

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

МИРОНЮК ВІКТОР ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК 630*53:630*58

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ
ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ЛІСІВ РІВНИННОЇ ЧАСТИНИ УКРАЇНИ ЗА
ДАНИМИ СУПУТНИКОВОЇ ЗЙОМКИ

06.03.02 «Лісовпорядкування та лісова таксація»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора сільськогосподарських наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор сільськогосподарських наук, професор,
член-кореспондент НААН
Лакида Петро Іванович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
директор Навчально-наукового інституту лісового
і садово-паркового господарства

Офіційні опоненти: доктор сільськогосподарських наук, професор,
член-кореспондент НААН
Ткач Віктор Петрович,
Український ордена «Знак Пошани»
науково-дослідний інститут лісового господарства
та агролісомеліорації імені Г. М. Висоцького,
директор

доктор сільськогосподарських наук, професор
Миклуш Степан Іванович,
Державний вищий навчальний заклад
«Національний лісотехнічний університет України»,
директор Навчально-наукового інституту
лісового і садово-паркового господарства

доктор сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник
Шпарик Юрій Степанович,
Державний вищий навчальний заклад
«Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника»,
доцент кафедри лісознавства

Захист відбудеться «09» липня 2019 року о 9⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.09 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «07» червня 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. Г. Лашенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення невиснажливого лісокористування потребує постійного аналізу кількісних та якісних показників лісових ресурсів. Основним інструментом для вирішення цих завдань є статистична інвентаризація лісу. В Україні впродовж 2006–2016 рр. реалізовано низку експериментальних проектів, які сформували базові принципи національної інвентаризації лісів. Проте, розвиток науково-технологічної сфери застосування даних дистанційного зондування Землі істотно змінює сучасні підходи щодо інвентаризації лісових ресурсів і спонукає до розгляду цього питання на новому рівні.

Упровадження дистанційного збору даних у практику лісової інвентаризації є однією з основних тенденцій розвитку лісооблікових методів сучасності. Фундаментальну основу обліку лісів за матеріалами супутникової зйомки зроблено, насамперед, в закордонних дослідженнях. При цьому, R. E. McRoberts, E. O. Tomppo, E. Næsset (2010) справедливо відзначають, що дистанційні технології забезпечили значний поступ у підвищенні ефективності польових робіт і додали статистичним оцінкам лісової інвентаризації просторову складову. На різних етапах інвентаризації лісу значення даних супутникової зйомки розкривається по-різному: від створення територіальної основи вибіркового дослідження до реалізації статистичного оцінювання параметрів лісового фонду за моделями (Ståhl G. et al., 2016).

Серед відомих технік лісотаксаційного дешифрування супутникових знімків більшої уваги здобули непараметричні методи. Вони застосовуються для прогнозування таксаційних показників на рівні окремого пікселя, картографування деревостанів у вигляді неперервних просторових розподілів і виведення статистичних оцінок показників лісового фонду (McRoberts R. E., Tomppo E. O., 2007). На противагу статистичній інвентаризації лісів, яка проводиться у великих масштабах (регіон, країна), подібні методи використовуються в контексті, так званої, інвентаризації малих територій, тобто відносно невеликих частин генеральної сукупності (McRoberts R. E., 2012).

Достовірна інформація про географічний розподіл лісів, таксаційні показники лісових насаджень має важливе значення як для практиків, так і представників наукової спільноти, оскільки дозволяє встановити динаміку земного покриття. Відкриття доступу до архіву супутникових знімків Landsat (Woodcock C. E. et al., 2008) та його поточних місій кардинально змінило стандарти використання даних дистанційного зондування Землі та остаточно визначило ліс як один із найголовніших об'єктів моніторингу довкілля (Hansen M. C., Loveland T. R., 2012; Lui G., Coomes D., 2015; Fassnacht F. E. et al., 2016; Gomez C., White J. C., Wulder M. A., 2016). Класифікація лісового покриття за даними супутникової зйомки розширює уявлення про стан і динаміку лісів. У межах завдань лісової інвентаризації одержана інформація має важливе значення для встановлення площі лісів, стратифікації території для реалізації вибіркового дослідження і створення необхідних тематичних матеріалів. Незважаючи на успішне вирішення цього питання у світі та

науковий доробок вітчизняних вчених (Лесів М. Ю., Щепашенко Д. Г., Швиденко А. З., Бунь Р. А., 2012; Миклуш С. І., Часковський О. Г., Гаврилюк С. А., 2013; Stefanski J., Chaskovskyy O., Waske B., 2014), досі комплексне використання даних дистанційного зондування Землі для потреб обліку лісових ресурсів України залишається невирішеним.

