу з застосуванням методу головних компонент з індексом пожежної небезпеки Кітча-Байрама.

Верифікація узагальненого індексу пожежної небезпеки на основі середнього арифметичного часткових критеріїв з продуктом класичного індексу FWI від служби CEMS. Для порівняння результатів розрахунку рівнів пожежної небезпеки за запропонованим методом було обрано продукт *FWI*, що надається у вільному доступі CEMS[214]. Він розраховується за класичним алгоритмом, просторове розрізнення становить 0.25°. Карту рівнів пожежної небезпеки, розраховану за даними *FWI* (CEMS) для території України станом на 15.08.2021 наведено на рис. 5.21.

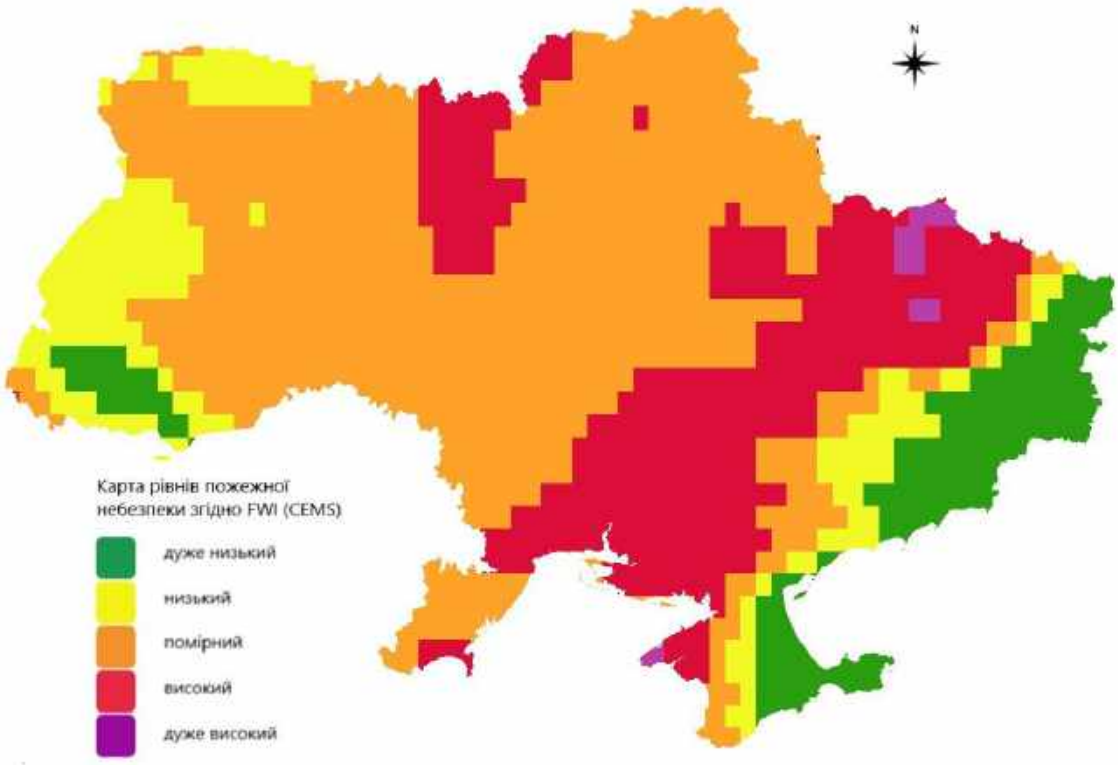


Рисунок 5.21 – Карта рівнів пожежної небезпеки території України за *FWI* (CEMS), 15 серпня 2021 р.

Розрахунок загальної точності (overall accuracy) карти рівнів пожежної небезпеки за FWI_{impr} (рис. 5.20) у порівнянні з картою за *FWI* (CEMS) (рис. 5.21) здійснювався на основі матриці невідповідностей (confusion matrix) (табл. 5.3), що є інструментом, який використовує крос-табуляцію [215].

Значення загальної точності карти рівнів пожежної небезпеки за FWI_{impr} порівняно з картою за *FWI* (CEMS) склало 42,23 %. Відносно невисоку загальну точність можна пояснити як значною відмінністю просторового розрізнення порівнюваних карт (0.25° та 250 м відповідно), так і різнорідністю джерел даних, на основі яких їх побудовано – виключно погодні дані для класичного індексу *FWI* (CEMS) та поєднання погодних, супутникових даних і геопросторової інформації про гідрологічні властивості поверхневого шару ґрунту для покращеного індексу FWI_{impr}.

Таблиця 5.3 – Матриця невідповідностей на основі порівняння карт FWI_{impr} та *FWI* (CEMS)

Confusion Matrix		Класи (рівні пожежної небезпеки) за *FWI*(CEMS)								
		1	2	3	4	5	Разом	User's Accuracy	Producer's Accuracy	Overall Accuracy
Класи (рівні пожежної небезпеки) за FWI_{impr}	1	0,0168	0,005	0,0099	0,0009	0	0,0326	0,5153	0,1879	0,4223
	2	0,0403	0,047	0,2119	0,0226	0,0004	0,3222	0,1459	0,4034	
	3	0,0252	0,052	0,2499	0,1119	0,0023	0,4413	0,5663	0,4648	
	4	0,0069	0,0122	0,0647	0,1079	0,0051	0,1968	0,5483	0,4351	
	5	0,0002	0,0003	0,0012	0,0047	0,0007	0,0071	0,0986	0,0824	
	Разом	0,0894	0,1165	0,5376	0,248	0,0085	1	-	-	

Водночас окремо здійснено порівняння залежностей кількості пожеж у екосистемах та на відкритих територіях, що сталися 15.08.2021 за даними добових зведень обласних управлінь ДСНС України [108], з результатами оцінювання пожежонебезпеки за індексами *FWI*(CEMS) та FWI_{impr} (рис. 5.22).

Проведене порівняння залежностей кількості пожеж у екосистемах та на відкритих територіях по областях від величин індексу FWI_{impr} та індексу *FWI* (CEMS) станом на 15.08.2021 (коефіцієнти кореляції Пірсона $R = 0{,}81$ та $R = 0{,}78$ відповідно) показало, що запропонований індекс FWI_{impr} краще корелює з кількістю реальних пожеж по областях порівняно з *FWI* (CEMS).

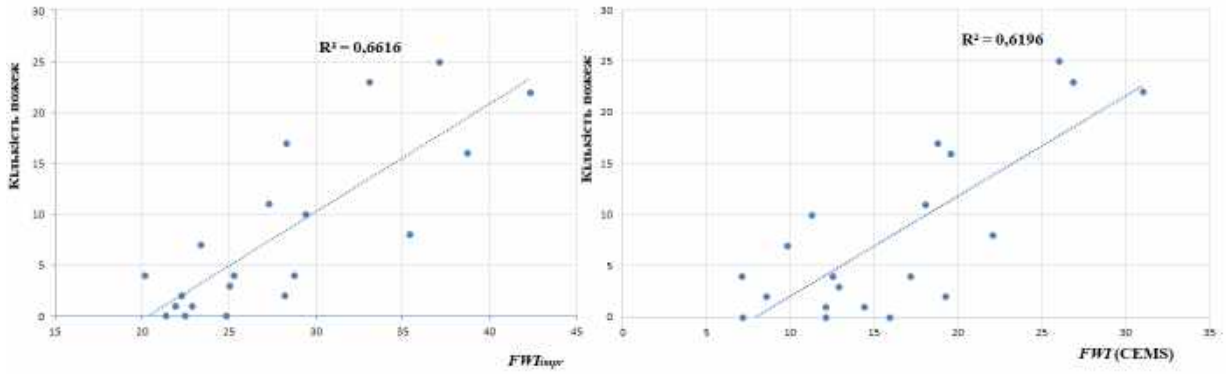


Рисунок 5.22 – Залежність кількості пожеж у екосистемах та на відкритих територіях за даними ДСНС по областях України від індексів FWI_{impr} та FWI(CEMS), 15.08.2021

Перевірка растрів FWI і дефіциту вологи у ґрунті як часткових уніфікованих критеріїв пожежної небезпеки на мультиколінеарність компонент. Як було зазначено у підрозділі 3.3 Звіту, покращений індекс пожежної небезпеки FWI_{impr} як узагальнений критерій формується у формі лінійної згортки (3.11). Побудова узагальненого критерію покращеного індексу пожежної небезпеки зводиться до задачі обґрунтованого визначення вагових коефіцієнтів k_1 та k_2. Співвідношення (3.11) являє собою лінійну регресійну залежність узагальненого критерію FWI_{impr} від часткових нормованих критеріїв, у якій критерії FWI та $\tilde{m}$ відіграють роль растрових пояснюючих змінних (регресорів), а FWI_{impr} – результуючої змінної [203]. Таким чином, при злитті часткових растрових критеріїв FWI та $\tilde{m}$ згідно з (3.11) в узагальнений критерій мають виконуватись умови коректної застосовності лінійного множинного регресійного аналізу, поширені на випадок відповідних растрів. Зокрема, ключовою умовою тут є відсутність мультиколінеарності часткових растрових критеріїв.

У нашому випадку повної мультиколінеарності пояснюючих критеріїв FWI і $\tilde{m}$ не може бути, бо не існує функціонального зв’язку між ними (один з критеріїв не може бути виражений функціонально через інший). Для

перевірки часткової мультиколінеарності, що визначається статистичними взаємозалежностями, у нашому випадку необхідно оцінити кореляцію між двома растрами часткових критеріїв пожежної небезпеки FWI і $\tilde{m}$, і якщо недіагональні елементи коваріаційної матриці растрів не перевищують 0.75, то мультиколінерність не має місця. Тоді індекс FWI і дефіцит вологи у поверхневому шарі ґрунту можна коректно використовувати як часткові незалежні критерії при формуванні узагальненого індексу пожежної небезпеки FWI_{impr}.

Процедура обчислення матриці коваріації растрових шарів та її реалізація. Для обчислення кореляції між растрами FWI і $\tilde{m}$ будемо використовувати такий вираз для нормованого коефіцієнта кореляції (іншими словами, коваріації) двох цифрових зображень $f(x,y)$ та $g(x,y)$, що мають однакові розміри у пікселях $(M \times N)$ у межах поля зору X [216], де $(x,y) \in X$ – координати пікселів у цілочисельних значеннях $\left(x = \overline{0, M-1};\ y = \overline{0, N-1}\right)$, причому за початок координат береться верхній лівий піксель зображення, вісь координат x напрямлена від початку координат вниз, а вісь y – від початку координат вправо:

$$K(f,g) = \frac{\sum_{(x,y)\in X}\left(f(x,y) - f^0\right)\left(g(x,y) - g^0\right)}{\sqrt{\sum_{(x,y)\in X}\left(f(x,y) - f^0\right)^2}\ \sqrt{\sum_{(x,y)\in X}\left(g(x,y) - g^0\right)^2}},$$

де f^0, g^0 - середні значення інтенсивності зображень $f(x,y), g(x,y)$ по всьому полю зору, які визначаються за формулами:

$$f^0 = \frac{1}{(M*N)}\sum_{(x,y\in X)} f(x,y), g^0 = \frac{1}{(M*N)}\sum_{(x,y\in X)} g(x,y).$$

Для визначення нормованого коефіцієнта кореляції (коваріації) растрів у середовищі QGIS можна використати функцію модуля для роботи з растрами географічної інформаційної системи GRASS GIS (Geographic

Resources Analysis Support System) [217], частина з модулів якої інтегрована в QGIS.

Визначення коваріаційної матриці растрів і встановлення невиконання для них умов мультиколінеарності. Перевірку мультиколінеарності часткових критеріїв пожежної небезпеки *FWI* і $\tilde{m}$ було здійснено для растрових шарів індексу *FWI* з просторовим розрізненням 1 км, розрахованого на 15.08.2021 і дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту з просторовим розрізненням 250 м, сформованого як мозаїка растрів за 6 днів з 10.08.2021 по 15.08.2021. Растр індексу FWI не нормувався, а значення верхньої межі діапазону значень його пікселів покладалося max_FWI = 100 балів. Растр дефіциту вологи у ґрунті нормовано до уніфікованої 100-бальної шкали. Обидва растри було перепроектовано до єдиної прямокутної проекції Меркатора. Перепроектовані растри *FWI* та нормованого дефіциту вологи відображені на рис. 5.17 та 5.18 . Коваріаційна матриця растрів FWI нормованого $\tilde{m}$ має вигляд:

1.000000 0.271619

0.271619 1.000000.

Розглянуті растри як часткові уніфіковані критерії слабо корельовані, а, значить, не є мультиколінеарними. Тому їх можна коректно використовувати при формуванні єдиного уніфікованого узагальненого критерію пожежної небезпеки.

Застосування методу головних компонент для злиття часткових уніфікованих критеріїв FWI та дефіциту вологи у ґрунті у результуючий критерій покращеного індексу пожежної небезпеки. Побудова узагальненого критерію покращеного індексу пожежної небезпеки за співвідношенням (3.11) зводиться до задачі обґрунтованого визначення вагових коефіцієнтів k_1 та k_2.

Слід зазначити, що стосовно вказаної задачі не можуть бути організовані процедури машинного навчання через неможливість формування навчальної вибірки даних з трійок растрів FWI_{impr}, FWI_i, $\tilde{m}_i$, які

характеризували б у сукупності у чисельному представленні ступінь пожежної небезпеки на заданих навчальних ділянках $\left(i=\overline{1,n}\right)$ земної поверхні. Для обчислених значень вхідних часткових критеріїв $FWI_i, \tilde{m}_i$, неможливо поставити експерименти з вимірювання (оцінювання) вихідного результуючого уніфікованого критерію $FWI_{impr\ i}$ $\left(i=\overline{1,n}\right)$ з незалежних джерел заздалегідь у кількісному вигляді і, навіть, у категоріальному вигляді про рівні пожежної небезпеки, і застосувати експертно-статистичний метод [202, 218, 219]. Таким чином, маємо задачу лінійної регресії згідно з співвідношенням (3.11) з неспостережуваним виходом $FWI_{impr\ i}$ $\left(i=\overline{1,n}\right)$ на обраних навчальних ділянках.

За умов неможливості організації процедур навчання, як у даному випадку, вагові коефіцієнти k_1 та k_2 можна визначити, зокрема, безпосередньо за значеннями часткових критеріїв як растрів $FWI, \tilde{m}$ у кожному конкретному випадку їх реалізації без набору статистики на навчальних ділянках земної поверхні. У цьому випадку для знаходження коефіцієнтів k_1 та k_2 можна застосувати метод головних компонент [202, 203, 218, 219] і використати, так звану, першу модифіковану компоненту набору уніфікованих часткових критеріїв $FWI, \tilde{m}$. Базова ідея для реалізації цього підходу [202, 203, 218, 219] полягає у тому, що з усіх змінних, у даному випадку растрів, які характеризували ступінь пожежної небезпеки у кількісному вигляді вибирається така, за значеннями якої можна було б найбільш точно відновити за допомогою відповідної моделі лінійної регресії значення часткових уніфікованих критеріїв $FWI, \tilde{m}$. Саме такі властивості має перша головна компонента, побудована за набором даних уніфікованих часткових критеріїв $FWI, \tilde{m}$ [202, 218, 219].

Отже, FWI_{impr} буде визначатися саме як перша модифікована компонента спільного набору даних растрів FWI та $\tilde{m}$ і задовольнятиме співвідношенню лінійної згортки (3.11), де вагові коефіцієнти k_1 та k_2

обчислюються як квадрати відповідних j-их компонент $(j=1,2)$ власного вектора коваріаційної матриці набору даних растрів FWI та $\tilde{m}$, що відповідають найбільшому власному значенню цієї матриці.

У середовищі QGIS перша головна компонента набору уніфікованих часткових критеріїв $FWI, \tilde{m}$ у кожному конкретному випадку їх реалізації визначається за допомогою модуля GRASS GIS для роботи з зображеннями та реалізується функцією i.pca [220]. Для прикладу реалізації алгоритму обчислення головних компонент вказаною функцією на даних спільного набору вхідних растрів часткових уніфікованих критеріїв FWI та $\tilde{m}$ отримано такі власні значення, власні вектори коваріаційної матриці та процент важливості головних компонент PC1 і PC2:

Eigen values, (vectors), and [percent importance]:

PC1 181.82 (0.1602, 0.9871) [83.29%]

PC2 36.48 (-0.9871, 0.1602) [16.71%].

Для цього прикладу вагові коефіцієнти k_1 та k_2, з якими часткові уніфіковані критерії як растри зливаються у єдиний уніфікований критерій покращеного індексу протипожежної небезпеки будуть обчислюватись як квадрати відповідних компонент 0.1602 і 0.9871 власного вектора коваріаційної матриці спільного набору даних, що відповідають її найбільшому власному значенню (головна компонента PC1):

k1 = 0.1602^2 = 0.02566404; k2 = 0.9871^2 = 0.97436641; k1+k2 = 1.00003045

У результаті реалізації алгоритму методу головних компонент у цьому прикладі отримано растр першої головної компоненти PC1 з узагальненою назвою FirstComp, який є растром шуканого єдиного уніфікованого критерію покращеного індексу пожежної небезпеки FWI_{impr} (рис. 5.23).

Через низьку кореляцію вказаних растрів і отримані вагові коефіцієнти, результуючий уніфікований критерій FWI_{impr} практично поводитиме себе так, як дефіцит вологи у ґрунті $\tilde{m}$.

