

УДК 630*:504.5.064.3:628.4.047

УКПП

№ держреєстрації № 0118U000312

Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Національний університет біоресурсів і природокористування
України
(НУБіП України)

03041, м. Київ-41, вул. Героїв оборони, 15
тел. (044) 527-81-54

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор,
акад. НААН України

_____ І.Ібатуллін
підпис
дата _____
МП

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
за договором від 01 лютого 2018 р. № 110/9-пр-2018

(НАУКОВО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТВОРЕННЯ ГЕОПОРТАЛУ
ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ, ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ПОПЕРЕДЖЕННЯ
ПРИРОДНИХ ПОЖЕЖ У ПОЛІССІ УКРАЇНИ)
(проміжний)

Директор НДІ лісівництва та
декоративного садівництва,
д-р с.-г. наук, доц.

підпис
дата _____
МП

Р. Василюшин

Директор ВП НУБіП України
«Боярська ЛДС»,
д-р с.-г. наук, доц.

підпис

А. Карпук

Керівник науково-дослідної роботи,
д-р с.-г. наук, проф.

підпис

С. Зібцев

2019

Результати роботи розглянуто науково-технічною радою НДІ лісівництва та
декоративного садівництва протокол від _____ № _____

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР
гол. наук. співробітник,
д. с.-г. наук, професор

С. Зібцев
(реферат, вступ,
висновки, розд. 1, 3)

Старший наук. співробітник
д. с.-г. наук, доцент

В. Миронюк
(розд. 2)

Науковий співробітник
д. с.-г. наук, професор

П. Яворовський
(розд. 1)

Науковий співробітник
канд. с.-г. наук

В. Гуменюк
(розд. 1)

Науковий співробітник
канд. с.-г. наук

О. Сошенський
(розд. 2, 3)

Молодший науковий
співробітник

Т. Богомолова
(розд. 3)

Молодший науковий
співробітник

Т. Лень
(розд. 1, розд. 2)

Молодший науковий
співробітник

Л. Кириленко
(розд. 2)

Молодший науковий
співробітник

В. Корень
(розд. 1)

Провідний фахівець

М. Грицишин
(розд. 1)

Провідний фахівець

В. Бойко
(розд. 2)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 120 с., 33 рис., 24 табл., 97 джерел, 1 додаток.

ВЕБ-СТОРІНКА, ГЕОПОРТАЛ, КОМПОЗИТНИЙ ЗНІМОК, ПОЖЕЖНА НЕБЕЗПЕКА ЛІСІВ, ПРИРОДНІ ПОЖЕЖІ, ПОЛІССЯ УКРАЇНИ, ЧОРНОБИЛЬСЬКА ЗОНА ВІДЧУЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – екосистеми Полісся України як вразливі до природних пожеж об'єкти.

Предмет дослідження – ландшафти, методи оцінювання ризику та поведінки природних пожеж, динаміка горимості в Українському Поліссі з використанням ГІС та даних ДЗЗ.

Мета роботи – створення вихідних наборів геопросторових даних та моделей, які описують основні параметри рослинного покриву та запасів горючих матеріалів у природних екосистемах Українського Полісся, в тому числі на територіях забруднених радіонуклідами.

Метод дослідження – експеримент, логічний, статистичний та математичний аналіз даних щодо горимості лісів, накопичення лісових горючих матеріалів, лісового фонду в Поліссі України.

Основні результати отримані упродовж другого року виконання роботи: підготовлено геопросторову основу для класифікації типів земного покриву для різних ландшафтів Полісся України у вигляді безхмарних композитних мозаїк, які повністю покривають територію досліджень; проведено класифікацію сезонних композитних мозаїк на вісім тематичних класів; встановлено розподіл площі території досліджень за основними типами ландшафтів; для моделювання поведінки верхових лісових пожеж проаналізовано можливості картографування зімкнутості деревостанів (всі растрові тематичні шари спроектовано до просторового розрізнення 100 м, яке буде визначати детальність моделювання ризиків пожеж на ландшафтній основі); розроблено фізичну модель порталу на основі серверу геопросторової бази даних та програмне забезпечення на стороні веб-серверу (backend). Прототип порталу завантажено в глобальну мережу за адресою: landscapefires.org.ua.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	4
ВСТУП	5
1 ЗАПАСИ ГОРЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРИРОДНИХ ЛАНДШАФТАХ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ.....	8
1.1 Методика збору та аналізу параметрів лісових горючих матеріалів	8
1.2 Методика збору та аналізу параметрів горючих матеріалів відкритих ландшафтів	24
1.3 Особливості формування наземних лісових горючих матеріалів в соснових лісах Західного Полісся України	30
2 БІОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЛАНДШАФТІВ ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ ПРИРОДНИХ ПОЖЕЖ.....	41
2.1 Класифікація території досліджень за типами ландшафтів	41
2.1.1 Створення безхмарних композитних мозаїк за часовими серіями супутникових знімків Landsat 8 OLI	42
2.1.2 Схема класифікації ландшафтів і характеристика опорної інформації.....	54
2.1.3 Методика дешифрування супутникових знімків	57
2.2 Точність дешифрування вкритих і неvkритих лісовою рослинністю ділянок ...	70
2.3 Зімкнутість вкритих лісовою рослинністю ділянок.....	81
2.4 Вертикальна структура лісових насаджень.....	84
2.4.1 Висота намету деревостанів.....	84
2.4.2 Базова висота намету деревостанів	86
2.4.3 Щільність запасу горючих матеріалів у наметі деревостанів	87
2.5 Обґрунтування моделей горючих матеріалів для характеристики показників горимості ландшафтів	89
3 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОПОРТАЛУ	95
3.1 Програмні компоненти VPS	96
3.2 Модулі розширення на мові Python.....	97
3.2.1 Каркас веб-застосунків Django	98
3.2.2 Розширення Python NumPy, SciPy, netCDF4, GDAL, OGR, OSR.....	100
3.3 Реалізація QGIS серверу	103
ВИСНОВКИ	106
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	108
ДОДАТКИ	119

ВСТУП

Рослинні пожежі у природних ландшафтах України в останні десятиліття стають все більш небезпечним явищем, яке загрожує особистій безпеці населення, яке проживає біля лісів, помешканям та іншій інфраструктурі. Зростання тривалості посушливих періодів та частоти періодів із високою швидкістю вітру зумовлює якісно нові ризики розвитку інтенсивних пожеж на великих площах. Служби охорони лісів та пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України, в умовах що склалися, потребують удосконалення системи попередження охорони природних територій від пожеж. Створення спеціальних інформаційних онлайн платформ регіонального або національного рівня про ризики пожеж можуть бути використані керівниками підприємств, землекористувачів та протипожежних служб для планування та проведення попереджувальних заходів та організації гасіння пожеж.

В Україні функціонує відомча система землекористування та охорони природних ресурсів, що зумовлює недостатню координацію дій з попередження та гасіння ландшафтних рослинних пожеж між лісогосподарськими підприємствами, природоохоронними територіями, агролісгоспами, військовими лісгоспами та іншими лісокористувачами. У підсумку, типовою для України є така послідовність: пожежа розпочинається на землях сільськогосподарського призначення і розвивається у лісову (оскільки землекористувач не гасить її) після перетину меж землекористування між полем та лісом або у торф'яну. Цей проєкт має на меті наукове обґрунтування та розробку геопорталу «Ландшафтні пожежі», який створюють на всіх видах землекористування, де відбуваються пожежі, на території 6 областей Українського Полісся, що буде сприяти кращому розумінню довготривалих та поточних ризиків виникнення та розвитку пожеж і удосконаленню стратегії попередження пожеж на рівні центральних органів виконавчої влади та місцевому рівні. До початку цього проєкту в Україні відсутній такий інтегральний регіональний продукт у галузі управління природними пожежами.

У США подібний продукт спільно використовують різні відомства – Міністерство сільського господарства США, Міністерство внутрішніх справ та Бюро з управління земельними ресурсами. Користувачами цього інформаційного продукту є не тільки лісові господарства або заповідники, а й муніципалітети, які використовують цей продукт для прогнозування впливу пожеж на якість повітря та ризики для населення.

Зміни клімату, зміни землекористування та погіршення соціально-економічного становища населення в Україні призвели до різкого зростання кількості, площ та інтенсивності природних пожеж, а також збільшення кількості пожеж, які проходять територію декількох землекористувачів. Протягом останніх десятиліть річна кількість лісових пожеж в Україні зросла з 1–1,5 тисяч до 5–7 тисяч, річна площа лісів, пройдена вогнем – з 1,5–2,5 тис. га до 15–20 тис. га. Згідно з даними дистанційного зондування щорічно в Україні відбувається 200 тис. і більше пожеж на сільськогосподарських землях. Природні пожежі генерують викиди в атмосферу тисячі тон вуглецю, радіонуклідів та інших забруднювачів, наносять непоправні збитки народному господарству, здоров'ю населення, екосистемам, клімату та довкіллю як в Україні, так і на регіональному та глобальному рівнях, зокрема в країнах Європейського Союзу та Арктиці. Значну частину пожеж не виявляють і не гасять вчасно через міжвідомчі конфлікти між землекористувачами, які відповідальні за охорону територій від пожеж. Отриманий за результатами науково-дослідної роботи продукт, дозволить відкрити спільний доступ до даних та прогнозів представникам всіх зацікавлених відомств та землекористувачів.

Проект є першим етапом створення національної інформаційної системи моніторингу та прогнозування природних пожеж, що містить повноцінний базовий набір геопросторових даних, в тому числі щодо горимості, запасів рослинних горючих матеріалів, параметрів чинників пожежного середовища і повністю узгоджується із завданнями проекту Закону України «Про Національну інфраструктуру геопросторових даних».

Актуальність проєкту зумовлена зростанням кількості, площ та інтенсивності природних пожеж, збитків екосистемам та господарству, які вони наносять. Це зумовлює необхідність створення єдиного національного геопорталу природних пожеж, де будуть розміщені первинні набори геопросторових даних, моделі та кількісна інформація щодо рослинних горючих матеріалів та інших чинників, що визначають поведінку пожеж. Крім того проєктом передбачено розробку відповідного інформаційного забезпечення для прогнозування ризиків пожеж у природних екосистемах. Враховуючи сучасний світовий досвід вирішення цього питання, для моделювання ймовірних сценаріїв розвитку пожеж необхідні параметри природних екосистем у вигляді відповідних наборів геопросторових даних, які можуть бути отримані в результаті класифікації земного покриву за типами ландшафтів і запасами горючих матеріалів. Для лісових територій важливе значення має встановлення окремих показників деревного пологу, зокрема зімкнутості деревостанів. Більшість параметрів природних екосистем, які необхідні для прогнозування розвитку пожеж у ландшафтах України, застарілі або взагалі відсутні. За таких умов необхідно опрацювати методичну основу створення ключових шарів геопросторової інформації та науково-обґрунтованих підходів щодо прогнозування розвитку пожеж за різних кліматичних умов та сценаріїв реагування. Одержана в результаті імітаційного моделювання інформація дозволить визначити необхідні стратегії із зниження ризиків пожеж. Одержані результати досліджень будуть представлені у вигляді загальнодоступного геопорталу даних.

Ще одним аспектом актуальності виконання проєкту пояснюється необхідність впровадження у вітчизняну теорію та практику сучасних методів дослідження пожеж на ландшафтній основі. На результатах імітаційного моделювання і прогнозу розвитку, а також наборах геопросторових даних, розміщених на вебплатформі пожеж, базуються системи прийняття рішень та управління пожежами у розвинутих країнах світу.

1 ЗАПАСИ ГОРЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРИРОДНИХ ЛАНДШАФТАХ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ

1.1 Методика збору та аналізу параметрів лісових горючих матеріалів

У межах виконання наукового дослідження важливою задачею є вибір класифікації лісових горючих матеріалів. Під систематизацією розуміють поділ і ранжування всього різноманіття об'єктів за будь-якою ознакою і супідрядність їх таким чином, щоб нижчий ранг ставився до вищого, як частина до цілого [49]. Основним завданням класифікації природних об'єктів є зведення їх різноманіття до мінімального числа типів та врахування максимального числа чинників, що на них впливають. Згідно із загальноприйнятими підходами класифікація – це штучна модель досліджуваного явища, що необхідна для селективного використання сучасних інформаційних технологій. Під час класифікації об'єктів і явищ природного походження, дотримуються таких принципів [49]:

- сума виділених одиниць має бути рівною обсягу класифікованого родового поняття;
- у межах одного ступеня цієї класифікації, підпорядкованої одному родовому поняттю, має витримуватися тільки одна класифікаційна ознака (підстава поділу);
- групи, що виділені за видовими відмінностями, мають виключати один одного, щоб жоден об'єкт класифікації не можна було віднести до інших груп, тобто підмножини одного не мають містити загальних якостей із числа тих, які враховують під час класифікації.

Класифікацію ЛГМ здійснюють за двома напрямками: класифікація видів лісових (рослинних) горючих матеріалів та класифікація лісів як об'єкта, де формуються однорідні комплекси лісових горючих матеріалів (ЛГМ) [67].

До ЛГМ відносять лісові рослини (відмерлі або живі), а також їх залишки різного ступеня розкладання, які повністю або частково згоряють під час лісової пожежі. ЛГМ складаються в основному з клітковини, усереднений

хімічний склад якої $C_6H_9O_4$. Теплота згоряння сухих ЛГМ зазвичай варіює в межах 17–21 МДж/кг [67].

За відношенням до зволоження і висихання ЛГМ поділяють на дві великі категорії: гігроскопічні і негігроскопічні. До гігроскопічних відносять відмерлі ЛГМ – мортмасу (сухостій, сухий травостій, опад, пні, порубкові рештки, хмиз, підстилка тощо), а також несудинні рослини з відсутньою (лишайники) або погано розвиненою (мохи) кореневою системою. Вміст води у цій групі постійно змінюється залежно від поточних гідрометеорологічних умов. Максимальний вміст води гігроскопічних ЛГМ залежить від їх об'ємної щільності і може змінюватися від 100 (деревина) до 3000 % (сфагнум) [88].

До негігроскопічних ЛГМ відносять біомасу живих судинних рослин (дерева, самосів, підріст, підлісок, чагарники, напівкущі, травостій та ін.), здатних підтримувати у своїх тканинах певний рівень вмісту води. У шарі лісового живого надґрунтового покриття з негігроскопічних ЛГМ зазвичай переважають напівкущі і трави. Напівкущі мають здерев'янілі стебла, містять смоли та ефірні масла. Вони підтримують вологовміст на рівні 80–150 %. Згораючи у полум'ї лісової пожежі, вони підсилюють горіння й підтримують його поширення [67, 70]. Особливою пожежною небезпекою характеризуються густі зарості вересу (*Calluna vulgaris* (L.) Hill.) і багна (*Ledum palustre* L.). Трави, що вегетують, відрізняються високим змістом води, який зазвичай перевищує 200 %, а навесні, на початку вегетації, може досягати 700 % [9], тому всі види трав, що вегетують, перешкоджають поширенню горіння.

За верхових пожеж можуть згоряти живі частини дерева, як-от хвоя і листя в кронах деревостану разом із пагонами завтовшки до 7 мм та сухий хмиз. Вміст води у хвої в кронах у пожежонебезпечний сезон зазвичай коливається від 90–130 %, але її горіння відбувається за рахунок високого вмісту ефірних масел [59].

Серед найбільш поширених виділяють такі підходи до класифікації ЛГМ:

- за швидкістю їх висихання (National Fire Danger Rating System (NFDRS), використовується в США) [10];

- за місцем розташування у фітоценозі (Франція) [10];
- за їх походженням (генетична класифікація, запропонована М.А. Шешуковим [96];
- за участю або функцією, яку ЛГМ відіграють під час поширення і розвитку пожежі, з урахуванням їх фізичних властивостей та місця розташування в фітоценозі [67].

Класифікацію ЛГМ здійснюють на трьох рівнях:

- класифікація елементарних частинок комплексів ЛГМ, включаючи окремі рослини з живого надґрунтового покриву, підросту, чагарників, опад та деревні залишки на поверхні ґрунту, морфологічні частини дерев тощо, що не враховує дрібні частинки, які розглядають в сукупності у вигляді шарів (підстилка, торф та ін.);
- класифікація шарів ЛГМ всередині лісових ділянок;
- класифікація однорідних лісових ділянок як складних комплексів ЛГМ.

У пірологічних дослідженнях мають місце наступні класифікації ЛГМ, які широко використовують у світі.

Методика дослідження ЛГМ за системою моніторингу наслідків пожеж та їх інвентаризації (FIREMON). З метою дослідження ЛГМ у лісових насадженнях можна використовувати лінійні методи та методики закладання пробних площ та площадок. Однією з найпростіших лінійних методик визначення запасу наземних лісових горючих матеріалів є методика на базі програмного забезпечення *FIREMON* (Fire Monitoring and Inventory System) розроблена за участю Лісової Служби США та пожежних організацій. Застосування моніторингу та інвентаризації з метою оцінювання наслідків ландшафтних пожеж є критично важливою для документування наслідків пожежі, оцінювання шкоди та користі для екосистем та потенціалу для подальшого планування догляду в насадженнях пройдених пожежами різної інтенсивності.

Методи збору даних, які використовують у *FIREMON*, відносяться до лінійних [90]. Згідно з цією методикою на ділянках для обліку лісових горючих

матеріалів закладають трансекти (лінії) завдовжки 25 м, на яких проводять підрахунок різних фракцій лісової підстилки, вимірюють потужність підстилки, визначають відсоток покриття та середню висоту надґрунтового покриву, зімкнутість намету деревостану, для крупних деревних решток – їх стан.

Поділ на фракції здійснюють згідно з прийнятою у США класифікацією наземних горючих матеріалів, за якою виділяють дві великі категорії ЛГМ: відмерлі та живі. Відмерлі ЛГМ поділяють на 4 групи залежно від швидкості їх висихання (*time lag*): легкі (*1-hour time lag fuel*), середні (*10-hour time lag fuel*), важкі (*100-hour time lag fuel*) та дуже важкі (*1000-hour time lag fuel*). Живі горючі матеріали поділяють на дві групи: 1) трави та трав'янисті рослини; 2) хвоя, листя та гілки діаметром менше 6 мм у кронах дерев.

Згідно з цією методикою на пробних площах закладають 10–15 трансект завдовжки 25 м (на площі ділянки більше 20 гектар потрібно закладати більше 20 трансект для обліку), на яких проводять підрахунок кількості частинок ЛГМ кожної фракції, які перетинають трансекту. Підрахунок частинок фракцій 1-hour ($d < 0,5$ см) виконують на перших двох метрах трансекти, фракції 10-hour ($d = 0,6–2,5$ см) – на п'яти метрах, фракції 100-hour ($d = 2,6–7,5$ см) – на 10 метрах, фракції 1000-hour ($d > 7,5$ см) на усій трансекті. Трансекта має перетинати вісь гілки (колоди). Вісь має знаходитись над підстилкою у місці перетину з трансектою. У разі перетину гілки з трансектою у двох місцях необхідно враховувати кожен перетин окремо. Для фракції 1000 hour записують для кожної частини, яка перетинає трансекту, діаметр гілки (колоди) та клас розкладання.

Для обліку трав'янистих рослин та лісової підстилки закладають 4 площадки розміром 30×60 см. Відстань між площадками 2–2,5 м. Розміщують площадки квадратом паралельно до схилу, під кутом 90 градусів до трансекти, на відстані 2–2,5 м від початку трансекти. Визначають площадку з максимальною вагою рослин і приймають її за еталон. Для обліку підстилки використовують іншу частину площадки. Визначають площадку з максимальною вагою підстилки і приймають її за еталон. На інших площадках

визначають відсоток рослин та підстилки відносно еталонної площадки (0–5 %, 6–20%, 21–40%, 41–60%, 61–80%, 81–95%, 96–100%). На усіх площадках окомірно встановлюють відсоток відмерлих рослин та визначають проєктивне покриття трав'яної рослинності. З еталонної площадки збирають всі рослини та підстилку (опад залишають на місці). Зібрані зразки висушують за температури 95 °C 24 години та зважують з точністю до 0,01 грама.

Облік кущів проводять на двох площадках радіусом 57 см з визначенням деревних видів. Окомірно визначають проєктивне покриття кущів, окремо – живих та відмерлих. На обох площадках визначають середню висоту кущів. Кількість стовбурів визначають у відповідних класах розміру – до 0,50 см, 0,51–1 см, 1,01–1,50 см, 1,51–2,00 см, 2,01–3,00 см, 3,01–5,00 см, більше 5 см. Діаметр вимірюють на висоті 3–5 см від поверхні ґрунту або кореневої розетки. За допомогою цих даних визначають запас ЛГМ [6].

Використання програмного забезпечення *FIREMON* [11], яке автоматично обраховує запаси ЛГМ, не вимагає закладати облікові площадки. У такому випадку на двох точках трансекти визначають глибину та проєктивне покриття лісової підстилки, проєктивне покриття окремо живих та відмерлих дерев, кущів і трав'яних рослин. Кінцевим підсумком обробки даних є запаси окремих фракцій ЛГМ, які можуть бути використані для побудови моделей поведінки пожеж і динаміки запасу горючих матеріалів [11].

Облік та визначення запасу ЛГМ можна проводити шляхом закладання площадок розміром 1,0×1,0 м [93]. Згідно з цією методикою для оцінювання наземних горючих матеріалів на пробній площі, вздовж довгої її сторони провішують три лінії, які розміщують на однаковій відстані одна від одної. На цих лініях через кожні 10 м закладають пробні площадки розміром 1,0×1,0 м. На площадках збирають та зважують усі крупні та дрібні сучки, трав'яний покрив, напівчагарники, опад, лісову підстилку. З метою визначення вологості ЛГМ у лабораторних умовах відбирають їх середні зразки. Використання цієї методики дозволяє отримати дані про запаси наземних горючих матеріалів за основними видами [65].

Методика оцінювання ЛГМ за Національною системою оцінки пожежної небезпеки (NFDRS). У Національній системі оцінки пожежної небезпеки США ЛГМ ділять на дві категорії [37]: відмерлі (*dead fuel*) і живі (*life fuel*). Живі рослини зазвичай здатні підтримувати свій високий вологовміст, в той час як вміст води відмерлих ЛГМ залежить від процесів їх зволоження і висихання під впливом погодних умов. Такий поділ справедливий для основної частини території США, де в лісах практично відсутній мохово-лишайниковий покрив. Лишайники і мохи (за винятком мохів роду політріхум) не здатні активно підтримувати вміст води. Вони висихають і зволожуються подібно мертвим ЛГМ. На Поліссі України в сосняках лишайникових мохово-лишайниковий покрив поширений дуже широко, і тому американський поділ можна прийняти тільки за умови, що цей покрив буде розглянуто аналогічно до відмерлого ЛГМ. Останні залежно від часового лагу (*time lag*) розділені на чотири класи: легке, середнє, важке і дуже важке пальне. Під тимчасовим лагом розуміють період часу, протягом якого відбувається втрата двох третин (63%) тієї кількості води, яка може випаруватися з цього зразка ЛГМ за стандартних атмосферних умов, тобто $2/3 (M-M_p)$, де M – вміст води ЛГМ в цей момент; M_p – рівноважний вологовміст ЛГМ для стандартних умов.

У NFDRS стандартними умовами повітряного середовища є: температура повітря 26,5 °C і відносна вологість повітря 20 %. Слід зауважити, що часовий лаг – величина, постійна для згаданого зразка ЛГМ, і не залежить від його вологовмісту. Це пояснюється тим, що швидкість висихання прямо пропорційна різниці $M-M_p$. У процесі висихання ця різниця зменшується, отже, знижується швидкість висихання.

До першого класу (*1-hour time lag fuel*) відносять ЛГМ із середнім тимчасовим лагом 1 год. (0–2 год.). Зазвичай це всохлі трав'янисті рослини і сухі рослинні частинки діаметром до 6 мм (опад хвої і тонких гілочок). До другого класу (*10-hour time lag fuel*) відносять ЛГМ із середнім тимчасовим лагом 10 год. (2–20 год.). Зазвичай це опале гілля діаметром від 6 до 25 мм. Третій клас (*100-hour time lag fuel*) має середній часовий лаг 100 год. (20–200

год). Зазвичай це валіжник або порубкові залишки діаметром від 26 до 75 мм. Четвертий клас (*1000-hour time lag fuel*) має середній часовий лаг 1000 год. (200–2000 год.) і відповідає валіжнику діаметром від 76 до 200 мм.

Живі ЛГМ (*life fuel*) поділяють на два класи: 1) трави і трав'янисті рослини; 2) хвоя, листя і гілки діаметром менше 6 мм в кронах деревостану. Згідно з даними обстеження горільників, діаметр 6 мм – це верхня межа діаметра живих деревних матеріалів, які повністю згоряють під час лісової пожежі. Сухі трав'янисті рослини та трав'яні рослини, що вегетують, утворюють єдиний живий надґрунтовий покрив і виділені в особливий клас ЛГМ – «дрібне пальне» (*fine fuel*). Саме цей клас є основним провідником горіння в американських моделях горючих матеріалів [59].

Для оцінювання співвідношення рослинності, що вегетує, та відмерлої в системі NFDRS використовують щотижневі супутникові дані про відносний рівень «зеленості» (*greenness*) рослинної поверхні. Цей показник – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – розраховують за даними, що отримують зі супутників серії NOAA у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах. Індекс NDVI безпосередньо пов'язаний із кількістю і вмістом вологи у живій рослинності.

У NFDRS за тимчасовим лагом класифікують також і шари надґрунтового покриву. До 1 класу (пальне з 1-годинним лагом) відносять верхній шар опаду завтовшки до 6 мм; до 2 класу (пальне з 10-годинним лагом) – шар опаду (підстилки) завглибшки від 6 до 25 мм; до 3 класу (пальне з 100-годинним лагом) – шар підстилки, розташований завглибшки від 25 до 100 мм; до 4 класу (пальне з 1000-годинним лагом) – шари підстилки, торфу, перегною, розташовані завглибшки від 100 до 300 мм.

У роботі І. Мелехова [70] відзначено, що швидкість висихання шарів опаду і підстилки (торфу) визначають не тільки глибиною їх розташування, а й режимом їх ґрунтового зволоження і ступенем рихлості шару. Тому наведена вище класифікація досить умовна.

Методика оцінювання ЛГМ за Канадською Національною системою оцінки пожежної небезпеки (CFFDRS). У Канаді для оцінювання та прогнозування лісопожежної обстановки використовують систему CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System). Вона складається з чотирьох підсистем:

- підсистема індексного оцінювання пожежної небезпеки в лісах за умовами погоди *FWI*;
- підсистема прогнозу поведінки лісової пожежі *FBP*;
- підсистема *Assessor Fuel Moisture System*, що дозволяє оцінювати вміст вологи у лісових горючих матеріалах, відмінних від «стандартного» типу;
- підсистема для прогнозування виникнення пожеж від блискавок та з вини людини.

Остання підсистема знаходиться у процесі розробки. У канадській класифікації ЛГМ ділять на три великі групи: ґрунтові (*ground fuels*), що включають гумус, торф, коріння; надґрунтові (*surface fuels*), що включають опад листя і хвої, сухий травостій, дрібні чагарники, великий валіжник; горючі матеріали в кронах (*crown fuels*), куди входять гілки з хвоєю і листям та відмерлі сучки.

Для оцінювання пожежної небезпеки та прогнозування поведінки лісової пожежі за цією системою виділено 16 типових лісорослинних комплексів (моделей) (*fuel type*), що представляють собою категорії ділянок, що належать до лісової площі, вкритої (хвойні ліси – сім типів, листяні – один, змішані – чотири) або не вкритої лісом (зруби – три типи), а також до нелісової площі (луки – один тип). Як еталон для оцінювання пожежної небезпеки за умовами погоди обрано тип лісу сосняк зеленомошній на дренажних ґрунтах, в якому надґрунтовий покрив розділений на три шари, приблизно однорідних за вмістом вологи:

- 1) верхній шар зеленого моху завтовшки 1–2 см із включенням в нього опадом;
- 2) нижній шар моху завтовшки 2–4 см;

3) шар підстилки завтовшки 3–5 см.

Виділені типові комплекси ЛГМ далеко не вичерпують все різноманіття лісів та нелісових площ Канади. Більше того, вибір деяких типів, ймовірно, визначали наявним фактичним та емпіричним матеріалом про поведінку пожеж. Тому, використовувати підсистему FWI рекомендовано лише на територіях, де лісова рослинність відповідає типовим комплексам ЛГМ, для яких розроблено моделі горючих матеріалів.

Методика класифікації та оцінювання запасів ЛГМ М.П. Курбатського. Для оцінювання запасів надґрунтових лісових горючих матеріалів можна використовувати методику М.П. Курбатського [67]. Згідно з нею пробні площі закладають на ділянках із різними лісорослинними характеристиками. Під час закладання пробних площ фіксують: склад деревостану, середній вік дерев панівної породи, повноту, тип лісу. Для визначення запасів горючих матеріалів в кронах хвойного молодняка (підросту) різної висоти збирають хвою та всі гілки, а також вершинну частину завтовшки до 7 мм включно – за чотирма породами: сосна, кедр, ялина та ялиця, з відбором 5-ти зразків кожної породи. Висоту молодняка під час дослідження фіксують з точністю до 1 см.

Для визначення запасу ЛГМ у кронах хвойних дерев різного віку (3–5 модельних дерев з кожної породи) обрубують по 3–5 гілок на різних висотах. Після чого збирають хвою та всі гілки завтовшки до 7 мм включно. При цьому фіксують довжину гілок, взятих для зразка, повноту насадження, вік, висоту й діаметр дерева на висоті грудей, форму крони, підраховують середню відстань між мутовками та середню кількість гілок у мутовці.

Зразки ЛГМ рекомендовано відбирати в липні–серпні. Зразки ЛГМ висушують у лабораторних шафах за температури 105 °C до абсолютно-сухого стану. Зважування здійснюють на електронних вагах із точністю до 0,1 г.

Засновником класифікації, яка відображає виконувані функції ЛГМ під час пожежі, є М.П. Курбатський [67]. Він розділив всі ЛГМ на три категорії: провідники горіння; підтримувачі горіння; затримувачі горіння. При цьому необхідно пам'ятати, що горіння поширюється тільки тоді, коли вміст вологи

ЛГМ знаходиться в необхідному для цього діапазоні. В іншому випадку провідник горіння може стати затримувачем горіння.

Крім того, М.П. Курбатський виділив сім груп ЛГМ:

I – шари з мохів, лишайників та дрібних рослинних залишків (опад, сухий травостій);

II – підстилка, перегнійний та торф'яний ґрунтові горизонти;

III – трави та чагарники;

IV – крупні деревні залишки (сухостій, валіжник, сучки, пні, порубкові рештки);

V – підріст, чагарники;

VI – хвоя та листя дерев, що ростуть (разом із дрібними гілочками до 7 мм);

VII – стовбури дерев, що ростуть та живі сучки завтовшки >7 мм.

ЛГМ кожної групи в різних біогеоценозах можуть істотно відрізнятися за своїми лісівничо-пірологічними властивостями. Тому потрібна подальша класифікація всередині груп на однотипні комплекси ЛГМ [89]. Класифікацію ЛГМ всередині I групи запропонував Е.В. Конєв [63]. Він розділив їх за видом пального на відмерлий травостій, опалу хвою, опале листя, лишайники та деякі мохи.

А.П. Яковлев [97] у сосняках і модринниках Південно-Західної Якутії виділив шість типів надґрунтових горючих матеріалів: лишайниковий, мертвопокровний з мучницею звичайною, хвойний, моховий, трав'яний та сфагновий. Оцінено швидкість їх пожежного дозрівання та подано розподіл за типами лісу.

Існує класифікація за черговістю загоряння ЛГМ та їх приуроченістю до типів лісу й рослинних асоціацій [55], яка включає 10 пірологічних типів мохово-лишайникового та відмерлого покриву із зазначенням повноти насадження і величини лісівничо-пожежного показника посухи, за якого кожна категорія досягає стану готовності до горіння – «пожежної зрілості». До шкали додають лісівничо-пірологічні умови (укрупнені групи деревних порід різних за

складом, вік, захищеність, наявність густого хвойного підросту, умови місцезростання, експозиція та крутизна схилу), за яких можлива загибель або серйозне пошкодження деревостану в результаті пожежі. Наразі це найбільш повна з наявних класифікацій для ЛГМ першої групи (за класифікацією М.П. Курбатського).

В той же час М.А. Софронов та А.В. Волокітіна [91] запропонували вдосконалити згадану класифікацію і замість показника посухи запропонували вказувати клас посухи. Їхня характеристика території за можливими видами, силі та наслідками пожеж доповнює оцінку природної пожежної небезпеки лісів у Російській Федерації.

«Генетичну» класифікацію ЛГМ для лісів Далекого Сходу з урахуванням щільності їх складання запропонував М.А. Шешуков [96]. У цій класифікації ЛГМ утворюють вихідну підсистему, що безперервно змінюється за своїм кількісним та якісним станом, а лісові пожежі – похідну підсистему. Імовірність виникнення лісових пожеж обумовлена як природними, так і антропогенними чинниками. Вже згадана класифікація – чотири ступенева. За походженням та з урахуванням подальшої трансформації всі ЛГМ в ній поділяють на два класи: вихідні (первинні) і трансформовані (вторинні). Для Далекого Сходу М.А. Шешуков виділив 8 типів ЛГМ:

- хвойний (опад хвої та підстилка);
- листопадний (опад листя з підстилкою);
- трав'яний (опад трави з підстилкою або дерниною);
- лишайниковий (лишайники з підстилкою);
- зеленомошний (зелені мохи з підстилкою);
- сфагновий (сфагнум з торфом);
- багновий (багно з підстилкою);
- бамбуковий (бамбук з підстилкою).

Виділені типи ЛГМ дуже неоднорідні за пірологічними властивостями. Наприклад, пухкий опад порід із довгою хвоєю (кедр, сосна) та щільний опад порід із короткою хвоєю (ялина, модрина) висихають й горять зовсім по

іншому, хоча і відносяться до одного хвойного типу. Такі ж відмінності у пухкого опаду листя дуба та щільного опаду листя осики в листопадному типі ЛГМ. Великі відмінності є між дрібнотравним та крупнотравним надґрунтовим покривом. Суттєво розрізняються за пожежною небезпекою ділянки лісу з зеленомошним покривом на дренажованих та слабо дренажованих ґрунтах. Багно зазвичай не є провідником горіння, а тільки підсилює горіння безперервного шару ЛГМ, що знаходиться під ним (мохи, лишайники або опад).

Зазначені недоліки були відзначені та усунені А.В. Волокітіною та М.А. Софроновим [89]. Поділ ЛГМ на групи за їхньою класифікації таке ж, як і у М.П. Курбатського. До першої групи ними виділено основні провідники горіння (ОПГ) – це безперервний шар рослинного горючого матеріалу на поверхні ґрунту, що складається з гігроскопічних ЛГМ (дрібні рослинні залишки, мохи, лишайники тощо), яким може самостійно поширюватися полум'яне горіння. Як головний класифікаційний критерій під час поділу підгрупи на типи вони запропонували час настання пожежного дозрівання, який пов'язано з певним лісівничо-пожежним показником посухи. Ця класифікація ЛГМ не пов'язана з загальноприйнятою класифікацією лісових пожеж та не дозволяє відразу оцінити можливість загоряння лісової ділянки за появи джерел вогню, що зменшує її затребуваність фахівцями в галузі охорони лісів від пожеж та ускладнює практичне застосування в ГІС.

Відмінності у підходах та формах класифікацій свідчать про те, що до теперішнього часу в лісовій пірології немає загальноприйнятої класифікації ЛГМ, що перешкоджає уніфікації нормативно-довідкового матеріалу і можливості застосування даних лісовпорядкування, а також ускладнює формалізацію вихідних даних, необхідну під час використання сучасних інформаційних технологій.

Для вирішення завдань прогнозування поведінки лісових пожеж класифікація ЛГМ має бути прив'язана до загальноприйнятої класифікації лісових пожеж і єдиної або місцевої шкали пожежної небезпеки за умовами погоди. Найбільш логічно класифікувати ЛГМ відповідно до загальноприйнятої

класифікації лісових пожеж, тобто за місцем знаходження конкретного паливного матеріалу в багаторусланому рослинному покриві лісів та його роллю в процесі розвитку й поширення горіння. Оскільки лісові пожежі поділяють на три основних види (низові, верхові, підземні), що розрізняються за участю в горінні різних ярусів ЛГМ, то логічно під час класифікації ЛГМ виділити саме ті їх групи, які спричиняють ці види пожеж [59].