Супутникові знімки, одержані завдяки неперервному зондуванню Землі за останнє півстоліття, є унікальними, оскільки охоплюють період, коли населення планети подвоїлося, а докази змін клімату стали очевидними. Відкритий доступ до великих обсягів інформації та розвиток методів її оброблення забезпечили широке використання часових серій супутникових спостережень і сприяли створенню низки глобальних продуктів лісового покриву з високим (25–30 м) просторовим розрізненням (Hansen M. C. et al., 2013; Sexton J. O. et al., 2013; Shimada M. et al., 2014; Chen J. et al., 2015). Отже, важливим завданням для сучасної науки є опрацювання відповідних підходів для картографування лісового покриву на основі щільних часових серій супутникових знімків. За своєю суттю завдання породжує проблему Великих даних, що потребує переходу на технології хмарних обчислень. Розміщення даних у «хмарі» передбачає зміну парадигми зберігання та оброблення інформації, що стало можливим завдяки інструментам, які надають доступ до даних мережею Інтернет (Gorelick N. et al., 2017).

Загалом треба констатувати, що останнім часом відбувається серйозний науково-технічний прогрес, який торкається всіх аспектів суспільного життя та не може обійти сучасної лісоінвентаризаційної науки. Впровадження інноваційних підходів у виробничу практику потребує проведення експериментальних досліджень їхньої ефективності на різних масштабах. Цей принцип формує зміст та визначає актуальність дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації виконано в межах таких науково-дослідних тем: «Розробити методичні основи та нормативно-інформаційне забезпечення системи комплексного обліку і використання лісових ресурсів в умовах урбанізованого середовища» (номер державної реєстрації 0110U003493, 2010–2012 рр.); «Проблеми сталого використання лісових ресурсів в умовах глобальних змін клімату» (номер державної реєстрації 0114U000651, 2014–2018 рр.); «Прикладні рішення комплексного оцінювання екосистемних функцій лісів на основі даних дистанційного зондування Землі» (номер державної реєстрації 0116U001583, 2016–2017 рр.); «Розробити науково-методичне забезпечення розвитку інвентаризації лісових ресурсів» (номер державної реєстрації 0118U000292, 2018–2020 рр.). До виконання зазначених наукових тематик здобувач залучався як керівник або відповідальний виконавець окремих розділів.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є опрацювання теоретичних основ інвентаризації рівнинних лісів України із застосуванням вибіркового збору даних наземними методами та матеріалів супутникової зйомки. Відповідно до поставленої мети передбачалося вирішити низку завдань дослідження:

- опрацювати теоретичні положення поєднання технології наземного та дистанційного збору даних для задач лісової інвентаризації;
- дослідити вплив конфігурації пробних ділянок на точність оцінювання таксаційних показників деревостанів наземними та дистанційними методами;
- обґрунтувати алгоритми обробки часових серій супутникових знімків оптичного діапазону для дешифрування лісових насаджень;
- визначити точність та сферу застосування глобальних продуктів лісового покриву високого просторового розрізнення для обліку лісових ресурсів рівнинної частини України;
- на основі даних Landsat 8 OLI виконати дешифрування вкритих лісовою рослинністю ділянок і розробити лісову маску для рівнинної частини України;
- опрацювати технологію прогнозування видового складу, сум площ перерізів і стовбурового запасу лісових насаджень на основі обробки супутникових знімків у хмарному ресурсі Google Earth Engine API;
- розробити технологію статистичної інвентаризації лісів малих територій на підставі непараметричних методів прогнозування таксаційних показників деревостанів на рівні окремого пікселя супутникових знімків.

Об'єкт дослідження – взаємозв'язок таксаційних показників лісових насаджень і закономірності їхнього відображення на супутникових знімках.

Предмет дослідження – особливості інвентаризації рівнинних лісів України на основі поєднання наземних методів вибіркової лісової таксації та даних супутникової зйомки.

Методи дослідження. Теоретичні та експериментальні дослідження виконано з використанням загальнонаукових і спеціальних методів. Збір дослідних матеріалів здійснено на основі перелічувальної вибіркової таксації лісових насаджень, застосовуючи способи відбору дерев із імовірністю, пропорційною їхнім розмірам і густоті деревостанів. З метою дешифрування вкритих лісовою рослинністю ділянок використано непараметричні методи комп'ютерної класифікації супутникових знімків, зокрема Random Forest. Класифікацію глобальних продуктів лісового покриву здійснено пороговими методами класифікації зображень. Задля зменшення розмірності спектральних даних супутникових знімків використано метод головних компонент і техніку створення композитних зображень. Прогнозування таксаційних показників лісових насаджень на рівні окремого пікселя супутникових знімків за даними вибіркової інвентаризації лісів виконано на основі методу відновлення пропущених значень, реалізованого в алгоритмі k -Nearest Neighbors (k -NN). Задля оцінювання просторової мінливості таксаційних показників насаджень застосовано методи геостатистики. Одержані результати підлягали узагальненню методами математичного моделювання, порівняння, синтезу та аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації опрацьовано теоретико-методологічні та прикладні принципи інвентаризації лісів із застосуванням методів вибіркової таксації та даних супутникової зйомки. Основні результати досліджень, які містять елементи наукової новизни, полягають у такому:

вперше:

- створено маску рівнинних лісів України за знімками Landsat 8 OLI з просторовим розрізненням 30 м;

- опрацьовано технологію статистичного оцінювання параметрів лісового фонду на підставі прогнозування значень таксаційних показників деревостанів на рівні окремого пікселя супутникових знімків;

- розроблено алгоритм оцінки деревного запасу на вибіркових одиницях лісової інвентаризації, використовуючи непараметричний метод прогнозування об'єму стовбурів облікових дерев;

обґрунтовано:

- методичні принципи обробки глобальних продуктів лісового покриття високого просторового розрізнення з метою картографування та статистичного оцінювання площі лісів рівнинної частини України;

- методику дешифрування видового складу лісових насаджень за часовими серіями мультиспектральних супутникових знімків та додатковими наборами допоміжної інформації;

- принципи вибіркової інвентаризації рівнинних лісів України за матеріалами таксації деревостанів на пробних ділянках фіксованої та змінної площі;

- алгоритми прогнозування сум площ перерізів і запасу деревостанів на основі техніки відновлення пропущених значень;

отримало подальший розвиток:

- напрями використання лісовпорядних атрибутивних баз даних для дешифрування лісових насаджень за даними дистанційного зондування Землі;

- ландшафтний метод дешифрування супутникових знімків;

- принципи зменшення розмірності даних під час обробки сезонних композитних мозаїк непараметричним алгоритмом Random Forest;

- методика використання реласкопічних і комбінованих пробних площ для оцінки таксаційних показників лісових насаджень за супутниковими знімками;

- статистична інвентаризація лісів малих територій на основі даних національної (регіональної) вибіркової мережі пробних ділянок та суцільного покриття регіону супутниковими знімками;

- методи оцінювання тематичної точності лісових карт, використовуючи методи візуальної інтерпретації безкоштовних супутникових знімків Google;

- технології хмарних обчислень для завдань лісової інвентаризації.

Практичне значення одержаних результатів. Опрацьовані теоретичні положення щодо обліку рівнинних лісів дистанційними методами та розроблену лісову маску впроваджено у сферу діяльності Державного агентства лісових ресурсів України. Зокрема, прикладні рішення інвентаризації лісів реалізовано виробничим об'єднанням «Укрдержліспроєкт» для запровадження національної інвентаризації лісів України. Виробництву пропонуються: алгоритмічне забезпечення для прогнозування значень таксаційних показників деревостанів за матеріалами наземних і дистанційних спостережень; алгоритм дешифрування лісових насаджень на основі сезонних композитних мозаїк

мультиспектральних супутникових знімків; непараметричний алгоритм обчислення запасу деревостанів на вибіркових ділянках інвентаризації лісу.

Результати дослідження застосовуються під час викладання навчальних дисциплін «Лісова таксація», «Дистанційне зондування Землі», «Інвентаризація лісу та лісовий моніторинг», що включені до програми підготовки студентів спеціальності «Лісове господарство» освітніх ступенів «Бакалавр» і «Магістр» в Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

Особистий внесок здобувача. Дисертацію виконано на основі багаторічних наукових досліджень здобувача. Постановка проблеми, визначення мети та способів її досягнення належить безпосередньо дисертанту. Ним особисто здійснено теоретичне узагальнення наукових положень інвентаризації лісів з використанням методів наземного і дистанційного збору даних, опрацьовано територіальну основу вибірки для експериментального полігону Київської області, розроблено алгоритмічне забезпечення для обробки матеріалів супутникової зйомки, виконано розрахункову частину роботи, обґрунтовано висновки та здійснено усі узагальнення за результатами дослідження. У спільних публікаціях права співавторів не порушено. В дисертації використано лише власні наукові ідеї. Польові дослідження виконано за участі аспірантів і студентів кафедри таксації лісу та лісового менеджменту Національного університету біоресурсів і природокористування України та співробітників Центру національної інвентаризації лісів України.