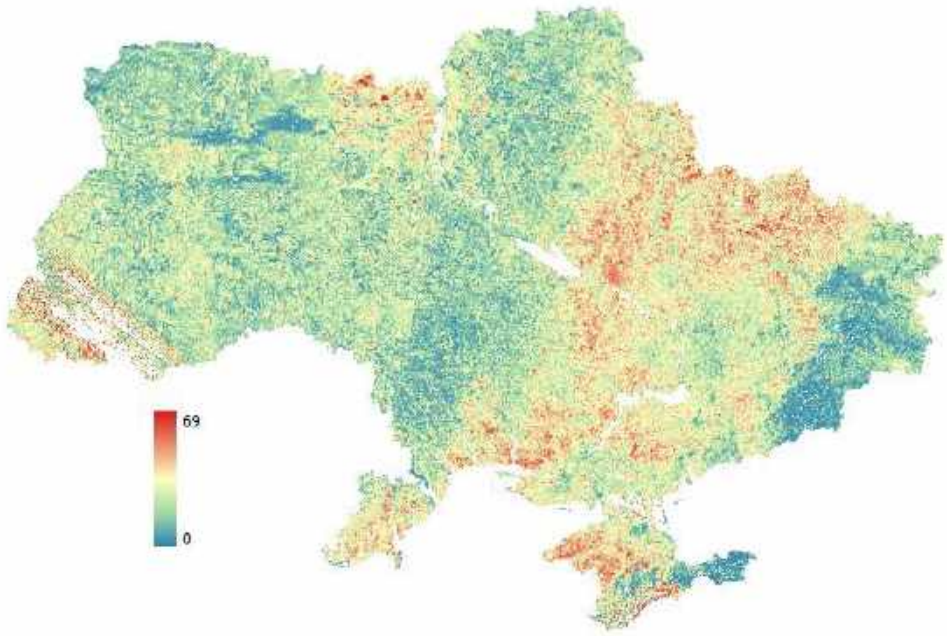


Рисунок 5.23 – Растр першої головної компоненти, який відповідає FWI_{impr}, для території України на 15.08.2021

Класифікація растрів за рівнями пожежної небезпеки при застосуванні методу головних компонент для злиття часткових уніфікованих критеріїв. Растри порогів рівнів пожежної небезпеки для часткових уніфікованих критеріїв FWI і дефіциту вологи у ґрунті $\tilde{m}$ розраховуються через відповідні значення порогів рівнів пожежної небезпеки для класичного індексу *FWI* (табл. 1.1) і через відповідні значення порогів рівнів класичного індексу Кітча-Байрама, які наведено та модифіковано у табл. 3.3 стосовно дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту. Растри порогів рівнів пожежної небезпеки для вхідних уніфікованих часткових критеріїв зливаються у растри порогів рівнів для вихідного уніфікованого критерію з ваговими коефіцієнтами $k_1 = 0.02566404$ і $k_2 = 0.97436641$.

Здійснено класифікацію за методом порогової сегментації растру FirstComp згідно з обчисленими растрами порогів рівнів пожежної небезпеки і отримано растр шести рівнів пожежної небезпеки для території України з узагальненою назвою 6Cl_FirstComp на 15 серпня 2021 р, розрахований із

застосуванням методу головних компонент для злиття часткових уніфікованих критеріїв пожежної небезпеки, зображений на рис. 5.24.

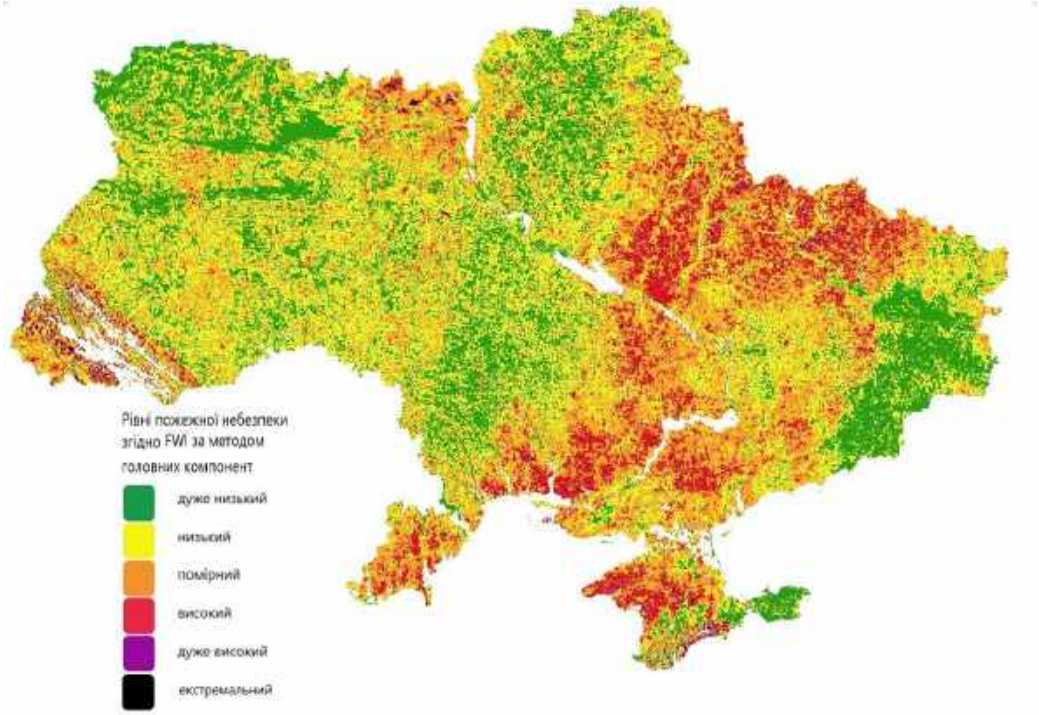


Рисунок 5.24 – Класифікований за рівнями пожежної небезпеки растр FWI_{impr}, розрахований за методом головних компонент, для території України на 15.08.2021

Обчислена коваріаційна матриця попередньо класифікованого за рівнями пожежної небезпеки часткового уніфікованого критерію $\tilde{m}$ у формі растру з узагальненою назвою $6Cl_\tilde{m}$ і класифікованого результуючого растру 6Cl_FirstComp, зображеного на рис. 5.24, яка має вигляд:

1.000000 0.861127

0.861127 1.000000.

Факт високої кореляції між вказаним растрами відображає визначальний внесок дефіциту вологи у ґрунті $\tilde{m}$ з ваговим коефіцієнтом k2 = 0.97436641 у результуючий критерій FWI_{impr} при злитті уніфікованих часткових критеріїв із застосуванням методу головних компонент.

Верифікація методу оцінювання пожежної небезпеки на основі зіставлення обчисленого узагальненого індексу з застосуванням методу головних компонент з індексом пожежної небезпеки Кітча-Байрама. Зважаючи на зазначений значний ступінь схожості класифікованих за рівнями пожежної небезпеки растра результуючого уніфікованого критерію і растра уніфікованого часткового критерію дефіциту вологи у ґрунті і їх високу взаємну кореляцію, виникає ідея верифікації обчисленого з застосуванням методу головних компонент узагальненого індексу з індексом пожежної небезпеки Кітча-Байрама *KBDI*. Як відомо, *KBDI* визначається як дефіцит вологи у деякому віртуальному шарі ґрунту з запасом вологи при польовій вологоємності $W_{FC_KBDI} = 203{,}2\ mm$, однаковій для всіх типів ґрунту, що безумовно є ідеалізацією, на глибині, що залежить від типу ґрунту [194, 195, 205, 206]. *KBDI* також є індексом пожежної небезпеки і має свою шкалу рівнів (табл. 3.2) і як критерій пожежної небезпеки *KBDI* використовується, зокрема, у США в NFDRS [23].

Таким чином, за взірцевий обрано класифікований растр індексу *KBDI*. При здійснюваній верифікації взірцевий індекс *KBDI*, за аналогією до часткових уніфікованих критеріїв, з метою забезпечення просторового розрізнення 250 м і усунення втрат точності, пов'язаних з передискретизацією, теж обчислюється за супутниковими радіолокаційними даними про ступінь насичення поверхневого шару ґрунту водою (продукт *SSM* від CGLS), даними пористості *n* ґрунту, та об'ємної польової вологоємності θ_{FC} з європейських баз даних гідрологічних властивостей ґрунтів за методологією, викладеною у підрозділі 3.3 Звіту, що базується на джерелах [205, 206]. Там же описана процедура нормування індексу пожежної небезпеки KBDI до уніфікованої шкали та визначені растри порогів 6 рівнів пожежної небезпеки нормованого KBDI. Здійснено класифікацію нормованого індексу KBDI на 6 рівнів пожежної небезпеки і отримано його класифікований растр з узагальненою назвою 6Cl_KBDI, зображений на рис. 5.25, який обрано за взірцевий для здійснення верифікації

з ним класифікованого за рівнями пожежної небезпеки уніфікованого узагальненого критерію FWI_{impr} у формі растра 6Cl_FirstComp, отриманого із застосуванням методу головних компонент.

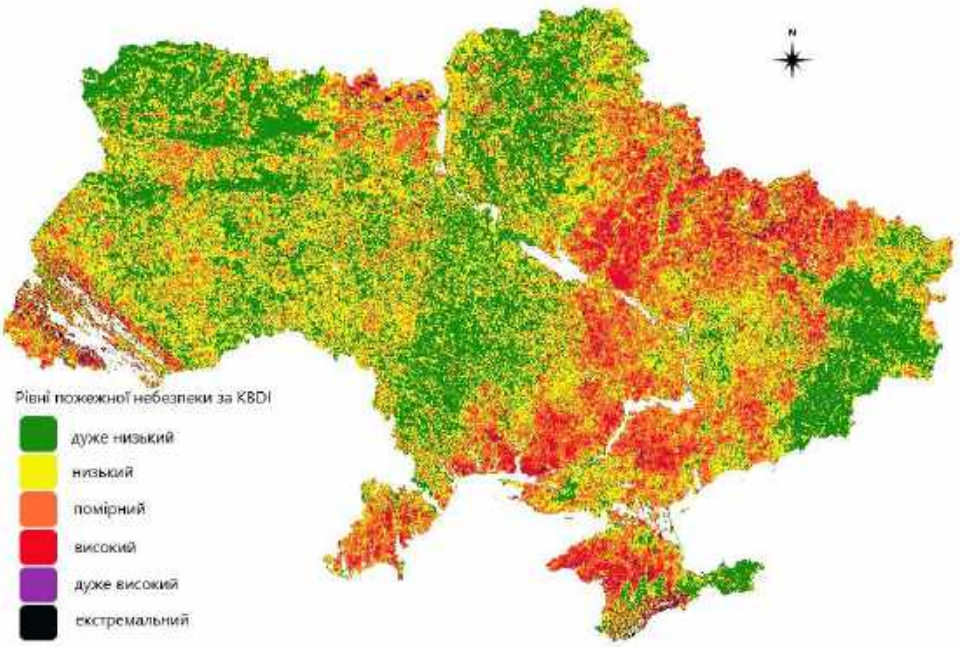


Рисунок 5.25 – Класифікований за рівнями пожежної небезпеки растр індексу KBDI для території України на 15.08.2021

Для побудови матриці невідповідностей (confusion matrix, contingency table, error matrix) [221, 222], яка містить 36 елементів, доцільною є побудова спеціального підготовчого растра класифікації з узагальненою назвою to_ConfMatrix, який містить дані 36 класів, причому кожен клас пікселів підготовчого растра утворений пікселями растра, що верифікується, і взірцевого растра, які утворюють всі можливі комбінації номерів класів рівнів пожежної небезпеки. Фрагмент підготовчого растру to_ConfMatrix для обчислення матриці невідповідностей зображений на рис. 5.26. Тут, зокрема, на півночі України, у зоні Полісся помітні ділянки з високим рівнем пожежної небезпеки, які у підготовчому растрі належать до класів з номерами (66 65 64, …), (56 55 54…) і номерами відповідних інверсних комбінацій.

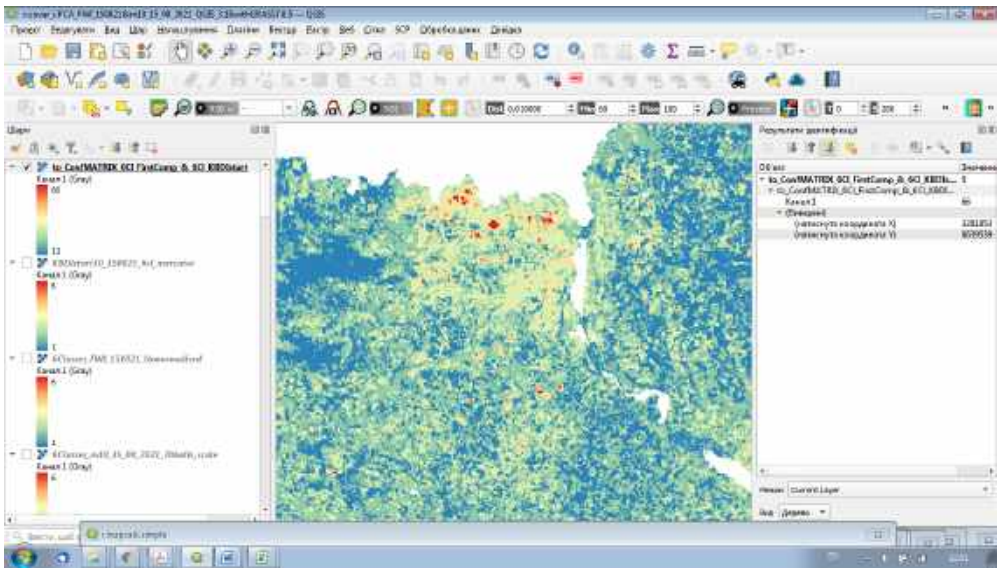


Рисунок 5.26 – Фрагмент підготовчого растра для обчислення матриці невідповідностей між класифікованими растрами: растром, що верифікується, та взірцевим

До растра to_ConfMatrix застосований у QGIS інструмент Raster layer unique values report [223] з меню Обробка даних/Растровий аналіз/Raster layer unique values report, який дозволяє отримати список унікальних значень кожного з двозначних номерів 36 класів значень комбінацій рівнів пожежної небезпеки та кількість таких пікселів для кожного унікального значення.

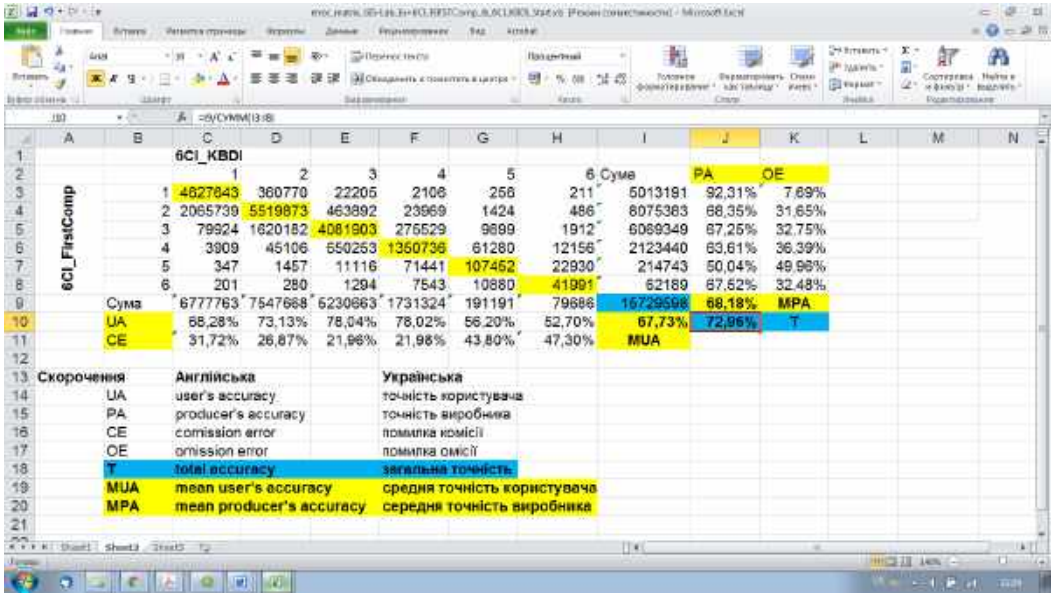
На основі результатів обробки унікальних значень пікселів підготовчого растра to_ConfMatrix побудовано матрицю невідповідностей [221, 222] між растрами класифікації 6Cl_FirstComp і 6Cl_KBDI, яку зображено на рис. 5.27, і обчислені характеристики точності та помилок класифікації за рівнями пожежної небезпеки. Назви рядків матриці невідповідностей відповідають класам легенди класифікації растра, що верифікується, цей набір даних узагальнено названо 6Cl_FirstComp. Назви стовпців матриці відповідають класам легенди класифікації взірцевого растра, цей набір даних узагальнено названо 6Cl_KBDI. За результатами обчислення матриці невідповідностей (рис. 5.27) має місце достатньо задовільна відповідність між класифікованими растрами: тим, що

верифікується, і взірцевим, оскільки при верифікації у конкретному прикладі, що розглядається, досягнуті такі основні характеристики точності:

Загальна точність (total accuracy) T = 73%

Середня точність виробника (mean producer's accuracy) MPA = 68%

Середня точність користувача (mean user's accuracy) MUA = 68%



		6CI_KBDI								
		1	2	3	4	5	6	Сума	PA	OE
6CI_FirstComp	1	4827643	360770	22205	2106	256	211	5013181	92,31%	7,69%
	2	2065739	5519873	463892	23969	1424	486	8075383	68,35%	31,65%
	3	79924	1620182	4081903	276529	9899	1912	6069349	67,25%	32,75%
	4	3909	45106	550253	1350736	61280	12156	2123440	63,61%	36,39%
	5	347	1457	11116	71441	107452	22930	214743	50,04%	49,96%
	6	201	280	1294	7543	10880	41991	62189	67,52%	32,48%
	Сума	6777763	7547668	5230663	1731324	191191	79686	16729598	68,18%	MPA
	UA	68,28%	73,13%	78,04%	78,02%	56,20%	52,70%	67,73%	72,96%	T
	CE	31,72%	26,87%	21,96%	21,98%	43,80%	47,30%	MUA		

Скорочення	Англійська	Українська
UA	user's accuracy	точність користувача
PA	producer's accuracy	точність виробника
CE	comission error	помилка комісії
OE	omission error	помилка омісії
T	total accuracy	загальна точність
MUA	mean user's accuracy	средня точність користувача
MPA	mean producer's accuracy	середня точність виробника

Рисунок 5.27 – Матриця невідповідностей між класифікованими растрами: узагальненим індексом пожежної небезпеки, обчисленим із застосуванням методу головних компонент, і індексом пожежної небезпеки Кітча-Байрама

Ці характеристики слід розглядати як міри відповідності (точність – виробника, користувача) і невідповідності (помилка – омісії, комісії) між растром, що верифікується, і взірцевим растром.