Система прогнозування поведінки пожежі на основі параметрів ЛГМ, погоди й рельєфу BehavePlus. Це вдосконалена версія BEHAVE, що використовує ті ж математичні моделі. Як вхідні параметри застосовують температуру, відносну вологість повітря, швидкість і напрям вітру, ухил місцевості, моделі горючих матеріалів, їхню вологість за класами розмірів. Такий набір параметрів дозволяє повністю відтворювати умови пожежі. У BehavePlus використовують 13 оригінальних моделей горючих матеріалів за Андерсеном (fuel model (FM)) та динамічні моделі за Scott & Burgan (2005) [41]. На основі моделі Р. Ротермела (1972) [37] в системі BehavePlus передбачено обчислення 189 вхідних змінних і вихідних параметрів пожежі, які упорядковані в 13 груп:

- 1) швидкість поширення та інтенсивність низової пожежі;
- 2) поверхневі горючі матеріали;
- 3) вологість поверхневого шару горючих матеріалів;
- 4) швидкість і напрям вітру;
- 5) ухил місцевості;
- 6) параметри верхової пожежі;
- 7) розмір безпечної зони;
- 8) розмір та форма полум'я;
- 9) тактика зупинки вогню;
- 10) вимірювання відстані;
- 11) висота факела полум'я;
- 12) відпад дерев;
- 13) ймовірність загоряння.

Моделювання пожеж переважно базується на експертному оцінюванні можливого сценарію їхнього розвитку, а перелічені показники є критеріями, за якими визначається відповідність прогностичних параметрів пожежі реальним умовам.

Моделі горючих матеріалів (*fuel model*) – це сукупність чисельних значень, що описують витрати горючих матеріалів для математичної моделі Ротермеля, яка прогнозує поширення пожежі на поверхні. Існує 53 стандартних моделі горючих матеріалів, включаючи 13 оригінальних, які були описані Андерсоном (Anderson, 1982), а також 40 динамічних, які були додатково визначені в роботі Scott & Burgan (2005) [41].

Тип моделі горючих матеріалів (*fuel model type*) – розділяють статичний та динамічний типи моделей ЛГМ. Динамічні моделі враховують компонент живого трав'яного покриву, частина якого переноситься в запаси горючих матеріалів відмерлої рослинності під час горіння. Цей процес залежить від вмісту вологи: чим нижчий вміст вологи, тим більша частка живих компонентів трав'яної рослинності переходить у відмерлі.

Система картографування та аналізу пожеж FlamMap. Ця система дозволяє спрогнозувати потенційну поведінку пожежі з урахуванням умов навколишнього середовища (погода та вологість ЛГМ). Для прогнозування поведінки пожежі необхідно розрахувати наступні елементи: швидкість розповсюдження низової пожежі, довжину полум'я, тип верхової пожежі (*active, passive, independent*), швидкість розповсюдження верхової пожежі, вид та вологість ЛГМ, характеристики рельєфу (схил, експозиція, висоти, аспект) та погоду.

Для створення моделей ЛГМ враховують дані щодо повноти й висоти деревостану, протяжності крони, видового складу, а також розміри й структуру наземних ЛГМ. З метою визначення видів ЛГМ на дослідних ділянках рослинність класифікують відповідно до панівного типу рослинності або за типом землекористування (пасовища, забудовані території, чагарники, лісові насадження тощо). Потім стратифіковані ділянки обстежують на місці і

підбирають 40 (розміром 1×1 м) репрезентативних точок для відбору зразків ЛГМ. На кожній ділянці для відбору зразків визначають такі параметри ЛГМ:

- середню висоту рослинності (м) з точністю 1/10;
- запас ЛГМ 1 год. (кг) (*1-hour time lag fuel*), з частинками діаметром до 0,6 см;
- запас ЛГМ 10 год. (кг) (*10-hour time lag fuel*) з частинками діаметром від 0,6–2,5 см;
- запас ЛГМ 100 год. (кг) (*100-hour time lag fuel*) з частинками діаметром від 2,5–7,5 см;
- вегетуючий травостій (діаметр <6 мм) (кг),
- загальний запас ЛГМ (кг);
- запас (кг) та глибину підстилки (см).

Середню висоту деревостану вимірюють як вертикальну відстань від верхівки до поверхні землі. Вимірювання здійснюють у трьох точках вздовж трансекти, що проходить через дослідну ділянку і обчислюють середнє значення висоти на ділянці. Запаси частинок 1-год., 10-год., 100-год. та інших ЛГМ визначають методом зважування (Brown et al., 1982). На кожній ділянці вимірюють глибину та запаси підстилки, листя, трав'яної рослинності (відмерлої та живої), чагарничків і чагарників заввишки до 2,0 м. Глибину підстилки вимірюють за допомогою лінійки. Усі зразки ЛГМ після відбору і зважування в польових умовах складають в пластикові пакети. Потім зразки висушують до повітряно сухого стану в сухожаровій шафі за температури 105 °С протягом 24 годин та зважують повторно. Вміст вологи у ЛГМ (*fuel moisture content – FMC*) розраховують шляхом знаходження різниці сухої ваги (*Wd*) від ваги в польових умовах (*Wf*) і відношенням результату до сухої ваги, використовуючи наступне рівняння [10]:

$$FMC = ((Wf - Wd) / Wd) \times 100, \quad (1.1)$$

Рослинність трав'яного та трав'яно-кущикового ярусів зрізують на рівні земної поверхні й розділяють на компоненти – листки й стебла. Відібрані

зразки розділяють на відмерлі й живі, а потім частки менше 7,5 см в діаметрі, додатково розділяють на три класи за розміром (0–0,6 см, 0,6–2,5 см і 2,5–7,5 см) [38, 29, 5, 6, 40].

Під час розробки моделей ЛГМ насадження з подібними лісівничо-таксаційними показниками (повнотою, висотою, віком, видом, кількістю й глибиною горючого матеріалу та надґрунтовим покривом) відносять до однієї моделі. Запаси усіх ЛГМ у моделях відображають в тоннах на гектар.

Повний комплекс системи картографування та аналізу пожеж FlamMap включає наступні програмні продукти: *FARSITE* [16], *FlamMap BASIC* [13], *Minimum Travel Time* [17, 13], *Treatment Optimization Model* [15, 13, 14], та *Conditional Burn Probability* [9, 12]. Система FlamMap включає наступні моделі поведінки пожежі [110]:

- Rothermel's (1972) модель розвитку низових пожеж;
- Van Wagner's (1977) модель ініціювання верхової пожежі;
- Rothermel's (1991) модель розвитку верхових пожеж;
- Albini's (1979) модель виникнення плямистих пожеж;
- Finney's (1998) or Scott and Reinhardt's (2001) модель розвитку плямистих пожеж;
- Nelson's (2000) модель вологості відмерлого горючого матеріалу.

Для роботи системи FlamMap необхідно наступні вісім шарів геопросторових даних:

- Topographic (висота, схил, експозиція);
- Fire Behavior Fuel Models (поведінка пожежі);
- Forest Canopy Cover (характеристика насадження);
- Forest Canopy Height (характеристика насадження);
- Forest Canopy Base Height (характеристика насадження);
- Forest Canopy Bulk Density (характеристика насадження).

Також для більш точного моделювання пожеж система потребує інформацію щодо зволоження відмерлого та живого видів ЛГМ, дані про

погоду, швидкість та напрямок вітру. З метою корегування характеристик і параметрів вітру в систему включено програмний додаток *WindNinja*. Цей додаток дозволяє використовувати повну інформацію про вітер та його параметри для будь-якого моделювання [18].

1.2 Методика збору та аналізу параметрів горючих матеріалів відкритих ландшафтів

До відкритих ландшафтів належать луки, галявини, перелоги, поляни та інші не вкриті лісовою рослинністю ділянки. У межах виконання цієї науково-дослідної роботи до уваги прийнято найбільш поширені види відкритих ландшафтів для регіону дослідження, які характеризуються значними запасами горючих матеріалів – луки та перелоги.

Перелоги – один із видів сільськогосподарських угідь, переважно орних, що втратили родючість і не були в обробітку протягом кількох років [60]. На ділянках, зайнятих перелогам, формуються сприятливі умови для відновлення природного рослинного покриву [62]. За іншим визначенням, перелоги – заросле травною полем, що свідомо не обробляється кілька років для відновлення родючості ґрунту; земля, що ніколи не оброблялась або цілина [56, 60]. З пірологічної точки зору, перелоги є динамічними комплексами природних горючих матеріалів, які мають властивість змінювати кількісні і якісні характеристики протягом вегетаційного сезону чим створюють загрозу виникнення та поширення пожеж на лісові площі.

Луки – природні кормові угіддя помірно зволжених місцезростань, травостої яких представлені багаторічними видами – мезофітами (рослинами, що для нормального росту і виживання в ценозах потребують стійкого вологозабезпечення впродовж всього вегетаційного періоду). У сільському господарстві луки використовують як сінокоси та пасовища. Їм, як і перелогам, властива сезонна та річна мінливість за характеристиками горючих матеріалів. Луки поширені у всіх рівнинних та гірських географічних місцевостях і

відіграють важливу сільськогосподарську й природоохоронну роль. Проте за екологічними показниками найбільше відповідають лісовій зоні. У разі знищення лісів як первинної рослинності луки спонтанно заповнюють звільнені місця, а під час тривалого припинення сінокосіння чи випасання, за винятком окремих місцезростань, поступово змінюють ліси як корінна рослинність [51].

Рослинні угруповання складаються з великої кількості видів, які формують складну просторову архітектуру, що змінюється у часі. Відмінною рисою трав'янистих фітоценозів є їх низька радіальна товщина та щорічне майже повне відмирання надземної фітомаси із закінченням вегетаційного сезону. Специфікою таких типів рослинних систем є надзвичайно низьке накопичення речовини та енергії переважно в підземних органах багаторічних рослин [80, 77]. У біогеоценозах лук та перелогів кожного року весь біоценологічний процес розпочинається з нульового циклу і максимальних значень набуває на початку літа, після чого система поступово завмирає та структурно руйнується восени в результаті засихання рослин та перетворення їх на морт-масу та підстилку [77].

У зоні Полісся всі ценози лук та перелогів контактують з лісовими масивами, завдяки чому, так чи інакше, постійно перебувають під їх впливом. Це виражається в перенесенні з прилеглих лісів різних рослинних матеріалів, насіння (завдяки чому відбувається поступове заліснення територій), мікроорганізмів тощо [77].

Методика вивчення горючих матеріалів, що формуються на лучних фітоценозах. Пробні площі для геоботанічного опису закладають в однорідних ділянках рослинності, відзначених у ході рекогносцирувальної експедиції: відмінні окомірно варіанти сухих і вологих лісів, луків, рудеральні угруповання та інші. Використовують для описів пробні площі квадратної форми, для лісів вони можуть бути 25х25 м, для луків – 5х5 м або частіше 10х10 м. Рослинність, фітоценози якої мають менші розміри або представлені вузькими смугами (прибережно-водна рослинність, зарості рудеральних рослин уздовж доріг), допустимо описувати в природних межах [52].

Перед описом пробних площ визначають основні типи луків, виявляють найтиповіші асоціації та їх екологічні ряди. Під час вивчення заплавних луків ефективним є метод профільних ліній, які пересікають заплаву річки від тераси до русла. Пробні ділянки закладають саме по профільних лініях. Розмір пробної площі 10x10 м. У межах цієї площі закладають 10 облікових площадок 1 м² найчастіше по діагоналі, на яких і проводять детальне дослідження видового складу, чисельності, життєвості, рясності та інших параметрів травостою [52].

Надземну фітомасу травостою визначають зрізуванням на рівні ґрунту надземної біомаси з облікових ділянок. Для визначення врожаю з точністю 20% звичайно достатньо трьох ділянок по 1 м² або двох ділянок по 4 м². Під час вивчення динаміки наростання біомаси зрізування виконують з весни (перший укіс – період найбільшої продуктивності – друга і третя декади травня) та в кінці вегетації (третій укіс – друга й третя декади серпня). Рослинні зразки зважують, висушують за температури 105 °С. Облік запасів підстилки в трав'янистих фітоценозах виконують шляхом збирання на пробних площах із ділянок площею 0,25 м² з шестикратним повторенням. Запаси фітомаси видів визначають шляхом розбирання вручну укісних снопиків, зважування рослин у вологому та абсолютно сухому стані та перерахунку запасів на 1 га угідь [79, 83].

Дослідники, які займалися питаннями біологічного кругообігу рослинних угруповань вважали, що вся надземна частина лучних травостоїв переходить повністю в опад. Однак це припущення не цілком відповідає дійсності, бо до складу едифікаторів лучних угруповань входять наступні групи рослин:

- однорічні рослини, вся надземна частина і коріння яких щорічно відмирають і переходять в опад.
- багаторічні трав'янисті рослини, вся надземна частина яких щорічно відмирає і переходить в опад, а коріння зберігає тривалу життєздатність і щорічно відмирає лише частина, головним чином тонких, всмоктувальних корінців.

- багаторічні рослини, у яких щорічно відмирає і переходить в опад лише частина надземних органів (листя, генеративні пагони), тоді як деяка частина листя зберігається до весни. Крім того, у дерновинних злаків (ковили, типчака та ін.) вузли кущіння мають тривалість життя кілька років і відмирають лише після утворення генеративного пагону [78]; у багатьох випадках поруч із вузлом кущіння, що відмирає, виникає новий молодий вузол. Таким чином, в опад від дерновинних злаків щорічно надходить, крім названих листя й генеративних пагонів, ще й якась частка (залежно від тривалості життя, різної у різних видів) вузлів кущіння та відповідних їм коренів, а також деяка частина тонких всмоктувальних корінців [78].

- багаторічні рослини, у яких повністю відмирає надземна частина і переходить в опад, а підземні частини у вигляді цибулин, бульб та кореневищ зберігаються тривалий час, і в опад надходять лише тонкі всмоктувальні корінці та деяка частка цибулин або кореневищ.

- багаторічні рослини – монокарпики, у яких щорічно відмирають вегетативні пагони (листя) та деяка частина тонких корінців, а з утворенням генеративного пагону і після дозрівання насіння відмирає вся рослина, отже, в опад надходить вся надземна та підземна частини.

Таким чином, визначення загальної суми річного опаду надземних частин рослин і їх підземних органів у лучних спільнотах є безумовно складним завданням, що вимагає уваги і точного знання морфології, біологічних особливостей і віку едіфікаторів та інших рослин [83, 78].

Рослинні угруповання, особливо в заповідних умовах, характеризуються накопиченням великої кількості відмерлих залишків, що сягають $95\text{--}100 \text{ ц} \cdot \text{га}^{-1}$ [78] і перевищують у декілька разів вагу живої, зеленої маси травостою [50, 85]. Шляхом чотирирічних спостережень встановлено, що накопичення опаду відбувається протягом майже всього року, проте в різні сезони проходить з різною швидкістю. Навесні й на початку літа переходять в опад пагони, що перезимували минулого року (або якась їх частина); пізніше, в період інтенсивного розвитку травостою, цей процес сповільнюється; влітку, з

поступовим призупиненням наростання зеленої маси, починається відмирання пагонів генерації поточного року, що посилюється до кінця вегетаційного періоду [85]. Рослинні угруповання за сінокісного використання, так само як за випасання, відрізняються ваговим переважанням зеленої маси над відмерлими залишками.

Основна складність полягає в тому, що в густому травостої неможливо встановити ящики для збору опадів площею 1 м² (подібно до того як це відбувається у лісі), не порушуючи мікроекологічних умов. Використання ж ящиків меншого розміру не дасть потрібного ефекту, так як довгі стебла злаків та різнотрав'я не вміщуються в такий опадозбирач [50].

Розчищення облікових майданчиків. Для збору опадів, пробну площадку розміром 1 м² потрібно обгородити металевою сіткою, щоб запобігти виносу опалого матеріалу вітром, а також не допустити принесення такого ж матеріалу з боку. Ранньою весною з площадок повністю видаляють всю підстилку, але дрібну вітош залишають. Далі протягом усього року, включно до наступної весни, проводять неодноразовий збір всіх опалих на землю частин. Зібраний опад зважують на кожній площадці окремо з подальшим висушуванням за температури 105 °C (у разі великих кількостей опадів проводять зважування в сирому стані, після чого ретельно відбирають середню пробу з триразовим повторенням для визначення вмісту вологи і подальшого перерахунку на абсолютно суху речовину). Треба мати на увазі, що видалення з поверхні ґрунту на облікових площадках підстилки накопиченої за попередні роки, може призвести до різкої зміни умов існування травостою, насамперед температурного режиму та режиму вологості, і викликати передчасне засихання та відмирання рослин або частин їх надземних органів. Тому таким способом можна отримати дещо спотворені дані [83, 78, 50].

Збір опадів без видалення підстилки. Ранньою весною з обгороджених площадок вибирають всю вітош, тобто торішні відмерлі частини рослин, що залишилися на корені. Далі регулярно проводять збір із поверхні відзначених для спостережень площадок всіх свіжоопалих частин, які за зовнішнім

виглядом відрізняються від минулорічних, що утворюють підстилку. У самому кінці вегетаційного періоду з облікових площадок прибирають (зрізають) всі інші, ще залишилися на місці, але відмерлі пагони, не чіпаючи зелених і живих пагонів, які будуть зимувати. Таким чином, за один вегетаційний період може бути врахований опад за рік. В обох рекомендованих способах необхідне десятикратне повторення. Бажано з метою взаємоперевірки провести збір опадів одночасно обома способами. Для обліку частки опадів від багаторічних вузлів кушніння дерновинних злаків слід вибрати по кілька модельних дерновин різних класів за розміром (а отже, і за віком) та за ними встановити відсоток відмерлих в поточному році вузлів кушніння. У разі забезпечення достатнього повторення в результаті можна отримати близькі до дійсності дані про кількість щорічного опадів цих багаторічних органів [78, 85]. Підсумовування величини опадів, зібраного на площадках і визначеного за модельними дерновинами (з перерахунком тих та інших на 1 га), дасть у результаті загальну кількість органічної речовини річного опадів [78].

Метод обчислення опадів. Беручи до уваги наведене вище, обчислення кількості органічної речовини, яка переходить в опад протягом року, стає можливим на підставі повних даних про органічну масу та її структуру. Для цього необхідно підсумувати наступні величини:

- органічну масу однорічних рослин;
- органічну масу листя та стебел торішньої генерації у багаторічних рослин;
- органічну масу генеративних пагонів злаків, що вирости й відмерли у поточному році;
- органічну масу листя, вегетативних та генеративних пагонів багаторічних рослин, що відмирають у поточному році (не залишаються зимувати);
- органічну масу плодів і насіння поточної генерації всіх рослин.

Цілком природно, що правильне обчислення цієї величини повністю залежить від точного знання біологічних особливостей рослин, що створюють основну масу органічної речовини, тобто тих рослин, які накопичують більше

10% їх загальної кількості в досліджуваному угрупованні. Крім опад листових і стеблових органів, слід враховувати насіння і плоди, які, потрапляючи в ґрунт, часто не беруть до уваги. Кількість насіння може бути дуже великою. Наприклад, за різних умов за сезон може опадати на землю до 20 000 насінин на 1 м², тобто до 20 млн. штук на 1 га [50]. Також відомо, що велика кількість насіння залишається в ґрунті й мінералізується там, не даючи сходів, так само як мінералізується велика кількість сходів, що гинуть на ранніх стадіях розвитку [83, 78].

1.3 Особливості формування наземних лісових горючих матеріалів в соснових лісах Західного Полісся України

Ризик розвитку лісової пожежі визначається наявністю неперервного шару горючих матеріалів, яким поширюється горіння. У соснових лісостанах провідниками горіння найчастіше є опад, мохи, лишайники та лісова підстилка [89, 67, 58]. В нинішній час комплексних досліджень лісових горючих матеріалів у регіоні Західного Полісся України немає, вивчались лише запаси та фракційний склад підстилки соснових насаджень в межах дослідження у 70-х роках малого біологічного кругообігу речовин [76]. Результати попередніх досліджень ЛГМ, які були проведені в Україні іншими вченими дозволяють виконати загальну оцінку запасів горючих матеріалів в лісах українського Полісся [54, 66, 58], проте для більш повного аналізу потрібно мати поглиблену інформацію – фракційний склад наземних горючих матеріалів, потужність, щільність, а також висоту, склад та проективне покриття ярусів рослинності (живого надґрунтового покриву, підросту, підліску), які в сукупності дають можливість змодельовати розвиток лісової пожежі в конкретних умовах. Так, за даними М. Софронова наявність у насадженнях підліску та підросту може суттєво підсилювати низові пожежі за показника його зімкнутості на рівні 0,3 і вище, а ярус трав'янистих рослин і кущиків доцільно враховувати за його проективного покриття на рівні 0,4 і вище [89]. Під час стійких низових пожеж,

значні запаси лісової підстилки сприяють пошкодженню кореневих систем та стовбурів, що підвищує відпад дерев у насадженнях [86]. Температура горіння ЛГМ залежить від запасу та вологості підстилки, а також від наявності та складу живого надґрунтового вкриття й запасу опаду [69]. Також згідно з класичними положеннями, ЛГМ поділяються за їхньою участю у процесі горіння на ті, що підтримують горіння, затримують або не беруть участі у горінні та ті, що є провідниками горіння [67, 89]. Отже, системні дослідження накопичення ЛГМ та їх зв'язку з лісівничо-таксаційними показниками насаджень у західному Поліссі не проводилися, що зумовлює актуальність цього напрямку лісівничо-пірологічних досліджень.

Дослідні дані для виявлення закономірностей формування наземних лісових горючих матеріалів в соснових лісах Західного Полісся України збиралися на території Сарненського, Кричильського, Страшівського та Костянтинівського лісництв ДП «Сарненське лісове господарство». Під час збору дослідних даних використовувалися загальноприйняті методи досліджень у лісівництві та лісовій пірології [67, 81]. Під час класифікації лісових горючих матеріалів використовували шкалу Н. П. Курбатського, яка передбачає їх розподіл на 6 груп [67]. Предметом дослідження є провідники горіння під час низових пожеж I-ї II-ї та III-ї групи ЛГМ. ТПП закладались у сосняках I^a-II класів бонітету віком від 9 до 135 років в ТЛУ А₂, А₃, В₂, В₃, які є типовими для регіону дослідження та мають високі відносні показники горимості [64]. За формою насадження, в яких проводилися дослідження – одноярусні, підлісок і підріст рідкий, поодинокий або відсутній, представлений листяними деревними видами (береза, дуб, осика, горобина, крушина та ін.) і сосною звичайною. Окрім того, для порівняння виконано збір дослідних даних на зрубі та у соснових культурах віком 4 роки. Збір даних щодо запасу ЛГМ на тимчасових пробних площах (ТПП) проводився шляхом визначення їх маси на облікових майданчиках розміром 1×1 м, у поєднанні з оцінкою визначення проективного покриття живого надґрунтового покриву за допомогою лінійних трансект.

Запас горючих матеріалів визначали шляхом їх зважування в сирому вигляді з подальшим висушуванням зразків до абсолютно сухого стану при температурі 105 °C та повторного зважування. Облікові майданчики розміщувались у типових місцях насадження, в межах проекції крон дерев. Збір дослідних даних у польових умовах проводився упродовж липня–серпня.

Враховуючи те, що відповідно до методики FIREMON гілки діаметром до 0,6 см згорають повністю, а з діаметром 0,7-2,5 см згорають лише на 25 %, що визначає участь вказаних фракцій гілок у процесі горіння, їх було розділено на дві фракції до 0,6 см, та від 0,7 до 2,5 см [11].

Відбір ЛГМ проводили пошарово: опадовий шар, до якого включали відпалу хвою, елементи кори, шишки, гілки та інші дрібні відмерлі рослинні рештки; ферментативний шар підстилки, до якого відносили напіврозкладені рослинні рештки з ознаками анатомічної будови; гуміфікований шар підстилки, до якого відносили однорідну масу розкладених рослинних решток. Окремо відбиралась фракція мохів та лишайників. Живий надґрунтовий покрив, який відноситься до III-ї групи ЛГМ розраховувався без врахування мохів та лишайників.

Основні лісівничо-таксаційні показники насаджень у яких відбиралися зразки ЛГМ з розподілом насаджень за категоріями земель та за групами віку наведено у табл. 1.1. В таблиці вказано діапазон значень основних лісівничо-таксаційних показників насаджень на пробних площах.

Таблиця 1.1 – Діапазон лісівничо-таксаційних показників соснових насаджень на тимчасових пробних площах у розрізі груп віку

Показники	Категорії земель, групи віку					
	зруб	незімкнуті лісові культури	вкриті лісовою рослинністю лісові ділянки			
			молодняки	середньо-вікові	пристигаючі	стиглі та перестійні
Кількість ТПП, шт	1	1	10	6	8	5
ТЛУ	B ₂	A ₃	A ₂₋₃ , B ₂₋₃	A ₂₋₃ , B ₂₋₃	A ₂₋₃ , B ₂₋₃	A ₂₋₃ , B ₂₋₃
Вік, років	-	4	11÷34	42÷55	62÷80	94÷139
Середній діаметр, см	-	-	3,6÷16,2	15,2÷23,5	20,2÷29,6	31,2÷46,1
Середня висота, м	-	0,9	3,2÷15,4	14,8÷24,6	19,4÷27,9	24,9÷34,1
Повнота	-	-	0,67÷1,00	0,75÷1,00	0,73÷1,00	0,57÷0,99
Клас бонітету	-	-	I ^a -II	I ^b -II	I ^a -II	I-II
Запас, м ³ га ⁻¹	-	-	30÷320	180÷540	340÷490	380÷540

У лісових насадженнях визначальною для можливого виникнення пожежі є фракційний склад та маса I-ї групи, яку розподіляють на мохово-лишайникову та опадову підгрупи [89]. Висихання верхнього 2-см шару опад у сухих сосняках від рівня вологості 100 % до 30 % може відбуватися за 8-10 годин, тоді як висихання мохового покриву до вологості 25 %, за якої він здатен горіти – відбувається повільніше (на третій день після дощу обгорає тільки поверхня шару мохового покриву *Hylocomium splendens* Schimp. [57], який має екологічний ареал у вологих борах, свіжих та вологих суборах Полісся і масово зустрічався на пробних площах в межах даного дослідження). Горіння даної групи ЛГМ є полуменевим та відбувається переважно під час проходження крайки вогню з виділенням достатнього обсягу теплової енергії для підготовки до горіння інших груп ЛГМ, зокрема крупніших деревних решток та нижніх шарів підстилки [89, 67].

ЛГМ II-ї групи у соснових насадженнях складають, зазвичай, найбільшу частку запасу наземних ЛГМ провідників горіння, і значно впливають на розвиток пожежі [76, 89, 67, 84]. За високих температур у період тривалих засух лісова підстилка може мати вологість до 14 %, що зумовлює майже повне її згорання [67]. Проте, упродовж більшої частини пожежонебезпечного періоду її вологість вища ніж у ЛГМ I-ї групи, але нижча ніж вологість III-ї групи ЛГМ,

до якої належать трави та напівкущі. Лісова підстилка у посушливий період здатна поступово підвищувати вологість ЛГМ I-ї групи [67, 89] та виконувати роль ізолятора проходження тепла від пожежі у ґрунт, не допускаючи пошкодження кореневих систем рослин [11].

III-тя група ЛГМ характеризується різнобічним впливом на поведінку пожежі, що залежить від видового складу живого надґрунтового покриву, умов пожежонебезпечного періоду і типу лісорослинних умов. Деякі види, зокрема папороті, затримують розповсюдження вогню, інші – такі як верес, багно – підсилюють горіння [67].

В умовах свіжих та вологих борів і суборів, які є найбільш поширеними у Західному Поліссі України накопичується значний обсяг наземних горючих матеріалів, який збільшується з віком і в стиглих насадженнях може становити $180 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Найбільшу частку наземних ЛГМ становить лісова підстилка, запас якої може сягати до $170 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Запас мохів, лишайників та дрібних рослинних решток може сягати до $15 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Найменшу частку наземних ЛГМ займає трав'яна рослинність та напівкущі і може становити до $6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. В цілому варто зазначити, що запас наземних ЛГМ та їх розподіл за групами залежить від віку насадження, складу, повноти, ТЛУ та особливостей проведення лісогосподарських заходів. Результати даного дослідження характеризують запаси ЛГМ типових соснових насаджень Західного Полісся (враховуючи склад, ТЛУ, повноту, бонітет насаджень).

Враховуючи зв'язок запасу ЛГМ із віком насаджень, дослідження особливостей накопичення їх у насадженні виконувалося у розрізі вікових груп. Для порівняння закономірностей накопичення наземних горючих матеріалів у насадженнях та на некритих лісом площах було закладено пробні площі на зрубі та у незімкнутих лісових культурах, що засвідчило вагому різницю у запасах наземних ЛГМ. Середні показники маси ЛГМ в абсолютно сухому стані наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Середні значення запасу ЛГМ та їх середньоквадратичні відхилення (при $p=0,05$) у соснових насадженнях Західного Полісся, т·га⁻¹

Група ЛГМ	Зруб 1-го року	Незімкнуті лісові культури	Групи віку			
			молодняки	середньо-вікові	пристигаючі	стиглі та перестиглі
I-ша група ЛГМ	39,97	0,86	7,70±3,70	9,36±2,62	7,93±1,79	7,82±1,98
II-га група ЛГМ	116,2	128,2	42,95±21,04	64,78±29,68	76,05±31,88	99,46±66,82
III-тя група ЛГМ	0,35	0,22	0,83±1,80	0,58±0,80	1,07±1,14	2,24±2,51
Всього	149,9	134,3	51,48±21,55	74,71±29,84	85,05±31,72	109,52±65,57

Запас I-ї групи ЛГМ характеризується незначними змінами у розрізі вікових груп – середнє значення становить 8,2 т·га⁻¹ (дисперсія 0,8 при $p=0,05$), що свідчить про сталість запасу мохів, лишайників і дрібних рослинних решток в сосняках незалежно від віку насадження. Середній запас II-ї групи збільшується з 42,9 т·га⁻¹ у молодняках до 99,5 т·га⁻¹ в стиглих і перестійних насадженнях, тому під час моделювання запасу лісової підстилки потрібно враховувати вік насаджень. Середнє значення запасу ЛГМ III-ї групи становить 1,2 т·га⁻¹ (дисперсія 0,7 при $p=0,05$) і в порівнянні з іншими групами займає найменшу частку.

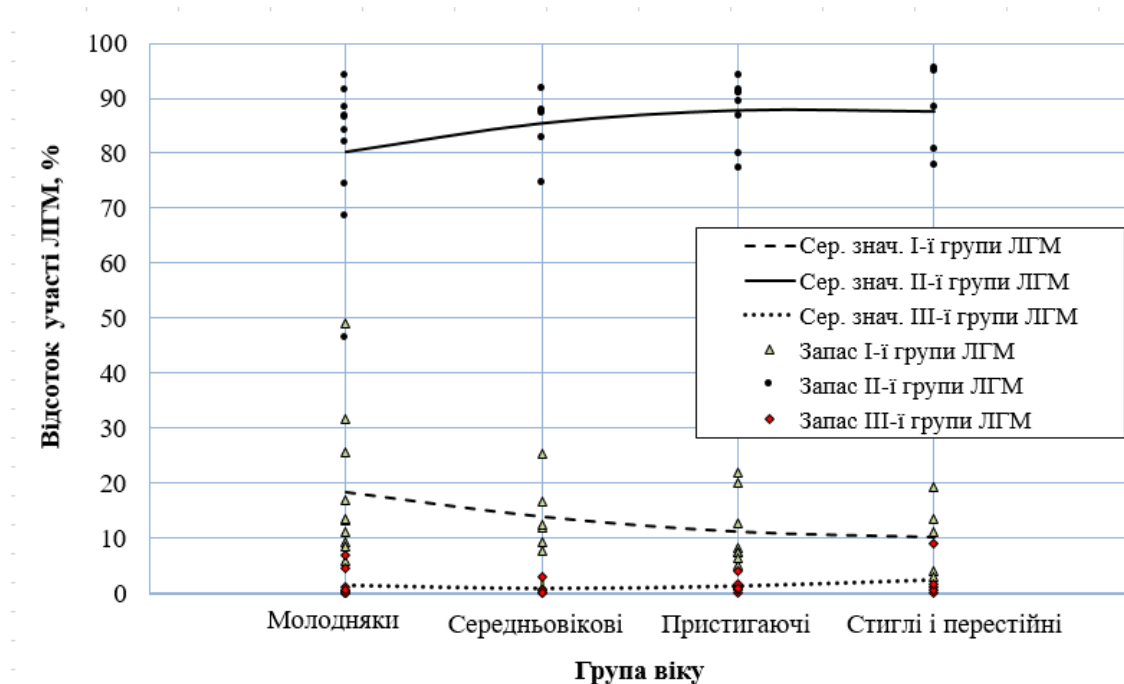


Рисунок 1.1 – Розподіл запасів ЛГМ I, II та III груп за часткою їх участі у сумарному запасі у розрізі вікових груп

Відповідно до результатів дослідження наведених в табл. 1.2, абсолютні значення запасу ЛГМ (окрім I-ї групи) зростають зі збільшенням їхнього віку, проте відсотковий розподіл запасів різних груп, у їх загальному запасі є відносно сталими. Так, у середньому, запас мохів, лишайників і дрібних рослинних решток становить 13,4 % (дисперсія 3,7 при $p=0,05$), лісової підстилки – 85,2 % (дисперсія 3,5 при $p=0,05$), трав'яної рослинності і напівкущів – 1,4 % (дисперсія 0,70 при $p=0,05$) (рис. 1).

Запас ЛГМ I-ї групи у молодняках, пристигаючих, стиглих та перестійних насадженнях коливається в межах 7,7-7,9 т·га⁻¹, а у середньовікових насадженнях становить 9,4 т·га⁻¹ запасу. Такий розподіл пояснюється зростанням маси фракцій хвої та гілок у середньовікових соснових насадженнях [76, 53], що пов'язано з періодом максимального приросту деревостанів за запасом, що співпадає з максимумом кількості хвої у деревостані [11, 76]. Детально характеризуючи ЛГМ I-ї групи слід відзначити, що 61,7 % від їхнього запасу становить опад, а 38,3 % – мохи. Розподіл ЛГМ I-ї групи за фракціями представлено на рис. 2.

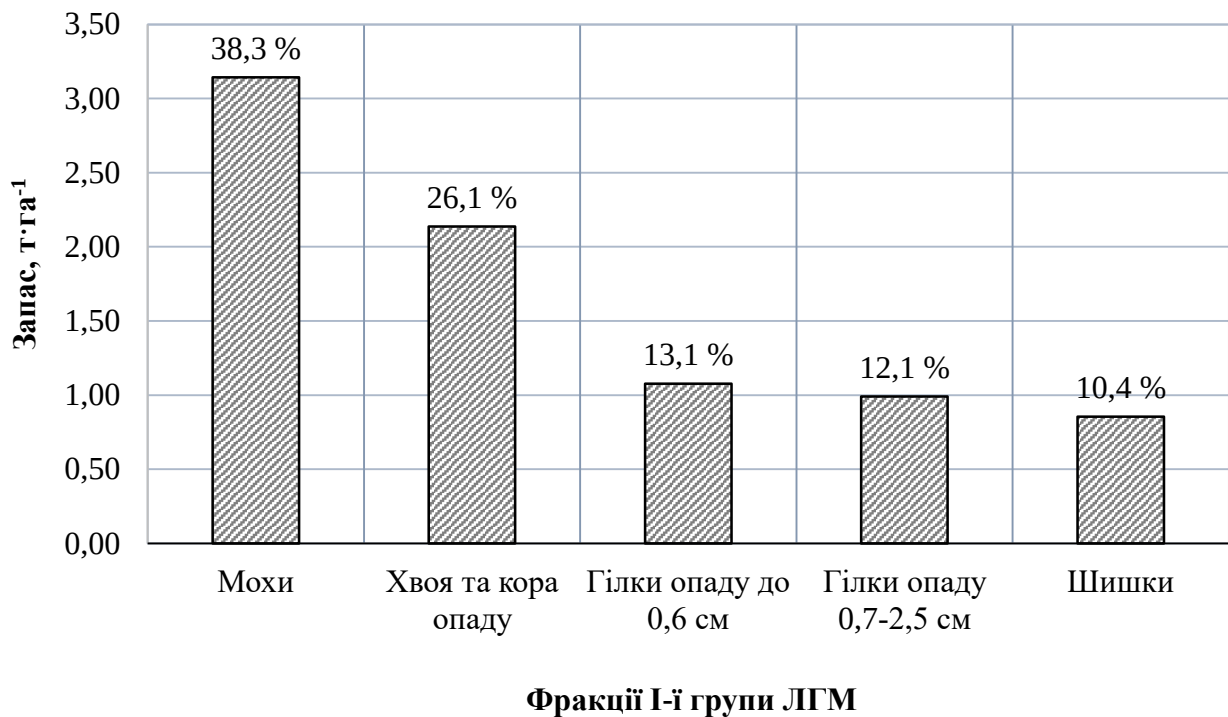


Рисунок 1.2 – Розподіл запасу ЛГМ I-ї групи за окремими фракціями

Особливу роль у розповсюдженні пожежі відіграють шишки. Під час верхових пожеж шишки у наметі соснового деревостану згорають не відразу і підхоплюються та переносяться на значні відстані конвекційними потоками, що сприяє утворенню плямистих пожеж [34]. Під час дослідження встановлено, що запас шишок на ТПП коливається в межах $0,7\text{--}1,5 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}$, максимальні значення спостерігаються у стиглих та перестійних насадженнях.

