Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Географічний факультет
Кафедра геодезії та картографії

На правах рукопису
УДК [528.94+528.854] : 004.9 (477)

ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ УКРАЇНИ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Галузь знань 10 – «Природничі науки»
Спеціальність 103 – «Науки про Землю»
Освітньо-професійна програма – «Картографія, географічні інформаційні системи, дистанційне зондування Землі»

Кваліфікаційна робота бакалавра
студентки четвертого курсу
Слічної Лілії Володимирівни

Науковий керівник –
доктор географічних наук, професор
Бондаренко Едуард Леонідович

Допущено до захисту:
Протокол засідання кафедри №___від «___» _____ 20__року
Завідувач кафедри проф. Даценко Л. М.

Київ – 2023

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ 4
ВСТУП 6
РОЗДІЛ 1. 9
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ 9
1.1. Сутність і характерні риси сучасного геоінформаційного картографування 9
1.2. Способи картографічного зображення на картах лісових ресурсів засобами геоінформаційного картографування. 11
1.3. Досвід геоінформаційного картографування лісових ресурсів 15
1.4. Сучасні та перспективні напрями геоінформаційного картографування лісових ресурсів 18
РОЗДІЛ 2. ЗМІНИ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ЯК ОБ'ЄКТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ 24
2.1. Предмет геоінформаційного картографування лісових ресурсів. 24
2.2. Місце карт лісів у системі класифікації географічних карт. 25
2.3. Особливості картографування лісового покриву України 26
2.4. Методологічні особливості створення карт лісових ресурсів засобами геоінформаційного картографування. 27
РОЗДІЛ 3. ДАНІ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЯК ІНФОРМАЦІЙНА ОСНОВА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ 30
3.1. Особливості даних дистанційного зондування для геоінформаційного картографування 30
3.2. Генералізація та класифікація даних дистанційного зондування для картографування лісових ресурсів 32
3.3. Види даних дистанційного зондування для геоінформаційного картографування лісового покриву 34

3.4. Можливості використання даних дистанційного зондування для картографування лісових ресурсів. 41
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ У ГЕОІНФОРМАЦІЙНОМУ КАРТОГРАФУВАННІ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ. 44
4.1. Авторське бачення сучасних практичних можливостей геоінформаційного картографування лісових ресурсів на основі ДЗЗ..... 44
4.2. Програмні продукти для геоінформаційного картографування лісових ресурсів на основі ДЗЗ..... 46
4.3. Алгоритм створення програмного додатку для моніторингу лісових ресурсів України..... 48
4.4. Особливості використання програмного додатку для моніторингу лісових ресурсів України..... 50
ВИСНОВКИ..... 56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 58

РЕФЕРАТ

У роботі висвітлено можливості геоінформаційного картографування лісового покриву України з використанням даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для створення інтерактивної тематичної картографічної моделі та одержання необхідних тематичних даних про лісовий покрив території. Досліджено основні риси, властивості та особливості лісового покриву як показника картографування.

Доведено, що інтеграція функціоналу географічних інформаційних систем (ГІС) та даних ДЗЗ для здійснення геоінформаційного картографування лісового покриву визначає достатню ефективність для проведення інвентаризаційних та оціночних робіт у лісовому господарстві, що дозволить перейти на курс усталеного ведення лісового господарства, а також зберегти та раціонально використовувати у майбутньому наявні лісові ресурси.

Визначено основні види даних ДЗЗ для геоінформаційного картографування лісового покриву (спектральні індексні зображення, комбінації каналів та глобальні цифрові карти на території, вкриті лісом), використання яких дозволило розробити програмний додаток з функціями аналізу лісового покриву на основі спектральних індексних зображень. У додатку надано можливість комбінування 4-х індексних зображень на основі даних супутника Sentinel-2 для локального дослідження стану лісового покриву на визначений період часу.

Функціонування розробленого додатка реалізовано на базі програмного забезпечення Google Earth Engine та є загальнодоступним за URL-посиланням (https://liliaslichnaia.users.earthengine.app/view/forest-cover-analysis). Алгоритм дослідження лісового покриву через створений програмний додаток, в основі якого лежить картографічна модель, передбачає одержання всієї необхідної для користувача інформацію на вибрану ним ділянку за допомогою показників картографування за окремими елементами, анімованого зображення, графіків.

Ключові слова: лісовий покрив, геоінформаційне картографування, дані ДЗЗ, показники картографування, спектральні індексні зображення, картографічні моделі.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Теперішнє лісове господарство України перебуває на стадії реформування. Обрано новий вектор ведення політики лісового господарства, що полягає у сталому, невиснажливому лісокористуванні, збереженні та раціональному використанні лісових ресурсів, заходам відтворення лісу задля підвищення економічної ефективності галузі.

Проблемами, що гостро постають у лісовому господарстві, є передусім застарілість технологій обліку лісу, картографування лісових ресурсів та недостовірність або повна відсутність тематичної картографічної інформації про стан лісів та лісового господарства в цілому. Завдяки розробці карт на основі ГІС та з використанням даних ДЗЗ, досягається забезпечення достатнім інформаційним ресурсом усі ланки менеджменту лісового господарства, дослідників, науковців та населення.

Метою проведення дослідження є розробка карти лісового господарства України на основі даних дистанційного зондування з використанням методів геоінформаційного картографування та поширення її у вигляді програмного додатка.

Для досягнення сформульованої мети поставлено до виконання такі **завдання:**

− дослідити лісове господарство як об’єкт геоінформаційного картографування, його сутність, особливості та характерні риси;

− здійснити аналіз досвіду картографування лісового покриву у історичній ретроспективі, знайти приклади впровадження ГІС у картографування лісового господарства;

− визначити види даних дистанційного зондування Землі, які доцільно використовувати при створення карт лісового господарства;

− проаналізувати доцільність використання даних дистанційного зондування для геоінформаційного картографування лісових ресурсів;

− розробити за допомогою методів геоінформаційного картографування додаток для аналізу лісового покриву на основі даних дистанційного зондування.

Об'єктом дослідження є лісовий покрив України.

Предметом дослідження є теоретико-методологічні та методичні основи створення карт лісового покриву з використанням ГІС, а також залучення даних дистанційного зондування.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети у роботі застосовані такі методи наукового пізнання: всезагальний або філософсько-світоглядний; загальнонаукові методи (аналізу і синтезу, порівняння, узагальнення, аналогій, індукції та дедукції, систематизації); загальнонаукові підходи (системний, моделювання, інформаційний); конкретно-наукові підходи та методи (математичні, економічні, статистичні – негеографічні та загальногеографічні: картографічний, геоінформаційний).

Наукова новизна проведеного дослідження полягає у наступному:

1. Обґрунтовано необхідність застосування геоінформаційного підходу до картографування лісового господарства України на основі поєднання традиційного підходу та геоінформаційного.
2. Визначено перелік видів дистанційного зондування Землі, які можуть бути каркасом для укладення карт лісових ресурсів України.
3. Розроблено авторську методику геоінформаційного картографування лісового господарства на основі використання даних дистанційного зондування.

Практичне значення одержаних результатів. Створена карта лісового покриву України може бути використана для подальшого дослідження різноманітних аспектів лісового господарства, а також служити прикладом поєднання сучасних технологій для картографування лісового покриву України.

Розроблений додаток доступний для використання за URL-посиланням. Програма не потребує реєстрації на сайті та навичок програмування у користувача. Інтерфейс максимально спрощений та інтуїтивно зрозумілий, доступність завантаження даних також зберігається.

Програмне забезпечення, що було використане для створення додатка – Google Earth Engine.

РОЗДІЛ 1.
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ

1.1. Сутність і характерні риси сучасного геоінформаційного картографування.

Геоінформаційними системами (ГІС) називають інформаційні системи, які призначені для збирання, зберігання, оброблення, аналізу та виведення результатів (візуалізації) просторових даних. Залучення таких систем до картографії дозволило прискорити процеси обробки, укладання, редагування та підготовки карт до видання.

ГІС мають широкі можливості для аналізу географічної інформації та представлення її у зручному для користувача вигляді (карти, серії карт, атласи, графіки, діаграми тощо). Взаємодія картографії та геоінформатики сформувала специфічний напрям картографування – геоінформаційне картографування.

Геоінформаційним картографуванням (ГК) називають автоматизоване створення та використання карт, картографічних баз даних та знань на основі ГІС. Суть ГК полягає у інформаційно-картографічному моделюванні геосистем.

Історія геоінформаційного картографування почалася у 1960-ті роки з появою перших ГІС і засобів автоматизованого створення карт. Першою реально працюючою геоінформаційною системою у світі вважається ГІС Канади (Canada Geographic Information System, CGIS), розроблена у середині 60-их років XX ст. на базі перших ЕОМ і пакетної системи обробки даних [2, с. 18].

Існує декілька класифікацій ГК. Як і будь-який вид картографування ГК поділяють на галузеве і комплексне, аналітичне та синтетичне. Інша класифікація ГК за видами та типами виділяє: соціально-економічне, екологічне, інвентаризаційне, оціночне картографування тощо.

Найбільш характерними рисами геоінформаційного картографування прийнято вважати [1, с.65]:

1. Високий ступінь автоматизації, опора на бази цифрових картографічних даних і бази географічних (геологічних, екологічних та інших) знань;

2. Системний підхід до відображення та аналізу геосистем;

3. Інтерактивність картографування, тісне сполучення методів створення і використання карт;

4. Оперативність, яка наближається до режиму реального часу, в тому числі з широким застосуванням ДЗЗ;

5. Багатоваріантність, яка припускає різнорідну оцінку ситуацій і спектр альтернативних рішень;

6. Мультимедійність, яка дозволяє поєднувати іконічні, текстові, звукові відображення;

7. Застосування комп'ютерного дизайну і новітніх зображувальних засобів;

8. Створення зображень нових видів та типів (наприклад, електронні карти, тривимірні комп'ютерні моделі та анімації тощо);

9. Проблемно-картографічна орієнтація картографування, спрямована на забезпечення прийняття рішень.

10. Візуалізація та інтерактивність, створення 3D-моделей та інтерактивних додатків.

Геоінформаційне картографування поєднує у собі ряд наукових напрямів сучасної картографії, але піднімає їх на більш високий технологічний рівень. Окрім цього, сьогодні розвивається системне картографування, що передбачає цілісне відображення геосистем та їх елементів, ієрархії, взаємозв'язків, динаміки та функціонування. Такий системний підхід проявляється, як у нових методах картографічного моделювання геосистем, так і в системній організації процесу картографування.

Геоінформаційне картографування сформувалося на перетині сфер діяльності 3 наук та технологій: ГІС, картографування та дистанційного

зондування Землі (ДЗЗ). Науковці по-різному інтерпретують ці взаємозв'язки одні з одними, використовуючи 4 різні моделі:

− Лінійна модель представляє поступовий перехід від ДЗЗ до ГІС. Завершальною ланкою взаємодії є картографія.

− Модель, де домінує картографія (як система), об'єднує у підсистемі ГІС та ДЗЗ.

− Модель, де домінує ГІС, навпаки, виокремлює ДЗЗ та картографію у спільну підсистему, об'єднану єдиною системою ГІС.

− Модель потрійної взаємодії. Жодна сфера не є домінуючою, а ГІС, ДЗЗ та картографування є рівними між собою. Модель потрійної взаємодії є найбільш реалістичною, де системи взаємодіють між собою в процесі отримання, обробки та аналізу просторової інформації.

Геоінформаційне картографування застосовується у багатьох галузях, включаючи лісове господарство, екологію, містобудування, туризм, енергетику, економіку та інше. Воно допомагає здійснювати управління ресурсами, прогнозувати зміни та розробляти ефективні стратегії розвитку на основі аналізу географічних даних. Доцільність постійного ведення ГК допомагає знизити економічні витрати, уникнути кризових екологічних ситуацій, неефективного планування та витрати ресурсів.

1.2. Способи картографічного зображення на картах лісових ресурсів засобами геоінформаційного картографування.

Однією із основних задач при геоінформаційному картографуванні будь-якого об'єкта, процесу чи явища є вибір способів зображення та передачі картографічної інформації до користувача. Картографічна інформація може бути подана у вигляді алфавітно-цифрового друку, графіків, анімацій або графічних зображень. Конкретна форма відображення таких даних визначається користувачем. При проведенні аналізу та вибору способів відображення інформації враховують: вимоги користувача до складу картографічної

інформації, високу наочність зображення, експлуатаційні можливості засобів машинної графіки для візуалізації у потрібній формі, швидкість відображення, складність та масовість інформації.

Головний метод у геоінформаційному картографуванні – це автоматизована побудова картографічного зображення. Для того щоб побудувати просторові моделі використовують різні способи подання різноманітної інформації про природні чи соціально-економічні об’єкти та процеси. В обох випадках найбільш вживаним методом є метод просторової інтерполяції.

У геоінформаційному картографуванні автоматизовано процеси просторового аналізу, інтерполяції та класифікації геоданих.

− Просторовий аналіз є групою функцій, що здійснюють аналіз просторових відношень об’єктів, у тому числі їх геометрії, місцезнаходження, картографічне накладання, обробку ЦМР тощо.

− Просторова інтерполяція – це визначення функції на заданому інтервалі за відомими значеннями кінцевої множини точок. Таким чином можна відновити значення функції у місцях, де такі дані відсутні. При інтерполяції невідомі значення не є проміжними у значеннях функції, а вирахувані за таблицею значень функції як конкретний аналітичний вираз функції. Якщо при інтерполяції трапляються помилки, то у таких випадках застосовують апроксимацію, тобто замінюють одні математичних значень іншими, що є близькими до вихідних.