Висновки. Розглянуті індекси характеризують пожежну небезпеку на основі наборів різнорідних геопросторових даних, які включають метеорологічні дані, супутникові та дані європейських баз гідрологічних властивостей ґрунтів. Саме використання двох останніх типів даних дозволяє досягти достатньо високого як для індексів пожежної небезпеки просторового розрізнення 250 м порівняно з розрізненням геопросторової сітки (0.25°x0.25°) чи меншим для наявних у вільному доступі продуктів

індексів пожежної небезпеки. Це є істотною перевагою методу оцінювання пожежної небезпеки, розробленого у межах даного проєкту.

5.5 Тестування ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж з використанням даних ДСНС та супутникових даних

Оцінювання точності ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж проводиться з використанням наступних тестових даних: супутникових продуктів активних пожеж інформаційної системи FIRMS; карт температури земної поверхні; маски хмар; карт покращеного індексу пожежонебезпеки для території України; карт класифікації земного покриву України.

Супутниковий продукт системи FIRMS, що містить інформацію щодо активних пожеж, та використовується у нашому дослідженні – *MCD14DL* [228]. Виявлення пожежі виконується за допомогою контекстного алгоритму, який використовує сильне випромінювання середнього інфрачервоного діапазону від пожеж. Алгоритм MODIS перевіряє кожен піксель смуги MODIS і в кінцевому результаті привласнює кожному один з наступних класів: відсутні дані, хмара, вода, не пожежа, пожежа або невідомий. Кожна гаряча точка / виявлення активної пожежі є центром пікселя, зазначеного як такий, що містить одну або кілька пожеж або інші теплові аномалії. Розмір пікселя для MODIS становить приблизно 1 км.

У таблиці атрибутів для продукту MCD14DL у форматі SHP одним із полів є «confidence» (впевненість/достовірність). Значення даного поля базується на наборі проміжних величин алгоритму, що використовуються в процесі виявлення пожеж, та призначене для допомоги користувачам в оцінці якості окремих пікселів гарячої точки / вогню. Оцінки достовірності знаходяться в діапазоні 0–100 % і відносяться до одного з трьох класів пожежі (пожежа з низьким ступенем достовірності, пожежа з номінальним ступенем достовірності або пожежа з високим ступенем достовірності). Це

значення достовірності надається, щоб при використані продукту можна було оцінити якість окремих пікселів з позиції виключення помилкових спрацьовувань при загорянні.

У нашому випадку, для уточнення продукту MCD14D на основі даного поля з таблиці атрибутів, у розробленій ймовірнісній моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж використовуються карти температури земної поверхні, створені з використанням методу збільшення просторового розрізнення супутникових даних Sentinel-3 на основі злиття даних Sentinel-2, Landsat-8 та Sentinel-3 (підрозділ 3.1 Звіту). Дані Sentinel-3 дають можливість визначити місцезнаходження пожежі з високою точністю та проводити моніторинг пожеж у режимі, близькому до реального часу. І, зокрема, карти температури земної поверхні є найкращим джерелом інформації щодо пожежі на торфовищі, оскільки за місцем події на карті відображається аномально висока температура земної поверхні.

Також для уточнення даних FIRMS стосовно активних пожеж використовуються продукти, отримані на основі супутникових даних високого просторового розрізнення (Sentinel-2), попередня обробка яких (маскування хмар та тіней від них) здійснюється згідно методу, описаного у підрозділі 3.2 Звіту.

Для побудови уточненої карти активних пожеж FIRMS використовується формула:

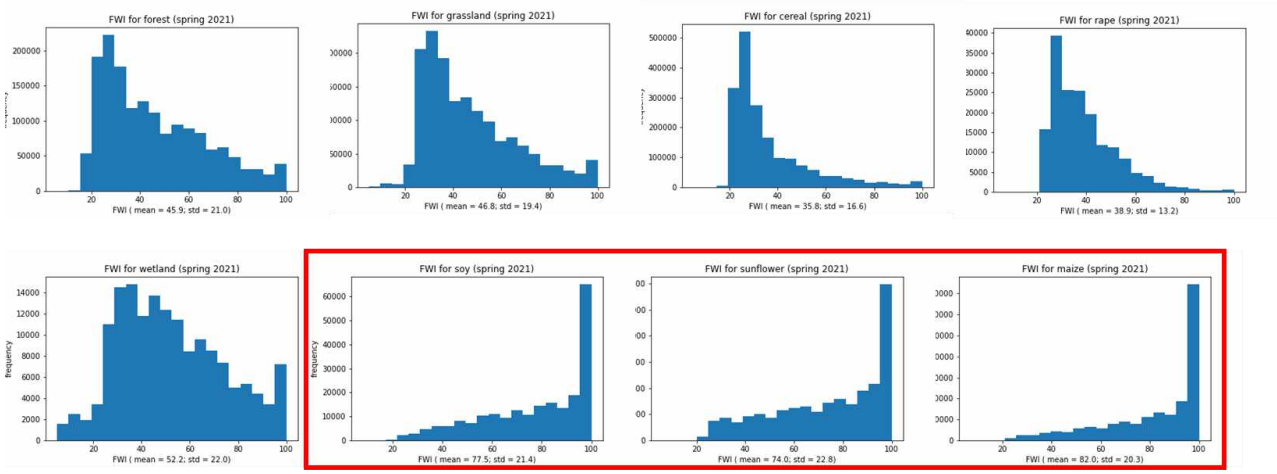
$$FIRMS_s(x,y) = \begin{cases} 1, \textit{ якщо } (FIRMS(x,y) \cup LST(x,y)) \cap LST(x,y) = 1 \\ 0, \textit{ якщо } FIRMS(x,y) \cap LST(x,y) = 0 \end{cases},$$

де $FIRMS_s(x,y)$ – значення пікселя (x,y) уточненої карти пожеж FIRMS за рахунок продуктів, отриманих з використанням методів, описаних у підрозділах 3.1 і 3.2 Звіту; $FIRMS(x,y)$ – значення пікселя (x,y) карти пожеж FIRMS по атрибуту «confidence» ($FIRMS(x,y)=1$ – пожежа зафіксована, $FIRMS(x,y)=0$ – пожежа відсутня); $LST(x,y)$ – значення пікселя (x,y) карти

температури земної поверхні ($LST(x, y) = 1$ – пожежа зафіксована, $LST(x, y) = 0$ – пожежа відсутня).

Для локалізації зон виявлення та поширення пожеж згідно розробленої методології використовується карта класифікації земного покриву для України відповідного року. Зокрема, карту для 2021 р. наведено на рис. 4.18. Класи земного покриву перерозподіляються згідно наступних міркувань: в залежності від пори року ті чи інші сільськогосподарські культури об'єднуються в один клас. Кожному з утворених класів відповідає деяке значення ймовірності виникнення та поширення пожежі на даній території.

На наведених нижче рисунках наведені діаграми частот для різних періодів часу та різних типів сільськогосподарських культур та типів земного покриву. З рис. 5.28 можна зробити висновок, що у весняний час найбільш небезпечними є сільськогосподарські території, на яких залишились неприбрані залишки врожаю з попереднього вегетаційного сезону.



Суха стерня на полях

Рисунок 5.28 – Аналіз індексу FWI_{impr} за типами культур та типами земного покриву у весняний період

Іншими словами, у весняний період під небезпекою перебуваються ті поля, які в поточному році будуть засіяні ярими культурами, такими як соняшник, кукурудза, соя. Також у весняний період значний рівень

пожежонебезпеки мають зони боліт. На рис. 5.29 зображено аналогічний результат аналіз, лише для літнього проміжку часу. В літній період найбільша пожежонебезпека спостерігається також на сільськогосподарських полях після збору врожаю зернових культур та ріпаку, а також частково для лугів / пасовищ / пару.

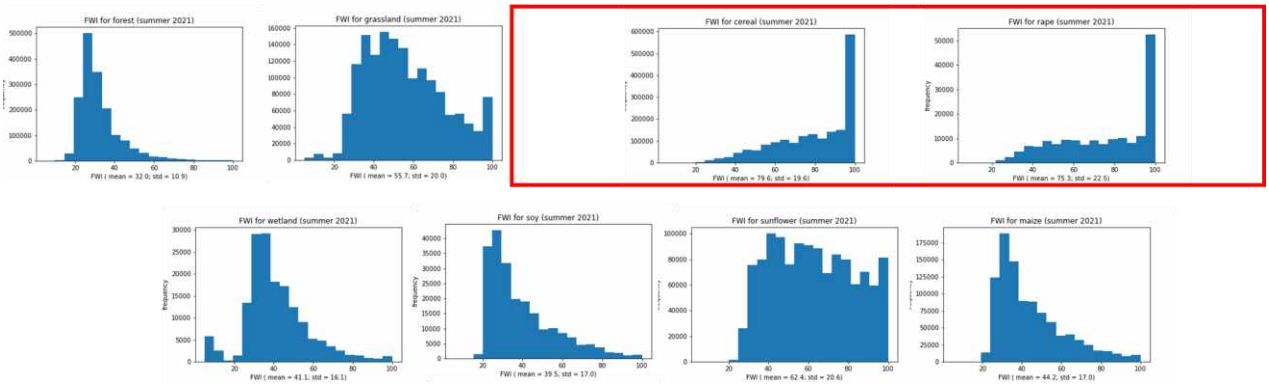


Рисунок 5.29 – Аналіз індексу FWI_{impr} за типами культур та типами земного покриву у літній період

З рис. 5.30, який демонструє аналіз частоти розподілу індексу FWI_{impr}, можна зробити висновок, що в осінній період найбільш небезпечними є вже всі сільськогосподарські території, на яких залишились неприбрані залишки врожаю, а також території, які покриті травою.

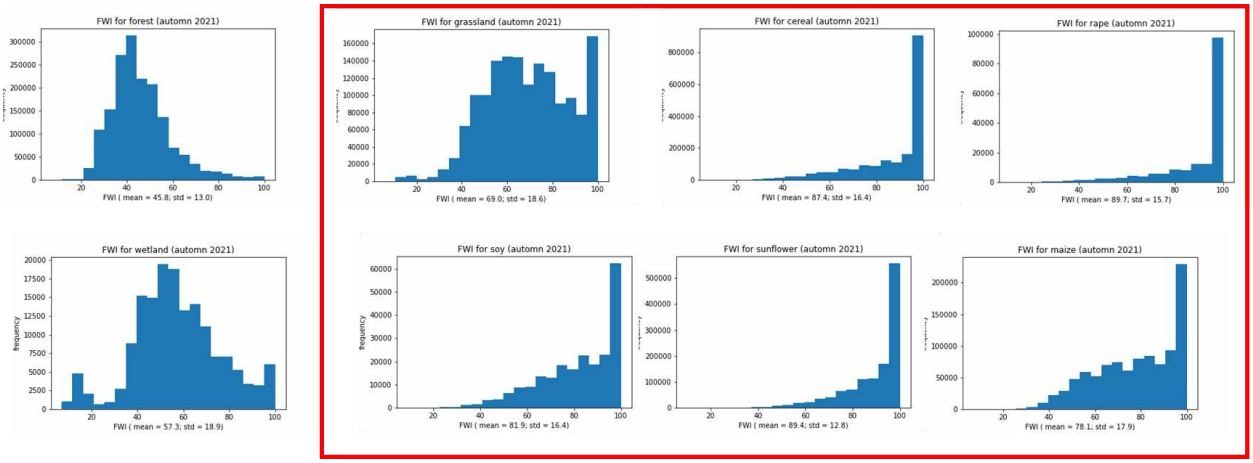


Рисунок 5.30 – Аналіз індексу FWI_{impr} за типами культур та типами земного покриву у осінній період

Тестування ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та поширення пожеж також відбувалося з використанням даних ДСНС України [108] щодо пожеж по областям за літній та осінній періоди (червень–вересень 2021 р.), рис. 5.31.

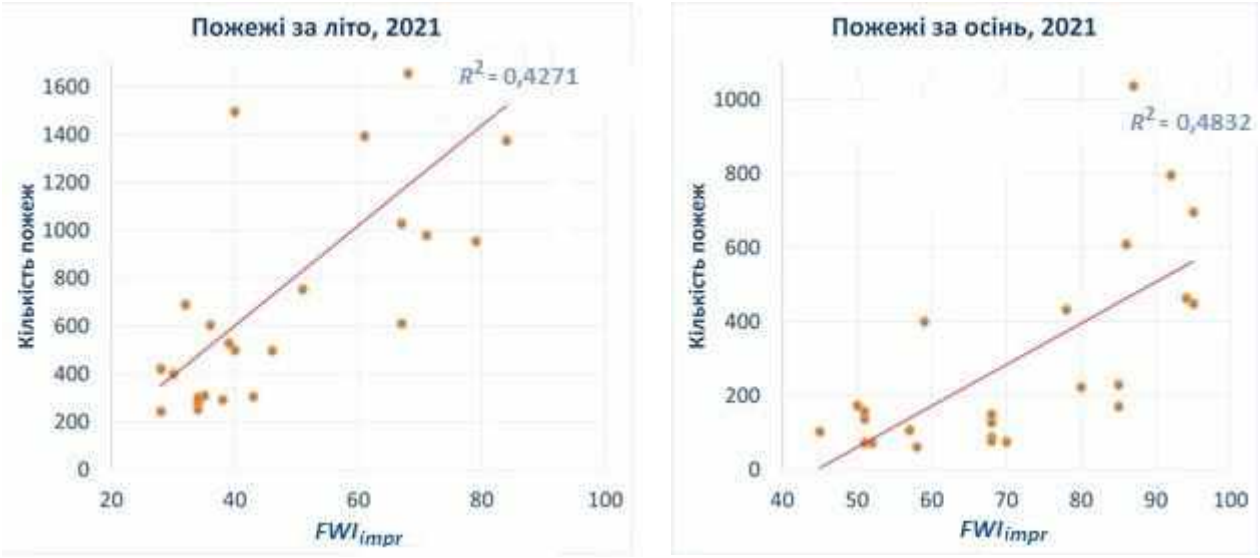


Рисунок 5.31 – Залежність кількості пожеж за статистикою по 24 областям України від індексу FWI_{impr}

Визначена кількість пожеж по областях включає всі без виключення факти (зокрема, побутові та інші, які не пов'язані з оцінюваним індексом). Проведене оцінювання залежності кількості пожеж від величини індексу FWI_{impr} (для літнього періоду коефіцієнт кореляції Пірсона $R = 0{,}65$, для осіннього $R = 0{,}7$) показало, що даний індекс добре корелює з реальними пожежами по областях, які спостерігаються в різні періоди року. Зважаючи на це, наведені оцінки щодо співставлення виглядають достатньо обнадійливо щодо подальшого використання застосованого підходу.

Висновки. Проведено тестування розроблених методів, що використовуватимуться при оцінюванні пожежної небезпеки різних типів природних екосистем та ймовірнісної моделі локалізації місця зон виявлення та поширення пожеж, у вигляді сценаріїв в хмарній платформі Google Earth Engine.

6 СТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА МОНІТОРИНГУ ПОЖЕЖ У ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

6.1 Визначення джерел та форматів вхідних даних для інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж і форматів вихідних даних інформаційної технології, що підтримуються WMS та WFS стандартами передачі геопросторових даних

Визначення вхідних джерел даних. При створенні бази даних інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж використовуються дані, що надаються засобами дистанційного зондування Землі (супутниками) та метеорологічними станціями. Отримані дані є сирими, та потребують попередньої обробки для представлення результатів.

На даний момент завантажено 11.25 тб даних супутників Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat-8 та метеорологічних даних (швидкість вітру, кількість опадів, температура повітря, відносна вологість). Для їх збереження, враховуючи обсяг отриманих даних, використовується хмарне сховище Amazon Web Services. Дані доступні за посиланням в хмарному сховищі Amazon S3 s3://fire-project. Для супутникових знімків серії Sentinel і Landsat-8 було здійснено попередню обробку, після якої дані стали займати 5.3 тб в форматі GeoTIFF. Даний формат представляє растрові дані та містить метаінформацію, де кожен піксель має географічну прив’язку. Таким чином, всі растрові карти території України у форматі GeoTIFF було зведено до однієї проекції, а саме WGS 84 / UTM zone 36N.