Формування шарів лісової підстилки відбувається за певними закономірностями, зокрема, частка шару підстилки до якого відносяться напіврозкладені рослини рештки з ознаками анатомічної будови становить в середньому 12,4 % (дисперсія 6,2 при $p=0,05$), а шар гуміфікації – 87,6 % (дисперсія 6,2 при $p=0,05$). В абсолютних величинах запас напіврозкладених рослинних решток залежить від віку та знаходиться в діапазоні $4,4\text{--}41,5 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}$, а запас шару гуміфікації – $12,7\text{--}153,0 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}$.

Аналізуючи живий надґрунтовий покрив було встановлено, що в досліджуваних типах лісорослинних умов основну частку проективного покриття займає чорниця, в умовах A_2 спостерігались куртини вересу, інші види, які самостійно не беруть участі у горінні зустрічаються у незначних кількостях. В переважній більшості випадків покрив трав'янистих рослин і напівкущів мав незначне проективне покриття – до 0,3.

Типові та розповсюджені у лісовому фонді непокриті лісом ділянки – зруби та незімкнуті лісові культури характеризуються кардинально іншими особливостями накопичення наземних ЛГМ у порівнянні з лісостанами. Так, запас ЛГМ на зрубі, після збирання порубкових решток у купи для їх спалювання є вищим в 1,2–2,9 разів, а в незімкнутих лісових культурах в 1,1–2,6 разів порівняно із лісовими насадженнями. Фракційна структура наземних ЛГМ на таких ділянок також відрізняється. На зрубках можна виділити всі фракції крім моху та шишок і їх запас значно перевищує запаси у насадженнях: за опадом в 8 разів (у тому числі – хвоя і кора – у 7,3 разів, гілки – в 11 разів), лісова підстилка в – 1,6 разів. У незімкнутих лісових культурах відсутні такі фракції ЛГМ як мохи, хвоя та кора опадів, шишки. Опад присутній у дуже

незначних кількостях – $0,9 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а головну питому масу складає лісова підстилка – $116,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, яка за запасом перевищує в 1,6 разів відповідне середнє значення в насадженнях.

В роботі також виконано дослідження запасів лісових горючих матеріалів відповідно до американської системи класифікації NFDRS, яка базується на періоді часу, упродовж якого втрачається дві третини кількості вологи, яка може випаруватися за стандартних умов повітряного середовища з конкретного зразка ЛГМ (67 % вологості). В роботі досліджено провідники горіння трьох класів – легкі ЛГМ, із середнім тимчасовим утримуванням вологи 1 год (від 1 до 2 год), середні ЛГМ, із середнім тимчасовим утримуванням вологи 10 год (від 3 до 20 год) та важкі ЛГМ, із середнім тимчасовим утримуванням вологи 100 год (від 21 до 200 год). До першого класу належить верхній шар лісової підстилки, товщиною до 0,6 см, суха трав'яна рослинність та дрібні деревні рештки діаметром до 0,6 см. До другого класу ЛГМ відносяться опалі сучки діаметром від 0,7 до 2,5 см та шар лісової підстилки на глибині від 0,6 до 2,5 см. До третього класу належить сушняк діаметром від 2,6 до 7,5 см та шар лісової підстилки на глибині від 2,6 до 10,0 см [10]. Запаси ЛГМ 1-ї, 2-ї та 3-ї груп, відповідно до американської класифікації NFDRS, які формуються в соснових насадженнях Західного Полісся України, за віковими групами наведено у додатку А.

Порівнюючи отримані результати дослідження із результатами отриманими для інших регіонів поліської природної зони, встановлено значні відмінності між ними. Так, у сосняках мохових і вересових білоруського Полісся [92] максимальний запас наземних ЛГМ спостерігався у насадженнях віком 30–40 рр., при повноті 0,9 і становив $29,2\text{--}30,7 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ відповідно, а за отриманими в ході дослідження результатами середній запас ЛГМ у віці 30–40 становить $56,5\text{--}63,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Запас наземних ЛГМ у 40–60 річних сосняках Київського Полісся становить $18,8\text{--}26,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ [53], а згідно результатів даного дослідження запас ЛГМ у таких насадженнях становить $63,2\text{--}76,5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Згідно досліджень проведених в умовах Центрального Полісся, запас I–II груп ЛГМ у

ТЛУ A_3 і B_3 становить 162,7-143,3 т·га⁻¹ [84], а за результатами даного дослідження відповідний середній запас становить 79,0 т·га⁻¹. За результатами дослідження проведеними в сосняках Рівненського Полісся України запас лісової підстилки у віці 20-30 років становить 12,4-24,6 т·га⁻¹, в 40 років – 46,2 т·га⁻¹, а в 80 років – 83,0 т·га⁻¹ (Voron, 2018). Для порівняння, середній запас лісової підстилки отриманий за результатами даного дослідження у 20-30 років становить 41,3-47,8 т·га⁻¹, в 40 років – 54,3 т·га⁻¹, а у 80 років – 80,3 т·га⁻¹.

Узагальнюючи результати дослідження можна зробити висновок, що в нинішній час оцінка ЛГМ в Україні є фрагментарною, з точки зору охоплення пожежонебезпечних регіонів та дослідження фракційного складу горючих матеріалів. Відсутність єдиної, загальноприйнятої методики дослідження ЛГМ призводить до використання різних підходів у визначенні запасів горючих матеріалів та їх розподілу за фракційним складом, що в результаті призводить до значних відмінностей у результатах подібних досліджень. Єдина методика дослідження запасів ЛГМ необхідна для розробки на національному рівні стандартних моделей горючих матеріалів, що є основою довгострокового й оперативного прогнозування ймовірності виникнення та розвитку лісових пожеж. Встановлені відмінності запасів горючих матеріалів у межах Полісся вказують на необхідність лісопожежного районування території України з урахуванням особливостей ЛГМ, клімату, горимості конкретних територій, ризиків виникнення пожеж, та особливостей лісокористування.

Отримані результати демонструють зростання середнього запасу II-ї групи ЛГМ у високоповнотних соснових насадженнях з 42,9 т·га⁻¹ у молодняках до 99,5 т·га⁻¹ у стиглих і перестійних насадженнях. Середнє значення запасу I-ї групи ЛГМ у молодняках, пристигаючих, стиглих та перестійних насадженнях коливається в межах 7,70-7,93 т·га⁻¹, а у середньовікових насадженнях становить 9,36 т·га⁻¹ запасу. Стабільність запасу мохів, лишайників та опадів зумовлює сталі умови для виникнення пожежі, які визначаються вологістю цієї групи ЛГМ.

Також за результатами дослідження встановлено суттєвий вплив вологості лісорослинних умов на запас ЛГМ у соснових насадженнях, так, мінімальні значення запасу наземних ЛГМ (провідників горіння) спостерігались у свіжих гігротопах, а максимальні – у вологих, що також підтверджується іншими дослідженнями [58, 84]. Найбільша різниця запасів ЛГМ у різних за вологістю умовах спостерігається у молодняках: мінімальне значення $15,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ спостерігається у свіжому суборі, а максимальне – $77,0 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ – у вологому суборі. Такий розмах значень пов'язаний зі значним обсягом органічних решток, які залишились після рубки попереднього деревостану, у насадженнях з вологим гігротопом. Запас провідників горіння у незімкнутих лісових культурах ТЛУ А₃ складає $134,3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, що в 1,1–2,6 разів більше ніж у лісостанах, це пов'язано, перш за все, з запасом ЛГМ до рубки. Наявність значних запасів наземних ЛГМ у соснових насадженнях передбачає виділення більшої кількості теплової енергії під час горіння, а їх розміщення по площі та фракційний склад визначають умови розвитку пожежі.

2 БІОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЛАНДШАФТІВ ТЕРИТОРІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ ПРИРОДНИХ ПОЖЕЖ

2.1 Класифікація територій досліджень за типами ландшафтів

Поряд із топографічними показниками в моделюванні природних пожеж за методикою Лісової Служби США використовують набір показників про біофізичні параметри території. Загалом основу для моделювання формують типи земного покриття з властивими їм характеристиками, що описують моделі горючих матеріалів [41]. Усі ці дані поєднуються в спеціальному файлі формату .lcp (landscape file), який складається з таких шарів:

1. Elevation – висота над рівнем моря.
2. Slope – ухил або ступінь зміни перевищень ділянки місцевості.
3. Aspect – експозиція або азимут вздовж схилу ділянки місцевості.
4. Fuel Models – тип моделі горючих матеріалів.
5. Canopy cover – зімкнутість намету деревної рослинності.
6. Canopy height – висота намету деревної рослинності.
7. Canopy base height – базова висота намету деревної рослинності.
8. Canopy bulk density – щільність запасу горючих матеріалів у наметі деревної рослинності.

Перші три топографічні показники не відіграють суттєвої ролі в моделюванні пожеж в умовах рівнинної території Полісся України і вже були одержані під час першого етапу виконання НДР. У зв'язку з цим у поточному році ключову роль відведено характеристиці запасів наземних горючих матеріалів та параметрам горючих матеріалів у наметі деревної рослинності. За наявності повного покриття території геопросторовими базами даних встановлення цих показників не викликає особливих труднощів, а за відсутності зумовлює пошук альтернативних підходів. Найбільш обґрунтованим за сучасних умов виступає підхід із застосуванням даних дистанційного зондування Землі, зокрема супутникових знімків Landsat та глобальних продуктів земного покриття.

2.1.1 Створення безхмарних композитних мозаїк за часовими серіями супутникових знімків Landsat 8 OLI

Найбільші складності під час оброблення знімків Landsat, як і для всіх інших даних ДЗЗ оптичного діапазону, зумовлює хмарність території на момент зйомки. За окремими винятками існує можливість відбору супутникових знімків для області інтересу без хмар, хоча це істотно обмежує дослідників у виборі необхідних дат зйомки [27]. Задля зменшення впливу атмосферних ефектів на результати класифікації відбирали дані з хмарністю не більше 30 %, а всього в дослідженні використано 536 знімків Landsat 8 OLI. (табл. 2.1). У зв'язку з великою кількістю днів зі щільним хмарним покривом в осінній період (у т. ч. для періоду квітень–жовтень) цей поріг було знижено до 20 %.

Таблиця 2.1 – Характеристика супутникових знімків Landsat 8 OLI, використаних для створення безхмарних сезонних мозаїк

Композитна мозаїка для періоду року	Початкова дата	Кінцева дата	Хмарність території, %	Кількість знімків
Рік	01.01.2016	31.12.2018	30	536
Літо	01.06.2016	31.08.2016	30	206
	01.06.2017	31.08.2017		
	01.06.2018	31.08.2018		
Осінь	01.09.2016	30.11.2016	20	113
	01.09.2017	30.11.2017		
	01.09.2018	30.11.2018		
Квітень–жовтень	01.04.2016	31.10.2016	20	350
	01.04.2017	31.10.2017		
	01.04.2018	31.10.2018		

У просторовому відношенні територію дослідження представляє 23 сцени (відбитка) супутникових знімків Landsat 8 OLI, які за координатною сіткою Worldwide Reference System-2 (WRS-2) розташовуються в діапазоні: шлях: 179–187, ряд: 23–26. Сітка WRS-2 являє собою набір полігонів, кожен з яких відповідає розмірам сцени супутникового знімка Landsat 185×185 км. Вона дозволяє відбирати супутникові дані для будь-якої частини земної

поверхні, задавши відповідний ідентифікатор полігону – шлях (PATH) та ряд (ROW). Ряд вказує на центр сцени за широтою, тоді як шлях виступає ідентифікатором центра знімка за довготою. Загалом упродовж 16-денного періоду система проходить 233 шляхи, зміщуючись зі сходу на захід та забезпечуючи часткове перекриття суміжних знімків. Покриття знімками території Поліського регіону в межах п'яти адміністративних областей України (Волинська, Рівненська, Житомирська, Київська, Чернігівська) відображено на рис. 2.1.

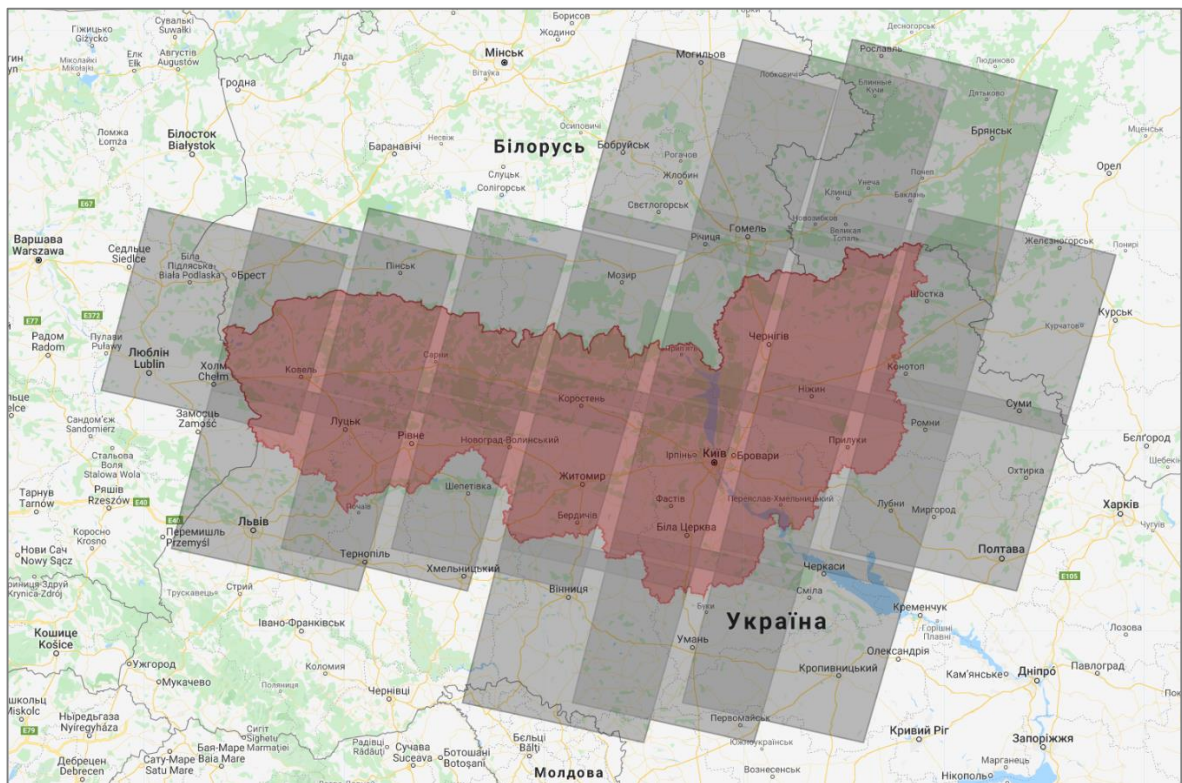


Рисунок 2.1 – Схема покриття території досліджень супутниковими знімками Landsat 8 OLI

Відображений на рис.2.1 просторовий розподіл кількості супутникових знімків для періоду 2016–2018 рр. наведено в табл. 2.2. Відповідно до нього, для окремої комбінації шлях / ряд у середньому відбирали від 20 до 25 сцен Landsat 8 OLI. Крім цього, за даними таблиці простежували явний тренд до збільшення їхньої кількості в напрямі з сх на зах. Це вказує на різний ступінь покриття небосхилу хмарами в західних і східних регіонах Полісся України, що впливає на якість даних ДЗЗ.

Таблиця 2.2 – Розподіл кількості супутникових знімків за глобальною координатною сіткою WRS-2

Ряд	Шлях									Разом
	187	186	185	184	183	182	181	180	179	
23	–	–	–	–	–	23	24	24	–	71
24	1	24	20	20	22	23	27	28	28	193
25	–	25	22	26	23	22	26	27	29	200
26	–	–	–	–	–	20	27	25	–	72
Разом	1	49	42	46	45	88	104	104	57	536

Найбільшу кількість супутникових знімків із хмарністю менше 30 % відібрано впродовж 2016 року, дещо менше – протягом 2017 року. Відповідно до даних табл. 2.3 простежується, що в 2016 році небосхил частіше вкривався хмарами, у зв'язку з чим кількість знімків істотно поступається попереднім рокам. Майже половину супутникових знімків (253), використаних у дослідженнях природно-територіальних комплексів Поліського регіону України, одержано практично за повної відсутності хмар. Це сприяло створенню якісних безхмарних композитних мозаїк для чотирьох сезонів: рік, літо, осінь, квітень-жовтень.

Таблиця 2.3 – Розподіл кількості супутникових знімків Landsat 8 OLI за роками зйомки та хмарністю

Рік зйомки	Хмарність території, %						Разом
	0–5	5–10	10–15	15–20	20–25	25–30	
2016	102	31	31	14	13	12	203
2017	96	24	23	14	12	13	182
2018	55	21	19	22	20	14	151
Разом	253	76	73	50	45	39	536

Детальніший аналіз за місяцями зйомки (табл. 2.4) закономірно вказує, що найменшу кількість супутникових знімків можна завантажити впродовж листопада та зимових місяців, для яких характерним є суттєвий хмарний покрив. Найбільша кількість даних Landsat з низьким рівнем хмарності (0–5 %) припадає на період вегетації рослинного покриву, що покращить якість

сезонних мозаїк для періоду квітень–жовтень і літніх місяців. Важливо наголосити також на тому, що обмеження часового періоду для осінньої мозаїки жовтнем, виявилось доречним, оскільки в листопаді кількість практично безхмарних супутникових знімків істотно зменшується.

Таблиця 2.4 – Розподіл кількості супутникових знімків Landsat 8 OLI періоду 2016–2018 рр. за місяцями зйомки та хмарністю

Місяць зйомки	Хмарність території, %						Разом
	0–5	5–10	10–15	15–20	20–25	25–30	
Січень	11	4	2	3		3	23
Лютий	3	4	8	1	4	3	23
Березень	25	4	4	5	2	1	41
Квітень	25	11	3	4	2	4	49
Травень	12	10	12	7	5	3	49
Червень	23	4	7	11	8	10	63
Липень	32	6	16	4	8	5	71
Серпень	41	9	8	6	7	3	74
Вересень	37	9	6	3	2	4	61
Жовтень	33	7	4	4	3	2	53
Листопад	6	4	–	–	2	–	12
Грудень	5	4	3	2	2	1	17
Разом	253	76	73	50	45	39	536

Незважаючи на застосовані умови відбору супутникових знімків із незначним рівнем хмарності, повне очищення зображень від хмар та їхніх тіней виступає важливим етапом створення якісних сезонних мозаїк і дешифрування типів земного покриву. Проблемам видалення хмарності та покращанню якості супутникових знімків присвячено багато досліджень. Найчастіше для фільтрації хмар застосовують алгоритми порогової класифікації зображень на основі певних комбінацій яскравості та температури пікселів. Процедура маскування хмар зазвичай складається з двох етапів: видалення густої хмарності та перистих хмар (димки). Для знімків Landsat OLI щільну хмарність ідентифікують шляхом пошуку відповідних порогових значень пікселів у інфрачервоному каналі Band 9 (Cirrus, хвилі завдовжки 1,36–1,38 мкм) та тепловому каналі Band 10 (хвилі завдовжки 10,60–11,19 мкм). Спектральний

діапазон зазначеного інфрачервоного каналу характеризується інтенсивним поглинанням променів водяною парою, яка концентрується в нижніх шарах атмосфери. Вода та кристали льоду блокують проходження сонячного випромінювання до земної поверхні та безпосередньо відбивають його назад у космос. Після реєстрації такої інформації сенсором найбільші значення пікселів припадатимуть на ділянки знімка під хмарами. При цьому в термальному діапазоні вони матимуть істотно менші значення (температуру) порівняно з фоновими пікселями. Димку ідентифікують на основі додаткової інформації з блакитного каналу Band 1 (Coastal Aerosol, хвилі завдовжки 0,433–0,453 мкм). Частина сонячного випромінювання проникає крізь такі хмари, у зв'язку з цим відповідні ділянки знімка характеризуються невисокими значеннями відбиття в каналі Band 9. Все ж, порівняно з іншими об'єктами, димка яскравіша в каналі Band 1, та холодніша – в каналі Band 10.

У підсумку описану методику можна представити у вигляді табл. 2.5. Аналіз експериментальних даних показує, що тіні зміщуються відносно хмар не більше, ніж на 200 пікселів. Отже, їх вдається ідентифікувати в буферній зоні навколо хмар за низькими значеннями в ближньому інфрачервоному діапазоні (Band 6).

Таблиця 2.5 – Порогові правила маскування хмар

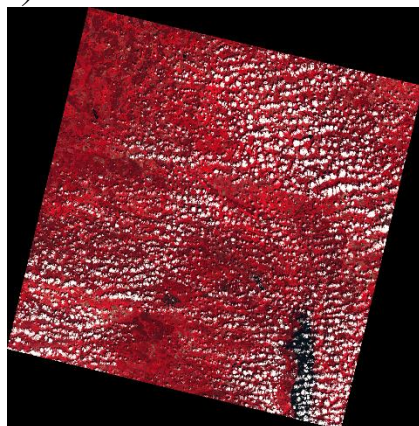
Тип хмар	Умова для класифікації
Шарувато-купчасті, купчасті та інші густі хмари	Дані Band 9 перевищують порогове значення & дані Band 10 менші порогового значення
Перисті хмари (димка)	Дані Band 1 перевищують порогове значення & дані Band 9 менші порогового значення & дані Band 10 менші порогового значення

Для методики притаманні щонайменше два недоліки: 1) алгоритм складно піддається автоматизації, оскільки навіть після радіометричної корекції порогові значення пікселів окремих знімків будуть відрізнятися; 2) не дозволяє створити якісну маску тіней від хмар, які залишаються на знімку. У зв'язку з

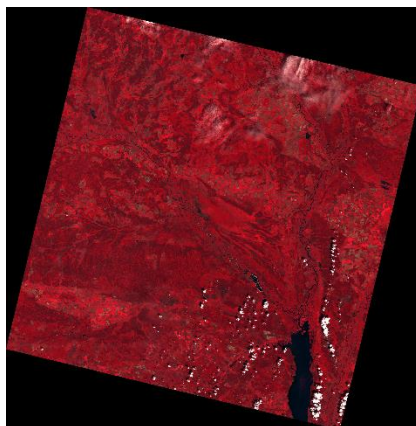
цим, загальноновживаним за сучасних умов став об'єктно орієнтований алгоритм FMask, версія 1.6 якого спочатку стосувалася тільки знімків Landsat 4–7 [48], а версію 3.2 адаптовано до сенсорів Landsat 8 та Sentinel 2 [47]. Після збою в роботі сенсора Landsat 8, що реєструє термальне випромінювання, ці алгоритми зазнали змін і наразі їх можна застосовувати як до даних із термальним TIRS, так і без нього. За новим алгоритмом CFMask до кожної сцени Landsat створюють додатковий 8-бітний канал якості пікселів (QA – Quality Assessment Band), за яким ідентифікують хмари та тіні від них [21]. У зазначеному каналі описують якість кожного пікселя, на яку може впливати стан земної поверхні, сенсора чи атмосфери. Врешті-решт, інформація про параметри пікселя допомагає користувачу визначитися в доцільності їхнього використання в дослідженні. На цій основі застосовують фільтри для вибору «чистих» від хмар та тіней частин супутникового знімка, використовуючи побітові оператори порівняння.

Задля зменшення впливу атмосферних ефектів на якість продуктів ДЗЗ у 1986 році в дослідженнях [26] розроблено алгоритм створення семиденних композитних зображень зі знімків NOAA AVHRR. Його ідея полягає в тому, що з часової серії знімків відбирають лише пікселі з найбільшим значенням вегетаційного індексу *NDVI* (звідси: MVC – Maximum-Value Composite). При цьому вирішується не тільки проблема маскування хмар, а й тіней від них. Пізніше запропоновану техніку почали застосовувати для знімків MODIS, зокрема для створення 16-денних композитних зображень. Після зміни в 2008 році [46] політики доступу до багатомільйонного архіву знімків Геологічної служби США (USGS), аналогічні підходи були адаптовані для підготовки щотижневих, щомісячних, сезонних і щорічних композитних зображень Landsat-7 ETM+ [39]. На рис. 2.2 зображено три етапи створення безхмарної мозаїки на прикладі однієї сцени Landsat, одержаної для комбінації шлях 182 / ряд 24. З метою створення безхмарних мозаїк для всієї території досліджень подібну процедуру необхідно повторити з усіма супутниковими знімками (див. рис. 2.1, табл. 2.2).

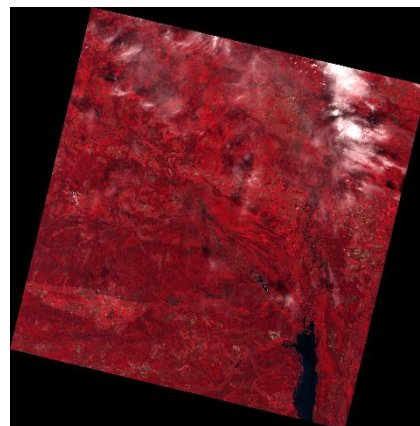
а)



LC81820242016154LGN00
Дата зйомки: 2016-06-02
Хмарність: 18,36 %

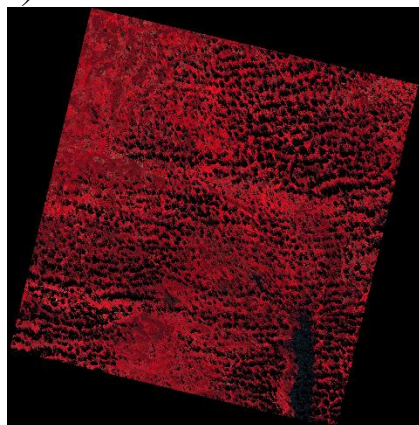


LC81820242016218LGN00
Дата зйомки: 2016-08-05
Хмарність: 1,35 %

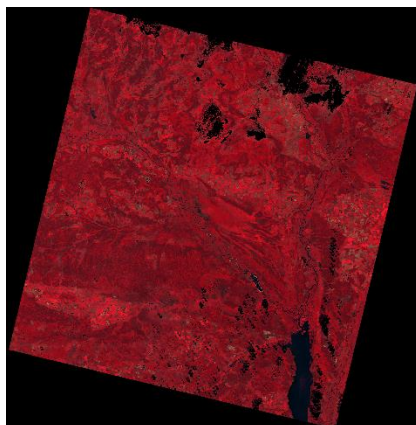


LC81820242016234LGN00
Дата зйомки: 2016-08-21
Хмарність: 8,37 %

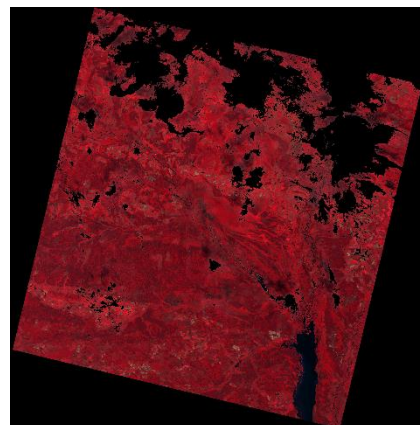
б)



LC81820242016154LGN00
з накладеною маскою хмар

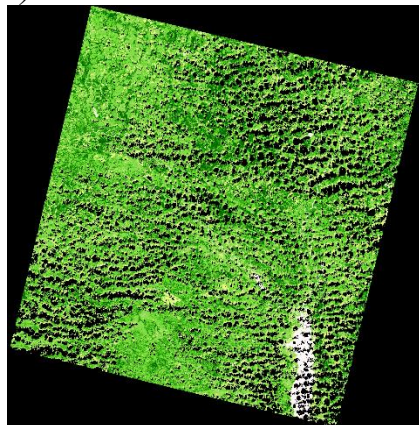


LC81820242016218LGN00
з накладеною маскою хмар

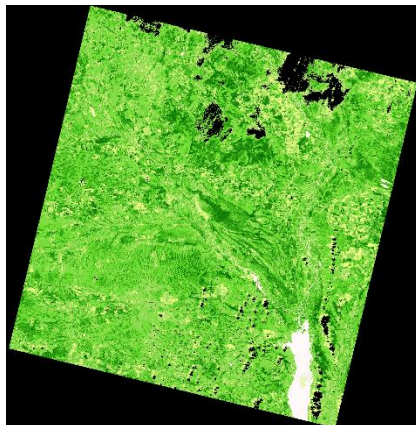


LC81820242016234LGN00
з накладеною маскою хмар

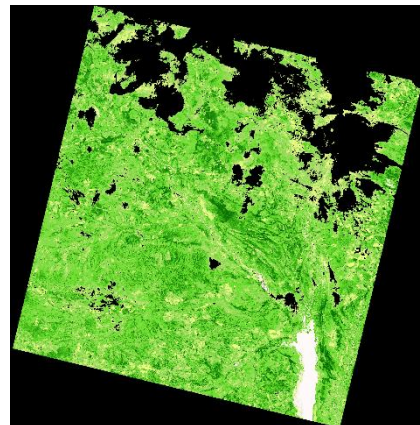
в)



NDVI зображення
LC81820242016154LGN00
з накладеною маскою хмар



NDVI зображення
LC81820242016218LGN00
з накладеною маскою хмар



NDVI зображення
LC81820242016234LGN00
з накладеною маскою хмар

Рисунок 2.2 – Візуалізація методики створення безхмарної мозаїки за часової серії знімків Landsat 8 OLI: а) вихідні знімки; б) знімки з маскою хмар; в) зображення NDVI з маскою хмар

Переваги композитних зображень MVC полягають у тому, що вони представляють усереднену характеристику спектральних показників земної поверхні та містять меншу кількість пропусків даних. Проте необхідно пам'ятати про очевидні недоліки MVC: оскільки в часовій серії простежуватиметься більший вплив тих знімків, на яких активніша вегетація, зменшується контраст між трав'яною та деревною рослинністю. У зв'язку з цим методика доречна для періодів без значних коливань значень *NDVI*. Крім цього, композитні мозаїки можна створювати на основі центральної тенденції – значень медіани пікселів для кожного спектрального каналу [20, 45].

Завдяки розвитку «хмарних» технологій, зокрема, появі ресурсу Google Earth Engine (GEE) API, складні алгоритми попередньої обробки та покращання якості супутникових знімків почали широко застосовувати в прикладних дослідженнях [23]. Платформа GEE забезпечує доступ до власного архіву супутникових даних і є одночасно середовищем для їхньої обробки за допомогою JavaScript чи Python. Так, видалення хмар на знімках Landsat стала стандартною процедурою GEE, яку виконують спеціальні функції.

Зведене зображення, одержане на основі злиття трьох сцен супутникових знімків, відображено на рис. 2.3. Як стає зрозуміло, знімків виявилось недостатньо, щоб одержати композитну мозаїку без пропусків інформації (відображено в верхній частині знімка чорним кольором). Подібна ситуація вимагає залучення додаткових даних, які можуть бути представлені знімками інших років для обраного сезону. Судячи з табл. 2.2, в межах окремого поєднання шляху та ряду системи WRS-2 налічується від 20 до 29 знімків Landsat, що забезпечує достатні передумови для створення якісних безхмарних мозаїк. Наявність лише однієї сцени за шляхом 187 та рядом 24 принципово не позначиться на мозаїках західної частини території досліджень, адже недостатню кількість інформації в цій частині можна компенсувати за рахунок суміжних супутникових знімків.

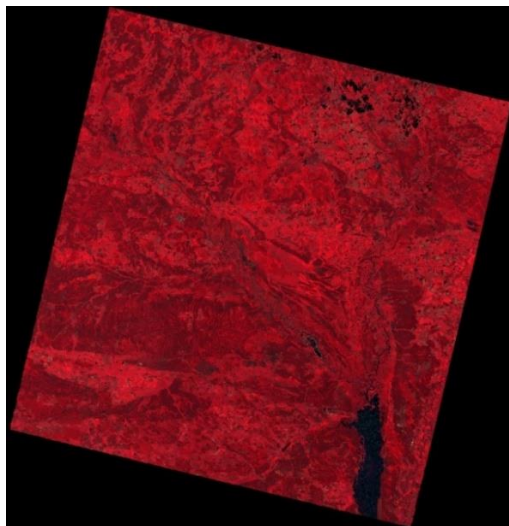


Рисунок 2.3 – Сезонна літня композитна мозаїка зі знімків Landsat 8 OLI

Маскування хмар та компонування знімків виконували в GEE API за методикою MVC на основі колекції знімків LANDSAT/LC8_L1T_TOA, які пройшли попередню радіометричну корекцію з приведенням значень пікселів до відбиття на сенсорі TOA. Алгоритм дозволив одержати для території досліджень безхмарні сезонні композитні мозаїки Landsat 8 OLI, в яких поєднуються спектральні канали та їхні відношення. Річну безхмарну мозаїку території досліджень зображено на рис. 2.4.

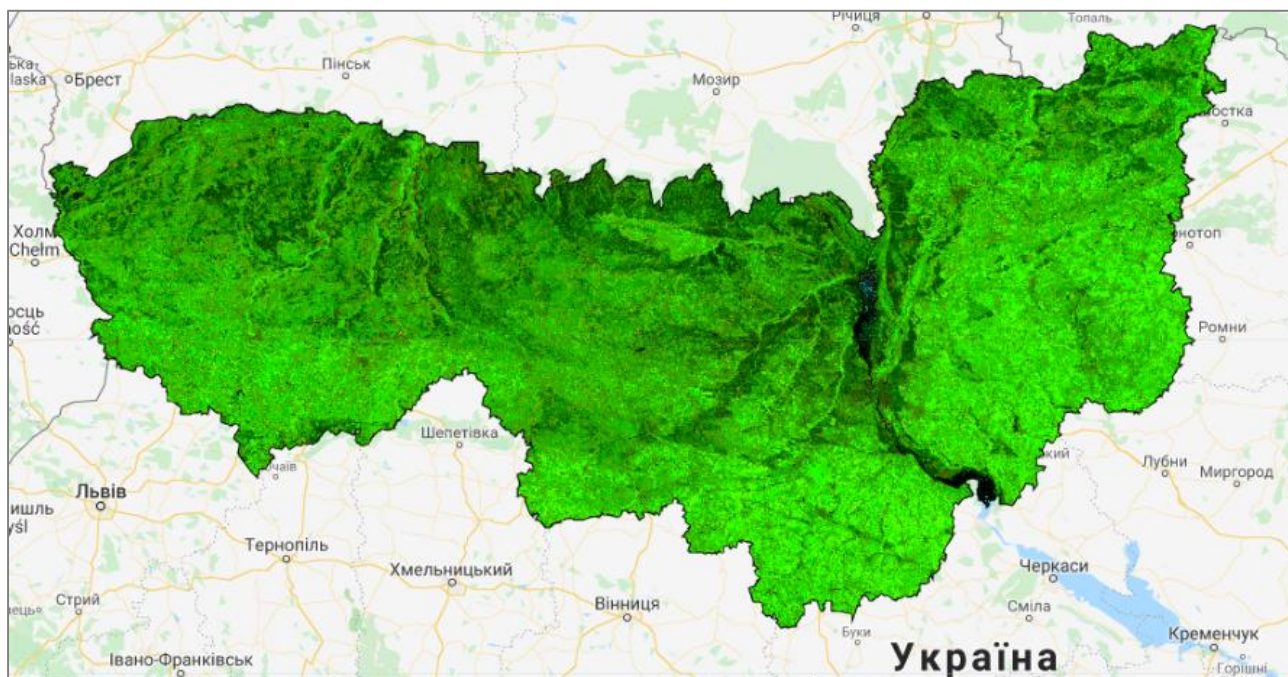


Рисунок 2.4 – Річна безхмарна MVC мозаїка зі знімків Landsat
(комбінація каналів: 6–5–4)

Враховуючи принципи вибору пікселів для їхнього поєднання у вигляді композитної мозаїки, рис. 2.4 відображає період максимальної вегетації рослинного покриву, який характеризується більшими значеннями вегетаційного індексу *NDVI*. Завдяки цьому принципових відмінностей між річною та літньою мозаїкою не спостерігається (рис. 2.5). Остаточний висновок про доцільність залучення спектральних показників з річної мозаїки можна буде виконати під час класифікації, оцінюючи їхній внесок у загальну точність дешифрування типів земного покриву.