Апробація матеріалів дисертації. Основні теоретичні положення дисертації обговорено на: Міжнародній науково-практичній конференції «Біоресурси лісових та урбанізованих екосистем: відтворення, збереження і раціональне використання» (м. Київ, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Виклики XXI століття та їхнє вирішення у лісовому комплексі й довкіллі» (м. Київ, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми лісового сектору та садово-паркового господарства» (м. Київ, 2016 р.); 16 Українській конференції з космічних досліджень (м. Одеса, 2016 р.); Міжнародній конференції, присвяченій 20-річчю створення факультету землевпорядкування «Землеустрій, кадастр та охорона земель в Україні: сучасний стан, європейські перспективи» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні» (м. Ужгород – Синевир, 2016 р.); 6 Міжнародному молодіжному науковому форумі «LITTERIS ET ARTIBUS» (м. Львів, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Здоров'я лісів, екосистемні послуги та лісові продукти для суспільства» (м. Київ, 2017 р.); III Глобальному форумі економіки природокористування в лісовій галузі (м. Наньчан, Китайська Народна Республіка, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Стале управління лісовим комплексом та збалансований розвиток урболандшафтів» (м. Київ, 2018 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми наук про життя та природокористування» (м. Київ, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя»

(м. Київ, 2018 р.); Міжнародному круглому столі з екологічного менеджменту, науки та інженерії (м. Сяминь, Китайська Народна Республіка, 2018 р.); Міжнародній конференції «Бореальні ліси під загрозою? Критична роль бореальних та гірських екосистем для людей, біоекономіки та клімату» (м. Лаксенбург, Австрійська Республіка, 2018 р.); Міжнародній конференції «ForestSAT 2018: Вступ в нову епоху спостережень за лісом та аналізу даних» (м. Коледж Парк, Меріленд, США, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічні та соціальні виклики лісам і лісовому менеджменту та їх подолання» (м. Київ, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми розвитку лісової таксації, лісовпорядкування та інвентаризації лісів» (м. Київ, 2018 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 49 наукових праць, з яких монографія у співавторстві, 4 статті в наукових фахових виданнях України, 17 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті в наукових виданнях інших держав, 4 статті в інших наукових виданнях, 3 науково-методичні рекомендації, 17 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить анотації, перелік умовних позначень, вступ, шість розділів, висновки, пропозиції виробництву, список використаних джерел (297 найменувань) та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 442 сторінки комп'ютерного тексту. Основна частина дисертації містить 68 таблиць і 76 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Сучасний стан та передумови інвентаризації лісів на основі супутникової зйомки» здійснено узагальнення методів обліку лісів із використанням технологій наземного та дистанційного збору даних. У результаті аналізу встановлено, що картографування лісів на основі даних супутникової зйомки знаходиться у фокусі численних досліджень, а методологічні основи вибіркової інвентаризації лісів у більшості розвинутих країн передбачають широке застосування методів дистанційного зондування Землі на практиці.

Дані дистанційного зондування Землі мають важливе значення для встановлення площі вкритих лісовою рослинністю ділянок, стратифікації території під час статистичної інвентаризації лісів, оцінювання таксаційних показників деревостанів, картографування та багатьох інших завдань обліку лісових ресурсів. Як зауважують С. Gómez, J. C. White, M. A. Wulder (2016), на сучасному етапі достатньо перспективними в цьому відношенні є щільні часові ряди супутникових спостережень. Науковцями доведено, що часові серії знімків мають більші переваги порівняно з даними, одержаними для двох віддалених у часі періодів, не тільки для тематичного картографування, а й для дослідження детальних біофізичних параметрів лісових насаджень. Найбільшого розвитку методика використання щільних часових рядів супутникових знімків здобула в дослідженнях групи вчених із університету штату Меріленд в США (Hansen M. C. et al., 2011, 2014).

Після зміни політики доступу до архіву знімків Геологічної служби США в 2008 році супутникові знімки Landsat (TM, ETM+, OLI) стали стандартним продуктом для моніторингу лісових територій. Знімки цієї системи є унікальними, оскільки охоплюють понад 40-річний період, коли населення планети подвоїлося і докази змін клімату стали очевидними. Інформаційна підтримка обліку лісів істотно посилилася завдяки розробці карт лісового покриву регіонального, континентального та глобального масштабів (Hansen M. C. et al., 2013; Sexton J. O. et al., 2013; Shimada M. et al., 2014; Chen J. et al., 2015). При цьому, багаторічний архів супутникових знімків Landsat почали розглядати як важливе джерело даних про динаміку лісів, оскільки більшість змін у лісовому покриві відбувається в масштабі, що узгоджується з просторовим розрізненням 30 м. Подібні карти мають важливе значення в умовах великої мозаїчності ландшафтів, оскільки їхні аналоги низького просторового розрізнення призводять до істотних помилок в оцінюванні площі фрагментованих лісів України.