Приклади використання технології WMS та WFS. Сервіс CAMS надає доступ до даних, що використовуються у глобальній інформаційній

системі пожеж GWIS (Global Wildfire Information System) [229]. Дані для перегляду поточної ситуації надаються з використанням технології WMS (Web Map Service). GWIS використовує продукт супутника MODIS (MCD64A1) як джерело для створення бази даних пожежної небезпеки. Пост-обробка агрегує в часі та просторі пікселі, що ідентифікують пожежі, виділяючи займання та обчислюючи кінцеву область спалених ділянок. Кожен випадок загоряння позначається унікальним числовим ідентифікатором. Використовуючи посилання технології WMS, яке надає сервіс CAMS, карту пожежної небезпеки для всього світу можна переглянути в програмному забезпеченні ГІС та у веб-браузері (рис. 6.1). Карта є результатом попередньої обробки даних супутника MODIS (MCD64A1) та складається з 6 рівнів пожежної небезпеки. Згідно формату даних для представлення карта має проекцію EPSG:4326, для того щоб зберегти відповідність щодо географічного розташування. На даний час GWIS надає статистику за період з 2001 р. по сьогоднішній день.

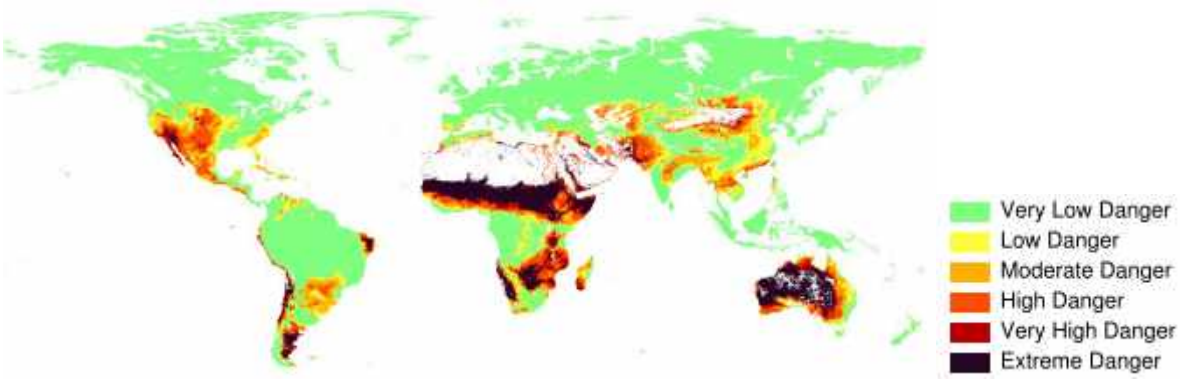


Рисунок 6.1 – Глобальна інформаційна система пожеж (GWIS) з використанням технології WMS [229]

Сервіс CAMS також надає дані про активні пожежі в форматі WFS (Web Feature Service). Даний формат застосовується для векторних даних. Для того щоб отримати дані, потрібно надіслати запит і коли вони будуть готові для завантаження, користувач отримає електронний лист із

інструкціями щодо завантаження. Сервіс CAMS підтримує 3 формати вихідних даних (.shp), (.csv), (.json).

Додатковим джерелом даних для моніторингу пожежонебезпеки від NASA є сервіс FIRMS. Цей сервіс пропонує растрові карти зображень пожеж, також використовуючи технологію WMS. Принцип роботи сервісу FIRMS за допомогою технології WMS зображено на рис. 6.2 [230].

Рисунок 6.2 – Огляд системи імпорту даних FIRMS (керування за допомогою WMS та розповсюдження) [230]

Всі карти надаються в проекції EPSG:4326. Наприклад, за посиланням WMS можна отримати доступ до активних пожеж сервісу NASA, використовуючи програмне забезпечення ГІС для відображення даних (рис. 6.3) [230].

Рисунок 6.3 – Карта активних пожеж з використанням технології WMS [230]

Також дані FIRMS надаються в форматі WFS та за запитом користувача можна отримати доступ до них. Дані сервісу FIRMS оновлюються раз на 15 хвилин [231]. Для того, щоб отримати дані потрібно надіслати запит «MAP_KEY». Ліміт запитів для цього сервісу 500 транзакцій на кожні 10 хвилин.

Використання WMS та WFS для формування вихідних даних інформаційної технології оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж. Для представлення результатів інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж в даному проекті використовується технологія представлення геопросторових даних WMS. Вона дозволяє користувачеві запитувати та надавати заздалегідь зібрані зображення (що можуть містити як векторні, так і растрові дані) користувачу, який робить запит на сервер [232].

У WMS найважливішою одиницею інформації є шар. Кожен шар може відображатися у кількох стилях, кожен з яких пов’язаний із легендою. Шари можуть бути організовані ієрархічно.

WMS повинна підтримувати принаймні одну систему координат, а карти з декількох серверів можуть накладатися лише за умови, що всі вибрані сервери мають принаймні одну спільну систему координат. Міжнародний стандарт не вимагає підтримки будь-якої конкретної системи координат[233].

Маючи ключ доступу користувач може використовувати його в програмному забезпеченні ГІС, яке дозволяє взаємодіяти з технологією WMS. Посилання доступу до WMS для програмного забезпечення ГІС має вигляд: https://baseURL/map/versionNumber/wms/?key=Your_API_Key.

Для перегляду карти з використанням технології WMS відтворено три основні операції підготовки даних[234]:

1. GetCapabilities. Для того щоб представити дані для WMS технології, попередньо було створено XML файл, які містять метадані, доступні шари, версію, ключ авторизації API для доступу до растрової карти

інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж.

2. GetMap. Даний етап відповідає за відображення даних растрової карти, в нашому випадку відбувається відображення карти інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж. Параметрами відображення карти є: система координат; обмежувальна рамка в проекції растрової карти minLon, minLat, maxLon, maxLat; ширина отриманого зображення в пікселях; висота отриманого зображення в пікселях; формат зображення; шари карти.
3. GetFeatureInfo. При натисканні на карту відображає додаткову інформацію в певному пікселі (наприклад, індекс пожежної небезпеки в певному пікселі або координати пікселя).

Реалізація WMS інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж зображена на рис. 6.4.

Рисунок 6.4 – Схема WMS для інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж території України

Подібною технологією до WMS є WFS. Сервіс WFS приховує істинні сховища даних і програма-клієнт отримує потік векторних даних з бази даних або з файлу. У специфікації WFS визначено, що формат одержуваних даних має бути GML. Тем не менш, формат суворо не фіксований, а сервер

WFS може надавати додаткові дані. Наприклад, GeoJSON широко використовується у веб-додатках для компактності та легкої обробки в більшості мов програмування.

Сервіс WFS призначений для доставки векторних даних від сервера до клієнта (зчитування-запис) з мінімальною їх обробкою з можливістю накладання фільтрів.

Суб'єктом, що видає первинні стандарти для спільнот геоінформаційних систем, є відкритий геопросторовий консорціум OGC (Open Geospatial Consortium). OGC випустив багато специфікацій, які не обов'язково є специфічними для Інтернету, але є найбільш широко прийнятим для інструментів ГІС на основі Інтернету.

OGC Web Map дозволяє клієнту накладати зображення карти для відображення, використовуючи технологію WMS для представлення даних в Інтернеті. Подібним чином OGC дозволяє клієнту отримувати та оновлювати геопросторові дані, кодовані мовою географічної розмітки GML (Geography Markup Language).

Вимоги для представлення даних за технологією WFS:

1. Інтерфейс повинен бути визначений в XML (Extensible Markup Language).
2. GML повинен використовуватися для вираження функцій в інтерфейсі.
3. Як мінімум, WFS має представляти функції за допомогою GML.
4. Сховище даних, що використовується для зберігання географічних об'єктів, має бути непрозорим для клієнтських програм, і єдиний їх перегляд даних має здійснюватися через інтерфейс WFS.
5. Для посилання на властивості вектору повинні використовуватися XPath (шлях) мови XML.

Реалізація WFS для інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж зображена на рис. 6.5.

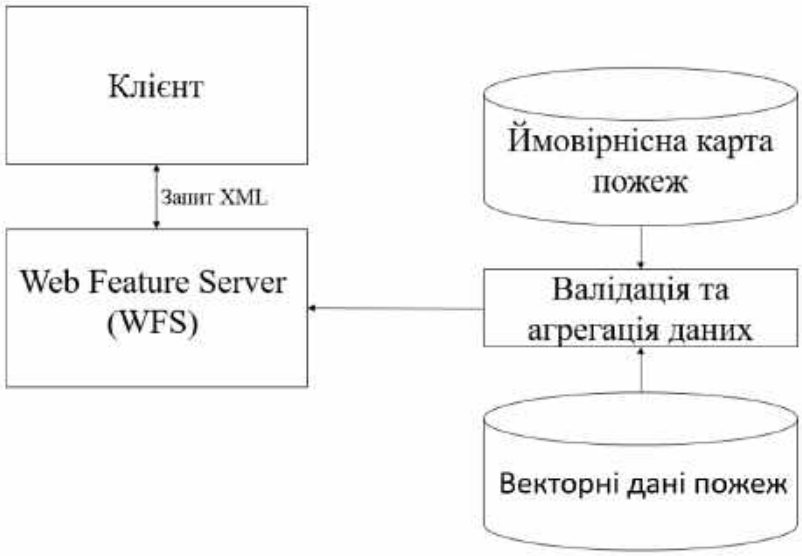


Рисунок 6.5 – Реалізація Web feature service

Приклад реалізації WMS та WFS для інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж. На основі описаної методології в підрозділі 3.3 Звіту реалізовано растрове представлення карти моніторингу пожежної небезпеки з використанням технології WMS, рис. 4.16. Для відображення карти за технологією WMS відтворено всі найбільш широко прийняті специфікації (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Параметрами відображення карти за технологією WMS

Параметри	**Дані**
система координат	EPSG:32636 - WGS 84 / UTM zone 36N
обмежувальна рамка зображення (широта, довгота)	303027.8458700000192039, 4915325.8606599997729063: 1025972.1541299999225885, 5803325.8606599997729063
ширина зображення в пікселях	1329
висота зображення в пікселях	888
формат зображення	GeoTIFF
результуючий шар на карті	5 рівнів пожежонебезпеки: дуже низький, низький, помірний, високий, екстремальний

Також реалізовано технологію WFS, яка містить векторні дані з точками пожеж для території України (рис. 6.6). Оскільки за специфікацією

технології WFS дані повинні бути приховані від клієнтів, на карті відображено лише вектори, які географічно відповідають растровій карті пожежонебезпеки для території України.

Рисунок 6.6 – Векторні дані з точками пожеж для території України

Для збереження відповідності векторних даних до географічного розташування дані растрової карти, яка представляється з використанням WMS, мають відповідати одній системі координат. Основні параметри технології WFS відображено в табл. .

Таблиця 6.2 – Параметрами відображення карти за технологією WFS

Параметри	**Дані**
система координат	EPSG:32636 - WGS 84 / UTM zone 36N
формат даних	ESRI Shapefile

Висновки. На основі завантажених та оброблених даних дистанційного зондування Землі, а саме супутникових знімків та метеорологічних даних, були створені растрові карти пожежної небезпеки для території України. Представлення результатів було виконано з використанням технологій WMS

і WFS. За допомогою WFS користувач може візуалізувати векторні дані у геоінформаційних системах.

6.2 Розробка структурної схеми інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж

За описаною в Звіті методологією відтворено етапи попередніх обробок даних для інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж. Кожен етап структурної схеми має вихідні результати, які в результаті формують карту рівнів пожежної небезпеки. Попередня обробка компонентів структурної схеми виконується в хмарній платформі GEE, оскільки зазначена платформа має зручний програмний інтерфейс API (application programming interface) для роботи із супутниковими даними, які є вхідними для відповідних алгоритмів. Також додатково завантажено дані, які є відсутніми в хмарній платформі GEE, та збережено в хмарному середовищі Amazon S3. Для реалізації обчислювально складних операцій обрано мову програмування Python, оскільки в такому разі є можливість реалізації нейронних мереж різних архітектур. Структурну схему інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж представлено на рис. 6.7.

Карти класифікації. Завдяки даним дистанційного зондування Землі кожна територія покривається супутниковими знімками з певною періодичністю. Оскільки більшість оптичних знімків є захмареними і через це втрачається велика кількість даних, тому карта будується на основі поєднання супутникових даних Sentinel-1 SAR та Sentinel-2. Часові ряди супутникових даних складаються приблизно з 16-20 дат протягом вегетаційного періоду для кожної точки земного покриву. Радарні супутникові дані Sentinel-1 мають канали VH та VV поляризації, завдяки яким є можливість бачити землю в будь який час дня і ночі, не зважаючи на хмари. Карта класифікації земного покриву отримана на основі зібраних

наземних даних згідно міжнародного стандарту міжнародної мережі полігонів сільськогосподарського призначення JECAM (Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring) [235]. Карта класифікації для території України будується із використанням ансамблю нейронних мереж, та має просторове розрізнення 10м [236].

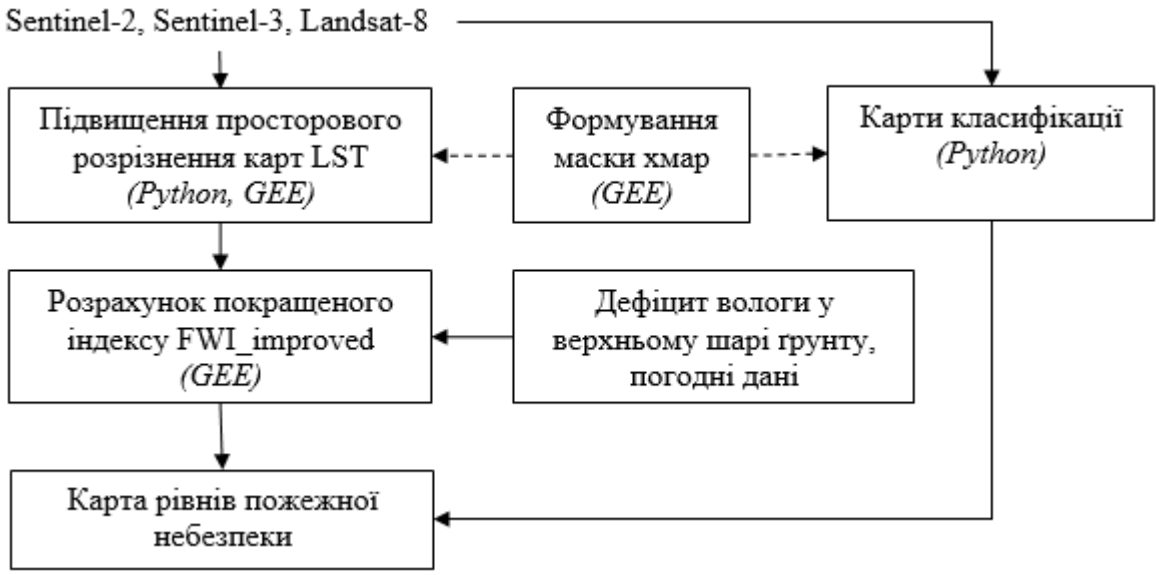


Рисунок 6.7 – Структурна схема інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж

Використання погодних даних. На основі описаної методології в Звіті запропоновано отримувати погодні дані із сервісів CAMS та NASA Power. Такий підхід в цілому є прийнятним для задач нашого дослідження, хоча дані NASA Power мають низьке просторове розрізнення 50 км, і тому доцільно використовувати дані з температурних каналів супутників MODIS (просторове розрізнення 1 км), які доступні для використання в GEE та дані, які були попередньо завантажені та оброблені Sentinel-3 (просторове розрізнення 1 км) та Landsat-8 (просторове розрізнення 30 м).

Формування маски хмар. Важливим моментом при отриманні якісних продуктів є велика кількість супутникових даних (часові ряди). Завдяки високій частоті зйомки можна отримати більш детальну зміну земного

покриву. Головним недоліком є захмарені супутникові знімки, які впливають на якість продукту. Формування маски хмар є одним з процесів попередньої обробки, завдяки якому відокремлюються хмари від супутникового знімку. Формування маски хмар та тіней реалізовано в хмарній платформі GEE. Для супутника Landsat-8 використовується стандартна маска хмар QA60, яка є досить точною. Для оптичного супутника Sentinel-2 в даному проекті реалізовано власні методи відокремлення хмар, через те, що існуючі методи виявлення хмар та тіней не є досить точними. Даний алгоритм виявлення хмар є більш точним, в порівнянні з алгоритмом Sen2cor має більший відсоток виявлення хмар. Для супутника Sentinel-3 використовується стандартна маска хмар. Оскільки дані є низького просторового розрізнення, тому впровадження додаткових методів виявлення хмар не потрібно, маска повністю покриває всі хмари та тіні, завдяки поєднанню смуг OLCI та SLSTR.

Підвищення просторового розрізнення карт LST. Оскільки дані супутника Sentinel-3 надаються кожного дня, а дані супутника Landsat-8 кожні 16 днів, використовуючи мову Python реалізовано підвищення просторового розрізнення карт LST з високим просторовим та часовим розрізненням. Метод грунтується на математичній моделі нейронної мережі LSTM, де для різних за площею територій виконується підбір гіперпараметрів, в залежності від класів карти класифікації земного покриву. Для валідації використовуються дані супутника Landsat-8.