− Поліпараметрична класифікація (кластеризація) здійснюється при аналізі всього набору характерних ознак об’єктів для віднесення їх до певних класів за кожним із параметрів.

Для інтерактивних карт лісових ресурсів, що створюються передусім за матеріалами ДЗЗ, звичні у традиційній картографії способи картографічного зображення (спосіб значків, лінійних знаків, ізоліній, кількісного та якісного фону тощо) застосовуються доволі рідко. Основна увага користувача має зосереджуватися на різниці контрасту індексних зображень та класифікації, що

на них подається. Тому важливе інформаційне навантаження частково переноситься на додаткові дані карти – геозображення, графіки, діаграми, карти-анімації, блок-діаграми.

Одним із видів відображення просторових об’єктів та явищ є динамічні геозображення. Їх перевага полягає у додаванні до зображення часового параметра. У цьому випадку геозображення ніби «оживають» і починають рухатися. До динамічних геозображень належать картографічні фільми, картографічні анімації [3, с.25].

Завдяки можливостям комп’ютерного моделювання стали доступними для використання різноманітні комбіновані геозображення. Наприклад, динамічні блок-діаграми, фотокарти дозволяють поєднувати корисні властивості моделей різних видів та використовувати їх у комплексі, збільшуючи інформативність та наочність таких комбінованих геозображень.

Геозображення, що відображають динаміку геосистем (динамічні геозображення), показують їх виникнення, розвиток, минулі стани, зміни у часі та переміщення в просторі. Наприклад, серії різночасових карт чи знімків, картографічні анімації, анімаційні атласи тощо [4, с. 49].

Анімації – послідовна демонстрація статичних картографічних зображень (кадрів). Зростаючий інтерес до картографічних анімацій викликаний прагненням відобразити не тільки структуру явищ, але й сутність процесів, що відбуваються у земній корі, атмосфері, гідросфері та біосфері, а також у зонах їх контакту та взаємодії [5, с. 81]. Загалом анімації можна класифікувати на 4 основні групи:

- Зображення динамічних змін у екосистемах та їх окремих компонентах;
- Візуалізація моделей геосистем у різних перспективах і під різними кутами;
- Зображення переміщення реальних об’єктів (рух хмар, транспорту), для створення ілюзії реальності;
- Привернення уваги користувача до певного об’єкта, явища, процесу.

На відміну від набору карт зміни, що відображають розвиток подій, зображують не просторовою послідовністю, а реальним рухом на самій карті. Одне з основних питань, яке доводиться вирішувати картографу, полягає у тому, як потрібно проектувати анімацію, щоб користувач зрозумів розвиток або тенденцію змін [3, с. 37].

Основними областями застосування анімованих зображень є оперативне картографування (для Гідрометеослужб), екстрене картографування при надзвичайних ситуаціях, анімації для навчального процесу, військових операцій, різноманітних наукових досліджень тощо.

Графіки і діаграми. Зважаючи на те, що усі малюнки завжди є наочніші, ніж текстовий опис, графіки та діаграми доволі часто застосовуються у якості додаткових даних на карті. Зазвичай графіки будують у декартовій системі координат, рідше – у полярний. Різновид графіків – гістограми, в яких замість точок застосовують стовпчики; такий вид графіків часто використовують для подання невеликої кількості дискретних даних.

Слід відзначити ще один вид графіків – адитивний. На ньому одночасно показують значення кількох параметрів, причому стовпчики будують не на загальній осі чи окремих осях, а один на одному, що відтворює адитивний характер показників [3, с.37].

Блок-діаграма – це трьохвимірний картографічний рисунок, що суміщає зображення якої-небудь поверхні з повздовжніми та поперечними вертикальними розрізами [6, с. 15].

Способи подання інформації для карт лісових ресурсів можуть бути різними. Це залежить від самого об’єкта картографування та призначення картографічного твору. Але завдяки комп’ютерним технологіям є широкий спектр способів, які можна застосувати та задовольнити вимоги будь-якого користувача.

1.3. Досвід геоінформаційного картографування лісових ресурсів.

Від первісних часів ліси на картографічних зображеннях зображали схематично. На найдавнішій пам'ятці картографії на території України «Межиріч-карті» (вік приблизно 15-17 тис. років) є перші зображення лісів та кущів. Подальші карти не відрізнялися особливою детальністю зображення. Лише з XVII століття на картах українських земель почали підписувати назви лісів. Наприклад, Генеральна карта України (першим її варіантом була рукописна карта 1639 р. «Українська географічна карта»), окрім підписів населених пунктів, річок, островів мала 4 назви лісів.

Починаючи з XIX століття, на картах більш повно зображали усі елементи змісту. Із 152 аркушів «Спеціальної карти Європейської Росії» (1865-1871 рр.) на територію України припадає 21 аркуш із детальним поданням гідрографії, населених пунктів, шляхів сполучення, лісів, боліт та рельєфу.

Поява тематичного картографування була зумовлена розвитком природознавства. Першими картами рослинності на території України стали карти ботаніка К. Лапчинського. Створену ним Генеральну карту лісів Буковини у масштабі 1:800 000 було видано у Відні у 1898 р.

На межі XIX і XX століть була видана перша ботаніко-географічна карта Росії – фізикогеографа, ботаніка, ґрунтознавця, одного з фундаторів болотознавства Г.І. Танфільєва (1857-1978) (1898, 1901 рр.) [7, с. 149].

У 1872 р. у великій загальногеографічній «Карті важливих галузей виробництва Європейської Росії…» масштабу 1:2 520 000 було присвячено розділ веденню лісового господарства на території Росії.

Багато тематичних карт Буковини масштабів 1:150 000 і 1:1 500 000 містяться у ґрунтовній праці майбутнього генерал-майора, почесного доктора Чернівецького університету Едуарда Фішера (1862-1935 рр.) «Буковина» (Чернівці, 1899 р.), виданій німецькою мовою [7, с. 160]. Частина доробку автора присвячена картографуванню лісів Буковини.

У період із 1918-1920 рр. зусиллями С.Л. Рудницького було укладено «Стінну фізичну карту України» (видання 1918 р.) масштабу 1:1 000 000. Карта

охоплює усю етнічну територію України та однією із п’яти тематичних карт-врізок масштабу 1:5 000 000 є «Рослинно-географічна карта України».

Цікавою у тематичному аспекті є карта «Буковина адміністративна та лісова» (1933 р.) масштабом 1:300 000 з детальною інформацією про ліси [7, с. 224]. Карту видавали у Румунії.

Незалежного розвитку геоботанічне картографування в Україні не набуло. У геоботаніці найбільшого поширення набули принципи еколого-морфологічної класифікації, розроблені ще в 30-і роки а працях В.Н. Сукачова, А.П. Шенникова, Е. М. Лавренко і використані при створенні геоботанічних карт різних масштабів [8]. Рослинний покрив України та її ліси відображали на багатоаркушевих картах СРСР та його європейської частини. Лісовпорядні та лісоінвентаризаційні роботи в СРСР масово проводилися до 1982 р. За радянськими стандартами створювалися первинні картографічні документи – «планшети» у масштабах 1:10 000 - 1:25 000. На досліджуваних територіях виділяли однорідні ділянки за видом деревини (із характеристиками віку, висоти, щільністю дерев тощо). «Планшети» використовувалися для створення планів лісонасаджень, а у випадку генералізації – були основою для укладання карт у масштабі 1:100 000-1:200 000.

Загалом, поширення лісів СРСР відображено на «Карті лісів СРСР» масштабу 1:2 500 000 (1955 р.) за переважаючими породами дерев. Пізніше був виданий більш докладний «Атлас лісів СРСР» (1973 р.), який містить такі ж карти лісів республік, країв та областей у масштабах 1:500 000-1:2 500 000.

У 1984 р. побачила світ «Карта рослинності Української РСР» масштабом 1:1 500 000, розроблена Інститутом ботаніки ім. М.Г. Холодного АН УРСР. Дрібномасштабні ботанічні карти (рослинний покрив, лікарські й рідкісні рослини, ліси, рослини, занесені до «Червоної книги» тощо) широко представлені у науково-довідкових, довідкових і навчальних атласах, а також у окремих картах України та її областей [7, с. 242, 244].

Вітчизняні вчені продовжують роботи із картографування лісових ресурсів, але із поступовим впровадженням сучасних технологій. Науково-

дослідний інститут геодезії та картографії займається розробкою стандартів у галузі географічної інформації та геоматики. Фахівці НДІГК разом із іншими науковцями обґрунтували застосування геоінформаційного картографування у різноманітних напрямках тематичного картографування. Перспективними є розробка дослідного програмно-методичного комплексу для створення інтерактивних електронних карт для веб-картографування, роботи у соціально-економічних галузях, лісовому господарстві та еколого-географічного картографування.

Стосовно досвіду використання геоінформаційних технологій заслуговує на увагу створена у 2000 р. серія карт «Комплекс природоохоронних заходів, що забезпечує екологічне оздоровлення басейну Дніпра» [3, с. 19]. Серія зокрема містить такі карти: «Водоохоронні лісові насадження», «Створення захисних лісонасаджень Державним комітетом лісового господарства України та заходи, здійснені Державним комітетом по водному господарству України». На картах зображено фактичні обсяги виконання природоохоронних заходів, включаючи співвідношення між плановими і фактичними показниками, джерела і структуру їх фінансування.

Створення Національної інфраструктури просторових даних (НІГД) передбачає розробку 12 державних кадастрових систем – різноманітних державних кадастрів, у тому числі і кадастру лісових ресурсів. Впровадження таких систем закріплено у 4 кодексах та 6 законах України. Потужним кроком для пришвидшення створення НІГД в Україні стало ухвалення Закону «Про національну інфраструктуру просторових даних» у 13 квітня 2020 р [9]. У Додатку до Закону одним із наборів (видів) геопросторових даних є земельний покрив, куди віднесено «…ліси та інші лісовкриті землі [9]».

Найважливішою складовою НІГД на національному рівні є Національний атлас України (НАУ) – цілісний інформаційний твір, в якому зосереджено просторово-часову інформацію про природу та суспільство держави [3, с. 80]. На тематичний блок «Природні умови та природні ресурси» у Атласі відведено 150 сторінок, де розміщено тематичних 320 карт [10]. У Розділі «Рослинний світ і

рослинні ресурси» представлено карту рослинності у масштабі 1:2 500 000 (автори: Дідух Я.П., Шеляг-Сосонко Ю.Р.).

Величезний масив інформації про лісові ресурси накопичений за роки досліджень у архівах. Важливість оновлення та забезпечення актуальності усіх даних є основним напрямом роботи як роботи Державного агенства лісових ресурсів України, так інших дотичних структур.

1.4. Сучасні та перспективні напрями геоінформаційного картографування лісових ресурсів.

Розвиток геоінформаційного картографування у перспективі включає в себе розвиток технологій і методів збору інформації та аналізу даних, підвищення точності та роздільної здатності вихідних даних (космічних знімків, зокрема), а також застосування штучного інтелекту та можливостей штучного навчання. Ось деякі із найперспективніших напрямів:

1. Розширення спектру та залучення усіх можливостей даних ДЗЗ. Супутникові знімки, що матимуть хороші параметри роздільної здатності та будуть актуальними («свіжими») на час проведення дослідження дозволить отримувати детальну інформацію про структуру та склад лісових масивів. Розрахунок вегетаційних індексів, використання комбінацій різних каналів між собою допоможе виявити зміни в лісових екосистемах, визначати площу та стан залісненості досліджуваних територій.

2. Застосування лазерного сканування (LIDAR). Це дозволить отримати точну інформацію про висоту лісу, профіль дерев та структуру лісових покривів. Створення 3D-карти лісів із повною характеристикою деревостану дозволить з дуже високою точністю розраховувати, скільки на тій чи іншій ділянці може бути заготовлено деревини.

3. Залучення усіх можливостей ГІС. Впровадження таких технологій дозволить інтегрувати, аналізувати, візуалізувати дані про лісові ресурси на

географічній основі. ГІС дозволяє створювати моделі та інтерактивні карти лісових екосистем, проводити геопросторовий аналіз тощо.

4. Використання можливостей штучного інтелекту та машинного навчання. Такі інновації дозволять автоматизувати процеси аналізу географічних даних, оперативно виявляти зміни у лісових екосистемах, якісніше здійснювати класифікацію типів дерев.

5. Створення інтерактивних веб-додатків та мобільних додатків. Розробка таких ресурсів забезпечить широкий доступ користувачів (науковців, лісівників та громадськість загалом) до геоінформаційних карт та інструментів аналізу лісових ресурсів.

В Україні поступово (переважно локально) почали залучати сучасні технології до картографування лісових ресурсів. Таким чином повільними темпами триває перехід від побудов науково-методичної бази лісового господарства радянських зразків до геоінформаційного картографування на сучасний лад. Забезпечення необхідним інформаційним ресурсом усіх користувачів поступово досягається завдяки розробці нових карт лісового господарства, що створюються на основі ГІС-технологій. Науковці активно працюють над залученням нових методів, прийомів та способів ГІС-моделювання, розробляючи чимало проєктів, які могли б стати каркасом для загальнодержавного геоінформаційного картографування лісових ресурсів на усіх рівнях. Наведемо деякі з них.