Результати досліджень свідчать, що можливості сучасних супутникових систем для вирішення задач моніторингу та обліку лісових ресурсів істотно розширилися. Заслужують на особливу увагу нові економічно ефективні методи лісової інвентаризації на основі технологій дистанційного зондування Землі. Нині математичну основу інвентаризації лісу в багатьох країнах забезпечує непараметричний алгоритм обробки геопросторових даних, відомий під назвою методу k -найближчих сусідів (k -NN, тобто k -Nearest Neighbors). Уперше у виробничу практику його запровадила Фінляндія (Tomppo E., Katila M., 1991), пізніше він став широко відомим у низці інших країн: Швеції (Reese H., Nilsson M., Sandström P., Olsson H., 2002), Норвегії (Gjertsen A. K., 2007), Німеччині (Breidenbach J., Nothdurft A., Kandler G., 2010), Польщі (Pachana P., 2016), США (McRoberts R. E., Tomppo E., 2007; Ohmann J. L., Gregory M. J., 2002), Канаді (Beaudoin A. et al., 2014), Італії (Chirici G. et al., 2008), Литві (Mozgeris G., 2008), Ірані (Abedi R., Bonyad A. E., 2015), Японії (Kajisa T. et al., 2008), Австралії (Nguyen T. et al., 2018). Інформації про використання цього методу в Україні до 2017 року в науковій літературі не траплялося (Bilous A. et al., 2017).

Техніка прогнозування таксаційних показників на основі пошуку найближчих сусідів широко ввійшла в методологію лісової інвентаризації, зокрема її застосовували для дослідження різних таксаційних показників насаджень: деревного запасу (McRoberts R. E., 2009), компонентів наземної біомаси (Latifi H. et al., 2015), сум площ перерізів дерев на 1 га та густоти насаджень (Franco-Lopez H., Ek A., Bauer B., 2001), середніх діаметра, висоти, віку та зімкнутості насаджень (McRoberts R. E., Nelson M. D., Wendt D. G., 2002; Tuominen S., Naakana M., 2005), лісистості території (McRoberts R. E., Liknes G. C., Domke G. M., 2014). Загалом у дисертаційній роботі доведено, що k -NN метод має достатнє наукове обґрунтування і є перспективним у контексті подальшого розвитку національної інвентаризації лісів України. Найбільший науковий інтерес при цьому представляють методичні підходи моделювання видового складу лісових насаджень,

опрацьовані вченими Північно-Західного Тихоокеанського регіону США (Ohmann J. L., Gregory M. J., 2002; Hudak A. T. et al., 2008; Ohmann J. L., Gregory M. J., Roberts H. E., 2014).

Упровадження даних супутникової зйомки в практику лісової інвентаризації є однією з основних тенденцій сучасного розвитку лісооблікових методів. Завдяки цьому в інвентаризації відбулися важливі якісні зміни: технології дистанційного зондування Землі дозволили зменшити витрати на проведення польових робіт, додали статистичним оцінкам просторову складову та сприяли розвитку методів оцінювання параметрів лісового фонду для, так званих, «малих територій». На основі тривалих досліджень доведено, що поєднання наземного та дистанційного збору даних вносить додаткові вимоги до схем вибіркової таксації лісу. Насамперед це стосується розміщення та конфігурації пробних ділянок.

Система вітчизняної лісової інвентаризації в Україні є відносно новою, проте побудована на досвіді країн, які стояли у самих витоків цієї ідеї. Розвитку національної інвентаризації лісів України передувала низка пілотних проектів для різних природно-кліматичних регіонів. У результаті проведених досліджень опрацьовано концептуальні засади обліку лісу статистичними методами, однак, сучасні тенденції розвитку методів вибіркової таксації лісу створюють необхідні орієнтири для її вдосконалення.

У другому розділі **«Природно-кліматичні та теоретико-методологічні передумови інвентаризації лісів рівнинної частини України»** проаналізовано особливості природно-територіальних комплексів регіону дослідження, обґрунтовано теоретико-методологічні принципи інвентаризації рівнинних лісів на основі технологій наземного та дистанційного збору даних.