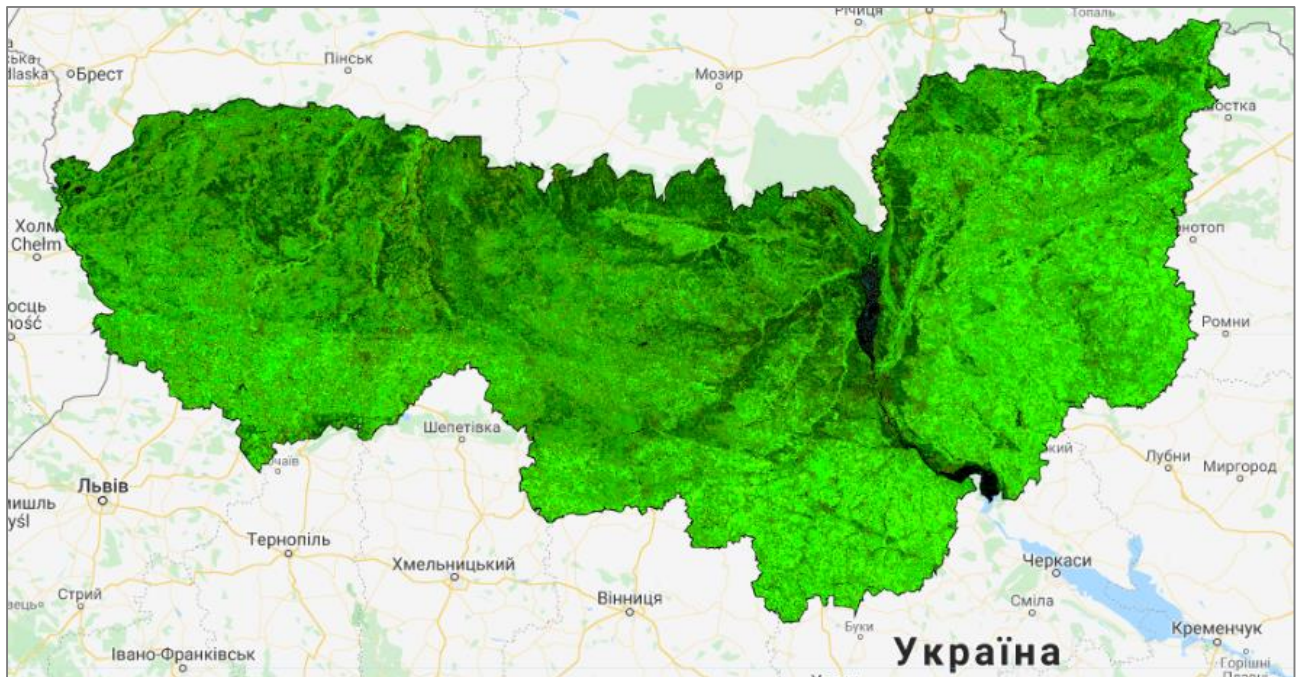


Рисунок 2.5 – Літня безхмарна MVC мозаїка зі знімків Landsat
(комбінація каналів: 6–5–4)

Найбільші сезонні варіації стану земного покриву впродовж року відображаються на мозаїці для періоду квітень–жовтень (рис. 2.6 а). Заданий період дозволив використати дещо інший підхід для її створення. Замість описаного методу відбору найбільш «зелених» спостережень тут застосовували статистичні правила: відбір мінімальних і максимальних значень пікселів, 1-го та 3-го квантилів, медіани. На основі цих статистичних показників можна відслідкувати сезонну динаміку фенологічних фаз рослинного покриву. Наприклад, мінімальні та максимальні значення характеризують початок і

завершення вегетаційного періоду, коли рослинність знаходиться в безлистому стані. Використані 25-й та 75-й персентилі відображають, відповідно, стан рослинності на стадії входження та завершення активної вегетації. Значенням медіани відповідає період, коли в рослинах накопичується максимальна кількість зеленої біомаси. Враховуючи особливості фенологічних фаз розвитку деревної та іншої рослинності, а також лісових насаджень різного складу, з'являються кращі можливості для їхнього розпізнавання за даними ДЗЗ.

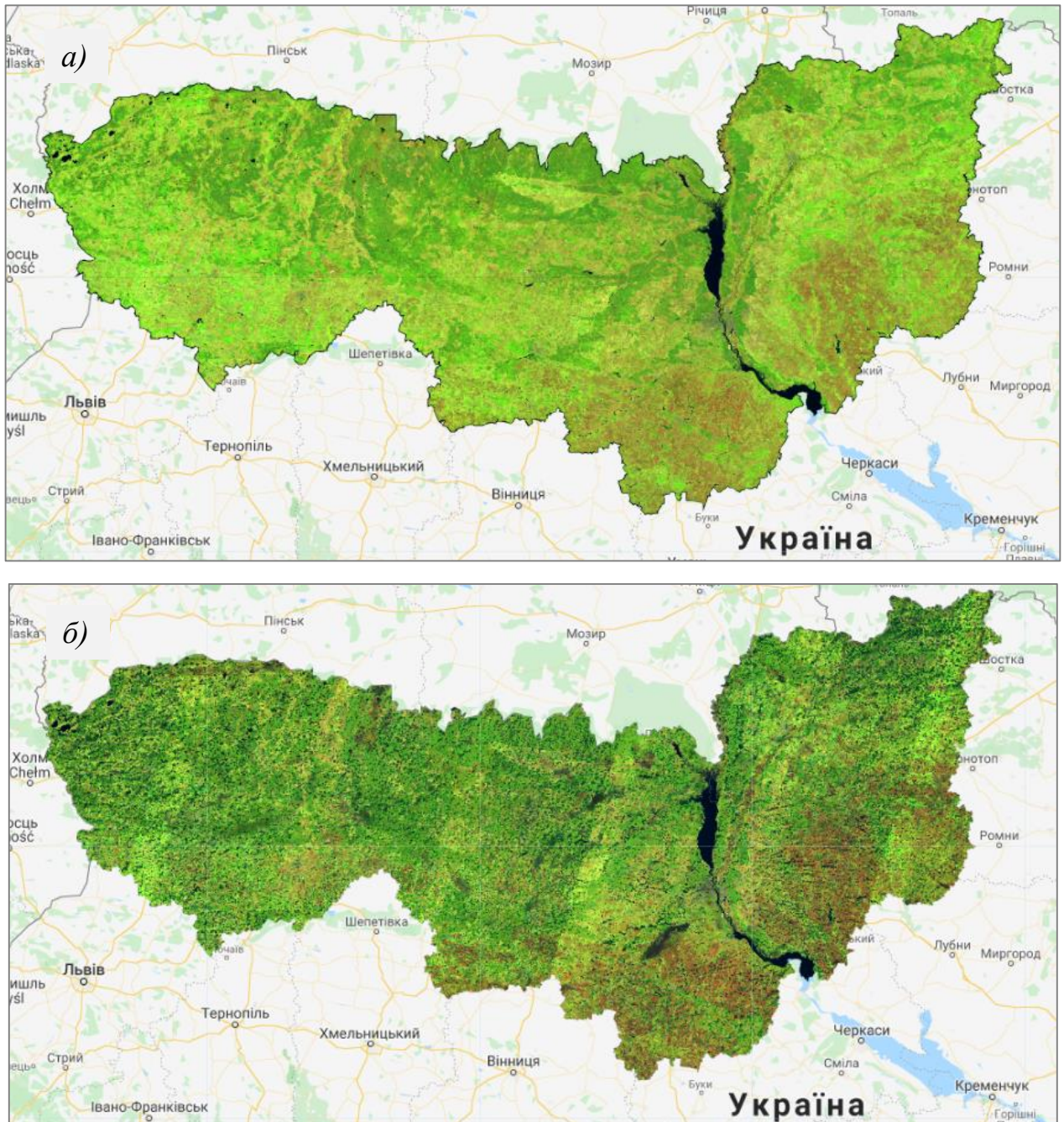


Рисунок 2.6 – Безхмарна мозаїка зі знімків Landsat для періоду квітень–жовтень (комбінація каналів: 6–5–4): а) 1-й квантилі; б) мінімальні значення

Не зважаючи на попередній досвід подібного підходу в минулому [24], в дослідженні встановлено, що залучати для розробки класифікаційної моделі мінімальних і максимальних значень з часового ряду супутникових спостережень недоречно. Як видно з рис. 2.6 (б), мінімальні значення переважно відображають затінені ділянки, а максимальні – шуми, що залишаються на знімку після фільтрування хмар.

Осіньна мозаїка доповнює часовий ряд спостережень і підкреслює завершальну стадію вегетації рослинності. Особливе значення мають знімки, зроблені впродовж вересня–жовтня для розмежування сільськогосподарських угідь від природних травостоїв, що видно з рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Осіння безхмарна MVC мозаїка зі знімків Landsat
(комбінація каналів: 6–5–4)

Описані методичні підходи щодо попередньої обробки супутникових знімків успішно апробовані для створення маски рівнинних лісів України [73, 72], яку буде використано для параметризації моделей горючих матеріалів лісових насаджень. Наступним завданням проєкту передбачено виконати детальнішу класифікацію земельного покриття з виділенням більшої кількості тематичних класів.

2.1.2 Схема класифікації ландшафтів і характеристика опорної інформації

Математичне моделювання ризиків природних пожеж за методикою Лісової Служби США здійснюють на ландшафтній основі. У зв'язку з цим картографування типів земельного покриття відіграє ключову роль для визначення просторового розподілу кількісних і якісних показників запасу горючих матеріалів, який впливає на умови виникнення та поширення пожеж. Для характеристики горимості ландшафтів прийнято застосовувати 13 стандартних і 40 динамічних моделей горючих матеріалів [41, 2], що відповідають певному типу земельного покриття.

Для класифікації території досліджень опрацьовано дворівневу схему класифікації, за якої існує вісім класів земельного покриття першого рівня. Кожен із них поділяють на певну кількість підкласів другого рівня:

1. Водойми.
2. Водно-болотні угіддя.
3. Населені пункти.
4. Інші непродуктивні землі.
5. Сільськогосподарські угіддя.
6. Травостої.
7. Чагарники.
8. Лісовий покрив.

Враховуючи просторове розрізнення супутникових знімків Landsat 8 OLI 30×30 м, деталізацію класифікації для вкритих лісовою рослинністю ділянок можна виконати тільки з розподілом останніх на три категорії: хвойні, листяні та мішані деревостани.

Загалом у дослідженні використано два незалежних набори опорної інформації, які застосовували для дешифрування сезонних мозаїк Landsat та оцінювання точності тематичних карт. Їх створено на основі випадкової стратифікованої вибірки, запроєктованої на підставі глобальної карти Global Forest Change – для класифікації, та розробленої тематичної карти земного

покриву – валідації результатів. У зв'язку з цим у першому випадку для стратифікації використано чотири тематичних класи карти Global Forest Change (постійний лісовий покрив, постійний нелісовий покрив, втрати лісу, лісовідновлення), а в другому – вісім запропонованих тематичних класів. Розподіл кількості вибірових одиниць опорний наборів даних наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Розподіл кількості вибірових одиниць за типами земельного покриву, використаних для класифікації супутникових знімків [73]

№ з/п	Адміністративна область	Категорія земель								Усього
		ліс	чагарники	травостої	с.-г. угіддя	населені пункти	водно-болотні угіддя	водойми	інші непродуктивні землі	
1	Вінницька	77	1	12	120	6	1	5	0	222
2	Волинська	132	0	17	77	7	2	1	0	236
3	Дніпропетровська	60	4	24	95	13	4	11	4	215
4	Донецька	52	19	10	112	13	1	4	11	222
5	Житомирська	106	4	48	62	10	7	2	0	239
6	Запорізька	33	6	21	124	18	9	8	0	219
7	Київська	68	12	31	88	15	5	6	2	227
8	Кіровоградська	30	2	63	103	9	1	4	0	212
9	Луганська	72	12	28	88	11	2	2	7	222
10	Львівська	83	14	69	44	18	1	3	0	232
11	Миколаївська	32	5	40	112	9	7	6	2	213
12	Одеська	47	12	32	103	15	7	1	3	220
13	Полтавська	73	0	27	101	10	5	5	0	221
14	Рівненська	103	7	55	51	11	9	1	0	237
15	Сумська	61	14	35	91	14	3	4	2	224
16	Тернопільська	58	4	23	124	8	2	0	0	219
17	Харківська	51	7	35	114	6	3	8	2	226
18	Херсонська	30	0	48	99	5	3	20	0	205
19	Хмельницька	52	18	33	109	8	3	2	3	228
20	Черкаська	59	0	33	107	7	3	9	0	218
21	Чернігівська	72	4	73	72	7	4	1	0	233
Разом		1351	145	757	1996	220	82	103	36	4690

Як вже зазначалося, класифікацію земельного покриття території досліджень виконували під час розробки маски рівнинних лісів України [73], у зв'язку з цим навчальну вибірку формували на основі дешифрування вибірових одиниць за схемою, запроєктованою для 21 області України. Наведений у таблиці розподіл одержано після візуального дешифрування кожної вибіркової одиниці, використовуючи безкоштовні супутникові знімки Google. Обсяг вибірки проєктували таким чином, щоб забезпечити помилку оцінювання загальної точності класифікації земельного покриття не більше 2 %. Оскільки два тематичні класи карти Global Forest Change, що відображають динаміку лісів, становлять відносно незначну частку площі, мінімальний обсяг вибірки для кожної страти проєктували не менше 25 одиниць. Обсяг валідаційного набору даних розраховували за аналогічним принципом. Утім, завдяки більшій кількості тематичних класів, для кожної адміністративної області одержано понад 400 вибірових одиниць (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Розподіл кількості вибірових одиниць за типами земельного покриття, використаних для валідації тематичних карт

№ з/П	Адміністративна область	Категорія земель								Усього
		ліс	чагарники	травостої	с.-г. угіддя	населені пункти	водно-болотні угіддя	водойми	інші непродуктивні землі	
1	Волинська	109	25	70	111	25	25	25	25	415
2	Житомирська	113	25	73	103	25	25	25	25	414
3	Київська	87	25	68	163	25	25	25	25	443
4	Рівненська	114	25	78	99	25	25	25	25	416
5	Чернігівська	76	25	77	135	25	25	25	25	413
Разом		499	125	366	611	125	125	125	125	2101

Загалом набір даних для валідації одержано більшого обсягу, що створює підстави для достовірного оцінювання точності тематичних карт і обчислення площі тематичних класів.

2.1.3 Методика дешифрування супутникових знімків

У дослідженні використано 536 супутникових знімків, які було скомпоновано у вигляді безхмарних сезонних мозаїк та використано для дослідження спектральних властивостей земного покриву [75]. Як вже зазначалося раніше, знімки скомпоновано у вигляді чотирьох сезонних безхмарних мозаїк на основі алгоритму, який максимізує вплив пікселів із найбільшими значеннями індексу *NDVI* та дозволяє відібрати «кращі» спостереження [24]. Відповідно до нього з серії спостережень для кожного спектрального каналу відбирають лише ті пікселі, що не потрапили на хмари. Якщо цей критерій для *i*-того пікселя задовольняють відразу кілька знімків, надається перевага спостереженням із найбільшим значенням *NDVI*. Також за цим принципом до мозаїк додано канали, створені на основі розрахунку індексу *NDVI* та ортогонального перетворення супутникових знімків типу «ковпак з кистю» (ТСТ). Для цього використано коефіцієнти, одержані емпіричним шляхом у роботі [3]. У просторовому відношенні територію дослідження представляє 59 сцен за глобальною сіткою WRS-2 (див. табл. 2.2).

Для мозаїки сезону квітень–жовтень створено додаткові канали, до яких пікселі відбирали на основі певних статистичних правил: медіана, 1-й і 3-й квартилі, а також мінімальні та максимальні значення періоду квітень–жовтень 2016–2018 рр. (табл. 2.8). На нашу думку, це допомагає виявити сезонну мінливість спектральних показників різних категорій земного покриву, зокрема покращує розпізнавання груп хвойних, листяних і мішаних лісових насаджень. Також запропонована методика дозволяє покращити диференціацію сільськогосподарських угідь та травостоїв.

Таблиця 2.8 – Спектральні показники сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI [73]

Спектральні змінні для мозаїк сезонів літо, осінь, рік	Показники, визначені для мозаїки сезону квітень–жовтень
ТОА відбиття в каналах: Band 4, Band 5, Band 6, Band 7, Band 10	Мінімальне та максимальне значення відбиття для: Band 4, Band 5, Band 6, Band 7 та <i>NDVI</i>
Відношення каналів: Band 4 / Band 5, Band 4 / Band 7, Band 5 / Band 7	25-й та 75-й персентилі відбиття для: Band 4, Band 5, Band 6, Band 7 та <i>NDVI</i>
Вегетаційний індекс <i>NDVI</i>	Медіана відбиття для: Band 4, Band 5, Band 6, Band 7 та <i>NDVI</i>
Канали перетворення TCT	

Враховуючи висновки, одержані в результаті дослідження динаміки спектральних показників різних типів земного покриття [75], для трьох сезонних мозаїк Landsat (рік, літо, осінь) навчальну вибірку сформовано за даними таких каналів: Band 4, Band 5, Band 6, Band 7, Band 10; співвідношення каналів Band 4 / Band 5, Band 4 / Band 7, Band 5 / Band 7, індекс *NDVI*; канали спектрального перетворення TCT. Для мозаїки періоду квітень–жовтень за трирічний період спостережень використовували такі статистичні показники: медіана, 1-й та 3-й квартилі каналів Band 4, Band 5, Band 6, Band 7, *NDVI*. Також вибірку для всіх сезонних мозаїк доповнювали значення географічної довготи і широти центра вибіркової одиниці (табл. 2.9).

У зв'язку з великою кількістю незалежних (предикативних) змінних розглядали виключно непараметричні методи класифікації супутникових знімків. Протягом останнього часу широко відомим став алгоритм машинного навчання Random Forest [4]. Класифікацію методом RF здійснювали за допомогою голосування класифікаторів (окремих дерев). Відомо, що точність ансамблів класифікаторів суттєво залежить від того, наскільки пов'язані між собою їхні рішення, тобто ймовірність точної класифікації буде більшою за умови меншої кореляції. У методі RF рішення класифікаційних дерев слабо корельовані внаслідок подвійної реалізації випадкового процесу: на стадії формування підвбірок та відбору незалежних змінних для розгалуження.

Все ж, оптимізація навчальної вибірки за великої кількості незалежних змінних має важливе значення для покращання поведінки моделі [28].

Таблиця 2.9 – Спектральні змінні для класифікації
сезонних мозаїк Landsat 8 OLI [73]

Тип змінної (спектральний канал)	Умовні позначення незалежних змінних для сезонних мозаїк			
	рік	літо	осінь	квітень-осінь
Band 4	B4_An	B4_Su	B4_Au	B4_ApOc_p75 B4_ApOc_median B4_ApOc_p25
Band 5	B5_An	B5_Su	B5_Au	B5_ApOc_p25 B5_ApOc_median B5_ApOc_p75
Band 6	B6_An	B6_Su	B6_Au	B6_ApOc_p25 B6_ApOc_median B6_ApOc_p75
Band 7	B7_An	B7_Su	B7_Au	B7_ApOc_p25 B7_ApOc_median B7_ApOc_p75
Band 10	B10_An	B10_Su	B10_Au	–
Band 4 / Band 5	B4/B5_An	B4/B5_Su	B4/B5_Au	–
Band 4 / Band 7	B4/B7_An	B4/B7_Su	B4/B7_Au	–
Band 5 / Band 7	B5/B7_An	B5/B7_Su	B5/B7_Au	–
<i>NDVI</i>	NDVI_An	NDVI_Su	NDVI_Au	NDVI_ApOc_p25 NDVI_ApOc_median NDVI_ApOc_p75
TCT	Brightness_An Greenness_An Wetness_An	Brightness_Su Greenness_Su Wetness_Su	Brightness_Au Greenness_Au Wetness_Au	–

Загальновживаним показником оцінювання відносного впливу кожної предикативної змінної на точність моделі RF є відносне збільшення середнього квадратичного відхилення (% IncMSE). Цей показник вказує на скільки відсотків зросте середньоквадратична помилка класифікації в разі виключення відповідної змінної з моделі. Треба зазначити, що % IncMSE є найпоширенішим критерієм для інтерпретації точності класифікаційних моделей RF [8, 22]. Кількісне оцінювання, яке забезпечує зазначений показник, важливе також для глибшого розуміння досліджуваної наукової проблеми під час класифікації.

Дослідження вказують на те, що за умови вибору більшої кількості класифікаційних дерев (*ntree*) оцінки за моделями RF стають стійкішими, а зі збільшенням кількості змінних, які беруть участь під час побудови розгалуження *i*-того класифікаційного дерева (*mtry*) – зростає диференціація незалежних змінних за величиною %IncMSE [21]. У зв'язку з цим, щоб обрати оптимальні значення параметрів моделей RF, використано функцію `tuneRF` зі статистичного пакета `randomForest` для системи R. Якщо кількість змінних на певному етапі була меншою від розрахованої, використовували стандартні налаштування алгоритму. Відповідно до них розрахунок параметра *mtry* здійснюють за формулою:

$$mtry = \sqrt{p}, \quad (2.1)$$

де *p* – кількість незалежних змінних у вибірці.

Величину відносного впливу незалежних змінних на точність класифікації оцінено за середнім арифметичним значенням помилки, обчисленої у результаті 50 повторних запусків алгоритму `randomForest` на основі невідібраних для побудови ансамблю класифікаційних дерев даних (звідси помилка OOB – Out of Bag). Після цього кожній змінній приписували ранг у порядку спадання %IncMSE. Всі розрахунки виконували за алгоритмами в системі R v. 3.5.1.

На першому етапі дослідження проаналізовано наскільки відрізняється точність класифікації окремих сезонних мозаїк (табл. 2.10). Найменшу помилку забезпечила класифікація повного набору незалежних змінних, сформованого на основі чотирьох сезонних мозаїк (OOB = 25,4 %). Дещо поступається перед нею в точності класифікація знімків, одержаних протягом сезону квітень–жовтень (OOB = 25,7 %). Для решти сезонних мозаїк виникають набагато більші помилки. Також виявлено важливу роль географічних координат, які суттєво зменшують помилку класифікації для всіх представлених мозаїк.

Таблиця 2.10 – Точність моделей класифікації сезонних мозаїк
Landsat 8 OLI [73]

Навчальна вибірка для періоду	<i>mtry</i>	Спектральні дані		Спектральні дані та географічні координати	
		кількість змінних	помилка класифікації, %	кількість змінних	помилка класифікації, %
Рік	6	12	36,5	14	33,8
Квітень–жовтень	8	15	26,7	17	25,7
Літо	6	12	36,8	14	34,6
Осінь	6	12	33,0	14	31,6
Рік, квітень– жовтень, літо, осінь	14	51	25,6	53	25,4

Завдання оптимізації вихідного набору змінних можна розглядати з двох позицій: визначити змінні, які виявляють найбільший вплив на відгук і вилючити всі зайві; визначитися з найменшим обсягом змінних, достатнім для виконання прогнозу. В дослідженні використано останній принцип [74, 71]. Для того, щоб зробити висновок про внесок відповідного показника в загальну точність класифікації, створено ряд поступового зменшення значень % IncMSE, а змінним присвоєно відповідні ранги (рис. 2.8). Характерно, що для частини показників величина % IncMSE набуває від’ємних значень і свідчить про необхідність виключення їх з розрахунків.

Ідея зменшення розмірності класифікаційної моделі полягає в тому, що серед представленого на рис. 2.8 списку змінних існує певний мінімальний піднабір, який забезпечує найвищу точність класифікації. Визначитися з переліком показників можна, проаналізувавши як змінюється помилка класифікації у разі поступового збільшення кількості незалежних змінних. Для вирішення зазначеної проблеми використано результати ранжування змінних за величиною їхнього внеску в точність класифікації.

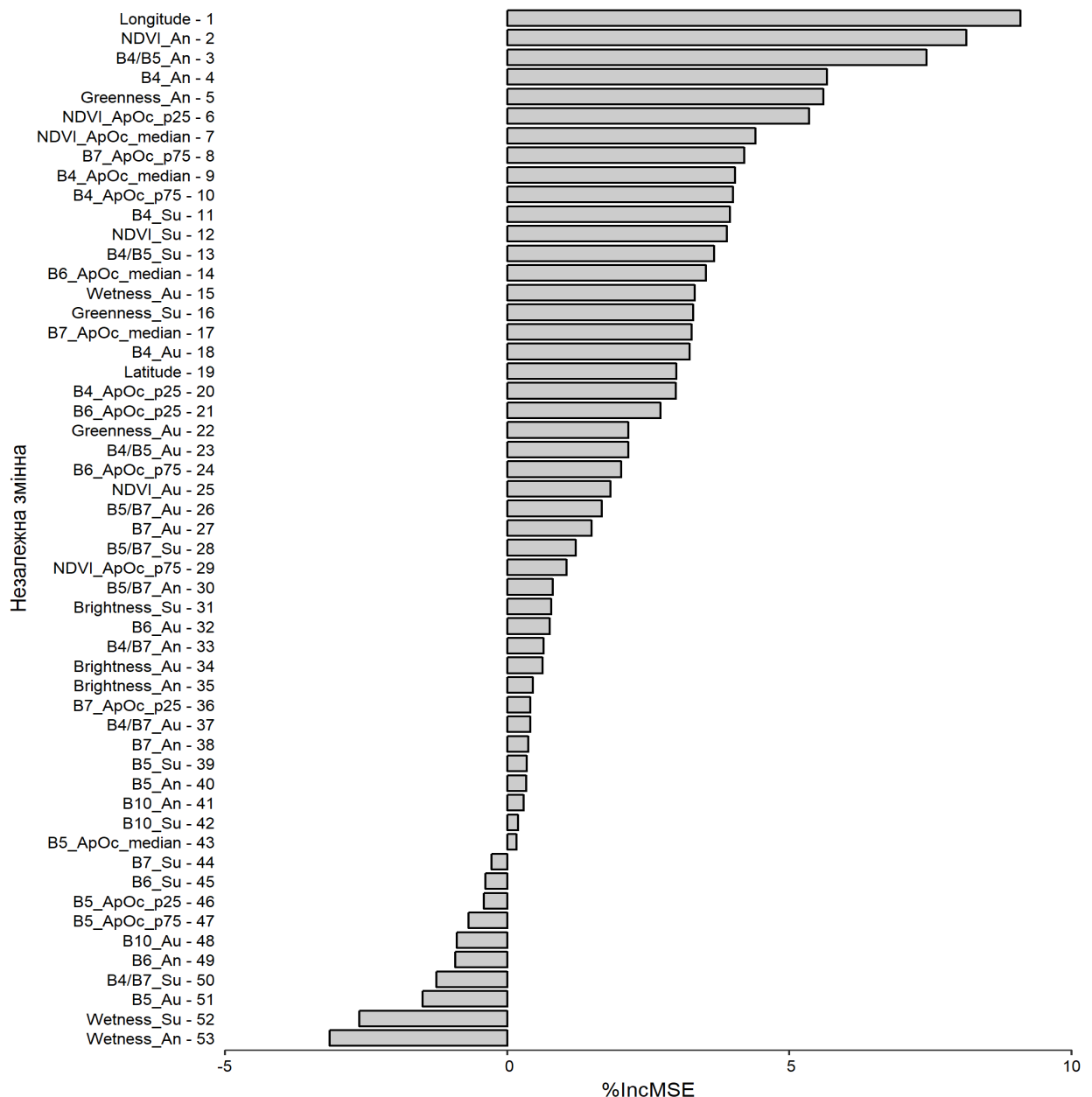


Рисунок 2.8 – Розподіл незалежних змінних за величиною відносного впливу на точність дешифрування типів земного покриття

Спочатку було опрацьовано модель, яка враховує тільки два найважливіших показники (Longitude та NDVI_An). На кожному наступному етапі до моделі додавали наступний за рангом показник. На рис. 2.9 наведено як змінюється середнє арифметичне значення помилки класифікації, обчисленої за даними 50 запусків алгоритму RF, у разі збільшення кількості змінних від 2 до 53. Дані свідчать, що найістотніше точність класифікаційної моделі зростає

після збільшення кількості предикативних змінних від 2 до 10. Після цього помилка спадає менш стрімко.

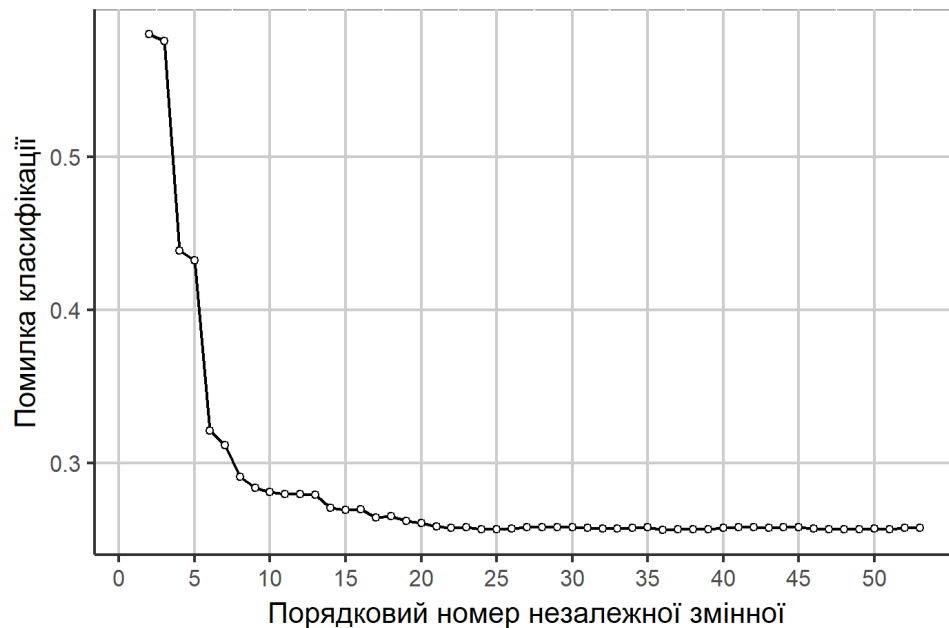


Рисунок 2.9 – Залежність помилки класифікації типів земного покриття від кількості незалежних змінних

Найбільшу точність забезпечують перші 36 незалежних змінних, після чого вона вже не підвищується. Приблизно третину з них одержано з сезонних мозаїк для періоду квітень–жовтень, що підтверджує важливість інформації про фенологічний стан рослинності для покращання точності класифікації ландшафтів. Проведені дослідження вказують також на відносно незначний вплив даних термальних каналів, зокрема каналу Band 10 системи Landsat 8 OLI, на точність дешифрування типів земного покриття.

Аналогічну перевірку також застосовано для окремих сезонних мозаїк. Це дозволило зробити більш змістовні висновки про вплив різних показників на точність класифікації супутникових знімків. Одержані результати створюють об'єктивне підґрунтя для опрацювання карти земного покриття території Полісся України, використовуючи модель класифікації багатосезонного набору даних, що включає 36 найважливіших показників.

За схожим принципом проаналізовано точність класифікації лісових насаджень залежно від їхнього видового складу. Одержані висновки щодо

класифікації супутникових знімків за типами земного покриття дозволили зупинитися на аналізі виключно багатосезонного набору даних. Як і для попередньої моделі треба констатувати великий внесок географічних координат у загальну точність класифікації видового складу лісових насаджень. На противагу цьому, термальний канал Band 10 для всіх сезонів знову виявився найменш важливим.

Реалізація опрацьованої методики класифікації супутникових знімків Landsat 8 OLI для території досліджень на персональному комп'ютері – надзвичайно складна задача, адже навіть підготовчий етап роботи зі створення сезонних мозаїк потребує великих витрат часу й ресурсів. У зв'язку з цим алгоритм обробки знімків від самого початку розробляли на платформі GEE API, а розрахунки виконували віддалено в хмарному кластері Google. У результаті досліджень для території Полісся України створено дві тематичні карти. Першою з них є карта земного покриття станом на 2016–2018 рр., що включає 8 тематичних класів. По суті, це найважливіший результат картографування, який слугує як основа для дешифрування в межах класу вкритих лісовою рослинністю ділянок додаткових трьох категорій деревостанів: хвойні, листяні та мішані.

Тематичні карти, одержані на основі дешифрування супутникових знімків Landsat, наведено на рис. 2.10–2.14. Для створення файлу з параметрами ландшафтів просторове розрізнення цих карт було агреговане до 90 м, після чого виконано перекодування пікселів за типами моделей горючих матеріалів. Достовірність моделювання природних пожеж, насамперед, залежить від точності розроблених карт земного покриття. Враховуючи це, оцінювання їхньої точності має важливе значення для виявлення потенційних невизначеностей у прогнозуванні ризиків природних пожеж, використовуючи розроблену геоінформаційну основу.