1. Спроби проведення інвентаризації лісів України опрацьовують різні дослідники, часто залучаючи у свої розробки дані дистанційного зондування Землі. Наприклад, за допомогою k-NN методу класифікації космічних знімків в середовищі R визначають запаси деревних насаджень. Тематичне картографування лісового форду, застосовуючи такий метод, дозволяє виокремити лісотаксаційні показники деревини, аби суцільний масив лісу розділити на ареали поширення певних видів деревостану.

В основі методики обробки даних покладено спеціально розроблений фінськими вченими (E. Tomppo, 1991 р.) непараметричний алгоритм

класифікації космічних знімків, відомий під назвою метод k-найближчих сусідів (k-NN). Завдання k-NN методу полягають у прогнозуванні значень залежної змінної за даними спектрального відгуку каналів космічного знімка. При цьому атрибути цільового об'єкта (пікселя) визначаються як середнє зважене значення спостережень найбільш близьких за спектральною характеристикою референц-пікселів. У результаті кожному пікселю космічного знімка приписується набір атрибутів іншого, встановлених за даними польових досліджень, відстань до якого у n-мірному спектральному просторі є найближчою [11, с. 53-54].

У залежності від вибраного алгоритму, якості підготовленої вибірки при польових дослідженнях та вихідних даних космічного знімка визначають середнє значення запасу насаджень. Метод виокремлює необхідні лісотаксаційні показники практично без систематичної помилки і є перспективним для використання в контексті здійснення статистичної інвентаризації лісового форду України.

2. Дослідження радіаційно-екологічного стану лісів у Чорнобильській зоні відчуження постійно перебуває у полі зору науковців. Одним з ефективних методів дослідження території, яка недоступна для проведення традиційних польових досліджень, є використання даних дистанційного зондування Землі. Одне із досліджень виконувалося із метою дослідити зміну стану лісу до та після серії пожеж у Зоні відчуження ЧАЕС.

Основою для побудови картографічної моделі стану лісів після завершення пожеж у ЧЗВ є часовий ряд космічних знімків у ближній зоні ЧЗВ за період квітень-серпень 2020 р. За результатами дешифрування вдалося виокремити площі вигорілого сухостійного хвойного лісу, площі вигорілого хвойного лісу, що відновився та площі хвойного лісу, який не постраждав.

У період найбільш активної фази пожеж, коли вогонь близько підійшов до розташованих у ЧАЕС радіаційно небезпечних об'єктів, 13 квітня була проведена радіаційна розвідка мобільною оперативною групою. За отриманими даними було зафіксоване перевищення у 18 разів контрольних рівнів об'ємної активності ^{173}Cs у приземному повітрі… У період пожеж, приблизно з 13-14.04

до початку травня, було зафіксовано зростання інтенсивності атмосферних радіоактивних випадінь у порівнянні з допожежним періодом [12, с. 231-232]

Окрім цього дослідникам вдалося за знімками виділити райони виникнення та поширення пожеж, напрямки поширення і площі охоплення димових утворень, обчислити площі згарищ. Результати дослідження вкотре підтвердили, що поєднання матеріалів ДЗЗ із матеріалами наземних досліджень дають достовірну та актуальну моніторингову інформацію про просторово-часові зміни у радіаційно-екологічній ситуації на ЧЗВ.

3. Особливими картами, що відносяться до карт лісових ресурсів, є карти лісових доріг. Такі ГІС необхідні перш за все для ефективного гасіння лісових пожеж, проведення рятувальних операцій та моніторингу стану лісу загалом. Увага до лісотранспортної інфраструктури пов’язана також із поступовим запровадженням в Україні принципів сталого ведення лісового господарства. Терміни та якість виконання всіх лісогосподарських робіт передусім залежать від наявності та стану лісових доріг. Екстремальні події (стрімке поширення шкідників чи хвороб деревостану, спалахи лісових пожеж) вимагають швидкого доступу служб до місць надзвичайної ситуації чи зони лиха. Перш за все для України є актуальними проблеми ефективної організації робіт при гасінні лісових пожеж, яких за кількістю, так і за площею трапляється щороку чимало.

Часто інформація про стан та наявність лісових доріг є недостовірною. Така проблема невідповідності реального технічного стану доріг створює труднощі у прийнятті як управлінських рішень щодо лісозаготівлі, так і унеможливлює транспортне освоєння великих лісових масивів для будівництва автомобільних доріг. Недостовірні дані про лісові дороги обмежують ефективність роботи техніки ДСНС, що використовується при гасінні осередків лісових пожеж.

Для вирішення вищезгаданих проблем працівниками УкрНДІгірліс спільно із науковцями НЛТУ України розроблено дослідні ГІС лісових автодоріг для трьох лісових підприємств Прикарпаття, загальна площа лісів яких становить близько 170 тис. га, а загальна довжина наявних в них лісових доріг

перевищує 500 км. Розроблення ГІС… передбачало застосування сучасних засобів вимірювань та геоінформаційних технологій, що дозволяє забезпечувати систематизацію і подання в електронному вигляді інформації про розташування мережі лісових доріг та технічні характеристики всіх її елементів (дорожнє покриття, мости, труби, броди, зруйновані і підтоплювані місця, пересічення, прилягання тощо) і, звичайно, про їх технічний стан [13, с. 64].

Інфраструктура побудови ГІС лісових доріг проста та максимально приведена до стандартів, що візуалізуються у будь-якому ГІС-середовищі. Лісові автодороги у ГІС подають лінійними об’єктами з відомими координатами. У вигляді таблиць та фото (креслень) додатково відображають достовірні експлуатаційні характеристики кожної дороги. Використана система координат – WGS-84, формат зберігання електронних карт – Шейп-файл (.shp), описи характеристик доріг подані у табличному вигляді та зберігаються окремими файлами у середовищі Excel. Прямими посиланнями у ГІС подаються додаткові дані (описи, фото, технічні характеристики до кожного лінійного об’єкта).

4. Геоінформаційне картографування лісових ресурсів дотично допомагає розвивати й інші галузі знань. Наприклад, дослідницький проєкт із картографування медоносних дерев дозволяє визначити ареали кормової бази бджільництва. Завдяки поєднанню декількох зображень вегетаційного індексу NDVI за певні періоди часу встановлюють місцезнаходження нектаро- та пилконосних дерев. Таким чином серед усього масиву лісу знаходять ділянки, які найбільш придатні для розміщення кочуючих та стаціонарних пасік.

Поєднання індексів за різний період часу дозволяє виокремити ареали медоносних лісових культур: акації, ліщини, дикої яблуні, груші, вишні, тополі, бересту, в’язу, липи, обліпихи, ожини тощо. За даними ДЗЗ можна виділити тільки ті рослини, що ростуть у верхньому ярусі лісу. Створивши еталонні віддешифровані ділянки лісу із точно визначеною породою дерев, проводять дослідження лісового масиву. За еталонними зразками встановлюють необхідні ареали поширення медоносних порід.

Виконано визначення та відображення нектаро- та пилконосних дерев на основі даних дистанційного зондування. Створено тематичні карти типів дерев. Вони мали масштаб 1:100 000 і можуть бути використані як база для планування локалізації кочуючих пасік [14, с. 67].

5. Наприкінці 2021 р. було розпочато роботи із аналізу різноспектральних космічних знімків, які визначають маски лісу для створення цифрової карти лісів. Цей метод ґрунтується на використанні космічних знімків Landsat-7 ETM+ та застосуванні алгоритму mask.gdm. Таким чином створюють нове зображення з спектральними характеристиками лише на лісовкриту територію.

Важливим у дешифруванні даних ДЗЗ є вибір найінформативніших комбінацій каналів. Найкращі результати отримують під час класифікації зображень Landsat, складених з 1-4-5 каналів 15-м просторової розрізненності, покращених мультиплікативним методом [15].

Було проведено дешифрування космічних знімків і згенеровано маску лісів на 16 найбільш заліснених областей – 35 млн га або 59% території України. Це північна, західна та центральна частина країни, для яких згенеровано маски лісів [16].

На основі широкого кола дослідницьких робіт, що присвячені геоінформаційному картографуванню, найближчим часом необхідно буде провести роботи із розробки методики впровадження таких практик не лише на локальних рівнях, але і на загальнодержавному із використанням сучасних методів моделювання та аналізу на основі ГІС. А подальше освоєння та впровадження сучасних технологій дозволить більш ефективно не тільки використовувати, але й зберігати лісові екосистеми.

РОЗДІЛ 2.
ЗМІНИ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ЯК ОБ'ЄКТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ

2.1. Предмет геоінформаційного картографування лісових ресурсів.

Предметом геоінформаційного картографування лісових ресурсів є використання географічної інформації та технологій для збору, аналізу, інтерпретації та візуалізації даних про лісові екосистеми.

Збір географічної інформації передбачає формування масиву даних про лісові ділянки, включаючи їх географічні координати та характеристики (висота, тип та відстань між деревами, особливості ґрунтового покриву). Для отримання таких даних використовують геодезичні прилади, дані дистанційного зондування Землі, матеріали польових досліджень, архівні матеріали тощо.

Аналіз отриманих даних передбачає їх класифікацію та систематизацію. ГІС дозволяють розробляти цифрові моделі лісових екосистем, виявляти кількісні та якісні зміни у лісових масивах, проводити оцінку та моніторинг за молодими посадками, аналізувати межі поширення шкідників чи хвороб деревостану і т. д.

Візуалізація та створення традиційних, інтерактивних, динамічних, цифрових карт лісових покривів. Ці карти можуть використовуватися для прийняття рішень у лісовому господарстві, проведення інвентаризації, планування розсадження дерев та для інших цілей.

І головне – управління лісовими ресурсами. Завдяки геоінформаційному картографуванню здійснюють моніторинг стану лісів, прогнозування розвитку лісових екосистем та економічну оцінку лісових ресурсів.

Тобто предмет геоінформаційного картографування лісових ресурсів полягає у використанні ГІС технологій для здійснення усіх процесів від збору даних до картографування даних про лісові ресурси. Такий шлях є необхідним для розуміння та раціонального використання лісових екосистем.

2.2. Місце карт лісів у системі класифікації географічних карт.

Карти лісів займають важливе місце у системі географічних карт. Їх відносять до тематичних карт, карт природних явищ, а саме до біогеографічних (карт рослинності). Вченими усього світу накопичений величезний досвід у створення карт лісів різного призначення, територіального охоплення, масштабу.

За масштабом виділяють:

− Великомасштабні карти (1:5 000-1:25 000 – детальні; 1:50 000-1:200 000 – узагальнені великомасштабні) їх укладають із прикладною та науковою метою.

− Середньомасштабні карти (1:300 000-1:1 000 000) створюються на окремі області або природні регіони.

− Дрібномасштабні карти (1:500 000-1:4 000 000 – формаційні, 1:5 000 000 і дрібніше – оглядові) для зображення поширення лісів на планеті, материках чи країнах.

За ступенем інтеграції інформації (аналітичні, синтетичні, комплексні);

За способом представлення інформації (паперові, електронні);

За періодичністю створення (довго часові та оперативні);

За форматом (стінні, настільні, книжкового формату, мініатюрні);

За практичною направленістю (інвентаризаційні, оцінні, рекомендаційні, прогнозні);

За можливостями візуалізації (електронні, цифрові, інтерактивні, динамічні);

За призначенням (навчальні, науково-довідкові; карти для управління лісовими ресурсами, для визначення потенціалу для лісового господарства, моніторингу зміни у лісах, вивчення екосистем).

Окрім цього на картах лісів можна подавати різні типи інформації про лісові ресурси, такі як типи лісів, поширення різних видів тварин та рослин, стан лісу, лісовий покрив та густоту лісу, тип ґрунту тощо.

Карти лісів можуть використовуватися окремо або входити до складу атласів, серій карт.

2.3. Особливості картографування лісового покриву України

Картографування лісів України має свої особливості, пов’язані з географічними, кліматичними, геоморфологічними, гідрологічними особливостями країни. Основні із них:

− Різноманітність лісового покриву. Загальна площа лісів досягає 9,4 млн га, а лісистість території України становить 15,6%. Найбільша лісистість в Українських Карпах (39%), Кримських горах (близько 36%), у зоні мішаних лісів (26%). Середня лісистість лісостепової зони – 13%. У степовій зоні ліси займають близько 5%. У лісах України налічується до 200 деревних порід та чагарників. Основні породи – сосна, ялина, смерека, модрина, бук, дуб, граб, береза, липа, клен, ясен, тополя, вільха [17, с. 170].

− Складна ієрархічна структура (ярусність лісу, просторова та морфологічна структура, функціональна структура).

− Схильність до часових змін різної тривалості (сезонні, річні, столітні зміни). Вони можуть мати зворотній або незворотній характер прояву.

− Антропогенний вплив. Лісовий покрив піддається впливу агресивної людської діяльності, включаючи вирубки лісу, лісові пожежі та інше. Картографування лісового покриву перш за все повинно фіксувати та відображати ці антропогенні впливи та їхні наслідки для лісових екосистем.

− Наявність лісів у зоні радіоактивного забруднення. Така особливість вимагає перш за все уваги до картографування лісів у цій зоні, з метою відстеження їх цілісності, моніторингу пожеж та показників радіоактивного забруднення.

Геоінформаційне картографування лісів здійснюють, враховуючи ці особливості, для створення точних, інформативних, актуальних карт лісового покриву.