Загальна площа території дослідження становить близько 541 тис. км² та охоплює 21 область України (крім Закарпатської, Івано-Франківської, Чернівецької та АР Крим). Лісовий покрив на рівнинній частині України розташований дуже нерівномірно, що зумовлює необхідність розгляду методів, здатних із високою точністю дешифрувати масивні лісові насадження Поліського регіону та лінійні позахисні смуги степової зони. Топографічні параметри місцевості території дослідження вплинули на технологію інвентаризації лісів дистанційними методами. Зокрема, рівнинний рельєф і незначні перевищення території дозволили в дисертаційній роботі не враховувати закономірності відображення лісового покриву на затінених та освітлених частинах схилів, а геометричну корекцію супутникових знімків виконувати без детальних цифрових моделей рельєфу. Враховуючи особливості поширення та структуру рівнинних лісів, виявлено, що вони пов'язані з природно-кліматичними умовами території дослідження. На основі цього визначено показники, що формують характерні градієнти та сприяють дешифруванню лісів за даними супутникової зйомки.

Відповідно до завдань дисертаційної роботи на території рівнинної частини України організовано три експериментальні полігони. В дослідженні

використано матеріали натурної таксації лісового фонду Сумської області, де Центром національної інвентаризації лісів у 2013 році закладено 333 кругові вибіркові ділянки площею 500 м² кожна. Сумська область одночасно розташована в двох природно-кліматичних зонах Полісся та Лісостепу, а тому представляє основні типи рівнинних лісових ландшафтів. Другий полігон розташований в Чернігівській області між значеннями довготи 31° 47' 2" Сх та 31° 52' 60" Сх і широти 52° 1' 57" Пн та 52° 5' 31" Пн та охоплює низку типових для поліської зони категорій земного покриву загальною площею 45 км². На його території досліджували методи картографування лісового фонду за даними повідільної таксації деревостанів та супутникової зйомки. Науково-дослідну базу даних доповнювали матеріали вибіркової таксації лісових насаджень на третьому експериментальному полігоні, який включає частину лісового фонду Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Боярська лісова дослідна станція» та займає площу 56 км² між значеннями довготи 30° 00' Сх та 30° 12' Сх і широти 50° 12' Пн та 50° 20' Пн. Зібраний на полігоні дослідний матеріал являє собою результати вибіркової таксації лісових насаджень на 156 кругових і реласкопічних ділянках.

Польові роботи з вибіркової таксації лісу виконували на основі технології Field-Mar за методикою, яка передбачає картографування положення всіх облікових дерев. Просторову основу дослідження для Сумської області формує вибірковий дизайн національної інвентаризації лісів України. Він поєднує систематичну вибірку з регулярною мережею вибірових ділянок та випадковим розміщенням у межах кожної з них кластера, утвореного чотирма круговими ділянками. На території експериментального полігону Київської області центри пробних площ розміщували через інтервал 1' за широтою та довготою. Дослідження на полігоні Чернігівської області виконували на основі лісовпорядних даних, агрегованих на рівні таксаційних виділів.

З метою підвищення ефективності лісової інвентаризації опрацьовано теоретичні положення вибіркової таксації лісу на основі кругових пробних площ постійного радіуса, концентричних проб, реласкопічних і комбінованих вибірових ділянок (табл. 1).

Таблиця 1

Конфігурація пробних ділянок вибіркової інвентаризації лісових насаджень

Тип пробної площі	Радіус, м	Реласкопічний коефіцієнт	Діаметр дерев, які обліковувалися, см	Розташування полігону
Кругові постійного радіуса	12,62	–	понад 6 см	Київська обл., Сумська обл.
Концентричні кругові	12,62 3,98	–	понад 12 см 6–11,9 см	Київська обл.
Реласкопічні	–	1 (0,5; 2)	понад 6 см	Київська обл.
Комбіновані	12,62*	1 (0,5; 2)	25,2 (17,8; 35,6)**	Київська обл.

Примітка. *Максимальний радіус (R_{max}) кругової пробної площі.

**Максимальний діаметр (d_{max}) дерев на комбінованих ділянках, для яких не виконується коригування розрахунків, враховуючи реальну зону відбору дерев згідно з формулою (3)

Розглядаючи концепцію відбору дерев із імовірністю, пропорційною розмірам дерев і густоті деревостану, обґрунтовано методику обчислення середніх значень таксаційних показників лісових насаджень на 1 га, використовуючи такі перевідні коефіцієнти:

кругові пробні площі постійного радіуса (500 м²):

$$TF_i = \frac{10000}{IZ_i} = \frac{10000}{500} = 20, \quad (1)$$

реласкопічні ділянки:

$$TF_i = \frac{10000}{\pi \cdot c^2 \cdot d_i^2} = \frac{2500}{c^2} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_i^2} = \frac{2500}{c^2} \cdot \frac{1}{g_i} = BAF \cdot \frac{1}{g_i}, \quad (2)$$