Розрахунок покращеного індексу FWI_{impr}**.** Розрахунок FWI_{impr} здійснюється в хмарній платформі GEE та включає в себе стандартний індекс *FWI*, який базується на основі погодних даних. Оскільки стандартний індекс *FWI* має недолік – розраховується лише за метеорологічними даними та без врахування типів палива і властивостей ґрунту, то покращений індекс FWI_{impr} включає в себе карти класифікації, отримані із оптичних супутникових даних, карти температур із збільшеним просторовим розрізненням, та ще один додатковий шар із дефіцитом вологи ґрунту. Дані,

які використовуються для оцінювання FWI_{impr} на основі індексу FWI є попередньо завантаженими в наше хмарне сховище Amazon S3. Для представлення результатів вони проходять попередню обробку, а саме зводяться до однієї проекції WGS 84 / UTM zone 36N, та до одного формату даних GeoTIFF. Даний формат даних дозволяє взаємодіяти між погодними даними в растровому вигляді, де кожен піксель зображення є географічно прив'язаним та містить інформацію щодо певного типу погодних даних.

Карта рівнів пожежної небезпеки. На основі попередніх етапів робіт реалізовано карту рівнів пожежної небезпеки для території України, яка представляється в растровому форматі та має просторове розрізнення 250 м. Кожен піксель містить інформацію щодо рівня пожежної небезпеки.

6.3 Розробка схеми інформаційних потоків інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж, що може бути реалізована в хмарному середовищі Amazon

Реалізація складних обчислень для інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж може бути реалізована в хмарному середовищі Amazon. Хмарна платформа GEE пропонує дані, які є готовими для аналізу, але реалізація відбувається лише вбудованими методами, тому розробка власних архітектурних рішень є неможливою. На відміну від хмарної платформи GEE дані для реалізації інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж мають бути попередньо завантаженими, оскільки хмарне середовище Amazon не надає готові для аналізу супутникові дані, а лише надає обчислювальні ресурси. Тому для реалізації інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж використовуються дані із хмарної платформи GEE, а додаткові методи обробки даних реалізуються в хмарному середовищі Amazon. Схему інформаційних потоків запропонованої інформаційної технології наведено на рис. 6.8.

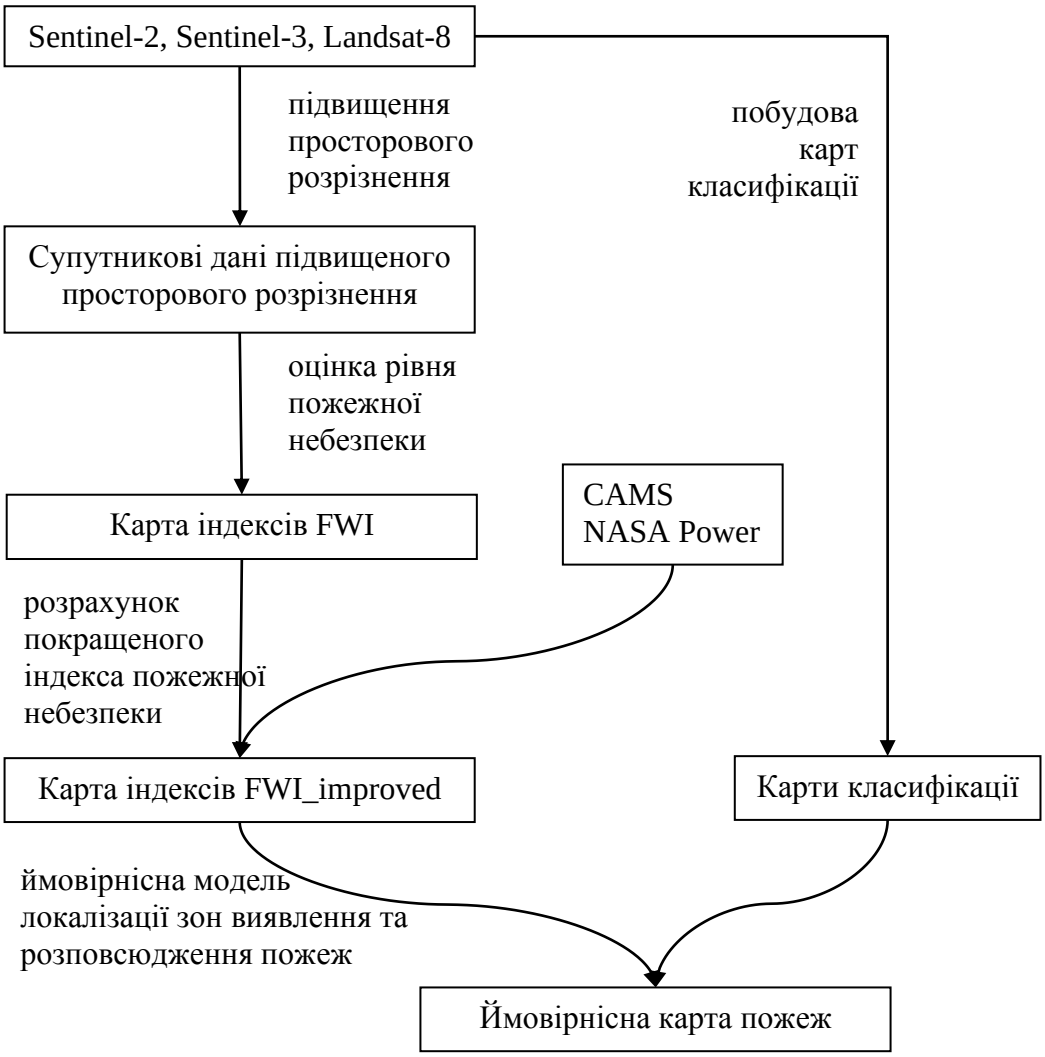


Рисунок 6.8 – Структурна схема інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки та виявлення пожеж

Реалізація в хмарному середовищі Amazon складається з наступних етапів: підвищення просторового розрізнення реалізовано на Python, побудова карт класифікації реалізовано на Python, оцінка рівня пожежної небезпеки може бути реалізовано на Python, розрахунок покращеного індекса пожежної небезпеки може бути реалізований на Python.

Отже, виконання програмної реалізації, запропонованої у нашому дослідженні інформаційної технології у хмарному середовищі AWS, можливе із використанням instance (віртуальної машини AWS) відповідної конфігурації:

– операційна система (локальне тестування проводилось на комп’ютерах з операційними системами Windows 10, але розроблений програмний код може виконуватись і на операційних системах сімейства Linux, наприклад, Ubuntu),

– установлений інтерпретатор Python,

– установлені програмні бібліотеки, які використовуються у розробленій програмній реалізації.

У випадку використання хмарного середовища AWS виникає задача отримання вхідних даних – на відміну від хмарного середовища GEE, яке має API для завантаження необхідних для запропонованої інформаційної технології супутникових даних. Поставлена задача може бути вирішена шляхом попереднього завантаження необхідних вхідних (супутникових) даних у хмарне сховище AWS; при цьому попередню обробку оптичних даних має сенс проводити в GEE з подальшим завантаженням у хмарне сховище AWS попередньо оброблених даних. Схематичне зображення підходу наведено на рис. 6.9.

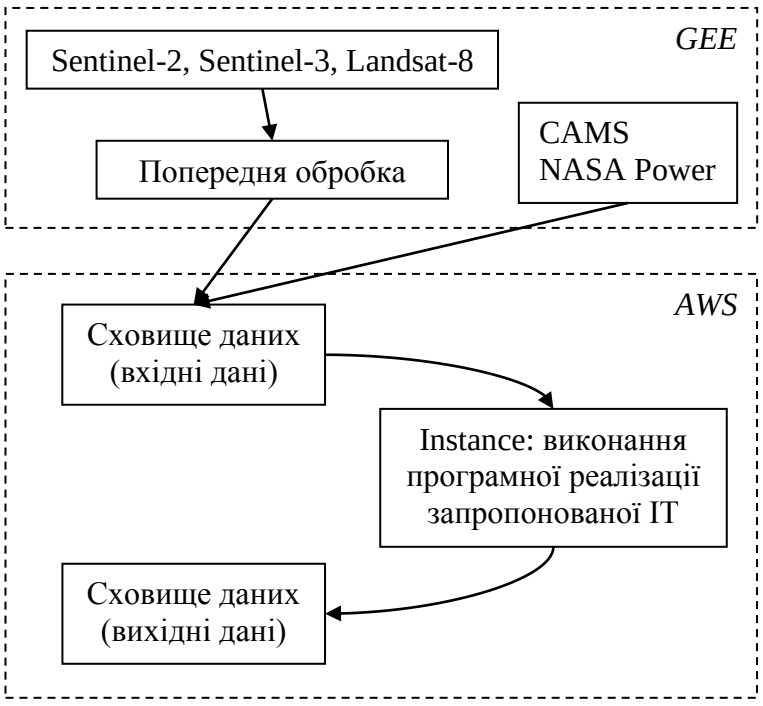


Рисунок 6.9 – Схематичне зображення виконання програмної реалізації запропонованої інформаційної технології із використанням хмарного середовища AWS

Завдяки взаємодії хмарного сховища Amazon S3 та Amazon EC2 дані зберігаються та обробляються в хмарному середовищі. Хмарні сервіси Amazon дозволяються з легкістю взаємодіяти з даними та створювати власні методи та архітектури нейронних мереж.

6.4 Реалізація інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки на основі розробленої програмної реалізації методу оцінки пожежної небезпеки

Для розв’язання задачі моніторингу пожежної небезпеки запропоновано адаптувати програмні реалізації методу оцінки пожежної небезпеки у вигляді інформаційної технології. В основу моніторингу пожежної небезпеки покладено побудову моделей, для якої необхідно два оснівних блока: сховище даних та обчислювальні ресурси рис. 6.10. Розглянемо ці блоки більш детально.

Сховище даних забезпечує доступ до даних та їх зберігання. Дані зберігаються на спеціалізованому обладнанні, налаштування якого передбачає автоматичне створення резервних копій та довготривалу підтримку збереження даних, але із низькою швидкістю. Для зберігання поточних та проміжних результатів використовується операційне сховище, яке забезпечує мінімальну затримку при збереженні та доступі до даних. Для деяких даних (зокрема супутникових Sentinel-2) доступ здійснюється через GEE, а результати обробки зберігаються на бакеті AWS Simple Cloud Storage (S3). Фізично вони розташовані окремо і доступні через мережу, але робота із такими даними для користувача ідентична роботі з локальною файловою системою.

Обчислювальні ресурси використовуються для попередньої оброки та підрахунків із використанням розроблених моделей. Для цього виокремлюються EC2 Instance із необхідними мінімальними характеристиками.

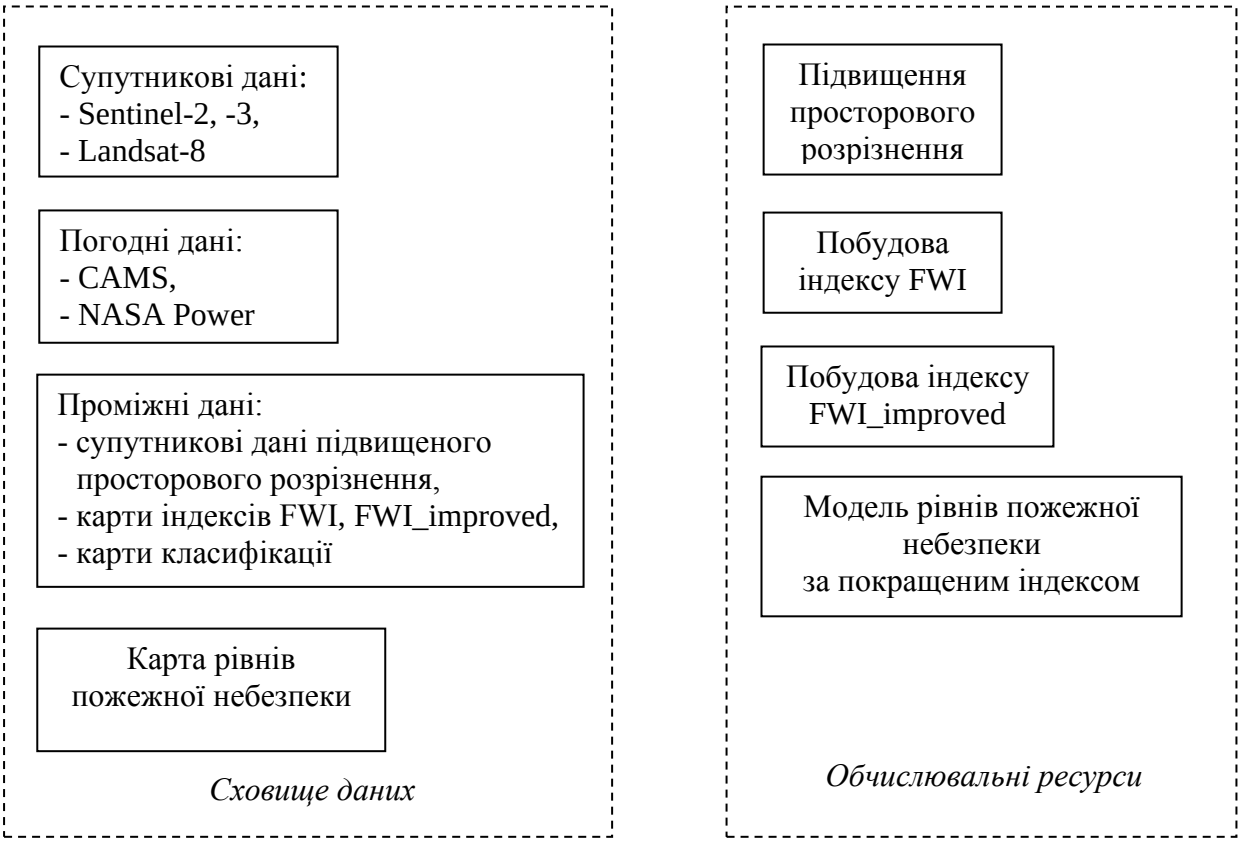


Рисунок 6.10 – Схема інформаційної технології моніторингу пожежної небезпеки на рівні реалізації

Розглянемо детальніше приклад реалізації інформаційної технології методу оцінки пожежної небезпеки. Після обрахунку індексу FWI_{impr} виконується побудова карти рівнів пожежної небезпеки згідно алгоритму на рис. 6.11, у межах якого значення на карті розподіляються на п’ять градацій. Приклад результуючої карти представлено на рис. 5.20.

Якщо у результаті виконання коду на карті немає значень, жодна із умов не була виконана, це означає, що супутниковий знімок повністю захмарений. Після чого програма починає завантажувати та обробляти дані за інший день.

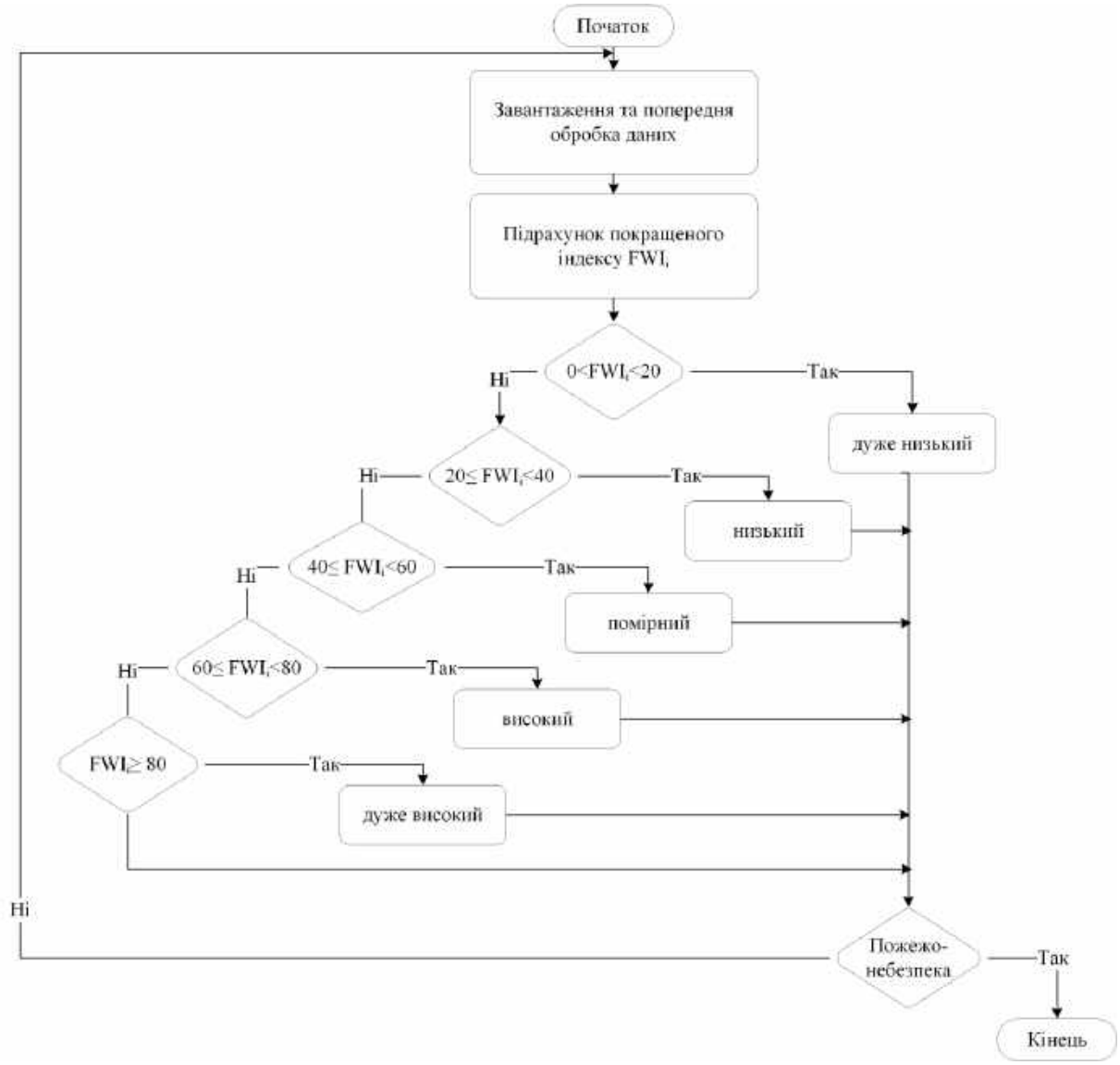


Рисунок 6.11 – Схема визначення рівнів пожежонебезпеки

6.5 Реалізація інформаційної технології моніторингу пожеж на основі розробленої програмної реалізації ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та розповсюдження пожеж

Для реалізація інформаційної технології моніторингу пожеж на основі розробленої програмної реалізації ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та розповсюдження пожеж використано мову програмування Python.