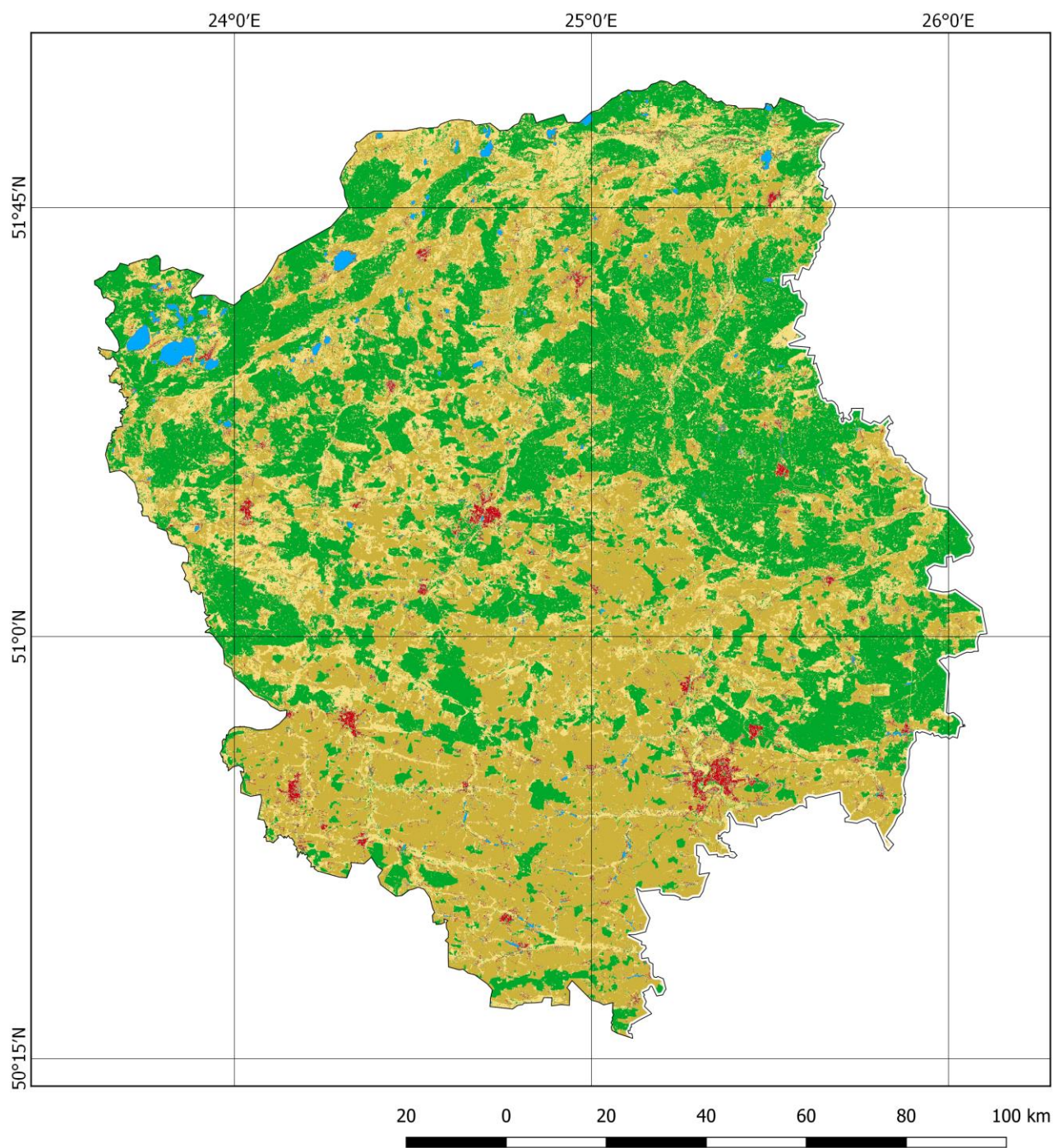
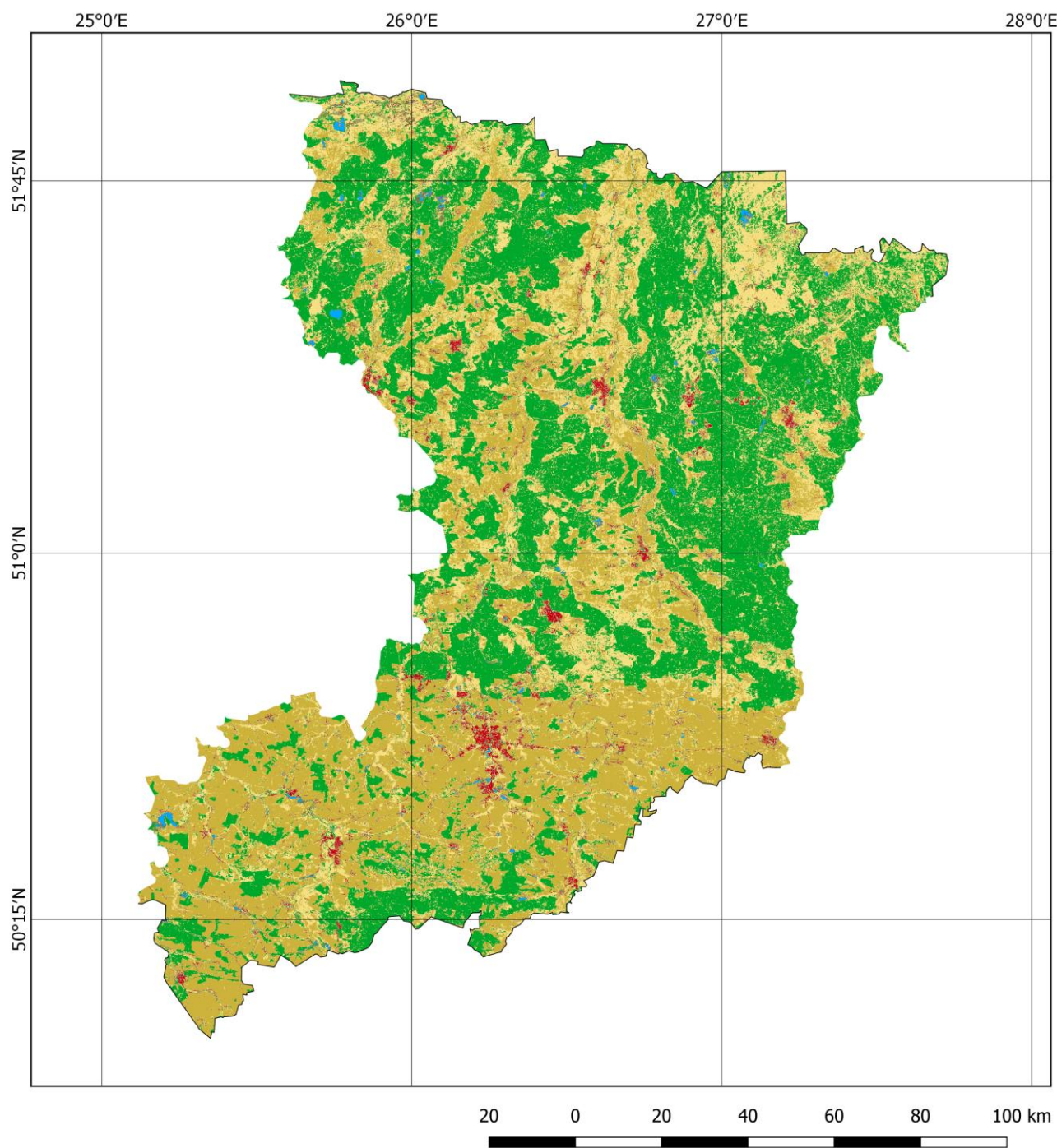


Рисунок 2.10 – Типи земельного покриву Волинської області



Умовні позначення

- Водойми
- Водно-болотні угіддя
- Населені пункти
- Інші непродуктивні землі
- С.-г. угіддя
- Травостої
- Чагарники
- Вкриті лісовою рослинністю ділянки

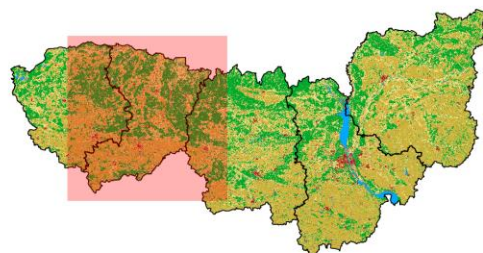
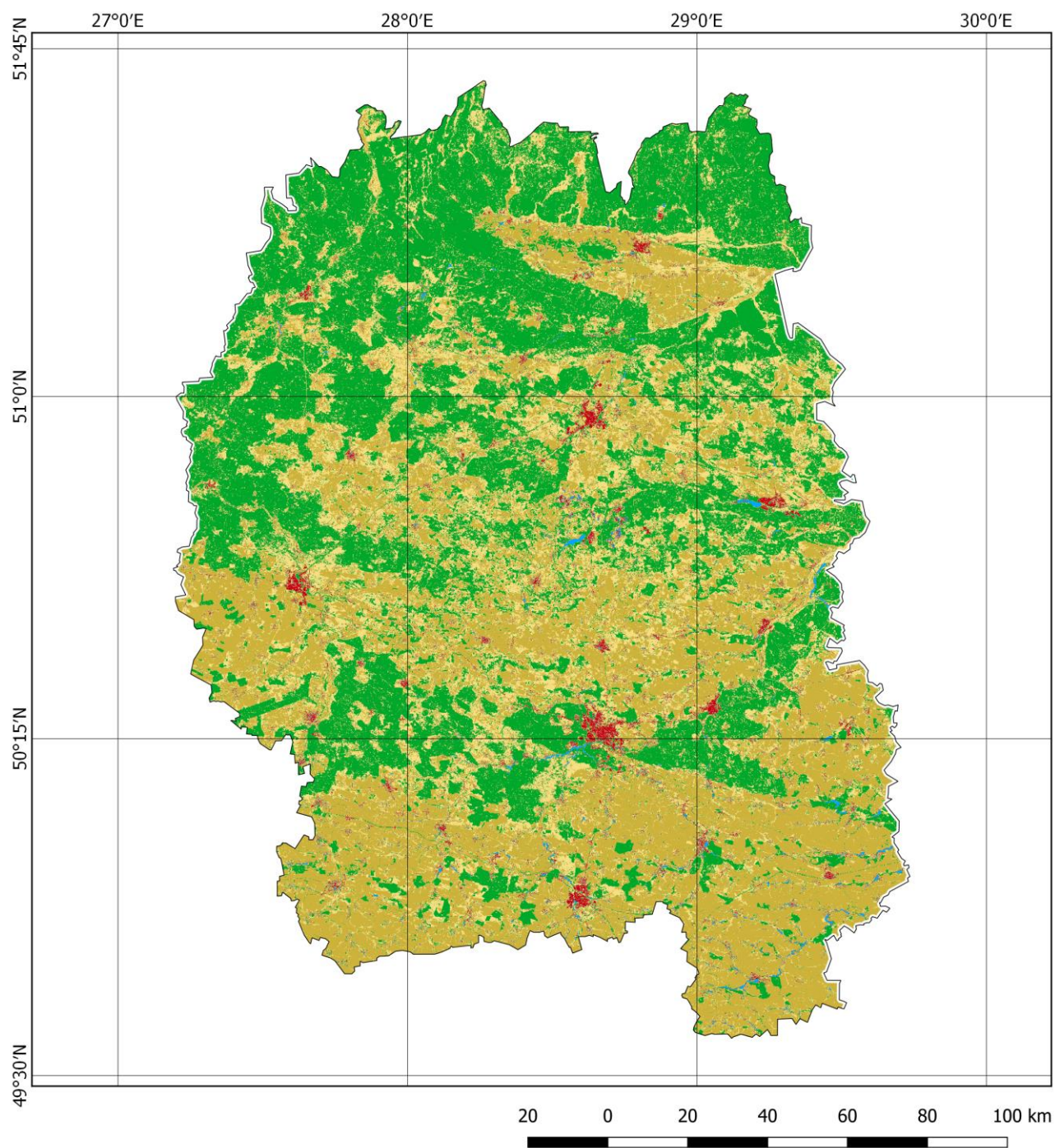


Рисунок 2.11 – Типи земельного покриття Рівненської області



Умовні позначення

- Водойми
- Водно-болотні угіддя
- Населені пункти
- Інші непродуктивні землі
- С.-г. угіддя
- Травостої
- Чагарники
- Вкриті лісовою рослинністю ділянки

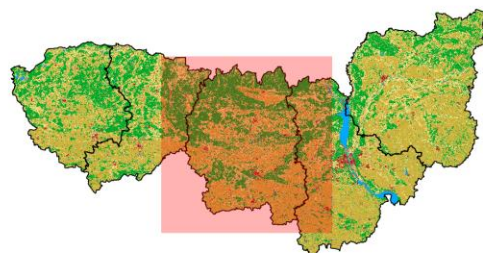
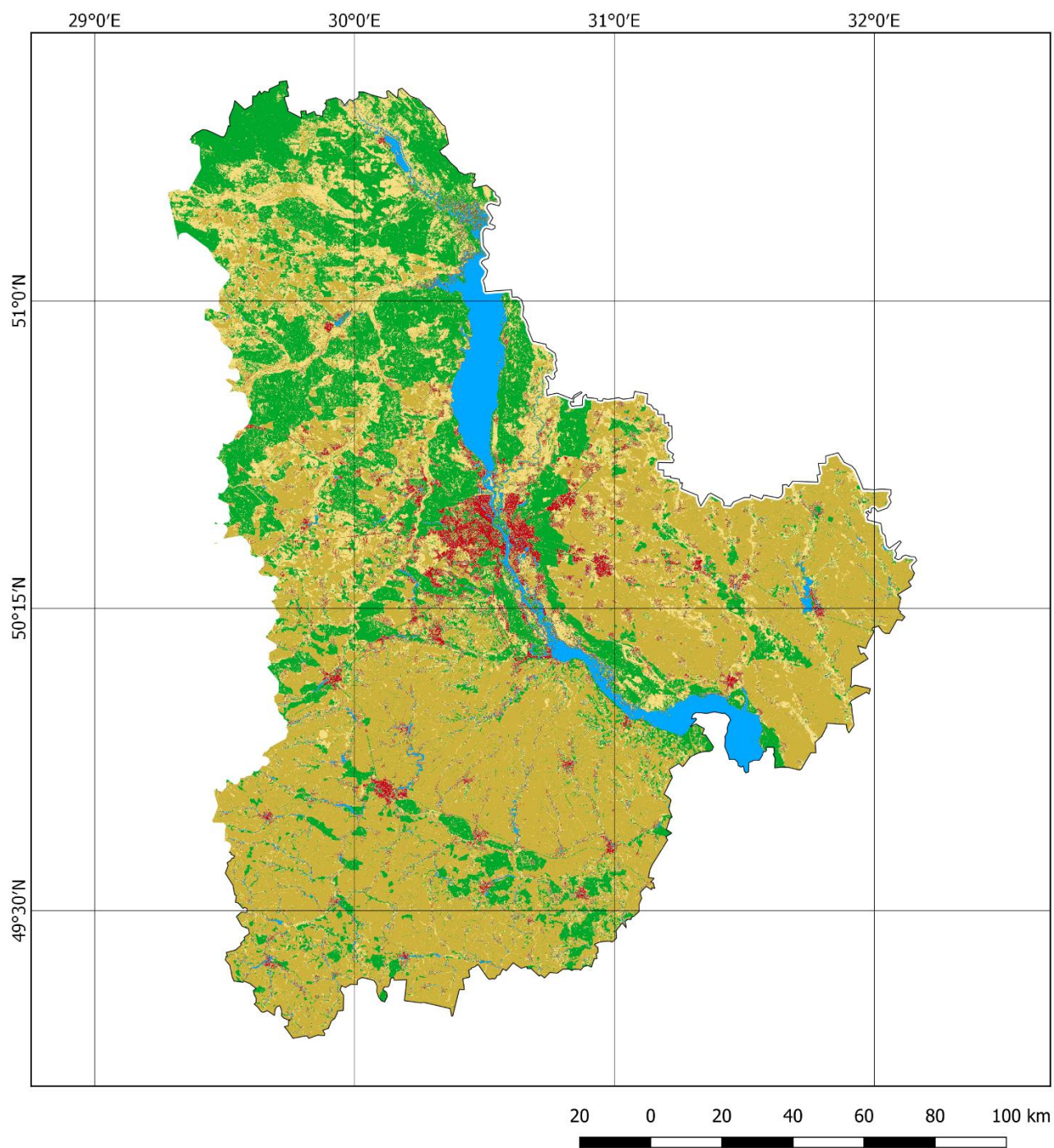


Рисунок 2.12 – Типи земельного покриття Житомирської області



Умовні позначення

- Водойми
- Водно-болотні угіддя
- Населені пункти
- Інші непродуктивні землі
- С.-г. угіддя
- Травостої
- Чагарники
- Вкриті лісовою рослинністю ділянки

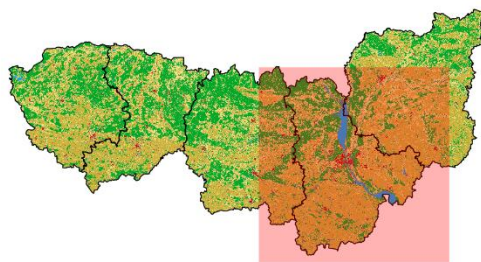
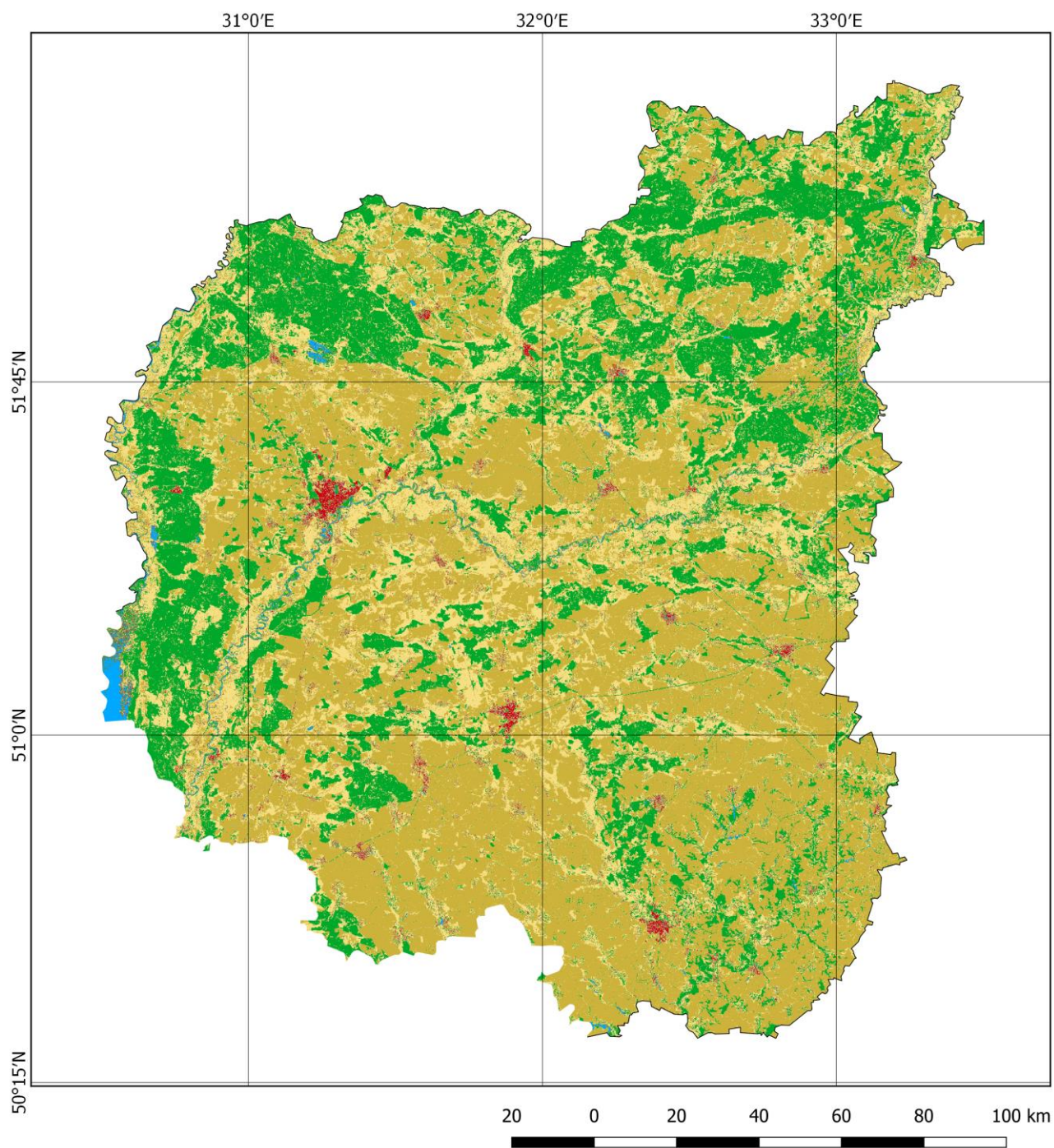


Рисунок 2.13 – Типи земельного покриття Київської області



Умовні позначення

- Водойми
- Водно-болотні угіддя
- Населені пункти
- Інші непродуктивні землі
- С.-г. угіддя
- Травостої
- Чагарники
- Вкриті лісовою рослинністю ділянки

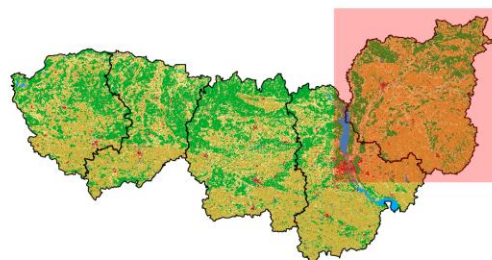


Рисунок 2.14 – Типи земельного покриття Чернігівської області

2.2 Точність дешифрування вкритих і неvkритих лісовою рослинністю ділянок

Оцінювання точності тематичних карт можна здійснювати двома способами: 1) із урахуванням взаємного розташування тематичних і фактичних класів земного покриття і 2) без врахування цього чинника [9]. В останньому випадку результати дослідження можуть мати більший ступінь невизначеності, оскільки під час перевірки порівнюють загальні площі відповідних тематичних класів із наявною офіційною інформацією, що виступає своєрідним критерієм контролю. У зв'язку з цим для виявлення помилок картографічних матеріалів прийнято застосовувати перший підхід, в основі якого покладено дослідження відповідності в просторі тематичних класів і співставної їм опорної інформації. Для цього застосовують систему вибірових одиниць із чітко визначеним набором необхідним атрибутів, а порівняння виконують у вигляді матриці помилок.

Матриця помилок являє собою перехресну таблицю, в якій за головною діагоналлю розташовують кількість коректно класифікованих даних, а інші елементи вказують на помилки пропуску / включення класифікації. Рядки цієї матриці представляють класи тематичної карти, а стовпці – реальні категорії земного покриття. Кожен елемент матриці характеризує частоту (n_{ij}) генеральної сукупності (ГС), який відповідає i -тому класу тематичної карти та j -тому класу опорних даних.

Матриці помилок класифікації супутникових знімків для п'яти адміністративних областей території досліджень наведено в табл. 2.11–2.15. Відповідно до представленої інформації, всім тематичним класам притаманний певний рівень невизначеності. За аналізом розподілу вибірових одиниць за головною діагоналлю матриці помилок, а також за стовпцями та рядками, в класифікації присутні як помилки включення, так і пропуску. Найточніше ідентифікують водойми, лісовий покрив та сільськогосподарські угіддя, решті типам земного покриття властиво більше помилок.

Таблиця 2.11 – Матриця помилок класифікації земного покриття Волинської області за сезонними мозаїками Landsat 8 OLI

Тематичний клас	Опорні дані								Разом
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	
Водойми	22	3	0	0	0	0	0	0	25
Водно-болотні угіддя	3	15	0	0	1	0	2	4	25
Населені пункти	1	0	18	0	1	3	0	2	25
Інші непродуктивні землі	0	0	21	4	0	0	0	0	25
С.-г. угіддя	0	1	0	0	94	14	1	1	111
Травостої	0	7	2	0	7	47	3	4	70
Чагарники	0	1	1	0	1	5	13	4	25
Ліс	0	4	0	0	0	1	2	102	109
Разом	26	31	42	4	104	70	21	117	415

Таблиця 2.12 – Матриця помилок класифікації земного покриття Рівненської області за сезонними мозаїками Landsat 8 OLI

Тематичний клас	Опорні дані								Разом
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	
Водойми	22	2	1	0	0	0	0	0	25
Водно-болотні угіддя	0	23	0	0	0	0	0	2	25
Населені пункти	0	0	23	0	1	0	1	0	25
Інші непродуктивні землі	0	1	9	13	0	0	0	2	25
С.-г. угіддя	0	1	1	0	86	10	1	0	99
Травостої	0	8	1	0	9	49	4	7	78
Чагарники	0	3	1	0	2	7	7	5	25
Ліс	0	1	0	0	0	5	4	104	114
Разом	22	39	36	13	98	71	17	120	416

Таблиця 2.13 – Матриця помилок класифікації земного покриття Житомирської області за сезонними мозаїками Landsat 8 OLI

Тематичний клас	Опорні дані								Разом
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	
Водойми	23	2	0	0	0	0	0	0	25
Водно-болотні угіддя	1	17	0	0	0	1	2	4	25
Населені пункти	0	0	21	1	2	1	0	0	25
Інші непродуктивні землі	0	0	8	17	0	0	0	0	25
С.-г. угіддя	0	0	0	0	101	2	0	0	103
Травостої	0	4	0	1	7	51	4	6	73
Чагарники	0	3	0	0	2	2	15	3	25
Ліс	0	2	0	0	0	1	0	110	113
Разом	24	28	29	19	112	58	21	123	414

Таблиця 2.14 – Матриця помилок класифікації земного покриття Київської області за сезонними мозаїками Landsat 8 OLI

Тематичний клас	Опорні дані								Разом
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	
Водойми	24	1	0	0	0	0	0	0	25
Водно-болотні угіддя	1	23	0	0	0	0	1	0	25
Населені пункти	0	0	24	0	1	0	0	0	25
Інші непродуктивні землі	0	0	21	4	0	0	0	0	25
С.-г. угіддя	0	0	0	0	149	10	2	2	163
Травостої	0	0	0	0	9	49	2	8	68
Чагарники	0	1	3	0	4	5	6	6	25
Ліс	0	2	0	0	0	0	1	84	87
Разом	25	27	48	4	163	64	12	100	443

Таблиця 2.15 – Матриця помилок класифікації земного покриття Чернігівської області за сезонними мозаїками Landsat 8 OLI

Тематичний клас	Опорні дані								Разом
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	
Водойми	25	0	0	0	0	0	0	0	25
Водно-болотні угіддя	2	17	0	0	0	0	2	4	25
Населені пункти	0	0	20	0	1	0	2	2	25
Інші непродуктивні землі	0	0	24	1	0	0	0	0	25
С.-г. угіддя	0	3	1	0	120	11	0	0	135
Травостої	0	4	0	0	9	45	17	2	77
Чагарники	0	1	1	0	0	6	15	2	25
Ліс	0	0	1	0	0	1	2	72	76
Разом	27	25	47	1	130	63	38	82	413

Наведені матриці помилок являють собою окремі випадки розподілу вибірових одиниць, на основі якого не можна оцінити показники точності класифікації на рівні ГС. З цією метою здійснюють перехід від кількості вибірових одиниць до частки площі ГС, якій вони відповідають на карті (табл. 2.16–2.20). Матрицю помилок трансформують до такого вигляду за формулою (2.2), враховуючи вагу відповідної страти:

$$\hat{p}_{ij} = W_i \cdot \frac{n_{ij}}{n_i}, \quad (2.2)$$

де W_i – частка від загальної площі і-того класу; n_{ij} – кількість вибірових одиниць, які потрапили до і-того тематичного та j-того опорного класів; n_i – кількість одиниць вибірки в і-тому тематичному класі.

Наприклад, використовуючи частку площі (вагу) класу «ліс» для Волинської області $W_i = 0,359$, згідно з даними табл. 2.11 встановлюємо, що

цей клас забезпечує 33,6 % коректно класифікованої інформації для всієї тематичної карти області:

$$\hat{p}_{ij} = W_i \cdot \frac{n_{ij}}{n_i} = 0,359 \cdot \frac{102}{109} = 0,336.$$

Після перетворення матриць помилок в абсолютних показниках до аналогічних таблиць, виражених у частках площі, можна обчислити показники точності дешифрування типів земного покриття, а також виконати інтервальне оцінювання площі тематичних класів. Основними показниками точності, які одержують з матриці помилок, що містить q класів, є:

- загальна точність класифікації (overall accuracy):

$$\hat{O} = \sum_{j=1}^q \hat{p}_{ij}, \quad (2.3)$$

- точність користувача (user's accuracy):

$$\hat{U}_i = \hat{p}_{ij} / \hat{p}_{i.}, \quad (2.4)$$

- точність виробника (producer's accuracy):

$$\hat{P}_j = \hat{p}_{ij} / \hat{p}_{.j}, \quad (2.5)$$

де $\hat{p}_{ij}$ – частка площі ГС, яка віднесена до i -того тематичного та j -того опорного класів; $\hat{p}_{i.}$ – частка площі ГС i -того тематичного класу; $\hat{p}_{.j}$ – частка площі ГС j -того опорного класу; q – кількість тематичних класів.

Враховуючи відповідні вагові коефіцієнти та частки коректно класифікованих даних, виражені в одиницях площі, можна одержати оцінку точності користувача для кожного тематичного класу. На основі рівняння (2.4) та наведених розрахунків точність користувача для вкритих лісовою рослинністю для Волинської області становить приблизно 80 %:

$$\hat{U}_i = \hat{p}_{ij} / \hat{p}_{i.} = \frac{0,336}{0,359} = 0,936,$$

$$\text{де} \\ \hat{p}_{i\cdot} = \sum_{j=1}^q \hat{p}_{ij}.$$

В обчисленні показника точності виробника для цієї категорії бере участь скоригована частка площі, яку представляють вибіркові одиниці опорного набору даних:

$$\begin{aligned} \hat{p}_{i\cdot} = \sum_{j=1}^q W_j \cdot \frac{n_{ij}}{n_{i\cdot}} = 0,006 \cdot \frac{4}{25} + 0,025 \cdot \frac{2}{25} + 0,369 \cdot \frac{1}{111} + \\ + 0,228 \cdot \frac{4}{70} + 0,359 \cdot \frac{102}{109} = 0,356. \end{aligned}$$

Таким чином, відповідно до наведеної матриці помилок, точність лісової маски за показником точності виробника оцінюється на рівні 94 %:

$$\hat{p}_j = \hat{p}_{ij} / \hat{p}_{i\cdot} = \frac{0,336}{0,356} = 0,943.$$

Розрахунок довірчих інтервалів для оцінювання показників точності класифікації виявляється суттєво складнішим, а з деталями розрахунків можна познайомитись у відповідних публікаціях [9, 32, 33].

Іншим важливим етапом є обчислення довірчих інтервалів для оцінювання скоригованої площі тематичних класів, яку одержують після врахування помилок пропуску класифікації. Дійсна площа класу k ($\hat{A}_k$) і стандартна помилка цього оцінювання ($S(\hat{A}_k)$), обчислюються за формулами:

$$\hat{A}_k = A \cdot \hat{p}_{\cdot k}, \quad (2.6)$$

$$S(\hat{A}_k) = A \cdot S(\hat{p}_{\cdot k}), \quad (2.7)$$

де A – загальна площа території досліджень.

Довірчий інтервал оцінювання площі за ймовірності 0,95 одержують із співвідношення $\hat{A}_k \pm 1,96 \cdot S(\hat{A}_k)$. Результати оцінювання тематичної точності розроблених карт земельного покриття наведено в табл. 2.16–2.20.

Таблиця 2.16 – Оцінювання показників точності карти земного покриття
Волинської області (довірча ймовірність $p = 0,95$)

Тематичний клас	Опорні дані (частка від загальної площі)									Площа класу, тис. га	Частка площі класу
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	разом одиниць вибірки		
Водойми	0,007	0,001	0	0	0	0	0	0	25	16,1	0,008
Водно-болотні угіддя	0,001	0,003	0	0	0,000	0	0,000	0,001	25	11,4	0,006
Населені пункти	0,001	0	0,018	0	0,001	0,003	0	0,002	25	50,0	0,025
Інші непродуктивні землі	0	0	0,000	0,000	0	0	0	0	25	0,1	0,000
С.-г. угіддя	0	0,003	0	0	0,312	0,046	0,003	0,003	111	743,2	0,369
Травостої	0	0,023	0,007	0	0,023	0,153	0,01	0,013	70	460,1	0,228
Чагарники	0	0,000	0,000	0	0,000	0,001	0,003	0,001	25	12,2	0,006
Ліс	0	0,013	0	0	0	0,003	0,007	0,336	109	723,2	0,359

Продовження таблиці 2.16

Тематичний клас	Скоригована частка площі класу	Довірчий інтервал для частки площі класу	Скоригована площа класу, тис. га	Довірчий інтервал для площі класу, тис. га	Показники точності класифікації					
					Точність користувача ($\hat{U}_i$)	Довірчий інтервал для $\hat{U}_i$	Точність виробника ($\hat{P}_j$)	Довірчий інтервал для $\hat{P}_j$	Загальна точність ($\hat{O}$)	Довірчий інтервал для $\hat{O}$
Водойми	0,009	0,002	18,1	4,7	0,880	0,130	0,807	0,195	0,832	0,039
Водно-болотні угіддя	0,044	0,022	88,7	43,6	0,600	0,196	0,077	0,045	–	–
Населені пункти	0,025	0,010	50,4	20,2	0,720	0,180	0,725	0,269	–	–
Інші непродуктивні землі	0,000	0,000	0,0	0,0	0,160	0,147	1,000	0,000	–	–
С.-г. угіддя	0,336	0,030	677,4	59,8	0,847	0,067	0,928	0,045	–	–
Травостої	0,207	0,035	417,3	70,3	0,671	0,111	0,74	0,091	–	–
Кущова рослинність	0,023	0,016	46,4	31,6	0,520	0,200	0,135	0,101	–	–
Ліс	0,356	0,022	717,8	44,3	0,936	0,046	0,943	0,038	–	–

Таблиця 2.17 – Оцінювання показників точності карти земного покриття
Рівненської області (довірча ймовірність $p = 0,95$)

Тематичний клас	Опорні дані (частка від загальної площі)									Площа класу, тис. га	Частка площі класу
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	разом одиниць вибірки		
Водойми	0,005	0,000	0,000	0	0	0	0	0	25	11,7	0,006
Водно-болотні угіддя	0	0,006	0	0	0	0	0	0,001	25	12,9	0,006
Населені пункти	0	0	0,028	0	0,001	0	0,001	0	25	60,2	0,030
Інші непродуктивні землі	0	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0,000	25	0,3	0,000
С.-г. угіддя	0	0,003	0,003	0	0,282	0,033	0,003	0	99	650,7	0,325
Травостої	0	0,026	0,003	0	0,030	0,161	0,013	0,023	78	513,3	0,256
Чагарники	0	0,000	0,000	0	0,000	0,001	0,001	0,001	25	7,7	0,004
Ліс	0	0,003	0	0	0	0,016	0,013	0,340	114	748,3	0,373

Продовження таблиці 2.17

Тематичний клас	Скоригована частка площі класу	Довірчий інтервал для частки площі класу	Скоригована площа класу, тис. га	Довірчий інтервал для площі класу, тис. га	Показники точності класифікації					
					Точність користувача ($\hat{U}_i$)	Довірчий інтервал для $\hat{U}_i$	Точність виробника ($\hat{P}_j$)	Довірчий інтервал для $\hat{P}_j$	Загальна точність ($\hat{O}$)	Довірчий інтервал для $\hat{O}$
Водойми	0,005	0,001	10,0	1,5	0,880	0,130	1,000	0,000	0,823	0,040
Водно-болотні угіддя	0,040	0,020	80,2	39,3	0,920	0,109	0,149	0,075	–	–
Населені пункти	0,035	0,010	70,2	19,4	0,920	0,109	0,798	0,211	–	–
Інші непродуктивні землі	0,000	0,000	0,0	0,1	0,520	0,200	1,000	0,000	–	–
С.-г. угіддя	0,313	0,028	627,6	57,1	0,869	0,067	0,901	0,053	–	–
Травостої	0,211	0,037	423,1	73,3	0,628	0,108	0,762	0,092	–	–
Кущова рослинність	0,032	0,019	64,2	38,4	0,280	0,180	0,034	0,029	–	–
Ліс	0,365	0,025	731,8	51,0	0,912	0,052	0,933	0,042	–	–

Таблиця 2.18 – Оцінювання показників точності карти земного покриття
Житомирської області (довірча ймовірність $p = 0,95$)

Тематичний клас	Опорні дані (частка від загальної площі)									Площа класу, тис. га	Частка площі класу
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	разом одиниць вибірки		
Водойми	0,005	0,000	0	0	0	0	0	0	25	15,1	0,005
Водно-болотні угіддя	0,000	0,003	0	0	0	0,000	0,000	0,001	25	11,1	0,004
Населені пункти	0	0	0,023	0,001	0,002	0,001	0	0	25	82,8	0,028
Інші непродуктивні землі	0	0	0,000	0,000	0	0	0	0	25	0,8	0,000
С.-г. угіддя	0	0	0	0	0,337	0,007	0	0	103	1024,3	0,343
Травостої	0	0,013	0	0,003	0,023	0,169	0,013	0,020	73	723,6	0,242
Чагарники	0	0,000	0	0	0,000	0,000	0,001	0,000	25	7,1	0,002
Ліс	0	0,007	0	0	0	0,003	0	0,365	113	1119,5	0,375

Продовження таблиці 2.18

Тематичний клас	Скоригована частка площі класу	Довірчий інтервал для частки площі класу	Скоригована площа класу, тис. га	Довірчий інтервал для площі класу, тис. га	Показники точності класифікації					
					Точність користувача ($\hat{U}_i$)	Довірчий інтервал для $\hat{U}_i$	Точність виробника ($\hat{P}_j$)	Довірчий інтервал для $\hat{P}_j$	Загальна точність ($\hat{O}$)	Довірчий інтервал для $\hat{O}$
Водойми	0,005	0,001	14,9	1,9	0,920	0,109	0,969	0,059	0,903	0,030
Водно-болотні угіддя	0,023	0,016	68,6	46,9	0,680	0,187	0,109	0,079	–	–
Населені пункти	0,023	0,004	68,6	12,1	0,840	0,147	0,997	0,002	–	–
Інші непродуктивні землі	0,005	0,007	14,9	20,5	0,680	0,187	0,037	0,056	–	–
С.-г. угіддя	0,362	0,019	1080,3	57,1	0,981	0,027	0,929	0,043	–	–
Травостої	0,181	0,028	540,1	84,0	0,699	0,106	0,937	0,060	–	–
Кущова рослинність	0,015	0,013	44,8	38,1	0,600	0,196	0,096	0,086	–	–
Ліс	0,386	0,019	1151,9	56,8	0,973	0,030	0,946	0,038	–	–

Таблиця 2.19 – Оцінювання показників точності карти земного покриття
Київської області (довірча ймовірність $p = 0,95$)

Тематичний клас	Опорні дані (частка від загальної площі)									Площа класу, тис. га	Частка площі класу
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	разом одиниць вибірки		
Водойми	0,043	0,002	0	0	0	0	0	0	25	129,6	0,045
Водно-болотні угіддя	0,000	0,009	0	0	0	0	0,000	0	25	28,8	0,010
Населені пункти	0	0	0,045	0	0,002	0	0	0	25	136,0	0,047
Інші непродуктивні землі	0	0	0,000	0,000	0	0	0	0	25	1,0	0,000
С.-г. угіддя	0	0	0	0	0,424	0,028	0,006	0,006	163	1345,8	0,464
Травостої	0	0	0	0	0,025	0,136	0,006	0,022	68	545,8	0,188
Чагарники	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	0,000	25	5,0	0,002
Ліс	0	0,006	0	0	0	0	0,003	0,236	87	707,2	0,244

Продовження таблиці 2.19

Тематичний клас	Скоригована частка площі класу	Довірчий інтервал для частки площі класу	Скоригована площа класу, тис. га	Довірчий інтервал для площі класу, тис. га	Показники точності класифікації					
					Точність користувача ($\hat{U}_i$)	Довірчий інтервал для $\hat{U}_i$	Точність виробника ($\hat{P}_j$)	Довірчий інтервал для $\hat{P}_j$	Загальна точність ($\hat{O}$)	Довірчий інтервал для $\hat{O}$
Водойми	0,043	0,004	124,7	10,4	0,960	0,078	0,991	0,018	0,893	0,030
Водно-болотні угіддя	0,017	0,009	49,3	24,8	0,920	0,109	0,550	0,283	–	–
Населені пункти	0,046	0,004	133,4	10,7	0,960	0,078	0,989	0,005	–	–
Інші непродуктивні землі	0,000	0,000	0,0	0,2	0,160	0,147	1,000	0,000	–	–
С.-г. угіддя	0,451	0,025	1307,5	73,8	0,914	0,043	0,940	0,033	–	–
Травостої	0,164	0,027	475,5	76,9	0,721	0,107	0,825	0,089	–	–
Кущова рослинність	0,015	0,012	43,5	35,6	0,240	0,171	0,028	0,030	–	–
Ліс	0,264	0,019	765,4	55,1	0,966	0,039	0,893	0,056	–	–

Таблиця 2.20 – Оцінювання показників точності карти земного покриття
Чернігівської області (довірча ймовірність $p = 0,95$)

Тематичний клас	Опорні дані (частка від загальної площі)									Площа класу, тис. га	Частка площі класу
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	разом одиниць вибірки		
Водойми	0,008	0	0	0	0	0	0	0	25	26,1	0,008
Водно-болотні угіддя	0,001	0,005	0	0	0	0	0,001	0,001	25	24,2	0,008
Населені пункти	0	0	0,014	0	0,001	0	0,001	0,001	25	55,3	0,017
Інші непродуктивні землі	0	0	0	0,000	0,000	0	0	0	25	0,2	0,000
С.-г. угіддя	0	0,010	0,003	0	0,403	0,037	0	0	135	1450,0	0,453
Травостої	0	0,013	0	0	0,030	0,150	0,057	0,007	77	823,8	0,257
Чагарники	0	0,000	0,000	0	0	0,000	0,001	0,000	25	4,3	0,001
Ліс	0	0	0,003	0	0	0,003	0,007	0,242	76	817,9	0,255

Продовження таблиці 2.20

Тематичний клас	Скоригована частка площі класу	Довірчий інтервал для частки площі класу	Скоригована площа класу, тис. га	Довірчий інтервал для площі класу, тис. га	Показники точності класифікації					
					Точність користувача ($\hat{U}_i$)	Довірчий інтервал для $\hat{U}_i$	Точність виробника ($\hat{P}_j$)	Довірчий інтервал для $\hat{P}_j$	Загальна точність ($\hat{O}$)	Довірчий інтервал для $\hat{O}$
Водойми	0,009	0,001	28,8	2,6	1,000	0,000	0,931	0,087	0,823	0,040
Водно-болотні угіддя	0,029	0,017	92,8	54,9	0,680	0,187	0,179	0,115	–	–
Населені пункти	0,021	0,010	67,2	31,1	0,800	0,160	0,669	0,305	–	–
Інші непродуктивні землі	0,000	0,000	0,0	0,0	0,040	0,078	1,000	0,000	–	–
С.-г. угіддя	0,433	0,030	1386,3	97,5	0,889	0,053	0,929	0,040	–	–
Травостої	0,191	0,036	611,5	115,3	0,584	0,111	0,787	0,096	–	–
Кущова рослинність	0,066	0,026	211,3	82,6	0,600	0,196	0,012	0,006	–	–
Ліс	0,251	0,016	803,6	51,2	0,947	0,051	0,963	0,036	–	–

За даними наведених таблиць загальна точність класифікації коливається в діапазоні 82–90 %. Точність користувача дешифрування сільськогосподарських угідь і вкритих лісовою рослинністю ділянок, які разом займають більше 60 % площі території досліджень, за адміністративними областями перевищує 85 %. Точність виробника за цими категоріями земного покриття навіть дещо більша (понад 90 %). Одержані результати свідчать про високу достовірність дешифрування основних типів природно-територіальних комплексів території досліджень на основі часових рядів супутникових знімків Landsat 8 OLI. Найбільші помилки класифікації виникають для класу «інші непродуктивні землі» (піски, кам'яні розсипи, кар'єри). Проте пов'язані з цим помилки принципово не відображаються на загальній точності класифікації, оскільки такі категорії займають відносно незначну частку площі території досліджень. Їх частіше приписують до категорії населених пунктів, тобто територій зі штучним покриттям, які під час моделювання природних пожеж все-одно будуть представлені як негорючі класи земельного покриття. Загалом треба прийняти достатню для поставлених завдань тематичну точність картографічних продуктів навіть за просторового розрізнення 30 м. Під час агрегації даних до прийнятого в проєкті просторового розрізнення 90 м подібні недоліки розроблених карт будуть меншими.