2.4. Методологічні особливості створення карт лісових ресурсів засобами геоінформаційного картографування.

При здійсненні геоінформаційного картографування лісових ресурсів важливо правильно провести збір географічних даних, які стосуються лісів. Завдяки відкритості доступу до архівів численних супутникових знімків, дані ДЗЗ часто залучають до досліджень лісового покриву. На цьому етапі проводять підбір знімків за часом зйомки, за роздільною, спектральною, просторовою здатністю та за відсотком хмарності.

− Часова розрізненність. На основі часових серій супутникових знімків, отриманих протягом одного календарного року або тривалішого періоду, можна вирішувати різні задачі тематичної класифікації. Так, річна серія знімків інформує про фенологічні зміни рослинного покриву чи сезонний стан поверхні різних об'єктів впродовж року, а багаторічна – відображає усереднену тривалу динаміку їхнього спектра та найістотніші зміни [18, с.28].

− Просторова розрізненність. У залежності від масштабу карти, що створюється, просторова розрізненість для знімка може бути обрана як висока (Sentinel-2), середня (Landsat-7) , низька (MODIS, Landsat-4, 5)

− Спектральна розрізненність – це ширина спектрального каналу, до якого чутливий датчик. Вона характеризує здатність системи ДЗЗ розрізняти певні інтервали довжин хвиль. При оцінці спектральної розрізненності розглядають дві характеристики: кількість діапазонів (каналів) та ширина кожного з них [19, с. 206]. Для застосування вегетаційних індексів та індексних зображень в цілому, перш за все орієнтуються на канали знімка та їх характеристики.

− Відсоток хмарності. Цей показник має становити не більше 20-30%. Хмарність є великою перешкодою та заважає зніманню. Якщо показник хмарності буде високий, то інформативність знімка буде значно меншою, ніж це допускається у дослідженні.

− Пропуск даних та перешкоди. Актуальними є проблеми втрати даних через технічні перешкоди, хмарність чи пропуск даних у місцях стику сусідніх

знімків. Задля усунення таких обмежень створено алгоритми попіксельного аналізу серій супутникових знімків. Таким чином заміщують непридатні для використання пікселі «найкращими із доступних», відповідно до сезону зйомки, стану земної поверхні чи хмарності тощо.

Особливості обробки даних для геоінформаційного картографування лісів передбачають виокремлення лісовкритих ділянок, проведення автоматизованої класифікації з навчанням чи без нього.

Використання «лісових масок». Відправним пунктом дешифрування лісових насаджень є створення так званої «лісової маски», яку отримують внаслідок відокремлення вкритих та невкритих лісовою рослинністю ділянок [20, с. 38]. Результати доводять, що використання лісових масок має найбільшу точність на лісових масивах Полісся та Лісостепу, а також у гірській місцевості. Для степових областей, де лісовий фонд складається переважно із захисних лісових насаджень лінійного типу, цей спосіб не застосовують, через невисоку просторову розрізненність знімків Landsat, а також через часті помилки у дешифруванні лісосмуг як повноцінного лісу.

У зв’язку з великою кількістю показників… виконують оптимізацію навчальної вибірки. Для цього за допомогою алгоритму машинного навчання Random Forest (RF) змінні впорядковують в залежності від їхнього внеску в загальну точність класифікації [21, с. 52]. Алгоритм послідовно виключає кожну наступну за рангом змінну, починаючи від 2 найважливіших (географічна довгота та NDVI), і завершується, коли усі показники виключено до моделі. Для поодиноких знімків часто використовують класифікації із застосуванням еталонних вибірок (наприклад, за методом максимальної вірогідності).

Для отримання нових зображень, які дають змогу ефективніше ідентифікувати різні стани рослинності, часто використовують вегетаційні індекси [22, с. 30]. Вони допомагають виявляти такі особливості зображення, які майже неможливо інтерпретувати навіть на синтезованих знімках.

Проблема вибору програмного забезпечення. Реалізація усіх процесів лише на персональному комп’ютері – практично нездійсненна задача через

величезні масиви інформації, особливо при великомасштабному картографуванні лісових ресурсів. Тому залучення «хмарних» технологій є простим та найбільш ефективним способом організації таких робіт. Алгорим обробки знімків з самого початку проводять на платформі Google Earth Engine (GEE), а розрахунки виконують віддалено у «хмарному» кластері Google.

Загалом, методологічні особливості проведення робіт із створення карт лісового фонду є більш технічного характеру. Але дотримуючись їх, створюють найбільш інформативні та достовірні карти лісових ресурсів.

РОЗДІЛ 3.
ДАНІ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЯК ІНФОРМАЦІЙНА ОСНОВА ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ

3.1. Особливості даних дистанційного зондування для геоінформаційного картографування

Дистанційні методи зондування є багатоплановими дослідженнями Землі й навколоземного простору, які виконуються за матеріалами наземного, повітряного та космічного знімання [19, с. 52]. За результатами проведення ДЗЗ отримують знімки у аналоговому (фотографії) та цифровому (дані записані на магнітних носіях чи передані на приймальні станції) форматі. Аналогові знімки обробляють, застосовуючи традиційні методи, а цифрові знімки – візуалізують на екрані монітора для подальшої роботи.

Для підвищення якості знімка як джерела інформації проводять його коригування. Виділяють радіометричне, атмосферне, топографічне та геометричне коригування:

− Радіометричне коригування здійснюють для відновлення «пошкоджених» пікселів. Найкраще себе зарекомендували методи інтерполяції чи екстраполяції яскравостей сусідніх пікселів або їх комбінації.

− Атмосферне коригування. Невід’ємний вплив атмосфери Землі на проведення знімання мінімізують із використанням спеціальних алгоритмів. Віднімання темних пікселів, дослідження лінійних регресій чи моделювання впливу атмосфери – одні з багатьох способів зменшити атмосферне спотворення знімка.

− Топографічне коригування проводиться для виправлення спотворень, що спричиняє рельєф місцевості.

− Геометричне коригування застосовують, аби уникнути розходження фактичних координат елементів на зображенні та їх ідеальними координатами, які б фіксували датчики за ідеальних умов. Таке коригування більше стосується космічних знімків, при створення яких кривизна поверхні та обертання Землі, нерівності рельєфу і рух самого космічного апарату є основними причинами геометричного спотворення знімків.

Особливостями космічних знімків є їх цілісність, екстериторіальність, регулярність, оглядовість, масштабованість, оперативність, об'єктивність, значна генералізація. Доступність знімків дозволяє залучати їх до створення різноманітних карт, а наявність часових серій знімків є невід'ємним компонентом при аналізі багаторічних, річних, сезонних та добових змін об'єкту дослідженння.

Різноманітні програмні продукти (Google Earth, SASPlanet), веб-джерела (EarthExplorer, CopernicusOpenAccessHub, LandViewer та інші) надають безкоштовний доступ до своїх архіві знімків [23, с. 102]. Дані ДЗЗ доступні на різних платформах з широким набором інструментів для роботи. Сучасні алгоритми автоматизованого аналізу даних дозволяють оброблять величезні масиви інформації, сортувати та класифікувати її за вказаними параметрами. Знімки часто створюють у стандартних форматах (для векторної графіки: IGES, DXB, DXF; для растрової графіки: PCX, JPEG, TIFF; для обміну та передачі даних: BIL, BIP, BSQ).

Завдяки використанню супутникових знімків стало можливим здешевити та пришвидшити виконання досліджень. Як відомо, що проведення повноцінних польових робіт вимагає чималих фінансових вкладень, витрати часу та залучення спеціалістів. Завдяки космічним знімкам місцевості стало можливим скоротити такі витрати, не втрачаючи при цьому якості проведення досліджень [23, с. 103].

Тому, дані ДЗЗ часто є незамінною основою для проведення робіт з геоінформаційного картографування лісових екосистем.

3.2. Генералізація та класифікація даних дистанційного зондування для картографування лісових ресурсів

Картографічна генералізація – це процес відбору основного, суттєвого та його цілеспрямованого узагальнення відповідно до обраної тематики, призначення та масштабу карти. Методика генералізації інформації при дешифруванні даних ДЗЗ базується в цілому на методиці картографічної генералізації.

Особливості генералізації при переході від знімка до карти пов’язані із різницею між фотозображенням і його графічним аналогом. Багато деталей фотознімка подаються надто детально або мають дрібний чи заплутаний рисунок. Тому при генералізації знімків постає завдання як зберегти природний рисунок, так і забезпечити достатню достовірність та інформативність зображення.

Відбір об’єктів, показників та характеристик для карт лісового господарства регламентується інструкціями. Розміри об’єктів, які наносяться на карту визначені цензами та нормативами залежно від гранично допустимого навантаження на карту. Цензами відбору є визначені мінімальні розміри об’єктів або найвищі категорії об’єктів, що показуються без відбору. Нормами відбору встановлюють допустиму кількість зображених об’єктів з усіх наявних на одиницю площі карти.

Однією із основних особливостей генералізації при переході від знімка до картографічного зображення є узагальнення окремих елементів та подання їх сполучення. Вибір сполучень має ґрунтуватися на принципах відображення домінуючих об’єктів, які формують типовий облік місцевості.

Узагальнення меж здійснюють таким чином, аби зберегти географічну подібність до природнього рисунка. Основний спосіб узагальнення – це спрощення абрису, об’єднання дрібних звивин або перебільшення їх розмірів з урахуванням генетичної подібності об’єктів.

Класифікація – це автоматизований поділ усіх пікселів знімка на групи, які відповідають різним об’єктам, в основному за спектральними ознаками [19, с. 301], тобто за значеннями спектральної яскравості кожного пікселя.

Класифікацію поділяють за розподілом значень яскравості на параметричну та непараметричну.

− Непараметрична класифікація передбачає поділ значень за класами, але без врахування розподілу значень яскравості у середині самих класів. З одного боку, непараметрична класифікація проста і призначена для розподілу 2-4 контрастних об’єктів за яскравістю по класам, а з іншого – застосовується у складних випадках, коли класи внутрішньо неоднорідні та неможливо застосувати параметричні способи.

− Параметрична класифікація складніша, адже розподіл значень спектральної яскравості всередині кожного з класів підпорядковується певному закону. Нормальний (або гауссовий) розподіл застосовують для симетричного розподілі значень яскравостей навколо визначеного середнього значення для кожного класу. Зі збільшенням кількості параметрів такої класифікації покращується розподіл пікселів за класами, які мають близькі значення яскравості, але пропорційно виконання таких операцій займає більше машинного часу.

Класифікацію за характером реалізації поділяють на контрольовану та неконтрольовану.

− Контрольована (класифікація з навчанням) передбачає віднесення кожного пікселя на знімку до визначеного класу об’єктів на місцевості. Такий вид класифікації обов’язково передбачає формування навчальної вибірки, тобто визначення еталонних ділянок (фрагментів зображення), об’єкти яких можна однозначно віднести до певного класу. Результати контрольованої класифікації сильно залежать від якості навчальної вибірки, адже у процесі класифікації значення яскравості кожного пікселя порівнюють із еталонним для віднесення його до певного класу. Карти, що створюються за таким принципом, мають наперед визначену легенду. Найбільш доцільно проводити картографування за

допомогою класифікації з навчанням, коли передбачено невелику кількість класів (до 30), а знімок має високу просторову розрізненність.

− Неконтрольована (класифікація без навчання) виконується після автоматичного поділу пікселів на групи. Дешифрувальник визначає кількість класів та їх відмінності між собою за значеннями яскравості. Якщо застосовується алгоритм швидкого виділення класів, то аналіз пікселів здійснюється по рядках. За значеннями граничної відстані від пікселя до центра кластера, відбувається порівняння відстані від цього центра до центра наступного пікселя в рядку та порівнюється з обраною пороговою величиною. Якщо виконується алгоритм послідовної кластеризації, то у цьому випадку задається кількість кластерів та значення їх центрів або число ітерацій. Карти отримані методом класифікації без навчання часто виконуються у два етапи: на першому застосовують алгоритм швидкого виділення класів, а на другому – ітераційний алгоритм послідовної класифікації.

Застосування генералізації та класифікації даних ДЗЗ для картографування лісових ресурсів дозволяє отримати детальну інформацію про лісові екосистеми, їх стан та розподіл.

3.3. Види даних дистанційного зондування для геоінформаційного картографування лісового покриву

Для здійснення геоінформаційного картографування лісового покриву застосовують такі дані ДЗЗ:

− Спектральні індексні зображення;

− Різноманітні комбінації каналів (композитні мозаїки);

− Глобальні цифрові карти світу на лісовкриті території тощо.

Характерною ознакою рослинності є її спектральна відбивна здатність. Існує чіткий зв’язок між структурою і станом рослинності з її спектральною відбивною здатністю. Цю особливість використовують при геоінформаційному картографуванні типів рослинності за матеріалами ДЗЗ і для відображення та

ідентифікації типів рослинності та її біологічної продуктивності створюють так звані «індексні» зображення.

Спектральні індекси – це показники, що характеризують співвідношення відбиття електромагнітного випромінювання в різних каналах супутникової зйомки [24, с. 176]. Спектральні індекси, які використовуються для вивчення та оцінки стану рослинності, отримали назву вегетаційних індексів (BI) [25, с. 13]. Було створено спеціальну базу даних – Index DateBase [26], що систематизує інформацію про усі відомі спектральні індекси (519 індексів, 167 супутникових сенсорів та 43 напрями застосування індексів).