Щоб мінімізувати помилкові тривоги та відфільтрувати активні пожежі, які не кваліфікуються як пожежі у природних екосистемах,

інформаційна система відображатиме лише відфільтровану підгрупу гарячих точок, виявлених FIRMS. З цією метою застосовуються методи, описані у підрозділах 3.1 і 3.2 Звіту. На основі підрахованого покращеного індексу FWI_{impr} (детальний підрахунок якого розглянуто у підрозділі 3.3 Звіту) та з використанням карти класифікації земного покриву і типів сільськогосподарських культур (розглянуто в розділі 5.5) проводитиметься аналіз впливу земного покриву на отриманий індекс FWI_{impr} з використанням методів штучного інтелекту. Це дасть можливість визначити, який тип землекористування характерний для того чи іншого пікселя та зрозуміти, якщо відбулая пожежа, що саме горить, та, у майбутньому, продовживши дане дослідження, контролювати небезпечні ситуації.

Враховуючи наведене, розроблена інформаційна технологія визначення ймовірнісної моделі локалізації зон виявлення та розповсюдження пожеж складається з трьох етапів (рис. 6.12). Перш за все, вона базується на основі покращеного індексу FWI_{impr}. Карта класифікації земного покриву використовується для визначення типу землекористування чи типу культури, відносно чого у подальшому приймається рішення щодо використання вагових коефіцієнтів при розрахунку ймовірнісної моделі виникнення пожежонебезпеки. На вагові коефіцієнти мають вплив також пори року. За наведеною схемою X_n – ваговий коефіцієнт, який використовується для весняного періоду для класу земного покриву n, Y_n – ваговий коефіцієнт, який використовується для літнього періоду для класу земного покриву n, Z_n – ваговий коефіцієнт, який використовується для осіннього періоду для класу земного покриву n. Додатково для уточнення результуючої ймовірнісної моделі використовується інформація про пожежі, які дійсно сталися у період дослідження.

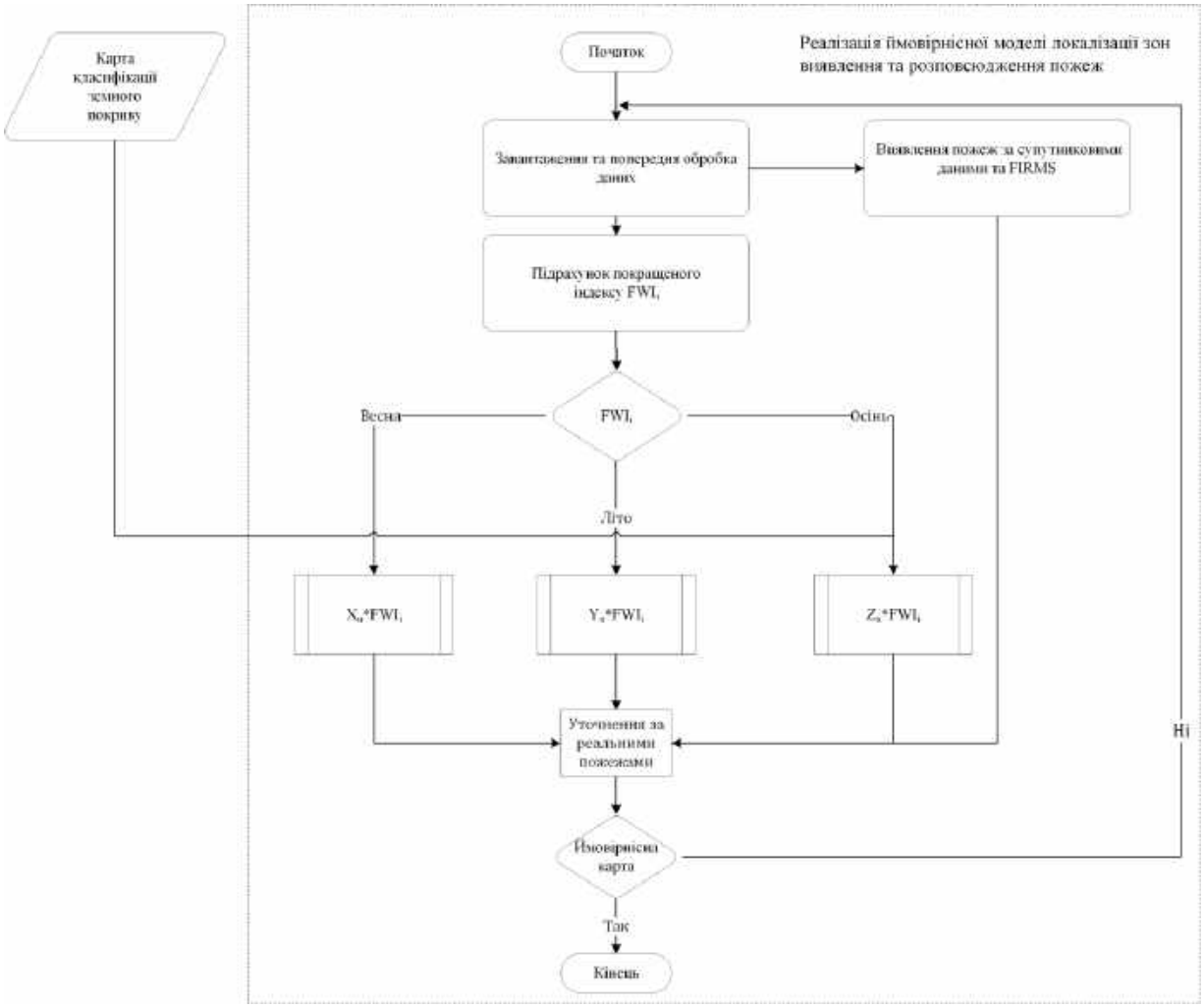


Рисунок 6.12 – Схема отримання ймовірнісної карти

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу проблеми оцінювання пожежної небезпеки, чинників та передумов виникнення пожеж у екосистемах України та світу визначені необхідні джерелі та характеристики супутникових, наземних та статистичних даних для побудови нової технології оцінювання пожежної небезпеки; проаналізована значущість методів виявлення та відновлення пропусків від хмар для обробки мультисенсорного серії супутникових даних; обрані у якості базових, підходи, які успішно використовуються у канадській методології визначення погодного індексу лісових пожеж FWI (Fire Weather Index).
2. Розроблено процедури збирання великих обсягів супутникових та наземних даних, зокрема завантаження погодних даних з сервісу Copernicus Atmosphere Monitoring Service, глобальної атмосферної моделі NASA Power, даних з сервісу CAMS, набору даних про надзвичайні ситуації, пов'язані з вогнем, на основі інформації ДСНС; проаналізовані інформативні ознаки у колекції супутникових та погодних даних, що є причинами надзвичайних подій; проаналізовано предиктори пожежної небезпеки; розроблено процедури щодо гармонізації супутникових даних високого та низького просторового розрізнення, формування спільного часового ряду на їх основі.
3. Розроблено оригінальний метод підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні на основі мультиспектральних даних високого просторового розрізнення. Ефект збільшення просторового розрізнення карт, одержаних супутником Sentinel-3 досягнуто на основі застосування математичної моделі нейронної мережі LSTM з архітектурою «Всі в один», часових рядів карт NDVI та LST. Метод надає можливість отримувати температурні карти земної поверхні кожні 2–3 дні з 30-ти метровим просторовим розрізненням.

4. Розроблено метод виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення на основі індексів NDMI (Normalized Difference Moisture Index), NDSI (Normalized-Difference Snow Index) та специфіки інтенсивності відбитого світла від хмар, що вимірюється супутниковим сенсором у різних діапазонах, з урахуванням кута зйомки та зміщення тіні від хмари, а також пошук темних пікселів (dark pixels) із використанням інформації з NIR та SWIR каналів. Метод може бути застосований і для низки супутникових даних, зокрема Proba-V, MODIS та Sentinel-3,5.
5. На основі модернізованої методики FWI розроблено новий метод оцінювання пожежної небезпеки. Модифікація методу FWI передбачає зокрема залучення індексу дефіциту вологи у ґрунті окрім усталених шести компонентів (субіндексів) системи FWI, які є предикторами добового потенційного загоряння. Їх розрахунки включають погодні дані сервісу CAMS і глобальної атмосферної моделі NASA Power. Новий метод із залученням супутникових, погодних та геопросторових даних дозволяє узагальнити індекс FWI на основні класи екосистем (ліси, луки, чагарники, с/г угіддя) та пожежну небезпеку у континентальних масштабах з просторовим розрізненням 250 м та 1 км та щоденним часовим розрізненням.
6. В рамках модернізації методу FWI запроваджено новий підхід для обчислення дефіциту вологи верхнього шару ґрунту SMD (Soil Moisture Deficit), який суттєвим чином відповідає за виникнення та перебіг пожежі в природній екосистемі. Підхід включає використання радіолокаційних супутникових даних Sentinel-1, а також геопросторові дані, зокрема, щодо фізичних і гідрологічних характеристик ґрунтів.
7. Запропоновано шкалу рівнів пожежної небезпеки, яка враховує діапазони значень нормованого дефіциту вологи у поверхневому шарі ґрунту. Шкала ідеологічно близька до шкали індексу посухи Кітча-Байрама, але

відрізняться зокрема введенням рівня, що відповідає від'ємному значенню індексу.

8. Побудовано ймовірнісну модель локалізації зон виявлення та поширення пожеж, яка протестована з використанням даних ДСНС України. Продемонстрована прийнятна кореляція з реальними пожежами по областях, які спостерігаються в різні періоди року.
9. Створено робочі програмні продукти для реалізації методу підвищення просторового розрізнення карт температури земної поверхні низького просторового розрізнення, методу виявлення хмар на супутникових даних високого та низького просторового розрізнення, методу оцінювання пожежної небезпеки для різних типів природних екологічних систем, ймовірнісної моделі локалізації місця зон виявлення та поширення пожеж.
10. Апробація запропонованого методу модифікації системи FWI демонструє принципове покращення точності та релевантності прогнозування пожежної небезпеки. Подальше доопрацювання методу стосуватиметься запровадження машинного навчання для підвищення якості узагальненого індексу як лінійної згортки часткових критеріїв пожежної небезпеки. Планується використання розробленого методу у створюваній інформаційній технології оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж за супутниковими даними для території України.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інформаційна технологія оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж у природних екосистемах на основі супутникових даних (Грантова підтримка Національного фонду досліджень України у межах конкурсу «Наука для безпеки людини та суспільства»): звіт про НДР (проміжний) Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України; кер. Н. Куссуль. Київ, 2020. 158 с. № ДР 0120U104886.
2. FIRMS FAQ – Earthdata – NASA.URL: https://earthdata.nasa.gov/faq/firms-faq (Last accessed: 10.12.2021).
3. Schneider R. G., Breedlove D. Fire Management Study Unit. Repository of United States Department of Agriculture: [Web site]. URL: https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/fsm9_028958.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
4. Giglio L. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations / L. Giglio, G. R. van der Werf, J. T. Randerson, G. J. Collatz, P. Kasibhatla. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2006. Vol. 6. P. 957–974. DOI: 10.5194/acp-6-957-2006.
5. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS / Giglio L. [et al] *Remote sensing of environment*. 2003. Vol. 87, No. 2–3. P. 273–282. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
6. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment / Schroeder W. [et al]. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 143. P. 85–96. DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.008.
7. LP DAAC UR. URL: https://lpdaac.usgs.gov (Last accessed: 10.12.2021).
8. Copernicus Global Land Service. URL: https://land.copernicus.eu/global/index.html (Last accessed: 10.12.2021).
9. Product user manual. Burned area and seasonality collection 300m. Version 1. URL:

https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_PUM_BA300m-V1_I1.40.pdf. (Last accessed: 10.12.2021).

10. An improved burned area algorithm designed for PROBA-V by the Copernicus Global Land Service*: 20th EGU General Assembly, EGU2018, Proceedings from the conference, (Vienna, 4–13 April 2018).* Vienna: Austria. P. 6417.
11. Scientific quality evaluation burned area collection 300m for 2019 Version 1. URL: https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_SQE2019_BA300m-V1_I1.00.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
12. Global Fire Emissions Database. URL: https://www.globalfiredata.org/.
13. Giglio L., Randerson J. T., Van Der Werf G. R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013. Vol. 118, No. 1. P. 317–328. DOI: 10.1002/jgrg.20042.
14. Randerson J. T. et al. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2012. Vol. 117, No. G4. DOI:10.1029/2012JG002128.
15. Van Der Werf G. R. et al. Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth System Science Data*. 2017. Vol. 9, No. 2. P. 697–720. DOI 10.5194/essd-9-697-2017.
16. Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS). URL: https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fdr (Last accessed: 10.12.2021).
17. Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System. URL: http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi (Last accessed: 10.12.2021).
18. Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System. URL: https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fbp (Last accessed: 10.12.2021).

19. European Forest Fire Information System (EFFIS). Welcome to EFFIS. URL: https://effis.jrc.ec.europa.eu (Last accessed: 10.12.2021).
20. The European Forest Fire Information System. User Guide to EFFIS applications. URL: https://effis.jrc.ec.europa.eu/static/effis_current_situation/public/static/userguides/userguide.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
21. Dowdy A. J. et al. Australian fire weather as represented by the McArthur forest fire danger index and the Canadian forest fire weather index. *Centre for Australian Weather and Climate Research Tech. Rep*. 2009. Vol. 10. P. 91. ISBN: 9781921605185.
22. Keetch J. J., Byram G. M. A drought index for forest fire control. US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1968. Vol. 38.
23. National Fire Danger Rating System. URL: https://www.fs.usda.gov/detail/cibola/landmanagement/resourcemanagement/?cid=stelprdb5368839 (Last accessed: 10.12.2021).
24. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). URL: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov (Last accessed: 10.12.2021).
25. MODIS/Aqua+Terra Thermal Anomalies/Fire locations 1km V006 NRT (Vector data) distributed by LANCE FIRMS. URL: https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14dl (Last accessed: 10.12.2021).
26. VIIRS I-Band 375 m Active Fire Data. URL: https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/viirs-i-band-active-fire-data (Last accessed: 10.12.2021).
27. Wildland Fire Assessment System (WFAS). URL: https://www.wfas.net/.
28. Bradshaw L. S. The 1978 national fire-danger rating system: technical documentation. – US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1984. Vol. 169. P. 44.

29. NDFD Fire Danger Forecasts. Adjective Class Rating. URL: https://www.wfas.net/index.php/fire-danger-rating-fire-potential--danger-32 (Last accessed: 10.12.2021).
30. Lawson B. D., Armitage O. B., Hoskins W. D. Diurnal variation in the Fine Fuel Moisture Code: tables and computer source code. *FRDA report*. 1996. ISSN: 0835–0752.
31. Науково-методичне забезпечення створення геопорталу для оцінювання ризику, прогнозування та попередження природних пожеж у Поліссі України: звіт про НДР (проміжн.) / Націон. універс. біоресурсів і природокорист. України; керівн. С. Зібцев. Київ, 2018. 135 с.
32. Удосконалення методики коротко- і середньотермінового прогнозування природної пожежної небезпеки за метеорологічними умовами: звіт про НДР (остаточн.) / Український гідрометеорологічний інститут; керівн. В. О. Балабух. Київ, 2019. 128 с.
33. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы ее определения / В. Г. Нестеров. М.:Гослесбумиздат. 1949. С. 76.
34. Балабух В.О. Зібцев С. В. Вплив зміни клімату на кількість та площу лісових пожежу північно-чорноморському регіоні України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 18. С. 60–71.
35. Курбатский Н. П. Методические указания для опытной разработкиместных шкал пожарной опасности в лесах. Л.: Леноблиздат. 1954. С. 32.
36. Van Wagner C. E. Development and structure of the canadian forest fire weather index system. Canadian Forest Service. 1987. 48 p. URL: http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/19927.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
37. Stocks B. J., Lawson B. D., Alexander M. E., Van Wagner C. E., McAlpine R. S., Lynham T. J., Dube D. E. The Canadian Forest Fire Danger Rating System: an overview. For. Chron. 1989. V. 65. P. 450–457.