комбіновані ділянки (якщо діаметр облікового дерева $d_i > d_{max}$):

$$TF_i = \frac{10000}{\pi \cdot R_{max}^2} = \frac{10000 \cdot BAF}{\pi \cdot 2500 \cdot d_{max}^2} = BAF \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_{max}^2} = BAF \cdot \frac{1}{g_{max}}, \quad (3)$$

де TF_i – коефіцієнт, для переведення значення таксаційного показника i -того облікового дерева на 1 га; IZ_i – площа зони відбору i -того облікового дерева, м²; c – постійний коефіцієнт, що пов'язаний із реласкопічним коефіцієнтом BAF ; d_i – діаметр на висоті 1,3 м i -того облікового дерева, см; g_i – площа перерізу на 1,3 м i -того облікового дерева, м²; R_{max} – максимальний радіус зони відбору для комбінованих ділянок, м; d_{max} – максимальне значення діаметра дерев для комбінованих ділянок, см.

Для обробки зібраних матеріалів у статистичній системі R v. 3.5.1 опрацьовано непараметричний алгоритм прогнозування запасу деревостанів на пробних ділянках лісової інвентаризації. При цьому, об'єм стовбурів модельних дерев (приблизно ¼ від кількості облікових) обчислювали за математичними моделями видового числа, що включені до чинного лісотаксаційного довідника (Свинчук В. А., Кашпор С. М., Миронюк В. В., 2014), а об'єм стовбурів облікових дерев прогнозували на основі їхніх значень. Для цього застосовано алгоритм пошуку найближчих сусідів, використовуючи систему обмежень і пріоритетності показників окремого дерева (деревний вид, діаметр дерева) та лісового насадження (вік, тип лісу, клас бонітету).

У розділі обґрунтовано два методи оцінювання параметрів лісового фонду – за вибіркою та моделлю. Перший варіант застосовували під час обробки матеріалів інвентаризації на вибіркових ділянках, другий був пов'язаний із обчисленням таксаційних показників лісових насаджень на підставі результатів дешифрування супутникових знімків. Відповідно до цього визначено теоретичні передумови інвентаризації лісу на основі технології k -NN та обґрунтовано методику обчислення середніх значень і невизначеності оцінок параметрів лісового фонду, використовуючи спрогнозований (модельний) розподіл таксаційних показників:

$$\bar{Y}_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\mu}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{y}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{y}_i, \quad (4)$$

де \bar{Y}_M – оцінка середнього значення параметра, одержана за моделлю; N – кількість пікселів в області інтересу; M – вказує на те, що оцінка одержана на основі моделі; $\hat{\mu}_i$ – значення залежної змінної \tilde{y}_i для i -того цільового елемента генеральної сукупності згідно з k -NN методом рівняння.

Опрацьована методика формує передумови інвентаризації лісів та оцінювання показників лісового фонду як для всієї генеральної сукупності, так і її локальних частин.

У третьому розділі «Обґрунтування технології дистанційного збору та обробки даних» висвітлено теоретичні та прикладні аспекти створення геопросторових баз даних і обробки супутникових знімків для інвентаризації лісів дистанційними методами.

Враховуючи переваги різнопланової інформації (спектральної та неспектральної) для дешифрування лісових насаджень, визначено принципи створення інтегрованих геопросторових баз даних (табл. 2). Їхню основу в дисертаційній роботі формують супутникові знімки, які відображають стан земної поверхні на момент зйомки, визначають охопит території та детальність досліджень.

Таблиця 2

Характеристика допоміжних геопросторових наборів даних

Група показників	Назва показника
Топографічні	Координати X та Y
	Тип землекористування
Орографічні	Висота над рівнем моря
	Ухил
	Індекс топографічного положення
Едафічні	Ґрунтові карти
Тематичні	Карти зімкнутості лісового покриву
	Лісовпорядні бази даних у форматі ГС

Серед доступних у дистанційному зондуванні Землі діапазонів електромагнітного випромінювання виділено видиму, ближню та короткохвильову інфрачервону частину спектру як найважливіші для дешифрування лісових насаджень. Встановлено, що лісовій рослинності притаманна більша спектральна селективність, ніж іншим типам земного покриву, яка залежить від таких чинників: 1) оптичних властивостей зеленої рослинності; 2) геометрії намету деревостану; 3) відбивної здатності поверхні ґрунту, якщо деревостан не утворює суцільного покриву; 4) просторово-параметричної структури лісових насаджень. Оскільки сучасний етап розвитку технологій дистанційного зондування Землі окреслив важливу роль часових траєкторій взаємозв'язку стану рослинності з її спектральними характеристиками, обґрунтовано методику попередньої обробки супутникової

інформації для узгодження показників відбиття для знімків широкого часового діапазону (радіометрична та геометрична корекція, спектральне перетворення типу «ковпак з кистю», вегетаційні індекси).