Основні ознаки, які використовують під час дешифрування рослинності на космічних знімках – це тон зображення та яскравість [27, с. 63]. Перетворення спектральних каналів використовують, аби виокремити та дослідити конкретний об'єкт, тобто відсіяти зайву та підкреслити необхідну інформацію.

Для геоінформаційного картографування лісових ресурсів найчастіше застосовують такі вегетаційні індекси:

1. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормалізований диференційний індекс рослинності, який обчислюють за формулою (3.1):

$$NDVI = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \tag{3.1}$$

де NIR – ділянка ближнього інфрачервоного діапазону з довжинами хвиль 0,75-1,3 мкм (зона спектра з максимальним відбиттям енергії листям);

RED – ділянка червоного діапазону з довжинами хвиль 0,62-0,75 мкм (зона спектра з максимальним поглинанням сонячної радіації).

NDVI часто використовується у сільському та лісовому господарствах. Індекс ефективний для кількісної оцінки зеленої рослинності, дозволяє відстежувати позитивні та негативні зміни у розвитку рослин. У лісовому господарстві NDVI використовують для кількісної оцінки запасів лісу, індексу площі листя, виявлення місць вирубки лісів (при порівнянні різночасових знімків).

2. NDWI (Normalized Differrence Water Index) – нормалізований диференційний індекс вологості, який обчислюють за формулою (3.2):

$$NDWI = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}}, \quad (3.2)$$

де NIR, GREEN – ділянки діапазонів спектра.

Індекс найчастіше використовується для дослідження водних об'єктів. Дані NDWI також застосовують у лісовому господарстві. У разі пошкодження лісової рослинності часто відбувається її повна загибель, рослина в'яне, а отже втрачає вологу. Тому аби виявляти осередки такої рослинності, застосовують індекс NDWI, який чутливий до зміни вмісту води у рослин.

3. EVI (Enhanced Vegetation Index) – розширений індекс рослинності, який розраховують за формулою (3.3):

$$EVI = 2{,}5 * \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{1 + \text{NIR} + 6 * \text{RED} - 7{,}5 * \text{BLUE}}, \quad (3.3)$$

де NIR, RED, BLUE – ділянки діапазонів спектра.

Значення індексу коливаються від -1 до +1, тоді як для здорової рослинності становлять 0,2-0,8. Індекс допомагає виявити більше градацій лісового покриву, порівняно із застосуванням NDVI, завдяки мінімізації впливу підстильної поверхні та атмосфери. Тому EVI є одним з основних індексів, що застосовують для моніторингу лісів.

4. SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) – ґрунтовий вегетаційний індекс, що визначають за формулою (3.4):

$$SAVI = \frac{(\text{NIR} - \text{RED})(1 + \text{L})}{(\text{NIR} + \text{RED} + \text{L})}, \quad (3.4)$$

де NIR, RED – ділянки діапазонів спектра;

L – коефіцієнт, значення якого варіюють від 0 до 1 (L=0 – багато листя, L=1 – мінімальна кількість листя, тому L=0,5 – оптимальне значення).

Індекс застосовується з метою мінімізації впливу ґрунту для дослідження рослинності. SAVI майже нечутливий до малої кількості рослинності, тому часто використовується при дослідженнях великих масивів лісу.

5. NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index) – нормалізований диференційний індекс хлорофілу. NDCI використовується для прогнозування вмісту хлорофілу в рослинності. Часто індекс застосовують до різночасових

знімків, аби прослідковувати збільшення чи зменшення вмісту цього пігменту у клітинах рослин.

6. PSRI (Plant Senescence Reflectance Index) – індекс відбиття старіння рослин. У сухих та пошкоджених насадженнях збільшується кількість огрубілого вуглецю, який можна вирахувати індексом PSRI [22, с. 36]. Значення коливаються від -1 до 1, але для зеленої рослинності оптимальний показник –від -0,1 до 0,2. Індекс використовують для загального оцінювання сухої та мертвої рослинності.

7. DMCI (Dry Matter Content Index) – індекс сухості. Якщо лісова рослинність пошкоджена, то відбувається порушення водного балансу і утворення сухих ділянок. Індекс сухості використовують, щоб визначати стресовий стан рослинності.

8. FLII (Forest Landscape Integrity Index) – індекс цілісності лісового ландшафту. Індекс допомагає відслідковувати втрати лісового покриву внаслідок людської діяльності. За шкалою від 0 до 10 оцінюється цілісність лісового покриву, що допомагає визначити ділянки, які порушені та не порушені господарською діяльністю людини.

Синтез каналів – це об’єднання каналів супутникового знімка в одне кольорове зображення [24, с. 88]. Багатозональні зображення при синтезі не завжди відтворюються у реальних кольорах, оскільки спектральні канали не завжди відповідають довжинам хвиль, які в ходять у кольорову гаму [1, с. 216].

Використання комбінацій різних каналів дозволяє отримувати результати, не гірші за якістю, ні ніж при застосуванні спектральних індексів. Наприклад, при необхідності відстежити об’єкти, що мають різкий контраст із навколишнім середовищем у певному вузькому діапазоні, застосовують зображення виконані у одному спектрі. Такі зображення часто називають спектральними.

Комбінування каналів між собою дозволяє побачити явища чи властивості об’єктів, як помітити одразу неозброєним оком практично неможливо. Наприклад, зображення лісу, водних об’єктів та дороги на знімку Sentinel-2 (Рис. 3.5).

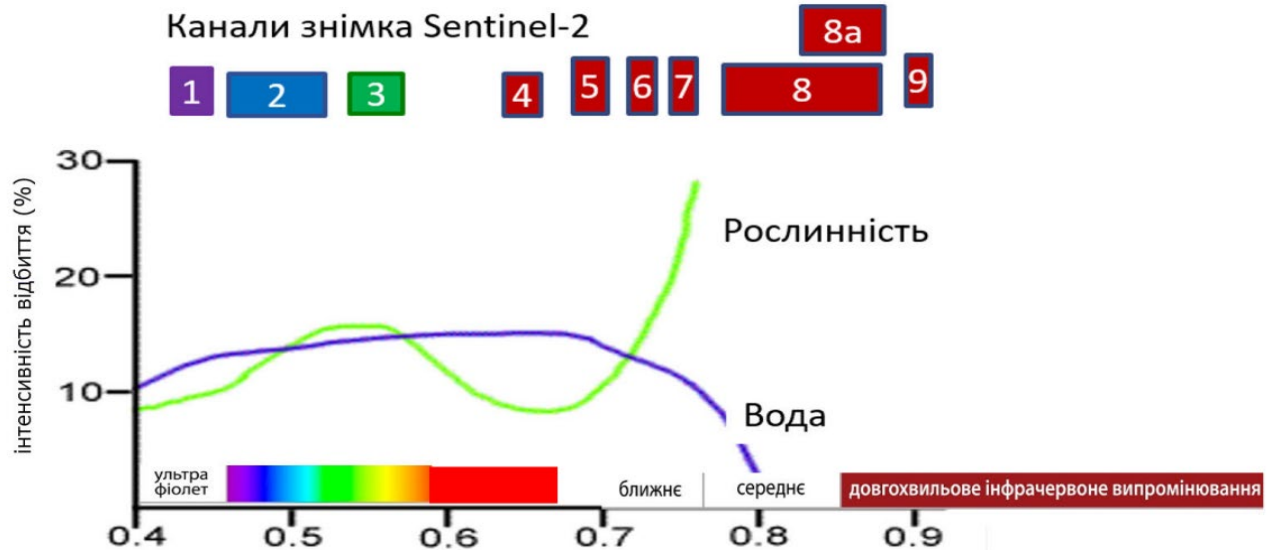

Рис. 3.5. Схема каналів Sentinel-2 із спектральними кривими води та рослинності [24, с. 89]

Зважаючи на спектральні криві води та рослинності, можна спрогнозувати, що застосовуючи червоний канал (B04), зручно дешифрувати рослинність та водну поверхню, адже рослинність буде темного кольору (градації кольору змінюються від чорного до білого), а водна поверхня – світлого; подібна ситуація із інфрачервоним (B08) каналом, але кольори відображатимуться навпаки: ліс буде світлим, бо інтенсивність відбиття рослинності у цій зоні спектру висока, а водна поверхня – темною.

Синтез каналів супутника між собою досягається так: із усіх наявних чорно-білих зображень (різних каналів) обирають будь-які три і відображають їх синім, зеленим та червоними тоном. Уся гама кольорів формується за рахунок злиття їх між собою. Наприклад, аби відобразити знімок у «природних кольорах», які є найбільш звичними для людського ока, обирають три канали супутника, які реєструють електромагнітне випромінювання відповідно у червоному, зеленому та синьому діапазонах спектра.

Для геоінформаційного картографування лісових ресурсів часто застосовують наступні комбінації каналів (на прикладі супутника Landsat 8):

1. «Природні кольори» B04, B03, B02 – зображення кольорово наближене до реального сприйняття світу людиною: зелена рослинність здорова, а коричнева та жовта – нездорова, сірі дороги, білі берегові лінії. Добре читаються

великі масиви рослинності, а місця вирубок чи розрідженої рослинності розрізняються важко.

2. «Штучні кольори» B05, B04, B03 – уся рослинність подається у відтінках червоного, що перш за все є індикатором здорової і (або) широколистяної рослинності. Різні відтінки коричневого відображають ґрунти. Така комбінація популярна для здійснення моніторингу рослинного покриву, його стану, а також для вивчення агрокультур.

3. B07, B05, B03 – близьке зображення до природнього кольору. Яскраво-зелена здорова рослинність, коричневі та оранжеві тони характерні для розрідженої рослинності, а сухостійної – помаранчеві. Цю комбінацію часто використовують при вивченні динаміки пожеж і постпожежному аналізі території, адже згорілі території відображатимуться яскраво-червоними кольорами.

4. B05, B06, B02 – відтінками червоного, коричневого та зеленого відображається здорова рослинність, а ґрунти можуть бути зелені або коричневі. Яскраво-блакитний колір допомагає розрізнити вирубані території, а червонуватий – розріджену рослинність. Завдяки додаванню середнього інфрачервоного каналу досягається добре розрізнення віку рослинності.

5. B05, B06, B04 – чітко розрізняється межа між водною поверхнею та сушею. Різні тони від коричневого до зеленого та оранжевого відображають рослинність. Синтез таких каналів дозволяє визначати вологість ґрунту та у рослинному покриві: чим вища вологість, тим темніший колір.

6. B07, B06, B04 – зображення створюється подібне до природніх кольорів. Зеленувата рослинність, білі урбанізовані території, чіткі лінії гідрографічних об’єктів. Одне із застосувань комбінації – моніторинг пожеж, де такі ділянки відображаються червоними або жовтими кольорами.

7. B06, B05, B04 – яскраво-зелена здорова рослинність, рожевий ґрунт. Завдяки колірному контрасту така комбінація використовується для вивчення рослинного покриву та аналізу стану лісових угрупувань.

8. B07, B06, B05 – чіткі берегові лінії гідрографії, різними відтінками сірого, пісочного та коричневого зображається ґрунт, а рослинність – зеленими та блакитними кольорами. Комбінація використовується для аналізу текстури та вологості ґрунтів.

Останнім часом зростає попит на використання різноманітних багатоканальних, гіперспектральних, багатоцільових датчиків. Комбінуючи такі дані між собою можна отримувати набагато якісніші зображення. Такі комбінації схожі на синергізм знімків, коли із двох зображень різної якості формують об'єднане зображення з найкращими характеристиками.

Для картографування лісового фонду часто створюють композитні мозаїки із кількох синтезованих знімків з комбінаціями різних каналів.

Додаток Esri Landsat Explorer створений для відображення супутникових знімків на територію усієї планети. Програма призначена для візуалізації різних комбінацій каналів для досліджень у сферах геології, екології, сільського і лісового господарства тощо. Архів знімків значний – це усі матеріали за останні 40 років [28].

Глобальні цифрові карти світу (від англ. «global land cover products») – це одні з найважливіших джерел базової наземної інформації для широкого кола користувачів та напрямків застосувань. На основі супутникових знімків такі цифрові карти розробляються вже майже три десятиліття. Інформація щодо переліку глобальних цифрових карт світу наведена в табл. 3.1.

З останні роки збільшилася кількість глобальних баз даних та розроблено нові, більш комплексні алгоритми для класифікації земельного покриву [29, с. 94].

На основі порівняння даних із різних глобальних цифрових карт, створюють цифрову карту лісів України. Накладаючи шари інформації про ліс з кількох джерел, визначають ділянки, де ліс є з високою (дані глобальних карт збігаються), середньою та малою ймовірністю. Отримані результати порівнюють із даними обліку лісових земель по областях. Головною проблемою такого підходу залишається не висока точність та різні легенди карт, що є основою для

порівняння даних. Наприклад, лісові масиви найкраще ідентифікують у зоні мішаних лісів, Карпатах, Криму, лісостепу, а найгірше – у степовій зоні. Тобто за допомогою глобальних цифрових карт можна точно визначити лише 50% території лісів України. Невеликі лісові ділянки дуже важко ідентифікувати, тому для степової зони можна визначити лише 11% території лісів.