2.3 Зімкнутість вкритих лісовою рослинністю ділянок

Опрацьовані тематичні карти слугують основою для опрацювання просторової основи для моделювання наземних пожеж у відкритих ландшафтах. Проте одним із важливих елементів оцінювання ризиків пожеж на територіях, зайнятих вкритими лісовою рослинністю ділянками, виступає зімкнутість деревостанів. Найточніше оцінювання цього показника можна одержати на підставі обробки наземних даних та матеріалів супутникової зйомки, а за їх відсутності найбільш доцільним є використання глобальних продуктів для отримання інформації про зімкнутість деревостанів. Нині доступні кілька карт, які забезпечують суцільне покриття території України з

просторовим розрізненням 30 м. Глобальна карта змін лісового покриву Global Forest Change (GFC), розроблена в університеті штату Меріленд Карта – найпоширеніша серед них [25]. В основу цього продукту потрапили знімки Landsat 5 TM та Landsat 7 ETM+ для 2000 року, які після радіометричної корекції були очищені від хмар, тіней та водних об'єктів. Обробку знімків виконували у вигляді попиксельних композитних мозаїк, що дозволило створити серію фенологічних метрик для класифікації. Моделювання зімкнутості деревостанів для кожного пікселя розміром 30×30 м проведено за регресійними рівняннями. Їх розробляли з використанням даних про фактичну зімкнутість деревостанів, одержаних на основі супутникових знімків надвисокого просторового розрізнення. Карту GFC відрізняє наявність додаткових шарів, які відображають втрати лісів і лісовідновлення, що теоретично дозволяє актуалізувати карту на обраний період часу.

Глобальна карта GFC відображає динаміку лісового покриву, починаючи з 2000 року [25]. Як критерій для визначення змін, тобто перетворення вкритих лісовою рослинністю ділянок на непокриті та навпаки, використано порогові значення висоти (5 м) і зімкнутості деревостанів (25 %). Нині карта є відкритим ресурсом та постійно оновлюється завдяки обробці знімків поточних місій Landsat. На зразок своїх попередників – неперервних полів рослинності MOD44B, дані GFC надають попиксельну оцінку лісового покриву у відсотках від 0 до 100 %. За розміру пікселя 30×30 м такі значення більше стосуються зімкнутості деревостанів, а не лісистості територій, що забезпечували продукти систем MODIS чи AVHRR.

Карта GFC складається з фрагментів (тайлів), розділених сіткою розміром $10 \times 10^\circ$: treecover2000 – зімкнутість деревостанів заввишки понад 5 м станом на 2000 рік у формі неперервного зображення зі значеннями вихідного растру від 0 до 100; loss – втрати лісів, тобто будь-яка форма перетворення вкритих лісовою рослинністю ділянок на непокриті (закодована як 1 – є втрати, 0 – втрати відсутні); gain – аналогічна інформація про загальне збільшення площі лісів (1 – є відновлення, 0 – відновлення відсутнє); lossyear – щорічна втрата лісів (0 – втрати відсутні, значення 1–14 – щорічні втрати лісів протягом зазначеного

періоду); datamask – три значення, що представляють такі площі: 0 – інформація відсутня, 1 – земна поверхня, 2 – водні об’єкти.

Система GEE забезпечує незалежний доступ до різних версій карти GFC. З метою гармонізації в часовому інтервалі показників зімкнутості деревостанів та розробленої карти земельного покриття використано версію продукту «UMD/hansen/global_forest_change_2015_v1_3». Для актуалізації карти станом на 2015 рік від шару зімкнутості деревостанів treecover2000 відминували всі втрати лісів, що сталися до 2015 р. (тобто перекодували пікселі, для яких значення loss дорівнювало одиниці) та приплюсували дані з шару gain про лісові відновлення, приписавши останнім значення зімкнутості 40 %. Вибір такого значення показника зімкнутості є умовним, утім саме його було рекомендовано для відокремлення вкритих і непокритих лісовою рослинністю ділянок для території полісся України [68]. Результати обробки глобальної карти GFC відображено на рис. 2.15.

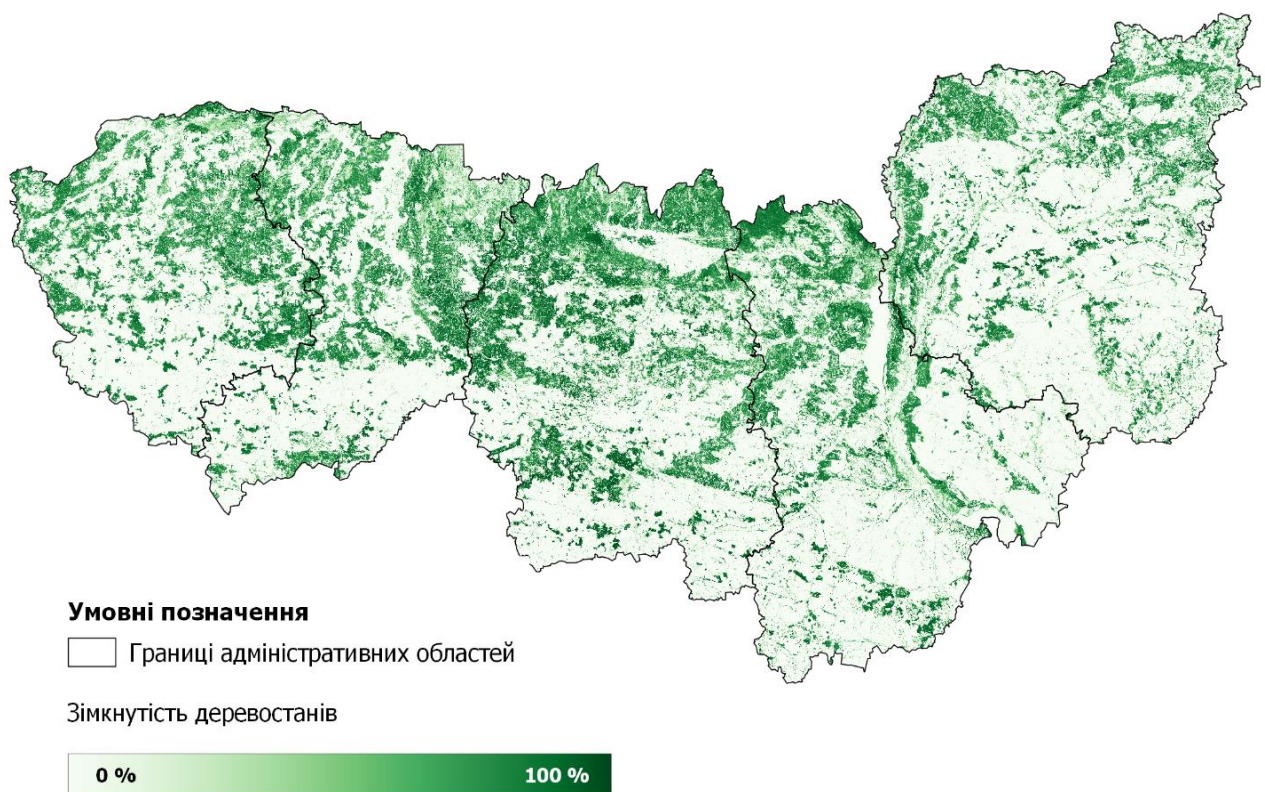


Рисунок 2.15 – Зімкнутість деревостанів території Полісся України
відповідно до даних глобальної карти GFC за 2015 рік

2.4 Вертикальна структура лісових насаджень

Параметризація алгоритмів моделювання лісових пожеж залежить від даних про запаси горючих матеріалів у кронах дерев та показників вертикальної структури вкритих лісовою рослинністю ділянок. Серед них виділяють дві характеристики намету: 1) середня висота деревостанів; 2) середня висота від поверхні землі до початку крон дерев у наметі деревостанів. Остання характеристика має більше значення, оскільки бере участь в алгоритмі, який розраховує умови переходу низової лісової поверхні у верхову.

2.4.1 Висота намету деревостанів

Дані про запаси горючих матеріалів у кроні дерев, які формують деревний намет насадження, необхідні для достовірного прогнозування поведінки верхових лісових пожеж. Утім, показники вертикальної структури лісових насаджень залишаються недостатньо охарактеризовані в Україні. Найповнішу інформацію про висоту деревостанів містить атрибутивна база даних лісового фонду ВО «Укрдержліспроєкт», яка складена переважно для лісів, підпорядкованих Державному агентству лісових ресурсів України. При цьому значна площа де-факто вкритих лісовою рослинністю ділянок, які ідентифікують за супутниковими знімками і не включені до зазначеної бази даних, не мають такої інформації. Іншими двома важливими показниками, що використовуються в алгоритмах моделювання лісових пожеж, виступає базова висота намету деревостанів (canopy base height) та щільність запасів горючих матеріалів у кроні дерев (canopy bulk density), оскільки визначають умови переходу низової пожежі у верхову. Дані про цей показник взагалі не фіксують в наявних атрибутивних базах даних.

За таких обставин єдиним доцільним способом охарактеризувати вертикальну структуру лісових насаджень залишаються окремі глобальні

продукти. Серед доступних нині покриттів із інформацією про висоту деревостанів є карта, розроблена на основі супутникового лазерного сканування системою GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) [43]. Показники оцінювання висоти деревостанів GLAS RH100 достатньо наближені, оскільки представлені за просторового розрізнення 1×1 км. Усе ж, після перетворення карти до просторового розрізнення 90 м і врахування фактичних типів земного покриття за розробленою на основі супутникових знімків Landsat 8 OLI картою, її можна використати для попередніх досліджень умов виникнення та розвитку верхових лісових пожеж (рис. 2.16).

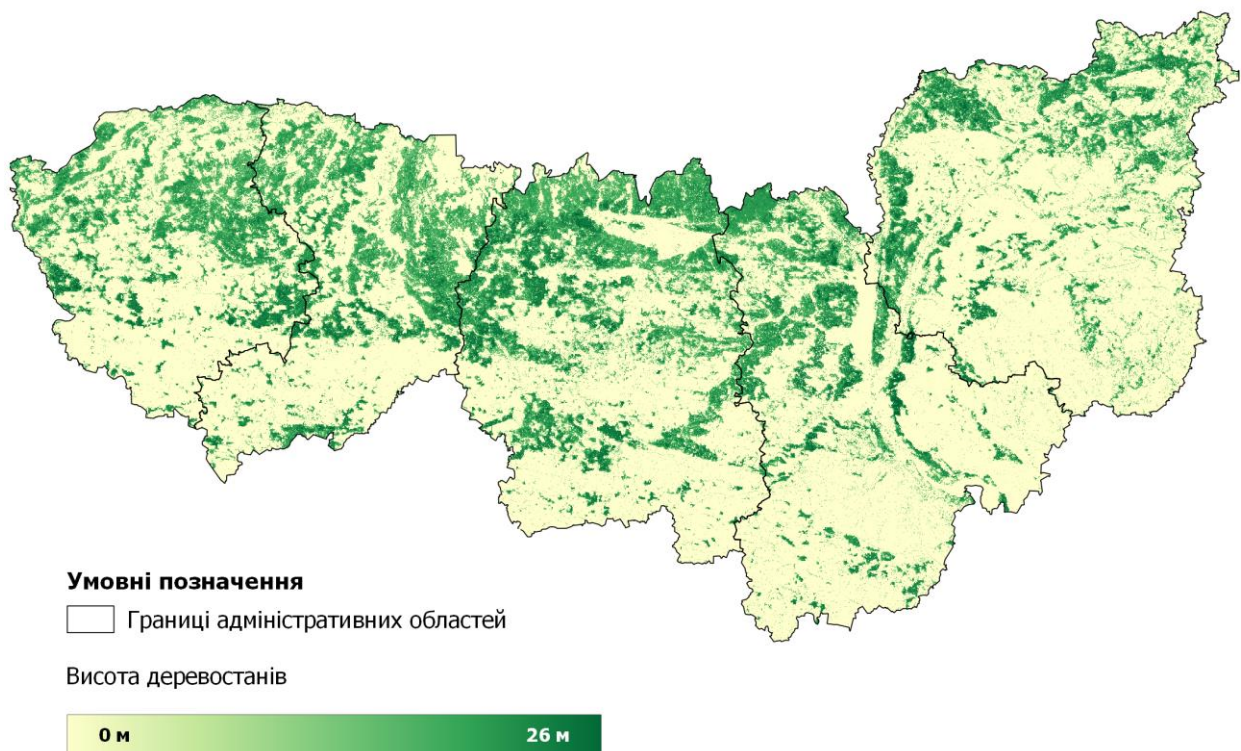


Рисунок 2.16 – Висота деревостанів території Полісся України відповідно до даних глобального покриття GLAS RH100 за 2005 рік

Гармонізацію картографічних матеріалів з метою одержання растрового покриття території досліджень із висотою деревостанів виконано таким чином, щоб зберегти показники оцінювання висоти тільки для тих пікселів, які на карті земельного покриття віднесені до вкритих лісовою рослинністю ділянок або

чагарників. Решті типам земного покриву приписано значення 0 м. Загалом висота деревостанів згідно з глобальною картою GLAS RH100 коливається в діапазоні від 0 до 26 м. Враховуючи просторове розрізнення 90 м, за якого виконуватимуть моделювання природних пожеж оцінювання максимальної висоти треба визнати достатньо реалістичними.

2.4.2 Базова висота намету деревостанів

Значення висоти від земної поверхні до початку крони під час виробничої таксації лісу в Україні не оцінюють. Проте цей показник є важливим критерієм для прогнозування умов переходу низових пожеж у верхові, або переходу пожеж у відкритих ландшафтах на лісові. За відсутності достовірних наземних даних для створення растру базової висоти використано наявні безхмарні мозаїки супутникових знімків Landsat 8 OLI, оцінки цього показника для лісових насаджень Чорнобильської зони відчуження за алгоритмами Лісової Служби США [1] та методи машинного навчання, зокрема алгоритм Random Forest [4]. Моделювання виконувалося на базі платформи GEE API, а як набір предикативних змінних використано такі показники:

1) канали ортогонального перетворення супутникових знімків типу «Tasseled Cap Transformation» (яскравість, вологість, зеленість) для літньої та осінньої сезонної мозаїк;

2) 1-й, 3-й квартилі та медіану значень нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI для сезонної мозаїки періоду квітень–жовтень;

3) значення зімкнутості, висоти (див. рис. 2.15–2.16) та код групи деревних порід (1 – хвойні, 2 – листяні, 3 – мішані), одержані із описаних раніше тематичних карт.

Алгоритм Random Forest використано в режимі регресії за базових налаштувань (кількість дерев рішень $n_{tree} = 500$, кількість показників для прийняття рішень $m_{try} = \sqrt{p}$). Прогнозування значень базової висоти намету деревостанів виконувалося в границях лісової маски, тобто на основі

розробленої карти земного покриву для тематичного класу 8 – вкриті лісовою рослинністю ділянки (2.10–2.14). Після цього попиксельні оцінки досліджуваного показника були агреговані до просторового розрізнення 90 м, використовуючи інтерполяцію за методом найближчого сусіда. Згідно з виконаним моделюванням базова висота лісових насаджень коливається в діапазоні від 0 до 13 м (рис. 2.17).

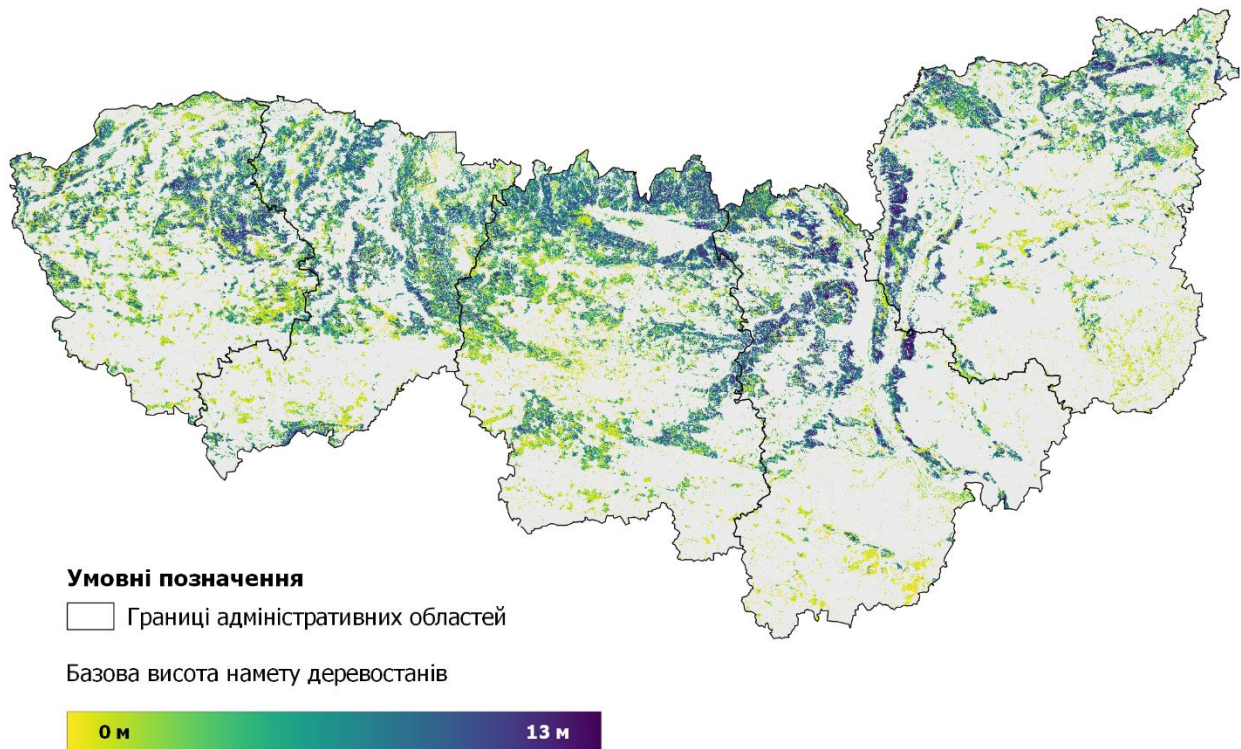


Рисунок 2.17 – Базова висота намету деревостанів території Полісся України, одержана на основі даних ДЗЗ

2.4.3 Щільність запасу горючих матеріалів у наметі деревостанів

Оцінювання запасів горючих матеріалів необхідно для ефективного моделювання розвитку верхових пожеж. Залежно від щільності запасів горючих матеріалів можуть виникати пасивні (torching) або активні (crowning) верхові пожежі. Для моделювання просторового розподілу горючих матеріалів у наметі деревостанів використано аналогічний до прогнозування базової висоти підхід. Навчальну вибірку сформовано на підставі результатів оцінювання щільності

запас горючих матеріалів для лісових насаджень Чорнобильської зони відчуження за алгоритмами Лісової Служби США. Попіксельні оцінки зазначеного показника для території досліджень за алгоритмом Random Forest наведено на рис. 2.18. Відповідно до них середня щільність запасу горючих матеріалів у кроні деревостанів на території Полісся України (за просторового розрізнення 90 м) може досягати $0,135 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

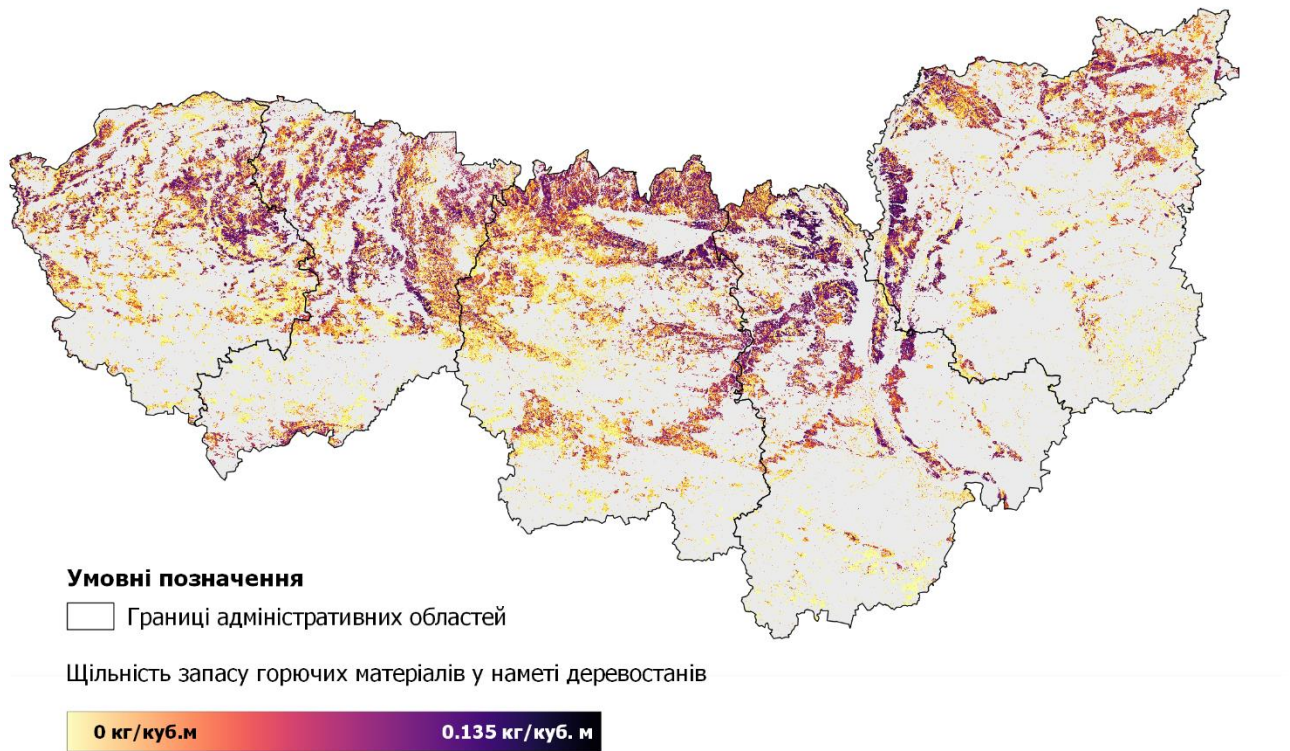


Рисунок 2.18 – Щільність запасу горючих матеріалів у наметі деревостанів території Полісся України, одержана на основі даних ДЗЗ

Оцінюючи можливості реалізації методики прогнозування ризиків пожеж у природних ландшафтах Полісся України, варто наголосити на найбільш слабких її сторонах. Насамперед зазначене стосується відсутності в Україні суцільного покриття території просторовими шарами з необхідними біофізичними показниками ландшафтів. Незважаючи, що розроблені методи картографування земельного покриву за даними супутниковими знімками загалом вирішують проблему його відображення на картах, детальні показники ландшафтів залишаються невизначеними. Найскладнішою виявляється задача

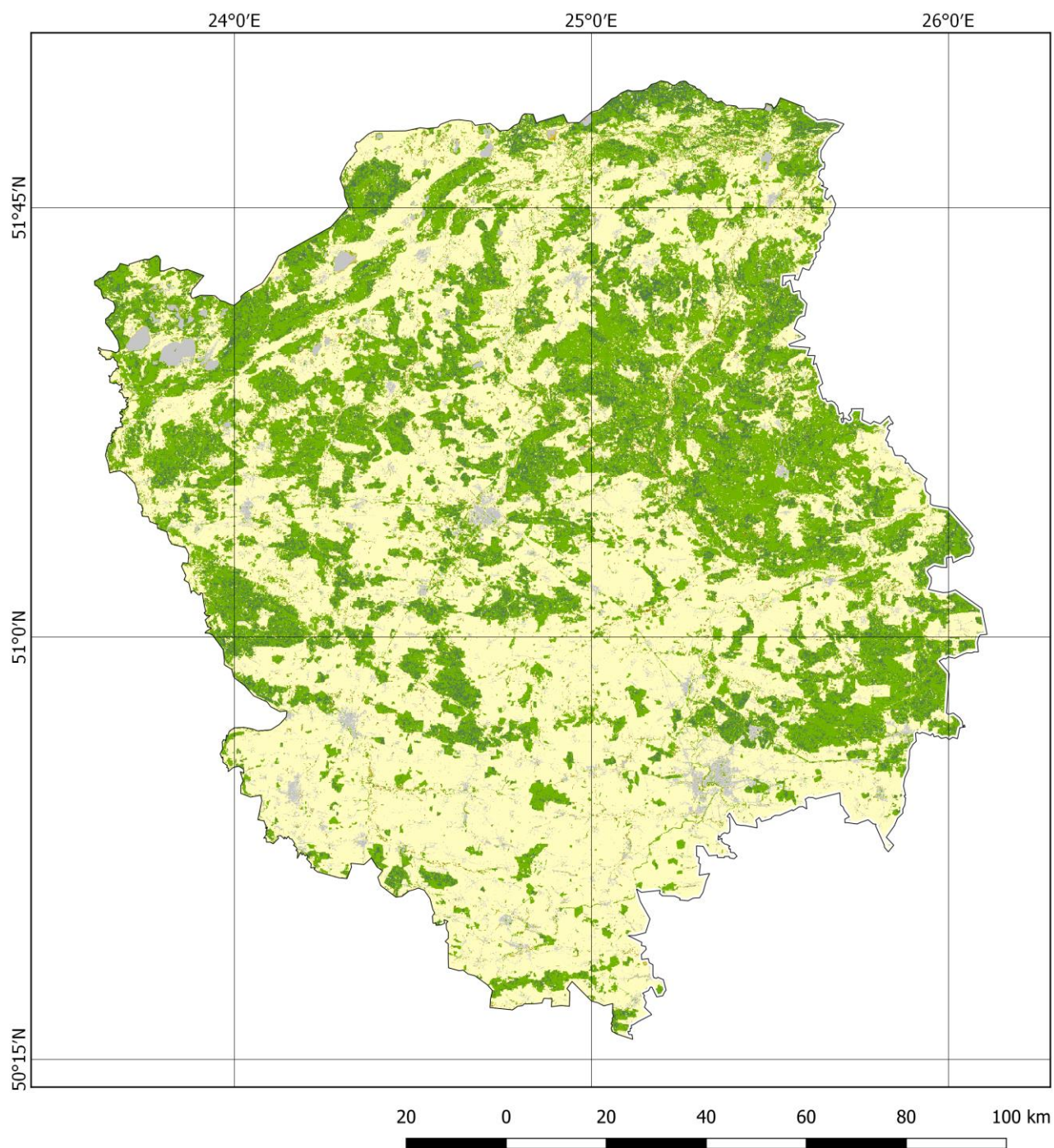
оцінювання запасів горючих матеріалів у наметі деревостанів, адже для створення карти висот необхідно залучати недоступні досі в Україні дані лазерного сканування лісів. Прогнозування щільності запасів в наметі можливе також завдяки ширшому застосуванню матеріалів активного дистанційного зондування, зокрема радарної зйомки. Порушені проблеми створюють певний орієнтир досліджень на майбутнє, а використані в проєкті підходи оцінювання запасів горючих матеріалів у наметі деревостанів є орієнтовними, проте дозволяють виконувати моделювання пожеж за просторового розрізнення 90 м (3×3 пікселя знімків Landsat).

2.5 Обґрунтування моделей горючих матеріалів для характеристики показників горимості ландшафтів

З метою перетворення карти земного покриття в растрове покриття моделями горючих матеріалів [41] застосовано обґрунтовану раніше схему класифікації (табл. 2.21), яку застосовано для перекодування карт землекористування в карти моделей горючих матеріалів (рис. 2.19–2.23).

Таблиця 2.21 – Відповідність між типами земного покриття та моделями горючих матеріалів

Код класу	Характеристика класу	Номер моделі горючих матеріалів	Код моделі горючих матеріалів	Тип моделі горючих матеріалів
1	Водойми	98	NB8	Негорючі території
2	Водно-болотні угіддя	121	GS1	Трав'янисто-чагарникова рослинність
3	Населені пункти	91	NB1	Негорючі території
4	Інші непродуктивні землі	99	NB9	Негорючі території
5	С.-г. угіддя	101	GR1	Трав'яниста рослинність
6	Травостої	102	GR2	Трав'яниста рослинність
7	Чагарники	142	SH2	Чагарникова рослинність
100	Хвойний ліс	188	TL8	Деревний опад
200	Листяний ліс	182	TL2	Деревний опад
300	Мішаний ліс	161	TU1	Піднаметова рослинність



Група моделей горючих матеріалів:

- Негорючі території
- Трав'яниста рослинність
- Трав'янисто-чагарникова рослинність
- Чагарникова рослинність
- Піднаметова рослинність
- Деревний опад

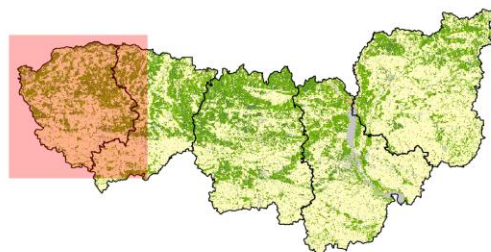
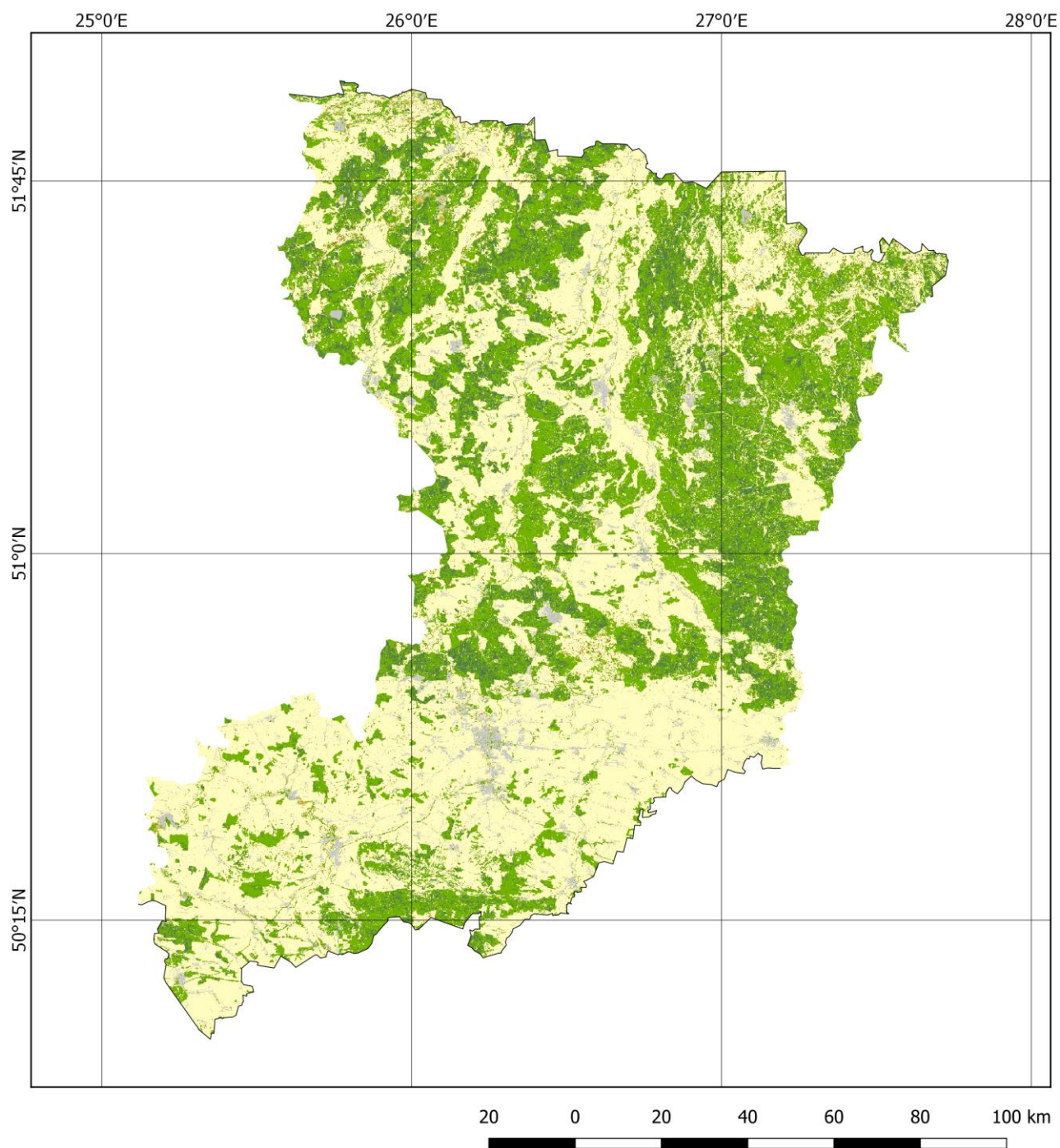


Рисунок 2.19 – Типи горючих матеріалів (групи моделей) на території Волинської області



Група моделей горючих матеріалів:

-  Негорючі території
-  Трав'яниста рослинність
-  Трав'янисто-чагарникова рослинність
-  Чагарникова рослинність
-  Піднаметова рослинність
-  Деревний опад