38. Dowdy A.J., Mills G.A., Finkele K., de Groot W. Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. Technical Report No. 010, CAWCR: Melbourne, Australia, 2009. URL: http://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR_010.pdf.
39. Інформаційна технологія оцінювання пожежної небезпеки та моніторингу пожеж у природних екосистемах на основі супутникових даних (Грантова підтримка Національного фонду досліджень України у межах конкурсу «Наука для безпеки людини та суспільства»): звіт про НДР (проміжний) Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України; кер. Н. Куссуль. Київ, 2021. 155 с. № ДР 0120U104886.
40. Dudfield M. Art and science of forest and rural fire management // Understanding the Variables that Affect Australian Hardwood Woodchip Export Performance-Perceptions and Lessons from the International Business Management. 2004. P. 79.
41. De Groot W. J. et al. Development of the Indonesian and Malaysian fire danger rating systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2007. Vol. 12, No. 1. P. 165. DOI: 10.1007/s11027-006-9043-8.
42. Taylor S. W., Alexander M. E. Science, technology, and human factors in fire danger rating: the Canadian experience. *International Journal of Wildland Fire.* 2006. Vol. 15, No. 1. P. 121–135. DOI: 10.1071/WF05021.
43. McArthur, A.G., Fire behaviour in Eucalyptus Forests. Leaflet No. 107 (Forest Research Institute, Forestry & Timber Bureau, Canberra). 1967. 36 p.
44. Noble I. R., Gill A. M., Bary G. A. V. McArthur's fire danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology.* 1980. Vol. 5, No. 2. P. 201–203. DOI.org/10.1111/j.1442-9993.1980.tb01243.x.
45. Keetch J. J., Byram G. M. A drought index for forest fire control. US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, 1968. Vol. 38.

46. What is the Keetch-Byram Drought Index // Technical Information Note September, 2014. URL: https://www.dfes.wa.gov.au/safetyinformation/fire/bushfire/BushfireInfoNotesPublications/DFES-InfoNote-WhatisKBDI.pdf.
47. Keetch-Byram Drought Index. URL: https://www.drought.gov/drought/data-gallery/keetch-byram-drought-index (Last accessed: 10.12.2021).
48. Keetch-Byram Drought Index (KBDI). URL: https://twc.tamu.edu/kbdi (Last accessed: 10.12.2021).
49. Griffiths D. Improved formulae for the McArthur Forest Fire Danger Meter. Bureau of Meteorology. Meteorological Note 214. (Melbourne), 1998.
50. Finkele K. National daily gridded soil moisture deficit and drought factors for use in prediction of Forest Fire Danger Index in Australia. BMRC, 2006 // Bushfire CRC Research Report number 119. (Melbourne, Vic., Australia).
51. Noble I. R., Gill A. M., Bary G. A. V. McArthur's fire danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology*. 1980. Vol. 5, No. 2. P. 201–203. DOI:10.1111/J.1442-9993.1980.TB01243.X.
52. Holgate C. M. et al. Using alternative soil moisture estimates in the McArthur Forest Fire Danger Index. *International Journal of Wildland Fire*. 2017. Vol. 26, No. 9. P. 806–819. DOI:10.1071/WF16217.
53. Tuller M. Water retention and characteristic curve. *Encyclopaedia of Soils in the Environment* 4’. 2003. P. 278–289.
54. Raaflaub L., Valeo C. Hydrological properties of duff. *Water resources research*. 2009. Vol. 45, No. 5. DOI: 10.1029/2008WR007396.
55. Choudhury B. J., Blanchard B. J. Simulating soil water recession coefficients for agricultural watersheds 1. *Journal of the American Water Resources Association.* 1983. Vol. 19, No. 2. P. 241–247. DOI: 10.1111/J.1752-1688.1983. TB05321.X.
56. Vinodkumar D. I. et al. Verification of soil moisture from multiple models over Australia for fire danger rating application. *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53, No. 1. P. 633–646. DOI: 10.1002/2015WR017738.

57. What is SMOS?. URL: https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos (Last accessed: 10.12.2021).
58. SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) Mission. URL: https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/smos (Last accessed: 10.12.2021)..
59. Crow W. T., Bindlish R., Jackson T. J. The added value of spaceborne passive microwave soil moisture retrievals for forecasting rainfall runoff partitioning. *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32, No. 18. DOI: 10.1029/2005GL023543.
60. Kerr Y. H. et al. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements ofthe global water cycle. Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98, No. 5. P. 666–687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032.
61. SMOS Data Products. URL: ttps://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos/content/-/asset_publisher/t5Py/content/data-types-levels-formats-7631 (Last accessed: 10.12.2021).
62. SMOS Mission. URL: https://earth.esa.int/eogateway/missions/smos (Last accessed: 10.12.2021).
63. Fire Potential Index Map. URL: https://www.usgs.gov/ecosystems/lcsp/fire-danger-forecast/fire-potential-index-map (Last accessed: 10.12.2021).
64. Fuel Models and Fire Potential from Satellite and Surface Observations. URL: https://www.wfas.net/index.php/nfdrs-next-day-forecast-experimental-products-39/35-fpi-paper (Last accessed: 10.12.2021).
65. Cruz M. G., Plucinski M. P. Billo Road fire: report on fire behaviour phenomema and suppression activities. 2007. ISBN: 0643065369.
66. Candra D. S., Phinn S., Scarth P. Automated Cloud and Cloud-Shadow Masking for Landsat 8 Using Multitemporal Images in a Variety of Environments. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 17. P. 2060.
67. Zhu Z., Woodcock C. E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote sensing of environment.* 2012. Vol. 118. P. 83–94.

68. Kussul N. Sentinel-2 for agriculture national demonstration in ukraine: Results and further steps / N. Kussul, A. Kolotii, A. Shelestov, M. Lavreniuk, N. Bellemans, S. Bontemps, P. Defourny, B. Koetz // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2017. P. 5842–5845.
69. Mueller-Wilm U., Devignot O., Pessiot L. Sen2Cor configuration and user manual //Telespazio VEGA Deutschland GmbH: Darmstadt, Germany. 2016.
70. Qiu S., Zhu Z., He B. Fmask 4.0: Improved cloud and cloud shadow detection in Landsats 4–8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment.* 2019. Vol. 231. P. 111205. DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.024.
71. S3 Product Notice SLSTR. URL: https://sentinel.esa.int/documents/247904/3590270/Sentinel-3A-SLSTR-Product-Notice-Level-1B-Version1.1.pdf.
72. Hughes M. J., Hayes D. J. Automated detection of cloud and cloud shadow in single-date Landsat imagery using neural networks and spatial post-processing. *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6, No. 6. P. 4907–4926. DOI: 10.3390/rs6064907.
73. Mohajerani S., Saeedi P. Cloud-Net: An end-to-end cloud detection algorithm for Landsat 8 imagery //IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2019. P. 1029–1032. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898776.
74. Ma N. et al. Improved cloud detection for Landsat 8 images using a combined neural network model. *Remote Sensing Letters*. 2020. Vol. 11, No. 3. P. 274–282. DOI: 10.1080/2150704X.2019.1708503.
75. Skakun S. V., Basarab R. M. Reconstruction of missing data in time-series of optical satellite images using self-organizing Kohonen maps. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2014. Vol. 46, No. 12. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v46.i12.30.
76. Enomoto K. et al. Filmy cloud removal on satellite imagery with multispectral conditional generative adversarial nets //Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2017. P. 48–56.

77. Meraner A. et al. Cloud removal in Sentinel-2 imagery using a deep residual neural network and SAR-optical data fusion *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Vol. 166. P. 333–346. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.013.
78. Gao J. et al. Cloud Removal with Fusion of High Resolution Optical and SAR Images Using Generative Adversarial Networks. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 1. P. 191. DOI: 10.3390/rs12010191.
79. Чуб И.А. Совершенствование методики оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера в лесных экосистемах. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2005. С. 3–11.
80. Гусев В. Г., Лопухова Е. Л., Дубовый В. К. Классификация и общие свойства лесных горючих материалов. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.* 2012, № 1.
81. Софронов М. А. Пирологическое районирование в таежной зоне. Наука. Сиб. отд-ние, 1990. С. 205.
82. Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов. *Вопросы лесной пирологии.* 1970. Т. 4. С. 5–58.
83. Софронов М. А., Гольдаммер И. Г., Цветков П. А. Пожарная опасность в природных условиях. 2005. С. 330. ISBN: 5-903055-01-X.
84. Wiley J. National Fire Danger Rating System (NFDRS). 2006. DOI: 10.1002/0471743984.vse8649.
85. Зубарева А. М. Методы оценки пожарной опасности растительных горючих материалов. *Региональные проблемы*. 2018. Т. 21. № 2.
86. Lawson B. D.; Armitage O. B. Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. 2008. 87 p. http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/29152.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
87. Шешуков М. А. Пирогенез-важнейший фактор формирования лесов в различных зонально-географических условиях Дальнего Востока. *Лесное хозяйство.* 2007. № 3. С. 15–16. ISSN: 0024–1113

88. Hines F. et al. Overall fuel hazard assessment guide / F. Hines. Melbourne: Victorian Government, Department of Sustainability and Environment, 2010. P. 41. ISBN: 978-1-74242-677-8.
89. Сучасний стан прогнозування природної пожежної небезпеки за умовами погоди в Україні. Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: *матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф., (Київ 10–11 жовтня 2017 р.)*. Київ: ІДУЦЗ, 2017. С. 25–29.
90. Кустов М. В. Влияние скорости ветра, влажности воздуха и горючего материала на скорость распространения ландшафтных пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*. Х.: НУГЗУ. 2012. № 32. С. 133–141.
91. Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture, 1972. Vol. 115. P. 40.
92. Kussul N. Data assimilation technique for flood monitoring and prediction / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, O. Kravchenko. *International Journal on Information Theory and Applications*. 2008. Vol. 15, No. 1. P. 76–84.
93. Skakun S., Kussul N., Shelestov A., Kussul O. Flood Hazard and Flood Risk Assessment Using a Time Series of Satellite Images: A Case Study in Namibia. *Risk Analysis*. 2014. Vol. 34, No. 8. P. 1521–1537.
94. Kussul N. Service-oriented infrastructure for flood mapping using optical and SAR satellite data / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, G. Li, O. Kussul, J. Xie. *International Journal of Digital Earth.* 2014. Vol. 7, No. 10. P. 829–845. DOI: 10.1080/17538947.2013.781242.
95. Kussul N. Resilience Aspects in the Sensor Web Infrastructure for Natural Disaster Monitoring and Risk Assessment Based on Earth Observation Data / N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, O. Kussul and B. Yailymov. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. Vol. 7, No. 9. P. 3826–3832. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2313573.

96. Shumilo L., Yailymov B., Lavreniuk M., Bilokonska Y. Remote Sensing Approaches for Deforestation Identification in Ukraine / L. Shumilo: The 5th IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems 17–18 September. 2020, Dortmund, Germany. DOI:10.1109/IDAACS-SWS50031.2020.9297054.
97. EarthExplorer. URL: https://earthexplorer.usgs.gov (Last accessed: 10.12.2021).
98. LandViewer. URL: https://eos.com/landviewer (Last accessed: 10.12.2021).
99. EO Browser. URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser (Last accessed: 10.12.2021).
100. SentinelHub Playground. URL: https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground (Last accessed: 10.12.2021).
101. Copernicus Open Access Hub. URL: https://scihub.copernicus.eu (Last accessed: 10.12.2021).
102. EARTHDATA. URL: https://search.asf.alaska.edu/ (Last accessed: 10.12.2021).
103. Архив метеоданных. Просмотр фактической погоды на определенную дату. URL: https://meteopost.com/weather/archive/ (дата звернення: 10.12.2021).
104. rp5.ua. Расписание погоды. URL: https://rp5.ua/ (дата звернення: 10.12.2021).
105. The POWER Project. URL: https://power.larc.nasa.gov/ (Last accessed: 10.12.2021).
106. Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). URL: https://data.nasa.gov/Earth-Science/Prediction-Of-Worldwide-Energy-Resources-POWER-/wn3p-qsan (Last accessed: 10.12.2021).
107. Climate Data Store. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home (Last accessed: 10.12.2021).

108. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. URL:https://www.dsns.gov.ua/ (дата звернення: 10.12.2021).
109. Sentinel-2 MSI Technical Guide. URL: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi (Last accessed: 10.12.2021).
110. Skakun S. The Use of Landsat 8 and Sentinel-2 Data and Meterological Observations for Winter Wheat Yield Assessment / S. Skakun, B. Franch, E. Vermote, J.C. Roger, N. Kussul, J. Masek // IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019. P. 6291–6294.
111. Mayer, B. and Kylling, A.: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1855–1877. URL: https://doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005, 2005 (Last accessed: 10.12.2021).
112. SciHub. URL: https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home (Last accessed: 10.12.2021).
113. Skakun S. Efficiency Assessment of Multitemporal C-Band Radarsat-2 Intensity and Landsat-8 Surface Reflectance Satellite Imagery for Crop Classification in Ukraine / S. Skakun, N. Kussul, A. Y. Shelestov, M. Lavreniuk, O. Kussul. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. Vol. 9, No. 8. P. 3712–3719.
114. Kussul N. Regional scale crop mapping using multi-temporal satellite imagery. International Archives of the Photogrammetry / N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, M. Lavreniuk, B. Yailymov, O. Kussul. *Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2015. P. 45–52.
115. Lavreniuk M. Regional retrospective high resolution land cover for Ukraine: methodology and results / M. Lavreniuk, N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, B. Yailymov // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2015. P. 3965–3968.

116. Lavreniuk M. Validation methods for regional retrospective high resolution land cover for Ukraine / M. Lavreniuk, N. Kussul, A. Shelestov, B. Yailymov, T. Oliinyk, A. Kosteckyi // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 2016. P. 4502–4505.
117. Shelestov A. Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping / A. Shelestov, M. Lavreniuk, N. Kussul, A. Novikov, S. Skakun. *Frontiers in Earth Science*. 2017. Vol. 5, No. 17. P. 1–10.
118. Shelestov A. Cloud Approach to Automated Crop Classification Using Sentinel-1 Imagery / A. Shelestov, M. Lavreniuk, V. Vasiliev, L. Shumilo, A. Kolotii, B. Yailymov, N. Kussul, H. Yailymova. *IEEE Transactions on Big Data*. 2019. Vol. 6, No. 3. P. 572–582.
119. Skakun S. Restoration of Missing Data due to Clouds on Optical Satellite Imagery Using Neural Networks / S. Skakun, N. Kussul, R. Basarab // ESA Sentinel-2 for Science Workshop, ESA-ESRIN, Frascati, Rome, Italy, 20–22 May 2014. 2014. P. 20–22.
120. Shumilo L. Sentinel-3 Urban Heat Island Monitoring and analysis for Kyiv Based on Vector Data / L. Shumilo, N. Kussul, A. Shelestov, Y. Korsunska, B. Yailymov // 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 5–7 June 2019, Leeds, United Kingdom P. 131–135.
121. Sentinel-3 SLSTR Instrument. URL: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr/instrument (Last accessed: 10.12.2021).
122. Shumilo L. Land Surface Temperature Analysis and Trends for Rivne Using Remote Sensing Data / L. Shumilo, B. Yailymov, M. Lavreniuk, A. Shelestov, Y. Korsunska // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) 2–6 July 2019, Lviv, Ukraine P. 1107–1111.

123. Shumilo L. Land Surface Temperature estimation for Smart City / L. Shumilo, A. Shelestov, B. Yailymov, Y. Korsunska, N. Kussul // 2019 Living Planet Symposium, 13–17 May 2019, MiCo Milano Congressi Milan, Italy.
124. Zyelyk Y. I., Podgorodetskaya L. V., Chornyy S. V. Estimation of the Thermodynamic Temperature of the Earth's Surface Using Satellite Data Based on the Land Cover Classification in the Optical Radiation Range. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2019. Vol. 51, No. 6. P. 25–40.
125. Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. URL: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product (Last accessed: 10.12.2021).
126. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. URL: https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/# (Last accessed: 10.12.2021).
127. Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*. 2004. Vol. 90, No. 4. P. 434–440.
128. Chavez P. S. et al. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 1996. Vol. 62, No. 9. P. 1025–1035.
129. Moran M. S., Slater P. N., Teillet P. M. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. 1992. P. 169–184. ISSN: 0034–4257.
130. Станкевич С. А. и др. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизованной территории по материалам тепловой космической съемки. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2015, No. 7. С. 12–21.
131. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote*

sensing of Environment. 2004. Vol. 89, No. 4. P. 467–483. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.005.

132. Artis D. A., Carnahan W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote sensing of Environment.* 1982. Vol. 12, No. 4. P. 313–329. DOI: 10.1016/0034-4257(82)90043-8.
133. Alipour T., Sarajian M. R., Esmaeily A. Land surface temperature estimation from thermal band of landsat sensor, case study: Alashtar city //The International Achieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2003. Vol. XXXVIII-4/C7. 6 p.
134. Richards, J. A. Jia X. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin, Germany: Springer. 2006. 439 p.
135. ERA5-Land hourly data from 1981 to present. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview (Last accessed: 10.12.2021).
136. Satellite temperature measurements. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_temperature_measurements# Measurements (Last accessed: 10.12.2021).
137. Mears C. A., Wentz F. J. Sensitivity of satellite-derived tropospheric temperature trends to the diurnal cycle adjustment. *Journal of Climate.* 2016. Vol. 29, No.10. P. 3629–3646. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0744.1.
138. Measuring wind. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Aeolus/Measuring_wind (Last accessed: 10.12.2021).
139. Measuring humidity. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Aeolus/Measuring_wind (Last accessed: 10.12.2021).
140. Global Precipitation Measurement. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/main/index.html (Last accessed: 10.12.2021).