Таблиця 3.1

Назва	**Просторова розрізненність**	**Період створення**	**Сенсор**	**Розробник**
GLCC 2.0	1 км	1992-1993	AVHRR	USGS, UNL
ISLSCP II	0.25°, 0.5°, 1°	1992-1993	AVHRR	ORNL-DAAC
MODIS Land Cover	500 м	щорічно з 2001	MODIS	NASA
UMD	1 км	1992-1993	AVHRR	UMD
GLC-2000	1 км	1999-2000	SPOT4	JRC
GlobCover 2005, 2009	300м	2004-2006, 2009	MERIS FR	ESA
GLCNMO V1, V2, V3	1 км, 500 м	2003, 2008	MODIS	ISCGM
GLC SHARE	1 км	Різний	MODIS, MERIS FR та ін.	FAO UN
GeoWiki (Hybrid 1, Hybrid 2)	300 м	з 2010	SPOT4, MODIS, MERIS FR	GeoWiki

Тобто залучаючи різні дані ДЗЗ та підходи до створення карт, створюють детальні та точні карти лісового покриву та отримують широкий спектр інформації про лісові екосистеми і їх характеристики.

3.4. Можливості використання даних дистанційного зондування для картографування лісових ресурсів.

Геоінформаційне картографування лісових ресурсів проводять із метою моніторингу та обліку площ лісу. Технології ДЗЗ поступово залучають до

процесу створення таких карт на регулярній основі як на місцевому, так і національному рівнях. Основні можливості включають:

1. Картографування різних типів лісів. Дані ДЗЗ допомагають ідентифікувати різні типи лісів та основі їх спектральних характеристик. За мультиспектральними або гіперспектральними знімками розпізнають великі масиви рослинності з підрахунком їх площ та визначенням типів лісу: листяний, хвойний, мішаний.

2. Визначення санітарного стану лісового покриву. За космічними знімками виявляють зміни стану та росту лісів. Аналізуючи спектральні знімки виявляють ознаки пошкоджень, хвороб чи стресу у рослинності. Це допомагає вчасно вжити заходи та виявити зберегти лісові ресурси.

3. Визначення площі та розподілу лісового покриву. Картографування передбачає контроль за вирощуванням цінних порід лісу, збір та облік зелених насаджень для міст та передмість з точністю до одного дерева. Окрім цього передбачається ведення баз даних екологічного спрямування (наприклад, «Карта найстаріших дерев України» [30] з вказанням їх характеристик, історичного значення, а для деяких – часу вирубки чи загибелі дерева).

4. Вимірювання параметрів лісових ресурсів: висота, щільність дерев, обсяг деревини тощо. Використання зокрема лідарних даних дозволяє отримати точні виміри та характеристики лісових ресурсів для розробки стратегій управління лісами та їх експлуатації.

5. Моніторинг змін. За оновленими на регулярній основі даними прогнозують приріст або зменшення лісових насаджень під впливом природних умов чи катаклізмів. Важливим завданням моніторингу є також контроль за вирубками та посадками лісу, виявленням місць незаконних вирубок (із подальшим підрахунком таких площ та прогнозуванням збитків). Дані ДЗЗ використовуються при визначенні осередків пожеж, причин їх виникнення та наслідків для екосистеми.

Можливості, отримані від застосування даних ДЗЗ, є потужним інструментом для картографування лісових ресурсів та дозволяють отримати детальну і об’єктивну інформацію про лісові екосистеми та їх стан.

РОЗДІЛ 4.
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ У ГЕОІНФОРМАЦІЙНОМУ КАРТОГРАФУВАННІ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ.

4.1. Авторське бачення сучасних практичних можливостей геоінформаційного картографування лісових ресурсів на основі ДЗЗ

Сучасні практичні можливості геоінформаційного картографування лісових ресурсів із повноцінним залученням ГІС та даних ДЗЗ дуже широкі та дають значний простір для дослідження та аналізу лісових екосистем. Основними з них є:

1. Здійснення ґрунтовної класифікації лісового покриву. Можна цілком стверджувати, що використання індексних зображень робить процес інвентаризації швидшим, доступнішим, дешевшим та якіснішим, а ніж традиційні польові дослідження, які є дорого вартісними та тривалими за часом. Однотипні класифікації лісового покриву є найбільш якісними та простими у зоні мішаних, широколистих лісів, у Карпатах та Криму. До того ж використання алгоритмів машинного навчання дозволяє швидко розпізнавати різні типи рослинного покриву: хвойні та листяні породи лісу, а також визначати рівень регенерації лісових угідь або виявити ділянки з ознаками хвороб чи пошкоджень деревостану.

2. Моніторинг змін у лісовому покриві. За допомогою серій супутникових знімків виявляють зміни у розподілі лісового покриву, знаходять місця рубок, лісопосадок, зміни в розмірі лісових масивів, зокрема спричинені господарською діяльністю людини. Останнім часом науковці фіксують, що через глобальні зміни клімату, підвищення температури та через зменшення кількості опадів у лісах побільшало шкідників. Наприклад популяція короїдів у хвойних лісах за останні 4 роки зросла у 7 разів, тому моніторинг за ураженими цими шкідниками деревами є вкрай важливим. Зважаючи на високий ступінь оперативності

моніторингу на великих площах охоплення, практичні можливості даних ДЗЗ у поєднанні з ГІС є незамінним помічником у геоінформаційному картографуванні.

3. Визначення біомаси та структури лісу. За супутниковими знімками можна визначати біомасу лісу, тобто кількість живої органічної речовини у ньому. Опрацьовані методики використання даних ДЗЗ дозволяють ідентифікувати не лише пошкоджену та здорову рослинність, але й рослинність, що належить до 2, 3 та 4 категорій. Таким чином можна здійснювати своєчасне вирубування таких дерев, аби з одного боку, зберегти здоровий ліс від шкідників, а з іншого – отримати деревину, яка ще придатна для використання у деревообробній галузі.

4. Оцінка екологічного стану лісу. Завдяки таким особливостям космічних знімків, як цілісність, об’єктивність та комплексне подання усіх частин геосфери, досліджують не лише лісовий покрив, але й невід’ємні складники екосистеми лісу: ґрунти, поверхневі та підземні води, радіаційний баланс, стан атмосферного повітря. Таким чином, визначаючи екологічний стан лісу, виявляють та попереджають потенційні проблеми, як деградація, ерозія, забруднення водних джерел тощо.

5. Планування управління лісовими ресурсами. Геоінформаційне картографування лісових ресурсів на основі даних ДЗЗ дозволяє збирати та обробляти усі необхідні дані про лісові ресурси та їх характеристики. Розроблені на їх основі плани управління лісовими ресурсами можуть бути використані для грамотного планування лісових робіт, включаючи збереження біорізноманіття, відновлення лісу та інші заходи.

І це лише неповний перелік можливостей, що надає геоінформаційне картографування лісових ресурсів на основі ДЗЗ. А зважаючи на постійне зростання доступності та підвищення якості даних ДЗЗ, відкриваються нові можливості для використання цих даних та технологій у дослідженні, управлінні та охороні лісових екосистем.

4.2. Програмні продукти для геоінформаційного картографування лісових ресурсів на основі ДЗЗ

Існує кілька програмних продуктів, які використовують для геоінформаційного картографування лісових ресурсів на основі даних ДЗЗ. Найпопулярнішими серед них є Google Earth Engine, ArcGIS та QGIS.

Google Earth Engine (GEE) – потужне програмне забезпечення для аналізу та обробки даних ДЗЗ, доступне із 2009 року. GEE надає доступ до численного каталогу супутникових зображень і наборів геопросторових даних планетарного масштабу. За допомогою інтерфейсу прикладного програмування (API) користувач створює сценарії обробки даних на мовах програмуванням Python та JavaScript.

Загальнодоступний каталог даних Earth Engine (Earth Engine Data Catalog) містить великий архів геопросторових даних, основною частиною яких є космічні знімки: повна колекція місії Landsat, дані європейських супутників Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-5P з різними рівнями обробки. Каталог оновлюється зі швидкістю 6000 сцен на день для активних місій ДЗЗ. Окрім доступних даних, платформа дозволяє завантажувати власні карти, космічні зображення тощо.

Користувачі створюють запити до GEE, використовуючи функції, отримані із бібліотеки API. Функцій налічується понад 1500, що варіюються за складністю: від простих математичних до машинного навчання та потужних геостатистичних інструментів обробки зображень [31]. Спочатку космічні знімки нарізають на тайли у вихідній проєкції та просторовій розрізненності, далі – зберігають у спеціальній тайловій базі даних. Стандартний розмір тайла 256×256 пікселей, але у процесі обчислень програма підтягує тільки окремі тайли, що значно економить ресурси системи.

У 2018 році Google запустив новий API Earth Engine Apps для проектування інтерактивних інтерфейсів. Тобто, готовий код можна обернути в графічний додаток з простими елементами інтерфейсу, який потім можуть використовувати звичайні користувачі, не взаємодіючи з кодом безпосередньо

[31]. Такі додатки доступні за URL-адресою, створеною під час публікації програми, а також для використання додатку користувачу не потрібно мати обліковий запис у GEE.

Для виконання цієї роботи основним програмним продуктом було обрано саме GEE, адже унікальність та масштаби хмарної платформи поки не мають рівносильних конкурентів у сфері обробки та аналізу супутникових даних.

ArcGIS – інтегрований набір програмних продуктів ГІС для розробки повнофункціональної ГІС [32]. Платформа дозволяє збирати, організовувати, аналізувати, розподіляти та візуалізувати географічну інформацію. Система включає програмне забезпечення, інтерактивну хмарну інфраструктуру, професійні інструменти, ресурси, які можна налаштовувати самостійно (шаблони веб-додатків, мобільних додатків тощо). ArcGIS як інфраструктуру для створення карт використовують у роботі тисячі організацій для забезпечення потреб різних сфер діяльності людини. ArcGIS містить сотні аналітичних інструментів та операцій для просторового аналізу та вирішення широкого кола завдань: від здійснення пошуку об’єктів за певними критеріями до моделювання природних процесів.

Щодо симбіозу використання, то донедавна платформа GEE дозволяла використовувати файли, наприклад, формату .shp, створені у ArcGIS, для проведення досліджень. Аналогічно, програмне забезпечення ArcGIS та ArcGIS Pro підтягувало та візуалізувало файли, що були експортовані із GEE (GeoTIFF та .shp). Нещодавно було поглиблено взаємодію між цим програмами до паралельної роботи над зображеннями.

QGIS (Quantum GIS) – повнофункціональна геоінформаційна платформа із відкритим кодом для аналізу та обробки геопросторових даних. Функціонал програми включає велику кількість функцій, плагінів та бібліотек, які використовують для створення плагінів.

QGIS та GEE активно співпрацюють у численних сферах. Через те, що GEE має обмежені картографічні можливості, особливо щодо оформлення карт, часто це компенсують за рахунок використання плагінів QGIS. Код Earth Engine легко

інтегрується із кодом PyQGIS: уся обробка виконується у хмарному середовищі GEE, і лише результати передаються до QGIS.

Ці програмні продукти допомагають ученим, науковцям та картографам використовувати дані ДЗЗ для створення карт лісових ресурсів, аналізу та моніторингу лісових екосистем. Однак кожен із таких програмних продуктів має ряд своїх особливостей, унікальних функцій та можливостей, тому вибір програмного засобу цілком залежить від конкретних потреб та вимог користувача.

4.3. Алгоритм створення програмного додатку для моніторингу лісових ресурсів України

Програмний додаток «Аналіз стану лісового покриву України» був створений із використанням хмарної платформи Google Earth Engine. На основі потужних обчислюваних можливостей GEE, після завершення обов'язкової реєстрації на сайті, було написано на мові JavaScript програмний код, який став основою для повноцінного функціонування додатку.

Перед початком написання коду важливо ознайомитися із прикладами використання цього програмного продукту та його можливостями. На офіційному сайті є повний перелік навчальної документації, де прописано основні скрипти та їх застосування. GEE надає широке коло прикладів застосування різних скриптів у поєднанні з одне одним та із залученням бібліотеки та архівів космічних знімків.

Увесь процес створення програмного додатку можна розділити на декілька етапів:

1. Створення плану виконання роботи, пошук необхідних супутникових знімків та визначення основних спектральних індексів, що будуть використані у програмі. На цьому етапі було важливо правильно підібрати тільки такі спектральні індекси, які б з різних боків могли характеризувати стан лісового покриву та не дублювати однотипну інформацію. Пошук необхідних скриптів,

які було б доцільно використати у роботі, перш за все був здійснений у навчальних документах, що розміщені на сайті програмного продукту.

2. Написання коду на JavaScript, який включає алгоритми обробки даних, зчитування та візуалізацію географічних даних. Важливо було змінити базову карту, бо ті, які були доступні для використання, були перевантажені зайвою інформацією (дорожня мережа, підписи населених пунктів, визначних місць тощо). Оновлений варіант базової карти був зроблений у зелених кольорах із акцентом на лісовкриті території; із географічної інформації було подано підписи країн та їх кордони, а також межі областей України.

3. Здійснення перевірок написаного коду. Тестування алгоритму відбувалися на усіх етапах його написання для визначення помилок та їх оперативного виправлення. Перевірка роботи алгоритму та внесення оновлень у його функціонування відбувалося до моменту, коли програмний код почав відповідати усім очікуваним результатам.

4. Оформлення. Невід'ємним етапом при створенні програмного додатку є його інтерфейс, що створюється для зручності користувача. Оформлення додатку передбачало додавання бокових панелей, наповнення їх додатковою та допоміжною інформацією, створення назви та підписів. Таким чином інтерфейс ставав незамінною складовою програми, за допомогою якого відбувалася повноцінна взаємодія користувача та програми.