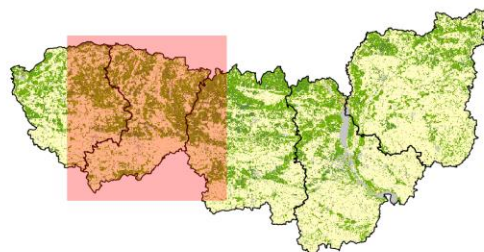
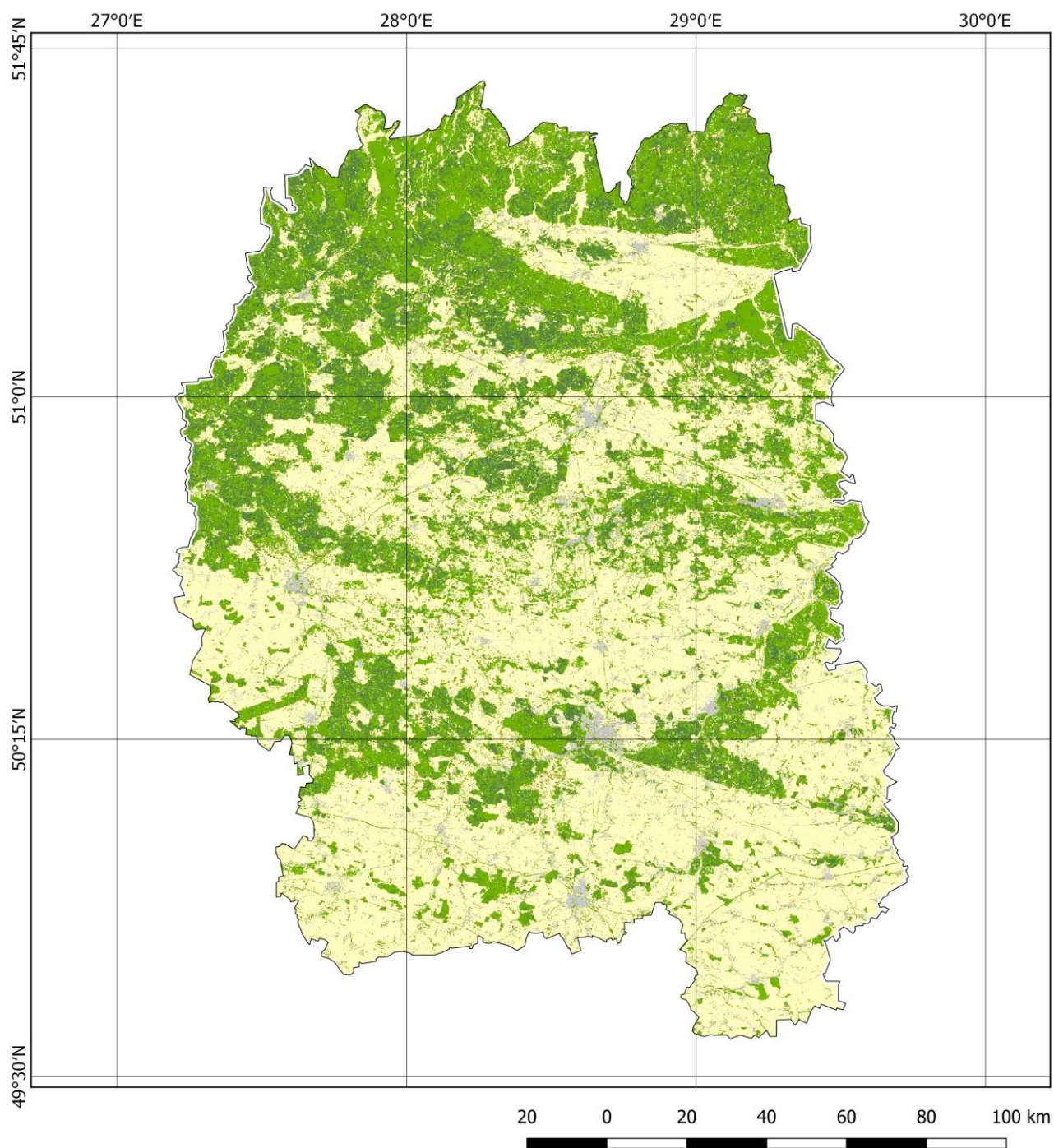


Рисунок 2.20 – Типи горючих матеріалів (групи моделей) на території Рівненської області



Група моделей горючих матеріалів:

- Негорючі території
- Трав'яниста рослинність
- Трав'янисто-чагарникова рослинність
- Чагарникова рослинність
- Піднаметова рослинність
- Деревний опад

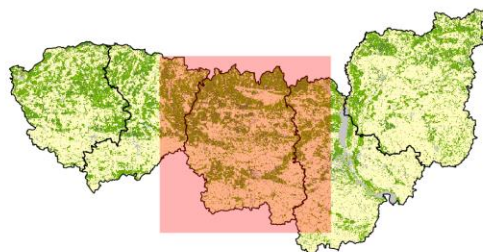
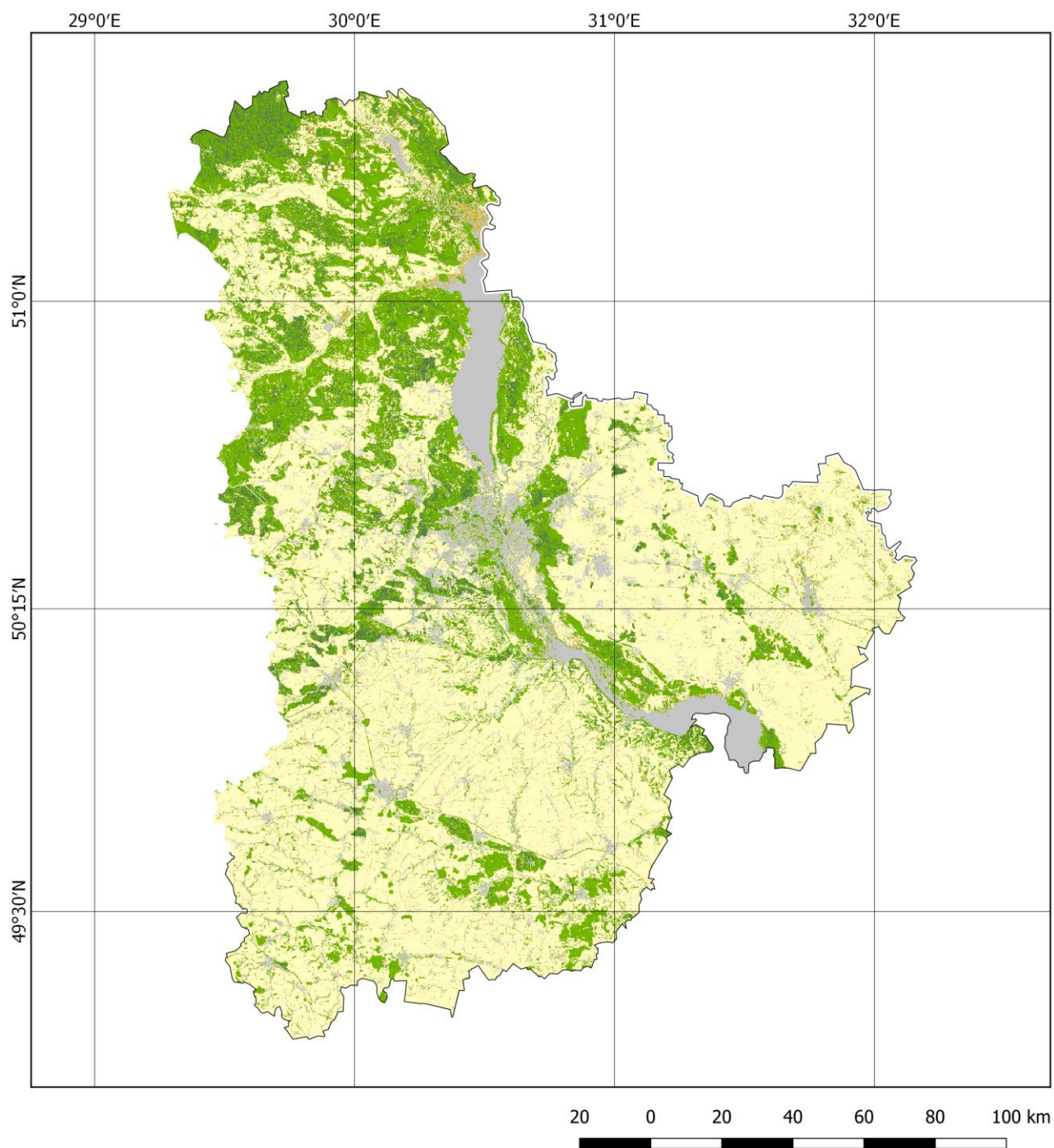


Рисунок 2.21 – Типи горючих матеріалів (групи моделей) на території Житомирської області



Група моделей горючих матеріалів:

- Негорючі території
- Трав'яниста рослинність
- Трав'янисто-чагарникова рослинність
- Чагарникова рослинність
- Піднаметова рослинність
- Деревний опад

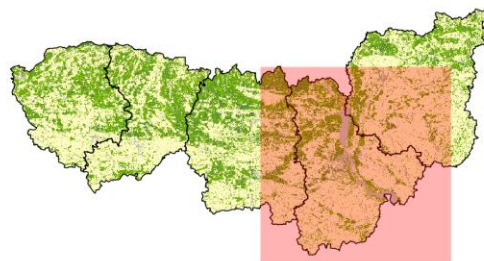
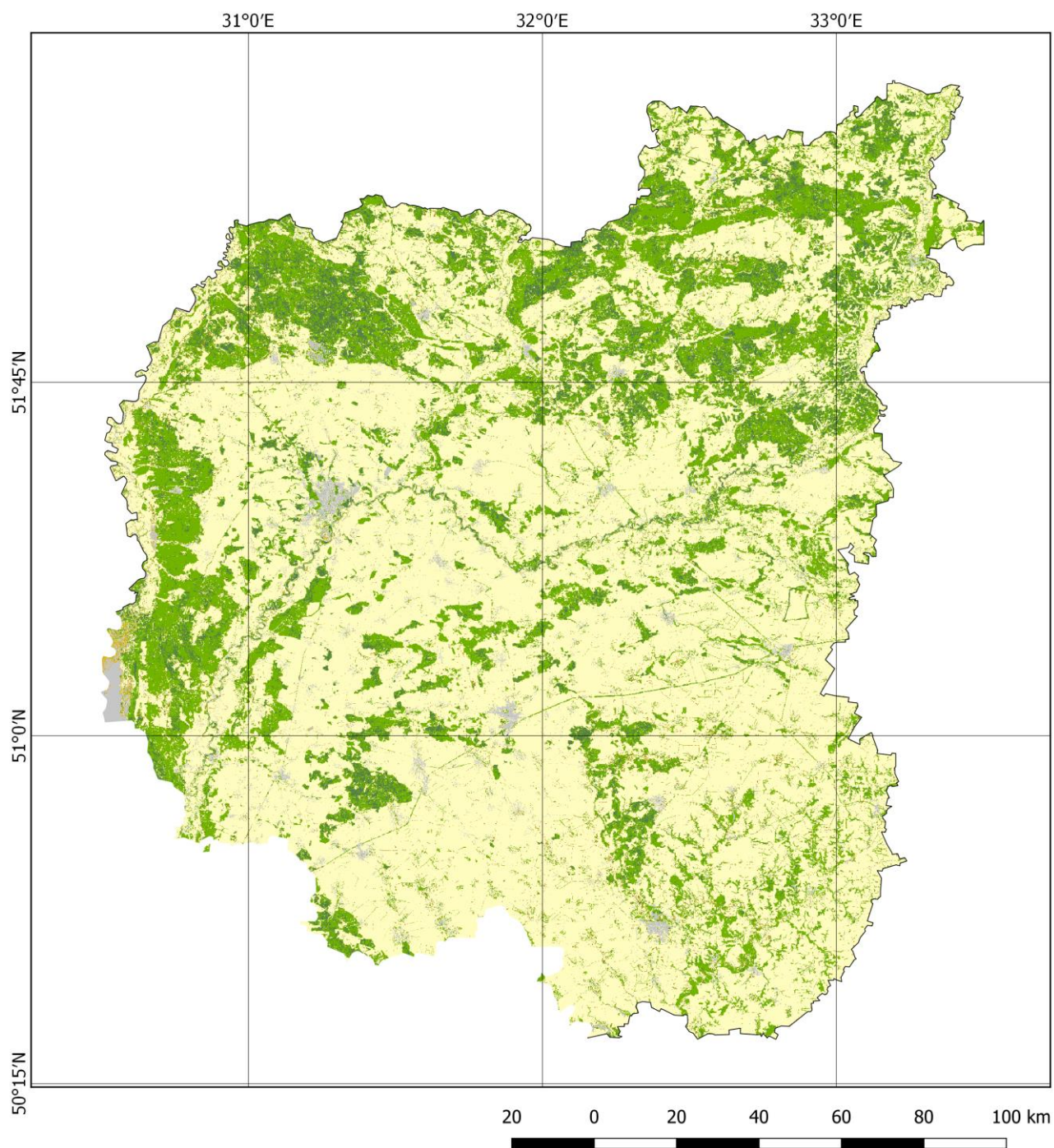


Рисунок 2.22 – Типи горючих матеріалів (групи моделей) на території Київської області



Група моделей горючих матеріалів:

- Негорючі території
- Трав'яниста рослинність
- Трав'янисто-чагарникова рослинність
- Чагарникова рослинність
- Піднаметова рослинність
- Деревний опад

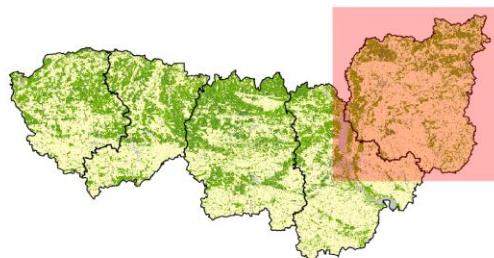


Рисунок 2.23 – Типи горючих матеріалів на території Чернігівської області

З ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОПОРТАЛУ

Виклик домашньої сторінки геоportалу «Ландшафтні пожежі» здійснюють введенням у адресній строчці будь-якого веббраузера адреси <http://landscapefires.org.ua>. Нижче наведено рисунок вигляду домашньої сторінки геоportалу у браузері Firefox.

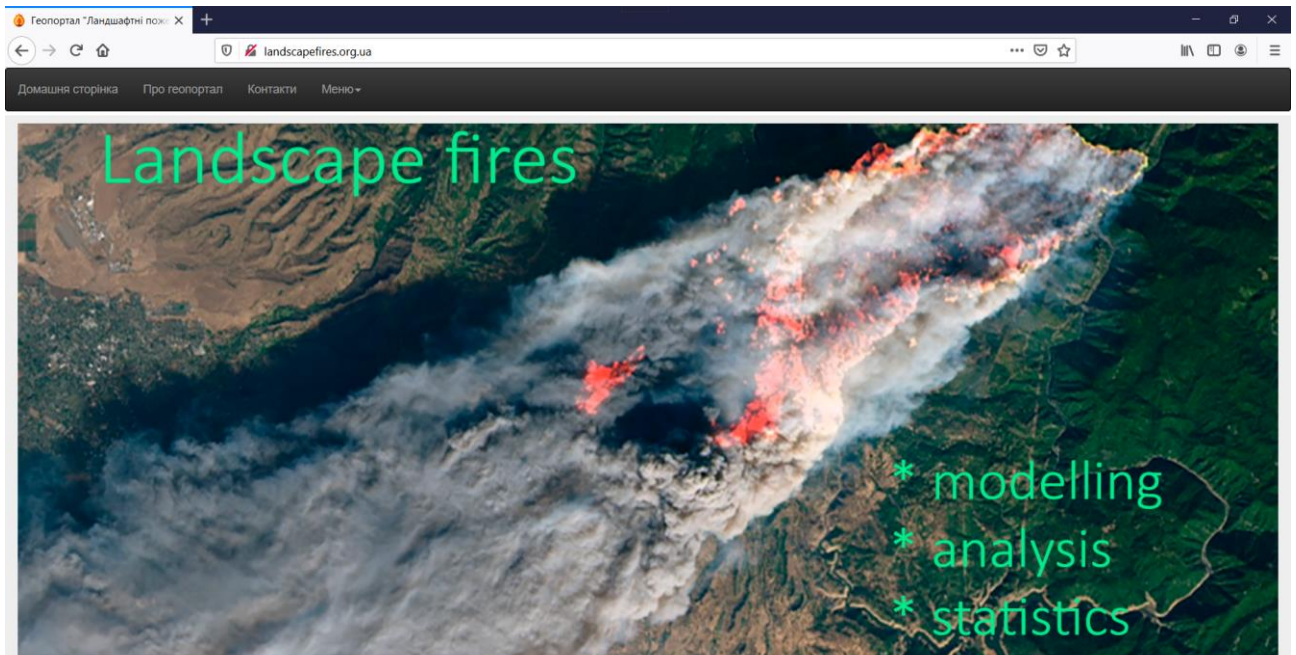


Рисунок 3.1 – Домашня сторінка геоportалу «Ландшафтні пожежі»

Доменне ім'я landscapefires.org.ua асоційовано з певною IP-адресою, яка може бути змінена у разі необхідності (наприклад, під час зміни фірми, яка надає послуги віртуального хостингу). Програмні компоненти, які формують зміст геоportалу за зверненнями користувачів розміщено на платному віртуальному виділеному сервері (VPS – virtual private server). Використання платного VPS надає наступні переваги щодо користування власним комп'ютером:

1. Безперервність доступу до геоportалу.
2. Виключення витрат на технічне обслуговування, адміністрування та резервне копіювання даних.

3. Можливість підвищення потужності серверу у напрямках збільшення кількості задіяних процесорів, обсягу оперативної пам'яті та дискового простору.

3.1 Програмні компоненти VPS

Для розгортання геопорталу «Ландшафтні пожежі» було вибрано віртуальний сервер із операційною системою Ubuntu 16.04 з наперед установленим інтерпретатором Python 2.7.

Додатково було встановлено і в деяких випадках компільовано:

1. Інтерпретатор мови програмування Python за посиланням <https://www.python.org/ftp/python/3.6.0/Python-3.6.0.tgz>.
2. HTTP-сервер Apache версії 2.4.18 <https://svn.apache.org/viewvc/httpd/httpd/branches/2.4.x/>).
3. `mod_wsgi` – модуль для вебсервера Apache, який надає WSGI-сумісний інтерфейс для роботи з web-додатками, написаними на мові програмування Python (https://github.com/GrahamDumpleton/mod_wsgi/releases/tag/4.5.15).
4. Postgresql 9.6 – об'єктно-реляційна безкоштовна система управління базами даних (СУБД), яка посідає 4 місце у рейтингу найбільш популярних СУБД (<http://apt.postgresql.org/pub/repos/apt/>).
5. QGIS сервер 2.18 – серверний додаток для публікації в мережі Internet проектів, створених в QGIS Desktop, через сервіси, сумісні з OGC-стандартами (WMS, WFS) <http://qgis.org/debian/>.

Загалом архітектура програмних компонентів на віртуальному сервері виглядає як показано на рис. 3.2. Користувач (віддалений клієнт) геопорталу шляхом взаємодії з його вебсторінками надсилає запити до вебсерверу. Вебсервер перенаправляє запити або до qgis-серверу, або через компоненти Python до бази даних Postgresql. У відповідь формуються дані у різних форматах, які складають зміст вебсторінок. Qgis-сервер реагує на запити

шляхом формування картографічного зображення у певному діапазоні координат та певному масштабі. При цьому вихідні картографічні шари фізично можуть міститись як у вигляді файлів певних GIS-форматів так і у базі даних PostgreSQL.

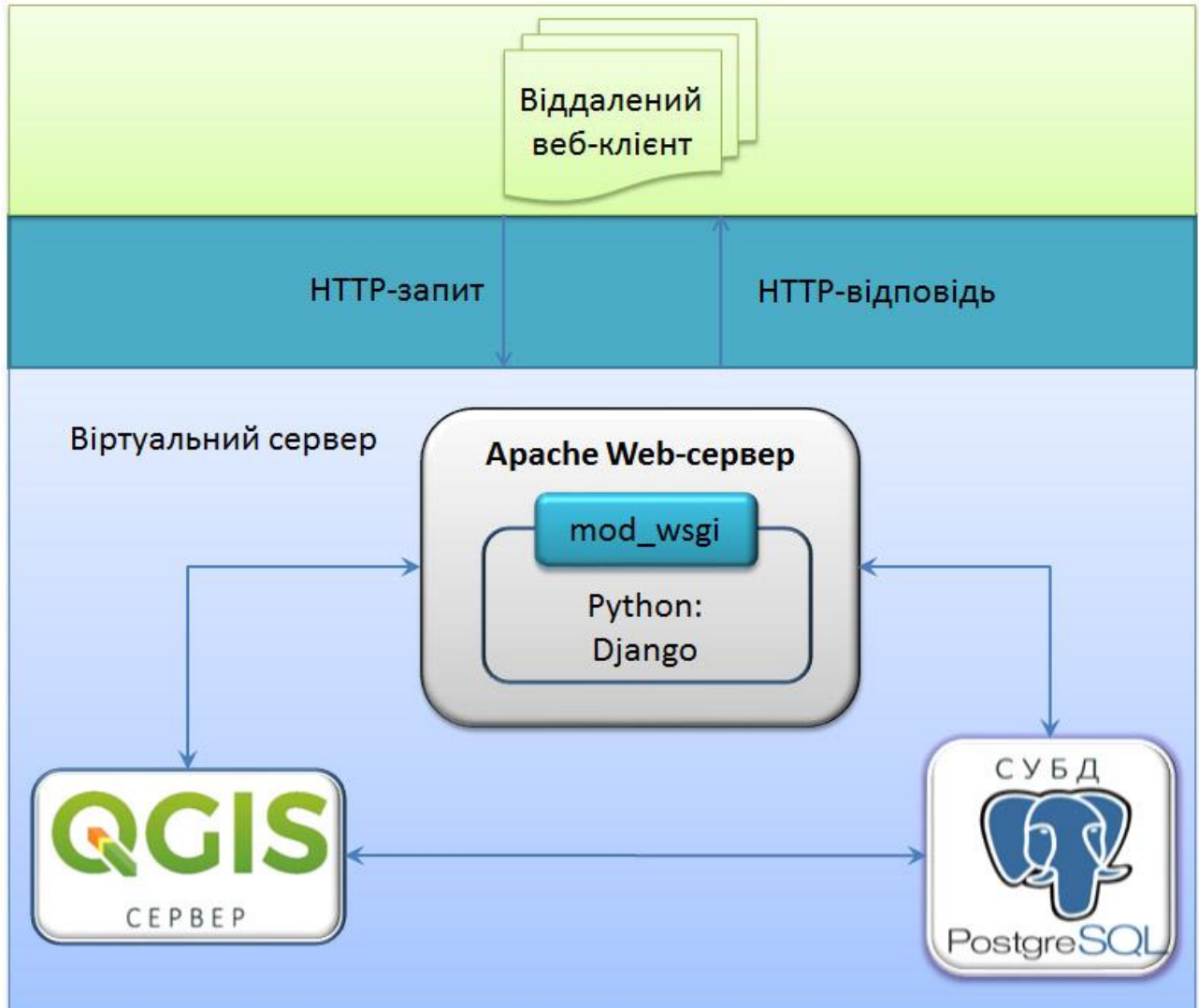


Рисунок 3.2 – Архітектура програмних компонентів на віртуальному сервері

3.2 Модулі розширення на мові Python

Значну частину функцій геопорталу реалізовано на стороні серверу шляхом використання функцій модулів розширення (site packages), а саме: Django, NumPy та інших (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Характеристика розширень Python

№ з/п.	Назва модуля	Призначення	Розробник	Ліцензія
1	Django	Високорівневий відкритий Python-фреймворк для розробки веб-додатків	Django Software Foundation	3-clause BSD
2	NumPy	Розширення Python, що додає підтримку великих багатовимірних масивів і матриць, разом із великою бібліотекою високорівневих математичних функцій для операцій з цими масивами	Проект спільноти	BSD
3	SciPy	Розширення Python для виконання чисельного інтегрування, інтерполяції, оптимізації, лінійної алгебри та статистики	Проект спільноти	BSD
4	netCDF4	Розширення Python для доступу до даних у форматі NetCDF 4 і NetCDF 3	Джеффри Уитакер	
5	GDAL, OGR, OSR	Розширення Python для читання і запису растрових і векторних геопросторових форматів даних	Open Source Geospatial Foundation	MIT

3.2.1 Каркас веб-застосунків Django

Django характеризується як відкритий вебфреймворк на основі мови Python, який відповідає архітектурній схемі модель–шаблон–вид (MTV). Після інсталяції цього модуля маємо:

- систему автентифікації;
- маршрутизацію URL-адрес;
- механізм роботи з шаблонами;
- систему формування змісту вебсторінок через види (view);
- об'єктно-реляційний відображувач (ORM).

Наведемо приклад роботи деяких із перелічених особливостей.

Припустимо, що з вебсторінки користувача сформовано запит на формування списку років, які присутні у таблиці бази даних, яка містить у собі дані про минулі пожежі. З використанням технології AJAX запит на javascript буде виглядати:

```
function DownloadBurnedYears(){
    param_list = {}

    $.ajax({
        type: "GET",
        url: '/backendemo/burned_areas_years',
        data: param_list,
        dataType: "html",
        cache: false,
        success: function (data) {
            fill_years(data)
        }
    })
}
```

URL-адресу, що вказана у запиті `/backendemo/burned_areas_years`, відшуковують у файлі `urls.py` серед можливих посилань, які задано регулярними виразами:

```
urlpatterns = [
    url(r'^topomaps/$', views.topomaps, name='topomaps', ),
    url(r'^burned_areas_years/$', views.get_burned_areas_years,
name='burned_areas_years', ),
    url(r'^burned_areas/$', views.get_burned_areas, name='burned_areas', ),
]
```

За вказаним посиланням виконують функцію `views.get_burned_years`, яка повертає список років у форматі `json`:

```
def get_burned_areas_years(request):
    try:
        plist = []
        qr = 'select year from myfire.tb_burned_area group by year order by year desc'
        tab_vals = get_tab_vals(qr, plist)
        res = json.dumps(tab_vals)
        return HttpResponse(res, content_type='text/html')
    except Exception as e:
        return HttpResponse('Burned area years page is wrong',
content_type='text/html')
```

Так само список років потрапляє у `html` тег з ідентифікатором `burned_area_list_div` за допомогою функції `javascript fill_years(data)`:

```
function fill_years(data)
{
    var n = $("#burned_area_list_div ul").size();
    if (n > 0){
        return
    }

    dd = $.parseJSON(data);
    $("#burned_area_list_div").empty();

    ht = '<ul id="year_list">'
    for (var i=0; i< dd.length; i++)
    {
        var yr = dd[i][0];
        var yrKey = "" + yr;
        ht += '<li class="folder" id="' + yrKey + '>' + yr
```



```

    ht += '<ul>'
    for (var j=0; j< 12; j++){
        var monthKey = yrKey + "." + (j + 1)
        var chMonthKey = 'i' + monthKey
        ht += '<li class="lazy folder" id="' + monthKey + '">' + mm_ua[j]
    }
    ht += '</ul>'
}
ht += '</ul>'

$("#burned_area_list_div").html(ht)
}

```

У результаті заповнюється верхній рівень гілок дерева, у яке потрапляє список пожеж на вебсторінці (рис. 3.3).

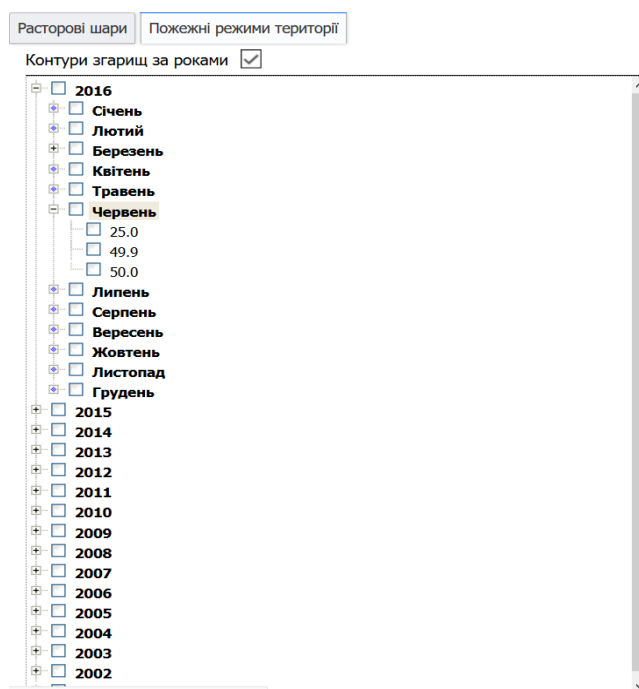


Рисунок 3.3 – Дерево згарищ за роками і місяцями

3.2.2 Розширення Python NumPy, SciPy, netCDF4, GDAL, OGR, OSR

Розширення Python NumPy, SciPy, netCDF4 використовують для згущення сітки та візуалізації полів метеорологічних показників. Припустимо, нам потрібно вивести приземну температуру з файлу чисельного прогнозу погоди на 12 годину 3 грудня 2019 р у вигляді сітки з розміром комірки 500 м з використанням інтерполяції методом кубічного сплайну. Для цього викликаємо метод MakeSourceData з параметрами TH, 12, 500, cubic.

```

from netCDF4 import Dataset
import numpy as np
from scipy.interpolate import griddata

self.cdfDs = Dataset(file_name, 'r')

def MakeSourceData(self, indicator, timeindex, cellsize, method_name):
    nxny = self.nx * self.ny
    xx, yy = np.meshgrid(np.arange(self.nx) * self.dx + self.x0,
np.arange(self.ny) * self.dy + self.y0)

    sxx = np.zeros((nxny))
    syy = np.zeros((nxny))
    szz = np.zeros((nxny))
    me = meteo_engine.MeteoEngine()

    counter = 0;
    for i1 in range(self.ny):
        for i2 in range(self.nx):
            indVal = float(self.cdfDs.variables[indicator][timeindex, i1, i2])
            x, y = xx[i1][i2], yy[i1][i2]
            sxx[counter] = x
            syy[counter] = y
            szz[counter] = indVal
            counter += 1;
    width, height = self.nx * self.dx, self.ny * self.dy
    dnx = int(round(width / cellsize))
    dny = int(round(height / cellsize))
    dxx, dyy = np.meshgrid(np.arange(dnx) * cellsize + self.x0, np.arange(dny) *
cellsize + self.y0)
    dzz = griddata((sxx, syy), szz, (dxx, dyy), method=method_name) # possible
method cubic, linear, near
    self.cellsize = cellsize
    self.ncols = dnx
    self.nrows = dny
    return dzz

```

Цей метод використовує об'єкт `cdfDs`, який містить у собі структуровані дані метеопрогнозу, отримані за допомогою функцій розширення `netcdf4`. Спочатку формуємо вихідну сітку з даними температури. Далі, використовуючи можливості розширення `NumPy`, формуємо матрицю з кроком 500 м (метод `meshgrid`). Після цього, викликаємо метод `griddata` з розширення `SciPy`, який і виконує інтерполяцію даних температури з початкової сітки. У підсумку отримуємо сітку, яка відображається у вигляді карти температур (рис. 3.4).

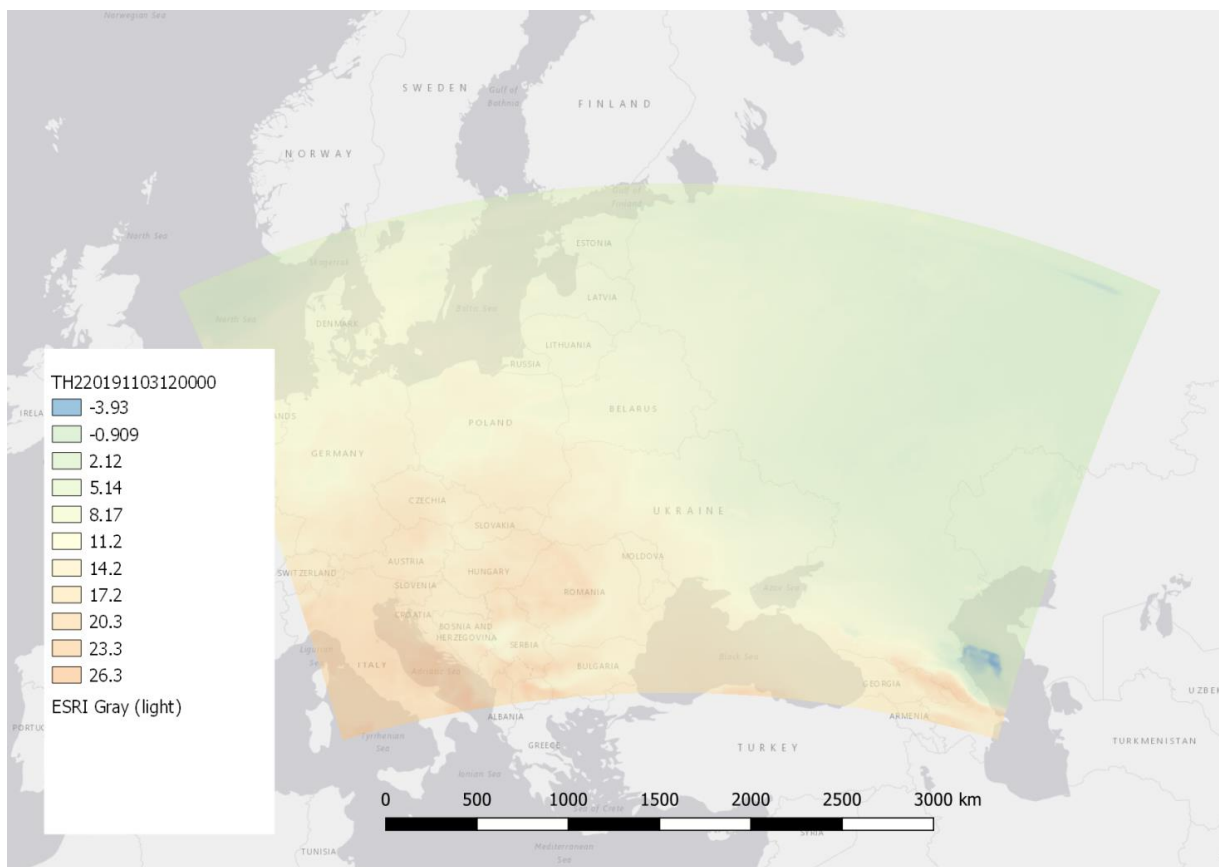


Рисунок 3.4 – Сітка температур на 12 год. 00 хв. 3 грудня 2019 р.

Далі за допомогою функцій розширень GDAL, OGR, OSR виконують функцію Polygonize щодо формування полігонів із однаковими температурами.

```
import gdal
import osr
import ogr

def Polygonize(self, rasterTemp, outShp):
    sourceRaster = gdal.Open(rasterTemp)
    band = sourceRaster.GetRasterBand(1)
    driver = ogr.GetDriverByName("ESRI Shapefile")
    # If shapefile already exist, delete it
    if os.path.exists(outShp):
        driver.DeleteDataSource(outShp)
    outDatasource = driver.CreateDataSource(outShp)
    # get proj from raster
    srs = osr.SpatialReference()
    srs.ImportFromWkt(sourceRaster.GetProjectionRef())
    # create layer with proj
    outLayer = outDatasource.CreateLayer(outShp, srs)
    # Add class column (1,2...) to shapefile
    newField = ogr.FieldDefn('DN', ogr.OFTInteger)
    outLayer.CreateField(newField)
    gdal.Polygonize(band, None, outLayer, 0, [], callback=None)
```

У результаті виконання цього методу отримуємо shape-файл, який відображається за стандартною легендою (рис. 3.5).

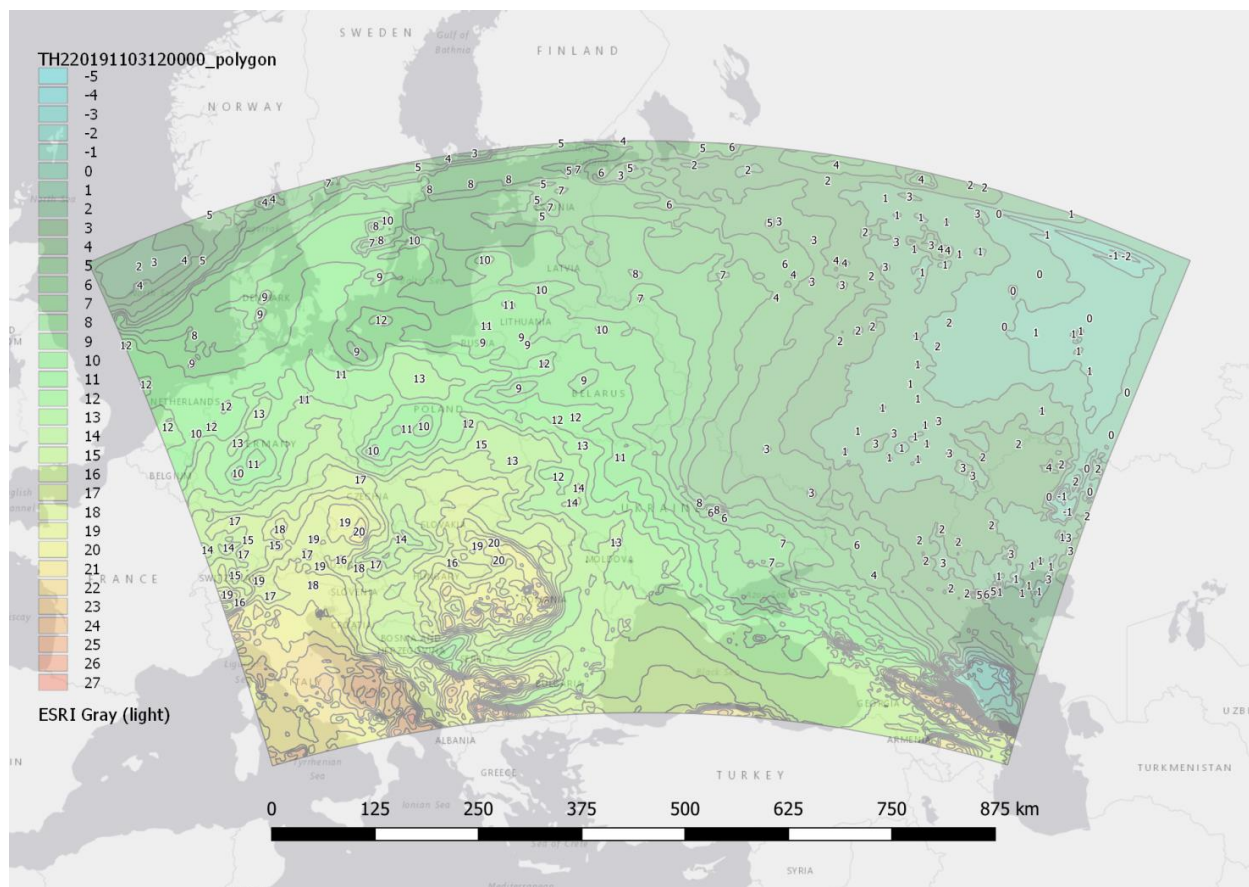


Рисунок 3.5 – Кара полігонів температур на 12 год. 00 хв. 3 грудня 2019 р.