141. Публічна кадастрова карта України. URL: https://map.land.gov.ua/kadastrova-karta (дата звернення: 10.12.2021).
142. Copernicus Global Land Service. Surface Soil Moisture (SSM). URL: https://land.copernicus.eu/global/products/ssm (Last accessed: 10.12.2021).
143. Copernicus Global Land Service. Soil Water Index. URL: https://land.copernicus.eu/global/products/swi (Last accessed: 10.12.2021).
144. CPC: Soil Moisture Monitoring – Explanation. URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/descrip.htm (Last accessed: 10.12.2021).
145. Global Soil Moisture. URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/sm_glb.html (Last accessed: 10.12.2021).
146. Huang J., van den Dool H. M., Georgarakos K. P. Analysis of model-calculated soil moisture over the United States (1931–1993) and applications to long-range temperature forecasts. *Journal of Climate.* 1996. Vol. 9, No. 6. P. 1350–1362.
147. CPC Soil Moisture. URL: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpcsoil.html (Last accessed: 10.12.2021).
148. ESRI Shapefile Technical Description. An ESRI White Paper, July 1998. URL: https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
149. Ukraine – Subnational Administrative Boundaries. UN OCHA Ukraine. URL: https://data.humdata.org/dataset/ukraine-administrative-boundaries-as-of-q2-2017 (Last accessed: 10.12.2021).
150. Skakun S. et al. Combined use of Landsat-8 and Sentinel-2A images for winter crop mapping and winter wheat yield assessment at regional scale. *AIMS geosciences.* 2017. Vol. 3, No. 2. P. 163. DOI: 10.3934/geosci.2017.2.163.
151. Kussul N. et al. Parcel-based crop classification in ukraine using landsat-8 data and sentinel-1A data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth*

Observations and Remote Sensing. 2016. Vol. 9, No. 6. P. 2500–2508. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2560141.

152. Zhou Y. et al. Long-short-term-memory-based crop classification using high-resolution optical images and multi-temporal SAR data. *GIScience & Remote Sensing*. 2019. Vol. 56, No. 8. P. 1170–1191. DOI: 10.1080/15481603.2019.1628412.
153. Orynbaikyzy A., Gessner U., Conrad C. Crop type classification using a combination of optical and radar remote sensing data: a review *International journal of remote sensing*. 2019. Vol. 40, No. 17. P. 6553–6595. DOI: 10.1080/01431161.2019.1569791.
154. Zhou Y. et al. DCN-Based Spatial Features for Improving Parcel-Based Crop Classification Using High-Resolution Optical Images and Multi-Temporal SAR Data. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 13. P. 1619. DOI: 10.3390/rs11131619.
155. Kussul N. Crop classification in Ukraine using satellite optical and SAR images / N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, O. Kravchenko, O. Kussul *International Journal "Information Models and Analyses*. 2013. Vol. 2, No. 2. P. 118–122. ISSN: 1314–6432.
156. Nguyen M. D. et al. Harmonization of Landsat and Sentinel 2 for Crop Monitoring in Drought Prone Areas: Case Studies of Ninh Thuan (Vietnam) and Bekaa (Lebanon). *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 281. DOI: 10.3390/rs12020281.
157. Dutta S. et al. Wheat crop classification using multidate IRS LISS-I data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 1998. Vol. 26, No. 1–2. P. 7–14.
158. Jakubauskas M. E. et al. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 2001. Vol. 67, No. 4. P. 461–470.

159. Claverie M. et al. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote sensing of environment*. 2018. Vol. 219. P. 145–161. DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.002.
160. Zhang M. et al. Harmonizing multi-source remote sensing images for summer corn growth monitoring. *Remote Sensing.* 2019. Vol. 11, No. 11. P. 1266. DOI: 10.3390/rs11111266.
161. Zhang M. et al. Harmonizing multi-source remote sensing images for summer corn growth monitoring. *Remote Sensing.* 2019. Vol. 11, No. 11. P. 1266. DOI: 10.3390/rs11111266.
162. Rengarajan R., Storey J. C., Choate M. J. Harmonizing the Landsat Ground Reference with the Sentinel-2 Global Reference Image Using Space-Based Bundle Adjustment. *Remote Sensing.* 2020. Vol. 12, No. 19. P. 3132. DOI: 10.3390/rs12193132.
163. Дистанційне зондування Землі з космосу. Обробка даних. Терміни та визначення понять: ДСТУ 4758:2007. [Чинний від 2007–10–01]. Київ: Держстандарт України, 2007. – 20 с. *: табл.* (Національний стандарт України).
164. Algorithm Theoretical Basis Document Sentinel 2 Global Mosaics. URL: https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/global-image-mosaics/sites/default/files/styles/medium/public/S2GM-SC2-ATBD-BC-v1.1.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
165. Sen2mosaic Documentation. URL:https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/sen2mosaic/latest/sen2mosaic.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
166. Holben B. N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data // International journal of remote sensing. 1986. Vol. 7, No. 11. P. 1417–1434.
167. Spatial Resolution Science Direct: URL: http://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/spatial-resolution (Last accessed: 10.12.2021).

168. Rahaman K., Hassan Q., Ahmed M. Pan-sharpening of Landsat-8 images and its application in calculating vegetation greenness and canopy water contents. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2017. Vol. 6. P. 168.
169. Johnson B., Scheyvens H., Shivakoti B. An ensemble pansharpening approach for finer-scale mapping of sugarcane with Landsat 8 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. Vol. 33. P. 218–225.
170. Qiangqiang Y. et al. A multiscale and multidepth convolutional neural network for remote sensing imagery pan-sharpening. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. Vol. 11(3). P. 978–989.
171. Kussul N. et al. Assessment of Sustainable Development Goals Achieving with Use of NEXUS Approach in the Framework of GEOEssential ERA-PLANET Project. XVIII International Conference on Data Science and Intelligent Analysis of Information. Springer, Cham, 2018. URL: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-97885-7_15 (Last accessed: 10.12.2021).
172. McCallum I. et al. Developing food, water and energy nexus workflows. *International Journal of Digital Earth.* 2020. Vol. 13, Iss. 2. P. 299–308.
173. Shelestov A. et al. Essential variables for air quality estimation. *International Journal of Digital Earth.* 2020. Vol. 12, Iss. 2. P. 278-298
174. Waldner F. et al. Roadside collection of training data for cropland mapping is viable when environmental and management gradients are surveyed. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 80. P. 82–93.
175. Kussul N. et al. Parcel based classification for agricultural mapping and monitoring using multi-temporal satellite image sequences. *IGARSS 2015*: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2015. P. 165–168. URL:

http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC99016 (Last accessed: 10.12.2021).

176. Sobrino J. et al. Single-channel and two-channel methods for land96 surface temperature retrieval from DAIS data and its application to the Barrax site. *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25, Iss, 1. P. 215–230.
177. Jimenez-Munoz J. et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. Vol 11(10). P. 1840–1843.
178. Chen D. et al. A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7(1). P. 647–665.
179. Avdan U., Jovanovska G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*. 2016. URL: http://doi.org/10.1155/2016/1480307 (Last accessed: 10.12.2021).
180. Wang F. et al. An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. Remote sensing. 2015. Vol. 7(4). P. 4268-4289.
181. Jimenez-Munoz J., et al. Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 103(4). P. 474–487.
182. Zhengming W. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote sensing of Environment*. 2008. Vol. 140(1). P. 59–74.
183. Kussul N. et al. Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2017. Vol. 14. P. 778–782.
184. Shelestov A. et al Cloud Approach to Automated Crop Classification Using Sentinel-1 Imagery. *IEEE Transactions on Big Data*. 2019. DOI:10.1109/TBDATA.2019.2940237.

185. Remy F., Sicre C. M., Baup F. Estimation of corn yield using multi-temporal optical and radar satellite data and artificial neural networks. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. 2017. Vol. 57. P. 14–23.
186. Skakun S. et al. The Use of Landsat 8 and Sentinel-2 Data and Meterological Observations for Winter Wheat Yield Assessment. *IGARSS 2019*: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019. DOI: 10.3390/rs11151768.
187. Qiang Z. et al. Cloud and Shadow Removal for Sentinel-2 by Progressively Spatiotemporal Patch Group Learning. *IGARSS 2019*: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2019. URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/8900207 (Last accessed: 10.12.2021).
188. Lavreniuk M. et al. Use of Modified BM3D Filter and CNN Classifier for SAR Data to Improve Crop Classification Accuracy. *UKRCON 2019*: Proceedings of IEEE 2nd Ukraine conference on electrical and computer engineering. 2019. DOI:10.1109/UKRCON.2019.8879805.
189. Lavreniuk M. Crop Classification Maps Filtration Based on Deep Learning Methods. *UKRCON 2019*: Proceedings of IEEE 2nd Ukraine conference on electrical and computer engineering. 2019. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879903.
190. Coluzzi R. et al. A first assessment of the Sentinel-2 Level 1-C cloud mask product to support informed surface analyses. Remote sensing of environment. 2018. Vol. 217. P. 426–443. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.009.
191. Baetens L., Desjardins C., Hagolle O. Validation of Copernicus Sentinel-2 Cloud Masks Obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask Processors Using Reference Cloud Masks Generated with a Supervised Active Learning Procedure. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 4. P. 433. DOI: 10.3390/rs11040433.
192. Chastain R., Housman I., Goldstein J., Finco M., Tenneson K. Empirical cross sensor comparison of Sentinel-2A and 2B MSI, Landsat-8 OLI, and Landsat-7

ETM+ top of atmosphere spectral characteristics over the conterminous United States. *Remote sensing of environment*. 2019. Vol. 221. P. 274–285.

193. Lazaros O., Wilson M. J., Várnai T. Implementation on Landsat data of a simple cloud-mask algorithm developed for MODIS land bands. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 8.4*. 2011. P. 597–601.
194. Pidgorodetska L., Zyelyk Y., Kolos L., Fedorov O. Surface soil moisture deficit assessment based on satellite data. *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2021. URL: http://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521114 (Last accessed: 10.12.2021).
195. Keetch J. J., Byram G. M. A drought index for forest fire control. Res. Paper SE-38. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC, 1968. 32 p.
196. Костяков А. Н. Основы мелиорации. Москва: Сельхозгиз, 1960. 622 с.
197. Власова О. В., Самойленко Л. І., Підгородецька Л. В., Колос Л. М. Дефіцит вологи кукурудзи за даними дистанційного зондування Землі. *Меліорація і водне господарство*. 2009. № 96. С. 58–64.
198. Campbell G. S., Campbell C. S. Water Content and Potential, Measurement. *Encyclopedia of Soils in the Environment* / Ed. D. Hillel. Elsevier, 2005. P 253–257. DOI: http://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00502-6.
199. Hengl T. et al. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning. PLOS ONE. 2017. 21 p. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748.
200. Задорожній Ю. В., Смірнова І. В. Сільськогосподарська меліорація: методичні рекомендації до виконання практичних занять. URL: http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4355/1/Silskohospodarska%20melioratsiia.pdf (дата звернення: 10.12.2021).
201. Волков В. Н., Нариманянц Е. В. Состав, физические и физико-химические свойства грунтов: учебно-методическое пособие. URL: http://window.edu.ru/resource/887/68887/files/rsu664.pdf. (дата звернення: 10.12.2021).

202. Айвазян С. А. К методологиям измерения статистических категорий качества жизни населения . *Экономика и математические методы*. 2003. Т. 39, № 2. С. 33–53.
203. Айвазян С., Мхитарян В. Прикладная статистика. Основы эконометрики: в 2 т. Москва: Юнити, 2001. Т. 1: Теория вероятностей и прикладная статистика. 656 с.
204. Keetch–Byram drought index. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Keetch%E2%80%93Byram_drought_index (Last accessed: 10.12.2021).
205. Garcia-Pratsa A., Del Campo A., Tarcнsio Fernandes J. G., Antonio Molina J. Development of a Keetch and Byram-Based drought index sensitive to forest management in Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2015. V. 205. P. 40–50.
206. Burgan R. E. A method to initialize the Keetch–Byram drought index. West. *J. Appl. For.* 1993. Vol. 8 (4). P. 109–115.
207. National Fire Danger Rating System. URL: http://www.fs.usda.gov/detail/cibola/landmanagement/resourcemanagement/?cid=stelprdb5368839 (Last accessed: 10.12.2021).
208. Tóth B., Weynants M., Pásztor L., Hengl T. 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. Hydrological Processes. 2017. Vol. 31 (14). P. 2662–2666. DOI: http://doi.org/10.1002/hyp.11203.
209. Panagos P., Van Liedekerke M., Jones A., Montanarella L. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. Land Use Policy. 2012. Vol. 29 (2). P 329–338. DOI: http://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.07.003.
210. European Soil Data Centre (ESDAC). URL: http://esdac.jrc.ec.europa.eu.
211. Bosilovich M. G., Lucchesi R., Suarez M. MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1). 2016. 73 p. URL: http://gmao.gsfc.nasa.gov/pubs/docs/Bosilovich785.pdf.

212. Bauer-Marschallinger B., Paulik C. Surface Soil Moisture Collection 1 km Version 1. Product User Manual. Issue I1.30. 2019 URL: http://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS1_PUM_SSM1km-V1_I1.30.pdf.
213. Alkhatib A. A. Forest Fire Monitoring. *IntechOpen*. DOI: 10.5772/intechopen.72059.
214. Fire danger (Canadian Fire Weather Index system) in the Global Wildfire Information System (version 2-3-1). European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset]ю 2018. URL: http://data.europa.eu/89h/4b4f1ea6-da7b-4870-9be4-aa5b9a2a4b70.
215. Olofsson P., et al. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation / Pontus Olofsson, Giles M. Foody, Stephen V. Stehman, Curtis E. Woodcock. *Remote Sensing of Environment.* 2013. Vol. 129. P. 122–131.
216. Корреляционное сопоставление изображений. URL: http://wiki.technicalvision.ru/index.php/%D0%9A%D0%BE%D1%80%D1%80%D0%B5%D0%BB%D1%8F%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%81%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B9 (Last accessed: 10.12.2021).
217. GRASS GIS 7.4.5dev Reference Manual. URL: https://grass.osgeo.org/grass74/manuals/full_index.html (Last accessed: 10.12.2021).
218. Айвазян С., Мхитарян В. Прикладная статистика. Основы эконометрики: в 2 т. Москва: Юнити-Дана, 2001. Т. 1. 656 с.
219. Айвазян С.А. Анализ качества и образа жизни населения. – М.: Наука, 2012. – 432 с.

220. GRASS GIS manual: i.pca. URL: https://grass.osgeo.org/grass78/manuals/i.pca.html (Last accessed: 10.12.2021).
221. Матрица ошибок и расчет показателей точности тематических карт. URL: https://gis-lab.info/qa/error-matrix.html (Останній доступ: 30.11.2021)
222. Contingency table. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Contingency_table (Last accessed: 10.12.2021).
223. Raster analysis. Raster layer unique values report. URL: https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/rasteranalysis.html#qgisrasterlayeruniquevaluesreport (Last accessed: 10.12.2021).
224. Solar insolation. URL: https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=CERES_INSOL_M (Last accessed: 10.12.2021).
225. EARTHDATA. URL: https://earthdata.nasa.gov/ (Last accessed: 10.12.2021).
226. Kopp, T.J.; Thomas, W.; Heidinger, A.K.; Botambekov, D.; Frey, R.A.; Hutchison, K.D.; Iisager, B.D.; Brueske, K.; Reed, B. The VIIRS cloud mask: Progress in the first year of S-NPP toward a common cloud detection scheme. J. Geophys. Res. Atmos. 2014, 119, 2441–2456.
227. Frey, R.A.; Heidinger, A.K.; Hutchison, K.D.; Dutcher, S. VIIRS cloud mask validation exercises. AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, CA, USA, 5–9 December; 2011. 0265.
228. MODIS Thermal Anomalies/Fire. URL: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod14.php (Last accessed: 10.12.2021).
229. Global Wildfire Information System. URL: https://gwis.jrc.ec.europa.eu/applications/data-and-services
230. Bell J. R., Burks J. E., Molthan A. L., McGrath Kevin M. Development of WMS Capabilities to Support NASA Disasters Applications and App

Development. 2013. URL: https://ntrs.nasa.gov/citations/20140004066 (Last accessed: 10.12.2021.

231. FIRMS. URL: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/mapserver/wfs-info/#firms-mapkey (Last accessed: 10.12.2021).
232. Christopher D. Michaelis, Daniel P. Ames., «Web Feature Service (WFS) and Web Map Service (WMS)»., Department of Geosciences, Geospatial Software Lab, Idaho State University, Pocatello, ID, USA.
233. Jeff de la Beaujardiere., «OpenGIS® Web Map Server Implementation Specification»., 2006.
234. Blower J. D., Gemmell A. L., Griffiths G. H., Haines K., Santokhee A., Yang X. A Web Map Service implementation for the visualization of multidimensional gridded environmental data. *Environmental Modelling & Software*. 2013. Vol. 47. P. 218-224. URL: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.04.002.
235. JECAM (Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring): URL: http://www.jecam.org/JECAM_Guidelines_for_Field_Data_Collection_v1_0.pdf (Last accessed: 10.12.2021).
236. A. Shelestov et. all. Cloud Approach to Automated Crop Classification Using Sentinel-1 Imagery. *IEEE Transactions on Big Data*. 2020. Vol. 6, No. 3. P. 572–582. DOI: 10.1109/TBDATA.2019.29402.