5. Публікація та розповсюдження. Додаток створювався з метою його подальшого користування різними користувачами. Спеціальна функція, що перетворює написаний алгоритм у програмний додаток, розміщена на сайті GEE та є безкоштовною для використання. Після того, як додаток стає загальнодоступним, його подальше розповсюдження та використання здійснюється за URL-адресою, що містить назву додатка та інформацію про його розробника. Користувачі можуть без обмежень користуватися такими додатками, але доступу до самого алгоритму (коду) вони не мають. Доступ до алгоритму надає особисто розробник і лише персонально для тих, хто матиме

таке прохання. Публікація додатка може відбуватися як на платформі GEE, так і на інших доступних хмарних сервісах у мережі Інтернет.

Створення таких програмних додатків у GEE відбувається за однотипним алгоритмом. Складність, функціональність та унікальність створених додатків цілком залежить від умінь та досвіду розробників.

Написання коду може відбуватися на мовах JavaScript та Python із використанням усієї програмної навчальної документації. Але найбільш важливим перед написанням будь-якого коду, є практика із застосування різних скриптів та їх поєднання. Саме із переходом одних частин алгоритма у інші виникає найбільше труднощів та проблем у початківців.

Програмний додаток «Аналіз стану лісового покриву України» об’єднав у собі багато різноманітних скриптів, спектральних зображень та просторової інформації. Він є опублікований та доступний за посиланням: https://liliaslichnaia.users.earthengine.app/view/forest-cover-analysis [33].

4.4. Особливості використання програмного додатку для моніторингу лісових ресурсів України

Програмний додаток «Аналіз стану лісових ресурсів України» розроблений із метою дослідження лісовкритих територій шляхом порівняння 4 спектральних індексних зображень: NDVI, NDCI, EVI та NDWI, які дозволяють комплексно дослідити стан лісового покриву у досліджуваній області (Рис.4.1).

Для початку роботи із додатком користувачу необхідно вибрати часовий діапазон, тобто вказати дати початку та кінця (включно із поточною датою) для дослідження. Далі, використовуючи кнопку «Накреслити прямокутник», створити невелику ділянку, для якої програма створюватиме індексні зображення.

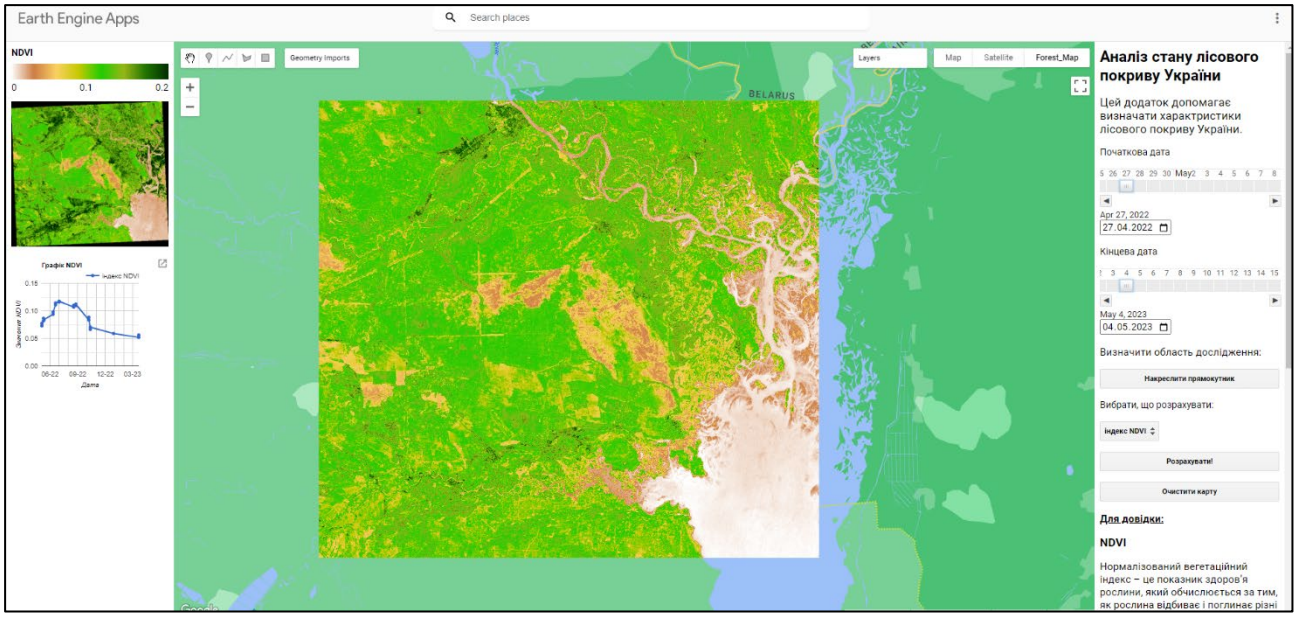

Рис.4.1. Індекс NDVI для досліджуваної області у Додатку «Аналіз стану лісового покриву України»

Великі регіони для дослідження є незручними, адже вегетаційні індексні карти – це громіздкі растрові файли, які потайлово завантажуються на окреслену прямокутником ділянку на карті. З одного боку, це огляд одразу широкої області дослідження, з іншого – витрата часу на очікування завантаження тайлів. Окрім цього, у місцях стику покадрових знімків, можуть утворюватися пустоти, де немає даних. Тому краще використати такий метод дослідження для середніх та малих ділянок лісовкритої території.

Далі необхідно обрати, який саме з 4 індексних зображень програма має побудувати на досліджувану територію. Існує також опція обрати не вегетаційний індекс, а супутниковий знімок Sentinel-2, який буде завантажено лише у прямокутну область на карті, яку обрав користувач.

Після натискання кнопки «Розрахувати!» алгоритм автоматично створює індексне зображення на карті, а також завантажує GIF-картинку та графік для обраного вегетаційного індексу. Композитне GIF-зображення, тобто покадрово продемонстровані знімки, що є на досліджувану територію за вказаний період часу, виконується у кольорах вегетаційного індексу. Графік розраховує усереднені зміни, що відбулися від початкової до кінцевої дати дослідження. Для

кожного спектрального зображення програма будує окрему кольорову шкалу, аби користувачеві було краще зрозуміло, які кольори відповідають за максимальні та мінімальні значення індексу. Усі ці дані (GIF-зображення, графік та кольорова шкала індексу) відображаються на лівій панелі у інтерфейсі користувача.

При виборі знімка Sentinel-2 алгоритм створює додатково GIF-зображення на лівій панелі на вказаний часовий період, але ні графіка, ні кольорової школи не створює.

Програма дозволяє на одну досліджувану область обирати декілька спектральних індексів, а також знімок Sentinel-2. За бажанням користувача у шарах (зверху, біля назви Додатку) можна вмикати та вимикати створені індексні зображення.

Існує можливість змінити базову карту, тобто увімкнути супутниковий знімок чи карту Google за замовчуванням. На правій панелі коротко описано особливості кожного з індексів, що застосовуються у Додатку, а також додано 2 посилання на Глобальні індексні карти для NDVI та EVI .

Після завершення дослідження певної ділянки, варто натиснути клавішу «Очистити карту», аби мати можливість накреслити нову прямокутну, квадратну чи полігональну область дослідження для будь-якої іншої лісовкритої території.

Додаток будує 4 різні спектральні індексні зображення, а користувач, порівнюючи їх дані, легко визначає мінімальні та максимальні коливання величин зображень чи знаходить подібні ділянки на різних спектральних зображеннях. Подібність таких меж чи об’єктів означає те, що вони можуть бути віднесені до одного класу.

Часовий період дослідження доступний із квітня 2017 року, коли було отримано перші знімки із супутника Sentinel-2 (постачальник European Union/Copernicus). Оновлені супутникові знімки Sentinel-2, які надходитимуть у використання, автоматично будуть доступні і у Додатку, при виборі певних дат.

Картографування лісового покриву передбачає точне визначення меж лісів, характеру поширення видового складу лісу, параметрів деревостану тощо.

Наприклад, завдяки використання Додатку можна створити карту, де буде чітко видно межі лісу після пожежі, завдяки чому здійснити аналіз постраждалої деревини та підрахувати суму збитків.

У Сумській області обстріл російських військ спричинив лісову пожежу біля міста Охтирка, яка завдала атмосферному повітрю збитків на суму 16,6 млн гривень [34]. Вогонь знищив близько 7,5 га лісу через масований обстріл Великописарівської громади 25 серпня 2022 року.

На період воєнного стану доступ до оновлених супутникових знімків є часто обмеженим у відкритих ресурсах. Платформа GEE дозволяє отримувати значно новіші знімки, ніж ті, що доступні широкому колу користувачів у інших програмних продуктах. Тому відсутність доступу до даних не є перешкодою для картографування. Візуально на знімку Sentinel-2 чіткі межі поширення пожежі визначити важко (Рис.4.2).

Рис. 4.2. Знімок Sentinel-2 на період 01.04.2023 р. по 01.06.2023 р.

Завдяки додатку «Аналіз лісового покриву України» створюють ряд індексних зображень на лісовкриту територію біля міста Охтирка на періоди часу від 01.04.2021 р. по 01.06.2021 р. (перед пожежею) та від 01.04.2023 р. по 01.06.2023 р. (після пожежі). Важливо обирати дані, що були зроблені у однакову пору року, аби отримати найбільш інформативне зображення (Рис. 4.3).

Зображення наочно демонструє, що значення показників NDVI та NDCI є однаковим для двох ділянок лісу у 2021 р. Після пожежі у 2022 р. отримують зображення, де суттєво різняться показники індексів для сусідніх ділянок лісу. Тепер можна чітко визначити межі поширення пожежі, локальні ділянки, які не знищило полум’я та оцінити масштаби збитків.

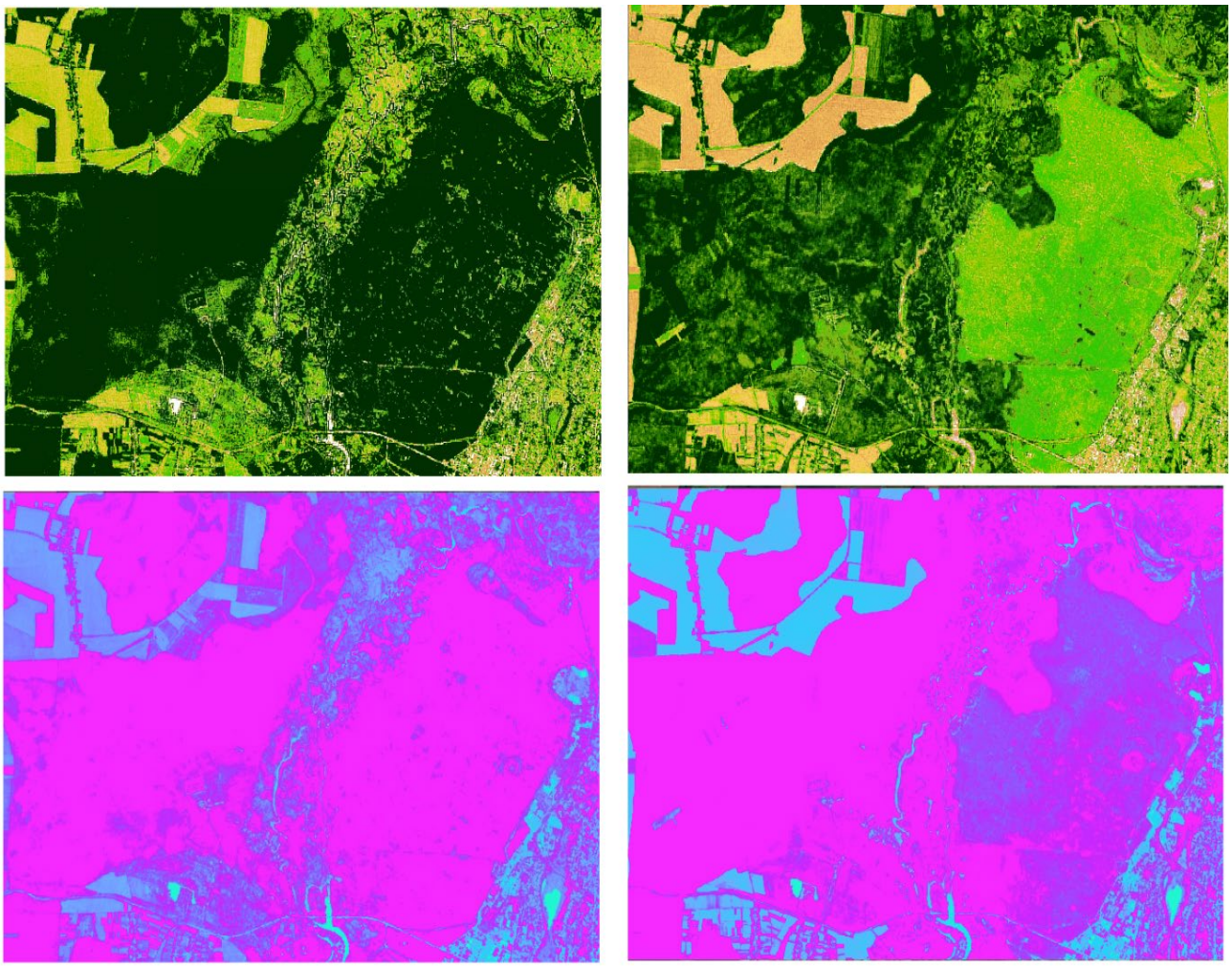

Рис. 4.3. Індексні зображення NDVI та NDCI на 2021 р. (зліва) і 2023 р. (справа)

Схожі значення демонструють індексні зображення EVI і NDWI (Рис. 4.4.). Межі поширення лісовкритих ділянок є подібними на створених зображеннях на 2021 р. Контраст помітний на зображенні на 2023 р. Зокрема за індексом NDWI чітко помітно масштаби втрат лісового покриву.