3.3 Реалізація QGIS серверу

На віртуальному сервері було розгорнуто QGIS-сервер, який виступає постачальником даних за протоколом WMS (web-map-service), Цей протокол слугує для видачі географічно прив'язаних зображень через інтернет. Фактично географічні дані стають доступними завдяки публікації шарів проєкту QGIS через URL посилання у вигляді: http://landscapefires/cgi-bin/landscapefires/qgis_mapserv.fcgi.

Перевірку працездатності сервісу здійснюють за посиланням: http://31.131.24.133/cgi-bin/landscapefires/qgis_mapserv.fcgi?request=getcapabilities&service=WMS&version=1.3.0

Фактично це запит, результат якого показує можливості сервісу. Першу сторінку результату запиту показано на рисунку 3.6.

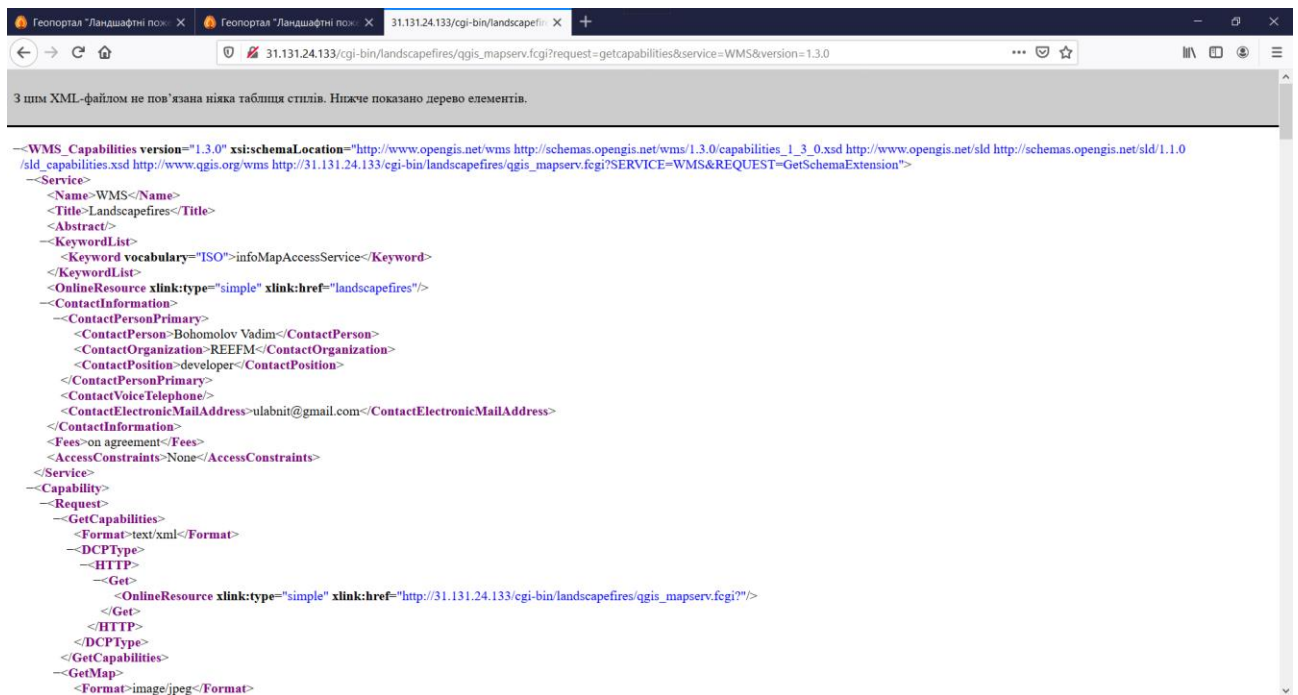


Рисунок 3.6 – Результат запиту getcapabilities до WMS QGIS серверу

Управління шарами і призначення стилів їх відображення здійснюють засобами додатку QGIS 2.18, який встановлено безпосередньо на віртуальному сервері (рис. 3.7).

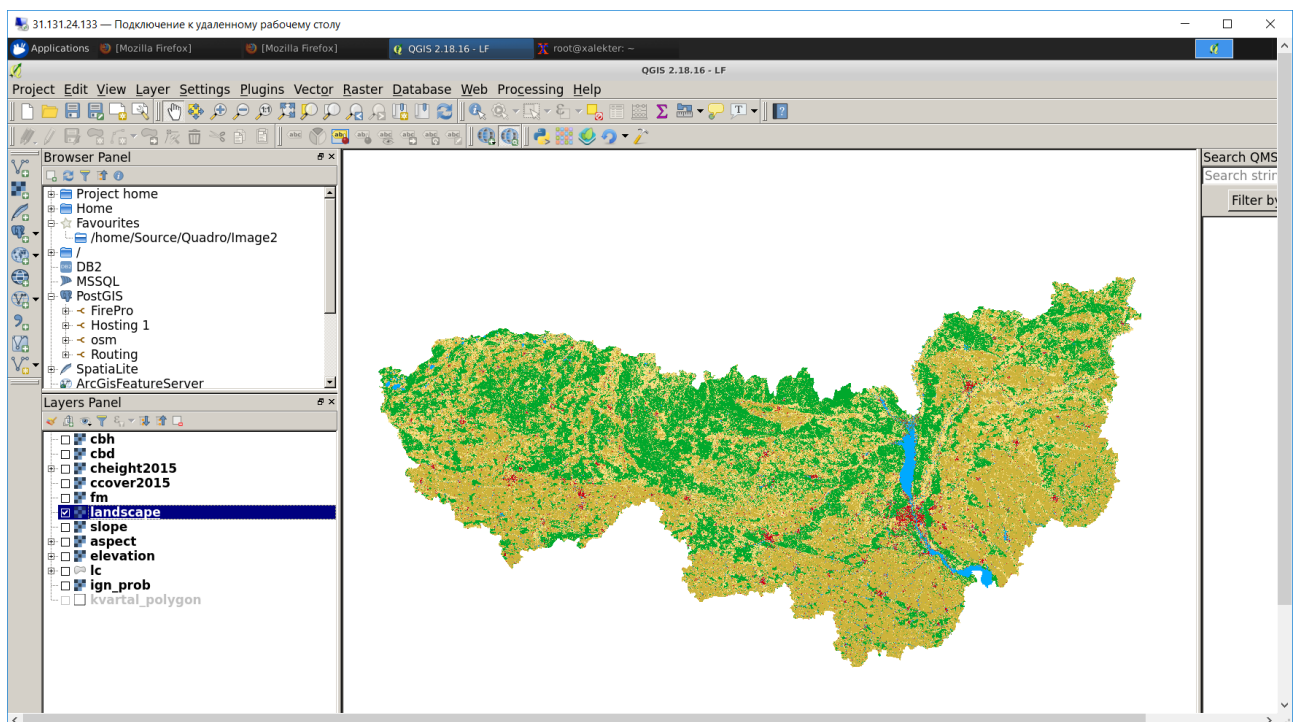


Рисунок 3.7 – Налаштування шарів у проекті QGIS як джерела сервісу WMS за допомогою віддаленого робочого столу.

Перелік шарів, що наведено у лівій нижній панелі ,можна вибирати за допомогою вебінтерфейсу, що реалізовано на відповідній сторінці геоportалу (рис. 3.8).

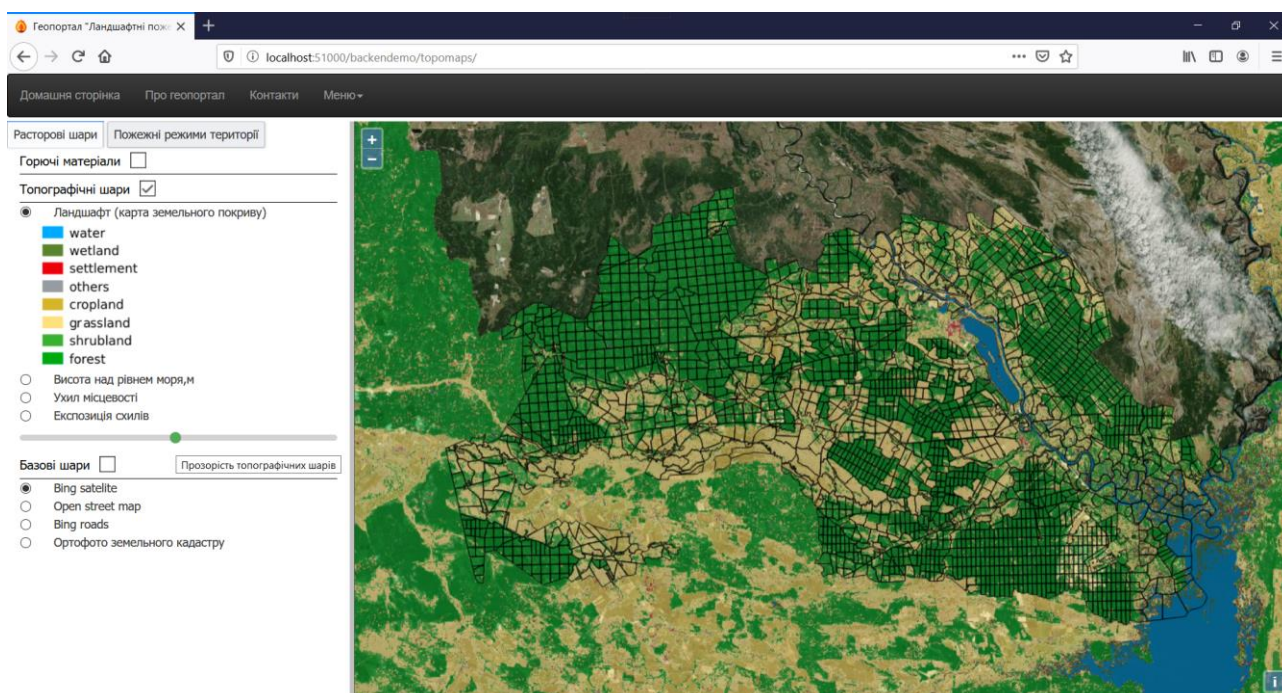


Рисунок 3.8 – Управління шарами на геоportалі (шар ландшафту на фоні знімків Bing Satellite)

ВИСНОВКИ

1. Підходи та методологія збору й аналізу параметрів горючих матеріалів суттєво відрізняються на вкритих лісом територіях та на відкритих ландшафтах. Останні можуть застосовуватися, як самостійно, для опису трав'яного покриву перелогів, луків та інших типів відкритих ландшафтів так і у комплексі для дослідження горючих матеріалів в лісі, зокрема для опису характеристик живого надґрунтового покриву та підліску.

2. Порівнявши найпоширеніші у світі методики для збору ЛГМ встановлено суттєві відмінності у підходах щодо збору дослідного матеріалу, його аналізу та застосування, які ґрунтуються на особливостях географічного розміщення, кліматичних показників та характеристики ландшафтів. Застосування методики збору ЛГМ за системою FIREMON з подальшим використанням системи прогнозування поведінки пожежі на основі параметрів ЛГМ, погоди і рельєфу BehavePlus дозволяє краще зрозуміти особливості формування природної пожежної небезпеки у соснових насадженнях Полісся України і можуть використовуватись для розробки моделей розвитку лісових пожеж.

3. Супутникові дані виступають єдиним доступним джерелом даних про просторові характеристики ландшафтів Полісся України, необхідні для прогнозування ризиків природних пожеж, оскільки забезпечують суцільне покриття території досліджень. У зв'язку з цим для створення інформаційної основи геопорталу з біофізичними показниками природних ландшафтів використано переважно матеріали дешифрування супутникових знімків Landsat, а також окремі глобальні продукти лісового покриву.

4. Розроблена схема класифікації території за типами землекористування узгоджується з альтернативною класифікацією на основі моделей горючих матеріалів Лісової Служби США, яка дозволяє виконати параметризацію алгоритмів виникнення та розвитку пожеж у природних ландшафтах території досліджень. Для цього в межах наукового проєкту

використано 10 різних моделей поведінки пожеж. Вони були обґрунтовані на основі аналізу бази даних запасів горючих матеріалів у природних ландшафтах Полісся України.

5. Виконано конфігурування геопорталу “Ландшафтні пожежі” на віртуальному сервері з доменним ім’ям landscapefires.org.ua та операційній системі Ubuntu 16.04.

6. Основні програмні компоненти геопорталу включають Python 3.6 Apache2, mod_wsgi, Qgis Server 2.18, Postgresql 9.6, а також модулі розширення Python Django, NumPy, SciPy, GDAL/OGR/OSR.

7. Основні можливості базової функціональності віртуального серверу продемонстровано на сторінці геопорталу landscapefires.org.ua вкладка «Меню» – «Топографія».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ager A. A. et al. The wildfire problem in areas contaminated by the Chernobyl disaster. Science of The Total Environment. Vol. 696. 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133954>.
2. Anderson H. E. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT. 1982. INT-122. 22p. Retrieved from: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr122.pdf (дата звернення: 25.05.2019).
3. Baig M. H. A., Zhang L., Shuai T., Tong Q. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance, Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 5, No. 5. P. 423–431. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434>.
4. Breiman L. Random forests. Machine Learning 2001. Vol. 45. Issue 1. P. 5–32. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
5. Brown J. K. Fuel and fire behavior prediction in big sagebrush: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 1982. 10 p. Retrieved from: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_rp290.pdf (дата звернення: 25.05.2019).
6. Brown J. K., Oberheu, R. D., Johnston, C. M. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station General Technical Report INT-129. Ogden. 1982. 48 p. Retrieved from: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_gtr129.pdf (дата звернення: 25.05.2019).
7. Brown J. K., Rick D. O., Cameron M. J. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. USDA Forest Service. 1982. Retrieved from: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/29401> (дата звернення: 7.04.2019).
8. Chrysafis I., Mallinis G., Gitas I. Tsakiri-Strati, M. Estimating Mediterranean forest parameters using multi seasonal Landsat 8 OLI imagery and an

ensemble learning method. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 199. P. 154–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.018>.

9. Congalton R. G., Green K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, Second Edition. 2008. CRC Press. 200 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420055139>.

10. Deeming I. E., Lancaster I. W., Fosberg M. A., Furman R. W., Schroeder M. *The National Fire-Danger Rating System* USDA Forest Service Research Paper RM-84. 1972. DOI: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.98707>.

11. Duncan C. L. et al. *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system* USDA Forest Service. Rocky Mountain Research Station. 1 CD. General Technical Report (GTR). 2006. DOI: <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-164>.

12. Finney M. A. The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology & Management*. 2005. Vol. 211 P. 97-108. Retrieved from: <https://www.snap.uaf.edu/> (дата звернення: 20.04.2019).

13. Finney M. A. *A Computational Method for Optimizing Fuel Treatment Locations*. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-41. 2006. Retrieved from: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/25940> (дата звернення: 02.03.2019).

14. Finney M. A. *An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities*. Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2006. P. 213-220. Retrieved from: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/25948> (дата звернення: 02.03.2019).

15. Finney M. A. Design of regular landscape level fuel treatment patterns for modifying fire growth and behavior. *Forest Science*. 2001. For. Sci. 47(2):219-228. Retrieved from: https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr292/2001_finney.pdf (дата звернення: 02.03.2019).

16. Finney M. A. *FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation*. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2004. 47 p. DOI: <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4>.

17. Finney M. A. Fire growth using minimum travel time methods. 2002. Canadian Journal of Forest Research, 2002, Vol. 32, No. 8. pp. 1420-1424. Retrieved from: <https://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/x02-068> (дата звернення: 03.03.2019).
18. Finney M. The FlamMap fire mapping and analysis system. Finney. USDA Forest Service. 2006. Retrieved from: <https://www.firelab.org/project/flammap> (дата звернення: 02.03.2019).
19. FlamMap. U.S. Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire, Fuel, and Smoke Science Program, and Stu Brittan; Alturas Solutions; Missoula, Montana. 2019. Retrieved from: <https://www.firelab.org/project/flammap> (дата звернення: 25.09.2019)
20. Flood N. Comparing Sentinel-2A and Landsat 7 and 8 Using Surface Reflectance over Australia. Remote Sensing. 2017. Vol. 9(7). Doi: <https://doi.org/10.3390/rs9070659> 659. Retrieved from: <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/7/659> (дата звернення: 25.05.2019).
21. Foga S. et al. Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 194,1. P. 379–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.026>.
22. Genuer R., Poggi J.-M., Tuleau-Malot C. Variable selection using random forests. Pattern Recognition Letters Elsevier, 2010, 31 (14), pp.2225-2236. Retrieved from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00755489/document> (дата звернення: 1.05.2019).
23. Gorelick N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment 2017. Vol. 202. P. 18–27. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900> (дата звернення: 10.04.2019).
24. Hansen M. C. et al. Continuous fields of land cover for the conterminous United States using Landsat data: first results from the Web-Enabled Landsat Data

(WELD) project. Remote Sensing Letters 2011. Vol. 2. Issue 4. P. 279–288. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.519002>.

25. Hansen M.C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science. Vol. 342. 2013. P. 850–853. Retrieved from: <https://pdfs.semanticscholar.org/d4e9/8078fbc0767ebc341f442f64ca7ce9e008db.pdf> (дата звернення: 10.04.2019).

26. 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. Retrieved from: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431168608948945> (дата звернення: 10.03.2019).

27. Kutia M., Gautam M., Myroniuk V. The Use of Sentinel-2 Imagery and Random Forest Classifier for Kyiv City Suburban Forest Mapping. The 3rd Global Forum of Ecological Economics in Forestry, May 20–21, 2017: Nanchang, China. 2017. P. 27–39.

28. Kutia M., Myroniuk V., Sarkissian A. J., Evaluation of Sentinel-2 Compositing Mosaics and Random Forest Method for Tree Species Distribution Mapping in Suburban Areas of Kyiv City, Ukraine. In Proceedings of the Proceedings of the International Workshop on Environmental Management, Science and Engineering, June 16–17, 2018; Xiamen, China, 2018; Vol. 1. P. 597–604.

29. Martin R. E., Frewing, D. W., McClanhan, J. L. Average biomass of four northwest shrubs by fuel size class and crown cover. Portland (OR): USDA Forest Service. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station. 1981. Research Note PNW-374. Retrieved from: https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_rn374.pdf (дата звернення: 6.06.2019).

30. McArthur A. G. Fire behavior in eucalypt forests. Australia, Canberra: Forestry and Timber Bureau, 1967. 36 p. Retrieved from: <https://trove.nla.gov.au/work/21914760?q&versionId=26402708> (дата звернення: 6.06.2019).

31. Nelson R. M. Water relations of forest fuels Forest fires: Elsevier. 2001. P. 79-149. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012386660-8/50006-4>. Retrieved from:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123866608500064> (дата
звернення: 10.05.2019).

32. Olofsson P., Foody G. M., Stehman S. V., Woodcock C. E. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 129. P. 122–131. Retrieved from: http://ftp-earth.bu.edu/public/olofsson/Estimation_Workshop_Lima_Aug2014/Articles/Olofsson_etal_2013_RSE.pdf (дата звернення: 5.03.2019).

33. Olofsson P., Foody G. M., Herold M. et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment* 148 (2014) 42–57. Retrieved from: http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/olofsson_et_al._2014_-_good_practices_for_estimating_area_and_assessing_accuracy_of_land_change.pdf (дата звернення: 11.05.2019).

34. Perryman, H. A. (2009). A mathematical model of spot fires and their management implications. A Thesis Presented to The Faculty of Humboldt State University In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Master of Science In Environmental Systems: Mathematical Modeling, 115.

35. PHP, Ruby, Python – краткая характеристика трёх языков программирования. Retrieved from: <http://www.internet-technologies.ru/articles/php-ruby-python-harakteristika-yazykov-programmirovaniya.html> (дата звернення: 02.07.2019).

36. Prichard S. J., Sandberg D. V., Ottmar R. D., Eberhardt E., Andreu A., Eagle P. & Swedin K. Fuel Characteristic Classification System Version 3.0: Technical Documentation (PNW-GTR-887). Portland, Oregon, USA. 2013.

37. Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-115. Ogden, Utah, 1972. 40 p. Retrieved from: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_int/int_rp115.pdf (дата звернення: 02.06.2019).

38. Roussopoulos P. J., Loomis R. M. Weights and dimensional properties of shrubs and small trees of the Great Lakes conifer forest. Research Paper NC-178. St.

Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 1979. 6 p. Retrieved from: https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rp/rp_nc178.pdf (дата звернення: 04.07.2019).

39. Roy D.P. et al. Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM+ composited mosaics of the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment* 2010. Vol. 114 (1). P. 35–49. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425709002545> (дата звернення: 10.03.2019).

40. Saglam B., Bilgili E., Dincdurmaz B., Kadiogulari A. I., Küçük Ö. Spatio-temporal analysis of forest fire risk and danger using LANDSAT Imagery. *Sensors*, Vol. 8(6). 2008. P. 3970-3987. Retrieved from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3924935/> (дата звернення: 12.06.2019).

41. Scott J.H., Burgan R.E. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2005. 72 p. Retrieved from: https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr153.pdf (дата звернення: 10.05.2019).

42. Shvydenko A., Buksha I., & Krakovska S. Strengthening Ukraine's ability to assess the vulnerability of plain forests to climate change. Clima East project report, CEEF2015-036-UA. 2016.

43. Simard M., Pinto N., Fisher J. B., Baccini A. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116. G04021. 2011. P. 1-12. Doi:10.1029/2011JG001708

44. Trabaund L. Fuel mapping helps forest fire- fighting in Southern France. *Fire Management Notes*. 1978. N 1. P. 14–17.

45. Wilson B.T., Knight J.F., McRoberts R.E. Harmonic regression of Landsat time series for modeling attributes from national forest inventory data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Vol. 137. P. 29–46.

Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271618300066> (дата звернення: 10.03.2019).

46. Woodcock C.E. et al. Free Access to Landsat Imagery. Commentary. Science. 2008. 320 p. Retrieved from: https://www.fs.fed.us/global/iitf/pubs/ja_iitf_2008_woodcock001.pdf (дата звернення: 14.05.2019).

47. Zhu Z., Wang S., Woodcock C.E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. Remote Sensing of Environment 2015. Vol. 159. P. 269–277. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425714005069> (дата звернення: 9.03.2019).

48. 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. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425711003853> (дата звернення: 15.04.2019).

49. Арманд Д. Л. Наука о ландшафтах. М.: Мысль, 1975. 141 с.

50. Базилевич Н. И. Малый биологический круговорот зольных веществ при лугово-степном и степном почвообразовании. Почвоведение, М.–Л., 1958. 120 с.

51. Балашев Л.С. Сипайлова Л.М., Соломаха Б.А. Шеяг-Сосонко Ю.Р. Типология лугов Украины и их рациональное использование. Київ : Наук. думка., 1988. 237 с.

52. Береговий П.М. Геоботаніка. Київ: Радянська школа, 1966. 175 с.

53. Борсук О.А. Комплексна оцінка пожежної небезпеки лісів зони відчуження Чорнобильської АЕС. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Лісівництво та декоративне садівництво. Вип. 187 (3). С 167–176.

54. Борсук О.А. Природна пожежна небезпека соснових лісів зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення ЧАЕС. Наук. вісн. НУБіП України. Вип. 164. С 105–112.

55. Валендик Э. Н., Матвеев П. М., Софронов М. А. Крупные лесные пожары: М.: Наука, 1979. 198 с.
56. Великий тлумачний словник сучасної української мови. Уклад. і голов. ред. В.Т. Бусел. К., Ірпінь: ВТФ «Перун», 2004. 732 с.
57. Волокитина А.В., Софронов М.А. Классификация и картографирование растительных горючих материалов. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2002. 314 с.
58. Ворон В.П., Ткач О.М., Сидоренко С.Г., Мельник Є.Є. Запаси підстилки та живого надґрунтового вкриття як показник ризику виникнення пожеж у соснових лісах Полісся. Наукові праці лісівничої академії наук України. № 16, 2018. С. 9–16.
59. Гусев В. Г., Лопухова Е. Л., Дубовый В. К. Класификация и общие свойства лесных горючих материалов. СПб.: ФБУ «Санкт-Петербургский НИИ лесного хозяйства», 2011. №21. С. 26–35.
60. Землі сільськогосподарського призначення: права громадян України. Науково-навчальний посібник. За ред. докт. юрид. наук, проф. Н.І. Титової. – Львів: ПАІС, 2005. 11 с.
61. Зібцев С.В., Сошенський О.М., Гуменюк В.В., Корень В.А. Багаторічна динаміка лісових пожеж в Україні. Ukrainian journal of forest and wood science. Вип. 10 (3), С. 27–40.
62. Канаш О.П. До проблеми ґрунтових обстежень. Землеустрій і кадастр. 2005., №3. 55 с.
63. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов Новосибирск: Наука, 1977. 239 с.
64. Корень В.А. Горимість лісів поліської частини Рівненської області. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. Вип. 219. С 85–97.

65. Костюкевич Н.И. Задержание жидких осадков пологом соснового насаждения. Лесоведение и лесное хозяйство. ФБУ «Санкт-Петербургский НИИ лесного хозяйства», 1975. Вип. 9. С. 22–28.

66. Кузик А. Д. Еколого-лісівницькі основи пожежної безпеки в лісових насадженнях Малого Полісся: дис. д-ра с.-г. наук: 06.03.03. Держ. Ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2012. 361 с.

67. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов. Вопросы пирологии. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1970. С. 5–58.

68. Лакида П.І., Миронюк В.В., Гілітуха Д.В. Аналіз та інтерпретація карти високого просторового розрізнення лісових екосистем Полісся України. Збалансоване природокористування. 2014. № 4. С. 5–9.

69. Левченко В. В., Борсук О. А., борсук А. А. Лісові горючі матеріали. Навчальний посібник. Київ. НУБіП України, 2015. 237 с.

70. Мелехов И.С. Природа леса и лесные пожары. Архангельск, 1947. 60 с.

71. Миронюк В.В. Використання сезонних композитних мозаїк Landsat для оцінки та картографування лісових ресурсів. Актуальні проблеми наук про життя та природокористування : зб. матеріалів учасн. Міжнар. наук.-практ. конф. Київ: 2018. С. 150–153.

72. Миронюк В.В. Картографування рівнинних лісів України на основі щільних часових рядів супутникових знімків Landsat. Картографічне моделювання та географічні інформаційні системи: зб. матеріалів учасн. всеукр. наук.-практ. конф. Львів, 2019. С. 51–54.

73. Миронюк В.В. Класифікація лісового покриву за сезонними композитними мозаїками Landsat. Науковий вісник НЛТУ України: 2018. № 28. С. 28–33.

74. Миронюк В.В. Підбір незалежних змінних для класифікації лісового покриву за сезонними мозаїками. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України: 2017. С. 66–76.

75. Миронюк, В.В. Сезонна динаміка спектральних характеристик земного покриву та її роль у дешифруванні лісових насаджень за знімками Landsat. Науковий вісник НУБіП України: 2017. С. 54–64.
76. Мякушко В. К. Сосновые леса равнинной части УССР. К. Наукова думка, 1978. 255 с.
77. Паскевич С. А. Радіаційна вагомість фітоценозів лук та перелогів Чорнобильської зони відчуження на етапі пізньої фази аварії : дис. канд. біол. наук: 03.00.01. Паскевич Сергій Анатолійович – Чорнобиль, 2005. – 191 с.
78. Персикова З. И. Морфологические особенности и большой жизненный цикл *Stipa stenophylla* Czern. Уч. зап. Волгоградск. гос. пед. инст. им. А. С. Серафимовича, 1958. 9 с.
79. Программа и методика биогеоценологических исследований. – М.: Наука, 1974. 401 с.
80. Работнов Т. А. Суходольный луг как биогеоценоз. М.: Наука, 1978. 84 с.
81. Ремезов Н. П., Погребняк П. С. Лесное почвоведение. Москва. Лесная промышленность, 1965. 323 с.
82. Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности. Москва. Наука, 1965. 264 с.
83. Родин Л. Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 215 с.
84. Рябуха Е. В. Накопление лесной подстилки в насаждениях Украинского Полесья. Лесоведение, 1972. № 1. С. 26-34.
85. Семенова-Тян-Шанская А. М. Динамика накопления и разложения мертвых растительных остатков в лугово-степных и луговых ценозах. Бот. ж., 1960. С. 45–55.

86. Сидоренко С. Г., Ворон В.П., Мельник Я.Я., Сидоренко А. Г., Особливості формування стиглих деревостанів після низових пожеж. Лісівництво і агролісомеліорація, вип. 127. С. 169-176.
87. СОУ 02.02–37–476: 2006. Площі пробні лісовпорядні. Метод закладання. Введ. 26.12.2006. К. : Мінагрополітики України, 2006. 32 с.
88. Софронов М.А. Лесные пожары в горах южной Сибири. М.: Наука, 1967. 148 с.
89. Софронов М.А. Пожарная опасность в природных условиях. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2005. 330 с.
90. Софронов М.А., Волокитина А.В. Методика пирологического обследования и описания лесных участков, пройденных пожарами. Красноярск : Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 71 с.
91. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. 205 с.
92. Усеня В. В. Лесные пожары, последствия и борьба с ними. Гомель: ИЛ НАН Беларуси, 2002. 206 с.
93. Черных В. А. Фурьев В. В. Лесные пожары в ленточных борах Кулундинской степи. Новосибирск: Наука, 2011. 176 с.
94. Швиденко А., Лакида П., Щепашенко Д., Василишин Р., Марчук Ю. Вуглець, клімат та землеуправління в Україні: лісовий сектор. Корсунь-Шевченківський. ФОП Гаврищенко В. М., 2014. 283 с.
95. Шевченко О. В. Оцінка вразливості до змін клімату: Україна. Київ: Myflaer, 2014. 63 с.
96. Шешуков М.А. Пирогенез – важнейший фактор формирования лесов. Горение и пожары в лесу. Красноярск, 1984. С. 99–100.
97. Яковлев А.П. Пожароопасность сосновых и лиственных лесов. Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1979. С. 195–213.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця 1 – Запас наземних лісових горючих матеріалів за класифікацією NFDRS, т·га⁻¹

Група віку	Статистичні показники	А, років	D, см	Н, м	Бонітет	Запас, м ³ ·га ⁻¹	ТЛУ	Запас 1 год. (до 0,6 см), т·га ⁻¹	Запас 10 год. (0,7-2,5 см), т·га ⁻¹	Запас 100 год. (2,6-7,5 см), т·га ⁻¹	Запас підстилки (+шишки), т·га ⁻¹	Глибина підстилки, см
Молодняки	avg.	30	10	11	2	193	B ₂	0,76	1,22	0,99	32,80	6,38
	max.	40	16	15	3	353	B ₃	1,47	2,90	3,00	77,52	11,73
	min.	11	4	3	1	30,3	A ₂	0,35	0,14	0,00	7,50	0,00
Середньовікові	avg.	51	18	18	2	379	B ₂	0,86	1,74	2,05	34,10	7,14
	max.	60	25	25	3	539	B ₃	1,91	6,15	5,40	130,35	11,70
	min.	42	12	15	1	177	A ₂	0,30	0,53	0,00	2,50	1,40
Пристигаючі	avg.	71	24	23	2	445	B ₂	0,72	0,87	0,75	61,39	9,96
	max.	80	30	28	1	761	B ₃	1,54	2,20	2,80	125,78	12,22
	min.	62	18	18	1	343	A ₂	0,25	0,12	0,00	19,00	6,80
Перестійні	avg.	115	37	28	1	442	B ₂	1,00	0,94	0,52	105,58	10,52
	max.	139	46	31	2	544	B ₃	1,47	1,85	1,13	180,59	12,88
	min.	94	31	25	1	380	A ₂	0,49	0,07	0,00	47,71	7,18

РЕЦЕНЗІЯ

на проміжний звіт про НДР за договором № 110/9-пр-2018 «Науково-методичне забезпечення створення геопорталу для оцінювання ризику, прогнозування та попередження природних пожеж у Поліссі України», що виконувалася на кафедрі лісівництва упродовж 2019 року
(керівник – д. с.-г. н., проф. Зібцев С.В., обсяг фінансування у 2019 році – 630,00 тис. грн, термін виконання – 2018–2020 рр.)

Природні ландшафти Полісся України і, в першу чергу, ліси є головним середовищем рослинного та тваринного біорізноманіття, важливим фактором стабілізації гідрологічного режиму і клімату регіону. Зміни клімату та антропогенний вплив на екосистеми призвели до суттєвого погіршення стану та стійкості цих лісів, збільшення випадків всихання лісів, спрощення просторової і видової структури насаджень, накопичення сухостою та підвищення пожежної небезпеки. За таких умов актуальною науковою задачею є прогнозування ризиків виникнення природних пожеж, кількісна оцінка та моделювання головних компонент пожежного середовища ландшафтів та пожежної інфраструктури, що дозволить виділяти критичні, з точки зору пожежної небезпеки, ділянки ландшафтів, отримати динаміку накопичення горючих матеріалів та прогнозувати ризики виникнення природних пожеж.

Об'єктом дослідження є екосистеми Полісся України які є вразливими до природних пожеж. Метою проекту є створення за допомогою методів ДЗЗ, геостатистики та польових експериментальних досліджень вихідних наборів геопросторових даних та моделей, які описують основні параметри рослинного покриву та запасів горючих матеріалів у природних екосистемах Українського Полісся, в тому числі, на територіях забруднених радіонуклідами. У дослідженнях використано сучасні методи, орієнтовані на використання комп'ютерних і дистанційних технологій. Упродовж другого року виконання роботи підготовлено геопросторову основу для класифікації типів земного покриву для різних ландшафтів Полісся України, проведено класифікацію сезонних композитних мозаїк на вісім тематичних класів, встановлено розподіл площі території досліджень за основними типами ландшафтів, проаналізовано можливості картографування зімкнутості деревостанів для моделювання поведінки верхових лісових пожеж, розроблено фізичну модель порталу та програмне забезпечення на стороні веб-серверу (backend).

Представлена робота повністю відповідає плану досліджень, а одержані результати – заявленим у календарному плані. За звітний період виконавцями проекту опубліковано 5 наукових статей у фахових виданнях України та 2 статті у науковому виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази Scopus. Наукові дослідження у звітному році пройшли апробацію на міжнародних та всеукраїнських конференціях, у матеріалах яких опубліковано 9 тез доповідей. У межах роботи було захищено одну кандидатську та одну докторську дисертації. Звіт оформлено згідно вимог ДСТУ 3008:2015.

Науково-дослідна робота виконувалася у співпраці з ВП НУБіП України «Боярська лісова дослідна станція», Українським ордена «Знак Пошани» науково-дослідним інститутом лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, Українським гідрометеорологічним інститутом ДСНС України та НАН України, виробничим об'єднанням «Укрдержліспроєкт», а також кафедрою таксації лісу та лісового менеджменту НУБіП України. До виконання досліджень залучалися студенти магістратури. Збір дослідних матеріалів виконувався із використанням сучасних апробованих технологій.

Загальний висновок. Звіт підготовлено на високому науково-методичному рівні. Під час досліджень застосовувалися сучасні технології збору та обробки дослідних даних. Принципових зауважень до структури, змісту та оформлення звіту немає. Вважаю, що представлений проміжний звіт може бути рекомендованим для розгляду та затвердження на науково-технічній раді НДІ лісівництва та декоративного садівництва.

Професор кафедри таксації лісу та лісового менеджменту, д. с.-г. н., проф.

Зібцев С.В.
проф. Зібцев С.В.



Гірс О.А.
(ПІБ)

Гірс О.А.