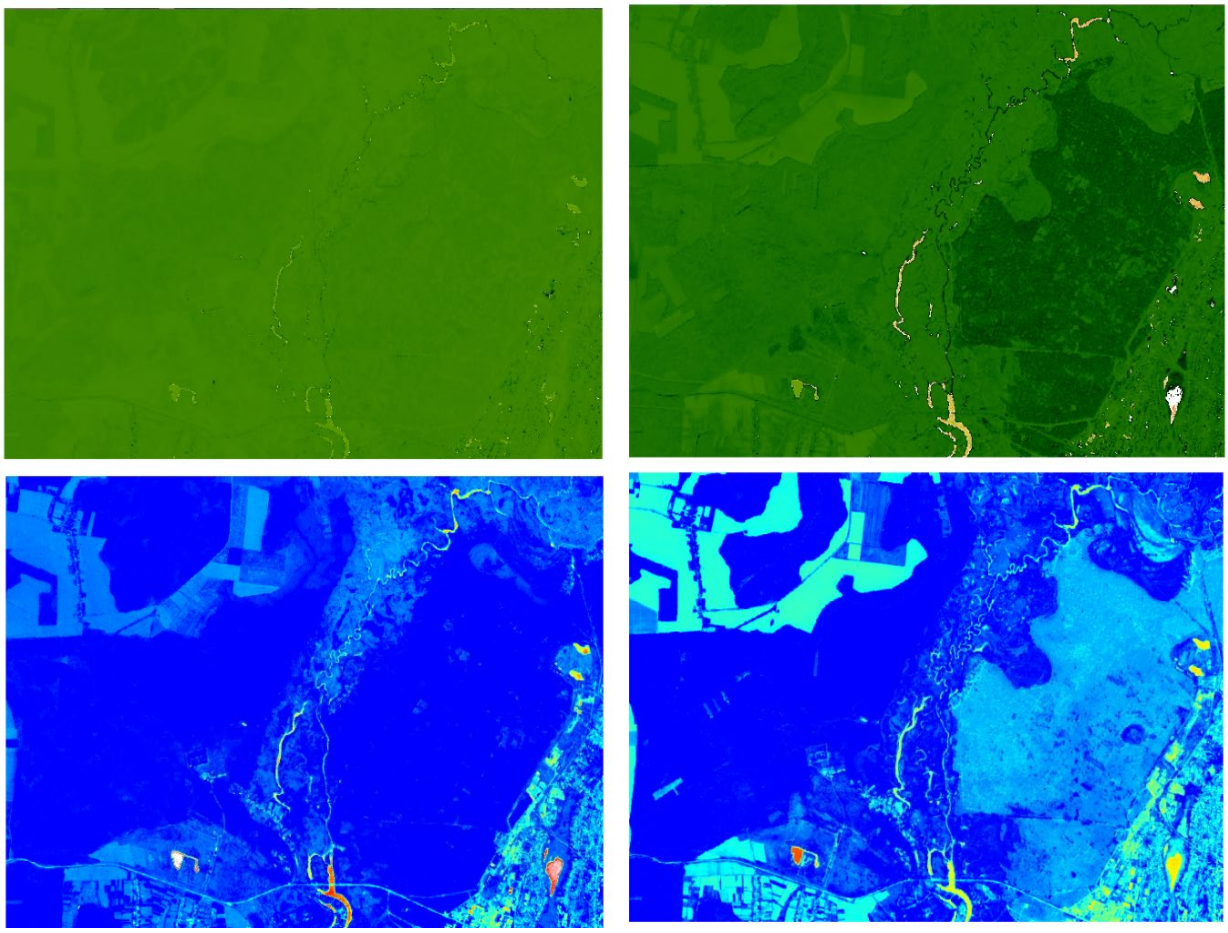

Рис. 4.4. Індексні зображення EVI та NDWI на 2021 р. (зліва) і 2023 р. (справа)

Отже, застосовуючи індексні зображення, які зроблені за різночасовими космічними знімками проводять дослідження стану та особливостей поширення лісу. У програмних продуктах ArcGIS такі зображення можна векторизувати для оновлення існуючих масивів інформації на лісовкриту територію. У Карпатах та у зоні мішаних лісів таким чином можна виявити свіжозрубані ділянки лісу, а за знімками у зоні ЧАЕС визначити осередки масштабних пожеж, наприклад, у травні 2022 р. Проведення такого моніторингу лісовкритих ділянок є важливим не лише при оцінці збитків від пожеж чи вирубки, але є корисним і для подальшого планування робіт на постраждалих територіях. Додаток цілком функціональний для дослідження локальних ділянок лісовкритих територій України, а також за її межами.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного дослідження з геоінформаційного картографування лісового покриву можна зробити такі висновки:

1. Лісове господарство є одним із об’єктів геоінформаційного картографування. Зважаючи на його особливості та характерні риси, визначено, що картографування із залученням даних ДЗЗ є найбільш оптимальним та раціональним для подальшого розвитку галузі.

2. Здійснений аналіз досвіду картографування лісового покриву допоміг зрозуміти, як такий процес тривав протягом багатьох століть, а також як зростала точність, доступність та швидкість отримання географічних даних. Важливим етапом для картографування лісових ресурсів став період відокремлення тематичного картографування від загальногеографічного, а отже поступового розвитку картографування лісового покриву самостійно.

3. Визначено види даних ДЗЗ, які найбільш доцільно використовувати для картографування лісових ресурсів. Основними даними для картографування лісовкритих територій є спектральні індексні зображення, комбінації каналів та глобальні цифрові карти. Застосування цих даних повністю забезпечить потреби в інформаційному забезпеченні при створенні карт лісових ресурсів та лісового господарства.

4. Сучасні технології поступово впроваджуються в усі сфери життя, а тому застосування їх для картографування лісових ресурсів є цілком доцільним. Збір, обробка, аналіз та візуалізація лісових ресурсів із використанням даних ДЗЗ та сучасних ГІС є найбільш перспективним шляхом розвитку та оновлення цієї галузі.

5. У під час даного дослідження був розроблений на основі даних ДЗЗ програмний додаток. Застосування подібного алгоритму допомагає при аналізі стану лісового покриву. Комбінуючи різні спектральні індекси між собою та порівнюючи результати можна отримувати необхідні дані для досліджень лісового покриву.

Геоінформаційне картографування лісових ресурсів розвивається поступово, але тільки перехід на комплексне і повне застосування усіх досягнень прогресу (даних ДЗЗ та ГІС) допоможе підняти галузь на новий та прогресивний рівень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк [та ін.]. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. – 492 с.

2. Світличний О. О. Основи геоінформатики : навчальний посібник / О. О. Світличний, С.В. Плотницький. – Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. – 295 с.

3. Руденко Л. Г. Геоінформаційне картографування в Україні: концептуальні основи та напрями розвитку : монографія / Л. Г. Руденко, Т. І. Козаченко, Д. О. Ляшенко [та ін.]. – Київ: «Вид-во «Наукова думка» НАНА України», 2011. – 105 с.

4. Курач Т. М. Класифікація геозображень за формою візуалізації / Т.М. Курач, І. О. Підлісецька // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції [«Картографічне моделювання та географічні інформаційні системи»] (Львів, 03-05 жовтня 2019 р.). – Львів, 2019. – С. 47-50.

5. Попов В. С. Анімаційні карти при вивченні шкільної географії / В. С. Попов, О. О. Жемеров // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – 2011. – Вип.14. – С. 81-83.

6. Ратушняк Г. С. Топографія з основами картографії : навчальний посібник / Г. С. Ратушняк. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 179 с.

7. Сосса Р. І. Історія картографування території України : підручник / Р.І. Сосса. – К., Либідь, 2007. – 336 с.

8. Карти рослинності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://um.co.ua/4/4-16/4-163262.html

9. Закон України «Про Національну інфраструктуру просторових даних» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/ laws/show/554-20?find=1&text=%D0%BB%D1%96%D1%81#w1_9

10. Національний атлас України; голова ред. колегії Л. Г. Руденко. – К.: ДНВП «Картографія». – 440 с.

11. Миронюк В. В. Використання k-NN методу класифікації космічних знімків в середовищі R для визначення запасу насаджень / В. В. Миронюк // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції [«Біоресурси лісових та урбанізованих екосистем: відтворення, збереження і раціональне використання»] (Київ, 23-24 квітня 2015 р.). – К., 2015. – С. 53-54.

12. Азімов О.Т. Моніторинг радіаційно-екологічного стану Зони відчуження під час пожеж з використанням даних космічного знімання / О.Т. Азімов, О.В. Томченко, С.І. Кірєєв [та ін.] // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції [«Chornobyl: Open Air Lab»] (Київ, 24 квітня 2021 р.) С. 229-233.

13. Коржов В. Л. ГІС лісових доріг як складова ефективних методів гасіння лісових пожеж / В. Л. Коржов, О. Г. Часковський // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції [«Теперішнє та майбутнє лісів екотону середніх широт»] (Київ, 11 червня 2021 р.). – К., 2021. – С. 63-64.

14. Москаленко А. А. Картографування медоносних дерев / А. А. Москаленко, І. І. Дьоміна // Управління земельними ресурсами та землеустрій. – 2018. – №4. – С. 61-67.

15. Гаврилюк С. А. Класифікація земель лісового форду Західного Лісостепу України за матеріалами дистанційного знімання / С. А. Гаврилюк, С. І. Миклуш // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів, 2007 – Вип. 17.3. – С. 26-35.

16. Відкритий ліс «Цифрова революція» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.openforest.org.ua/244344/

17. Маринич О. М. Фізична географія України: підручник / О.М. Маринич, П.Г. Шищенко. – К.:Знання, 2005. – 511 с.

18. Миронюк В. В. Класифікація лісового покриву за сезонними композитними мозаїками Landsat / В.В. Миронюк // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів, 2018. – т. 28. – №1. – С. 28-33.

19. Білоус В. В. Дистанційне зондування з основами фотограмметрії: навчальний посібник / В. В. Білоус, А. М. Молочко, Г. О. Патиченко [та ін.]. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2011. – 367 с.

20. Миронюк В. В. Узгодженість оцінок площі лісів за даними глобальної карти змін лісового покриву і мультиспектральних супутникових знімків / В.В. Миронюк, А.М. Білоус // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів, 2017. – т.27, №5. – С. 38-42.

21. Миронюк В. В. Картографування рівнинних лісів України на основі щільних часових рядів супутникових знімків Landsat / В. В. Миронюк // // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції [«Картографічне моделювання та географічні інформаційні системи»] (Львів, 03-05 жовтня 2019 р.) – Львів, 2019. – С. 51-54.

22. Бурштинська Х. В. Моніторинг засихання хвойних лісів Прикарпатського регіону з використанням даних дистанційного зондування / Х. В. Бурштинська, Ю. В. Петрик, Б. В. Поліщук [та ін.] // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2019. – Вип. 90. – С. 29-40.

23. Слічна Л. В. Космічний знімок як основа сучасних просторово-часових досліджень / Л. В. Слічна // Збірник наукових праць XX міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених [«Шевченківська весна – 2023: Географія»] (19 квітня Київ, 2023) – Київ, 2023. – С. 102-104

24. Довгий С. О. Дистанційне зондування Землі: аналіз космічних знімків у геоінформаційних системах / С. О. Довгий, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма [та ін.]. – К.: Національний центр «Мала академія наук України», 2020. – 268 с.

25. Томченко О. В. Вегетаційні індекси, як інструмент оцінки і моніторингу стану земельних ресурсів / О. В. Томченко, А. В. Хижняк // Новітні технології. – Київ, 2016. – Вип.1. – С. 13-15.

26. Index DataBase [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.indexdatabase.de/

27. Коляда Л. П. Вегетаційні спектральні індекси космічного знімання як індикатори параметрів ґрунту Лісостепу Лівобережного / Л.П. Коляда // Вісник аграрної науки. – Київ, 2015. – № 4. – С. 63-66.

28. Landsat Explorer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://livingatlas2.arcgis.com/landsatexplorer/

29. Лесів М. Ю. Порівняння глобальних цифрових карт земельного покриву з використанням елементів нечіткої логіки / М.Ю. Лесів // Геодезія, картографія аерофотознімання. – Львів, 2012. – Вип. 76. – С. 94-102.

30. Карта найстаріших дерев України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://maps.visicom.ua/c/30.55933,50.42132,12/po/oldesttreesukraine?lang=uk

31. Earth Engine від Google [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://habr.com/ru/articles/500020/

32. Платформа ArcGIS - Esri Ukraine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://esri.ua/sarticle.php?id=1

33. Додаток «Аналіз стану лісового покриву України» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://liliaslichnaia.users.earthengine.app/view/forest-cover-analysis

34. Екополітика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ecopolitic.com.ua/ua/news/na-sumshhini-rosijski-vijska-spalili-lisu-na-ponad-16-miljoniv-griven/