У дисертаційному дослідженні використано супутникові знімки різних сенсорів, а також низку похідних продуктів дистанційного зондування Землі – глобальних карт лісового покриву. Територія рівнинної частини України повністю була вкрита мультиспектральними супутниковими знімками Landsat 8 OLI. Для локальних експериментальних полігонів додатково застосовували знімки, які мають вище просторове розрізнення: Київська область – PlanetScore, SPOT 7; Чернігівська область – SPOT 7 та Ikonos. Кількісні показники знімків Landsat 8 OLI, що застосовували для створення сезонних мозаїк задля суцільного покриття території рівнинної частини України, наведено в табл. 3. Крім супутникових знімків у дисертаційній роботі використано п'ять глобальних карт лісового покриву з просторовим розрізненням 25–30 м і карту запасу деревостанів із розміром пікселя 100×100 м.

Таблиця 3

Характеристика використаних супутникових знімків Landsat 8 OLI

Композитна мозаїка для періоду	Початкова дата	Кінцева дата	Відсоток хмарності території, %	Кількість знімків
Рік	01.01.2014	31.12.2016	30	1548
Літо	01.06.2014	31.08.2014	30	607
	01.06.2015	31.08.2015		
	01.06.2016	31.08.2016		
Осінь	01.09.2014	30.11.2014	20	326
	01.09.2015	30.11.2015		
	01.09.2016	30.11.2016		
Квітень–жовтень	01.04.2014	31.10.2014	20	1020
	01.04.2015	31.10.2015		
	01.04.2016	31.10.2016		

Супутникові знімки Landsat 8 OLI одержано за допомогою платформи Google Earth Engine (GEE) API (Gorelick N. et al., 2017), клієнтська частина якої забезпечує прямий доступ до даних дистанційного зондування Землі. При цьому їхній аналіз здійснюється безпосередньо на серверній частині за допомогою клієнтських алгоритмів або стандартних функцій низького рівня. Архітектура GEE API спростила складні обчислення, особливо на етапі створення безхмарних композитних мозаїк і класифікації знімків для рівнинної частини України.

Радіометричне калібрування знімків виконано за спрощеною процедурою, яка передбачає використання даних відбиття на сенсорі та стала поширеною в дослідженні лісів. Стабільна геометрія сцен Landsat рівня обробки L1T, яку впродовж багатьох років забезпечують мережа опорних точок та детальна цифрова модель рельєфу, дозволила не розглядати методику геометричної корекції цих знімків. З метою виправлення геометричних

спотворень супутникових знімків SPOT 7 та PlanetScore, що застосовувалися для локальних експериментальних полігонів, ортотрансформацію виконано на основі раціональних поліноміальних коефіцієнтів, які постачалися зі знімками.

Оскільки під час дослідження частково виникала необхідність залучення знімків Landsat 7 ETM+, які забезпечили перекриття областей із пропусками інформації, додатково обґрунтовано методику гармонізації відбиття в спектральних каналах різних сенсорів Landsat. Для цього запропоновано систему регресійних коефіцієнтів, що були обґрунтовані емпіричним способом в дослідженнях D. P. Roy et al. (2016). Базуючись на цьому, опрацьовано принципи створення для рівнинної частини України безхмарних мозаїк, використовуючи методику відбору «найкращих» серед доступних спостережень на рівні пікселя. У контексті дисертаційної роботи ними були пікселі, які не потрапили на хмари та мали найбільше значення вегетаційного індексу нормалізованої різниці *NDVI* в ряді спостережень для відповідного періоду зйомки. Формування безхмарних мозаїк за цим принципом виконано для трьох сезонів: рік, літо, осінь. З метою виявлення фенологічних змін упродовж вегетаційного сезону (квітень–жовтень) порівняно з центральною тенденцією сформовано додаткову мозаїку, до якої пікселі відбирали за статистичними правилами: мінімальне та максимальне значення, 1-й та 3-й квартилі, медіана.

У дисертаційній роботі розглянуто непараметричні методи класифікації супутникових знімків, оскільки масив змінних був достатньо значний. Серед сучасних алгоритмів перевагу надано алгоритмам машинного навчання, зокрема методу Random Forest – для тематичної класифікації супутникових знімків за типами земного покриття, та *k*-NN – для прогнозування таксаційних показників лісової інвентаризації. У результаті опрацьовано методику комплексного дешифрування супутникових знімків, яку відображає рис. 1.

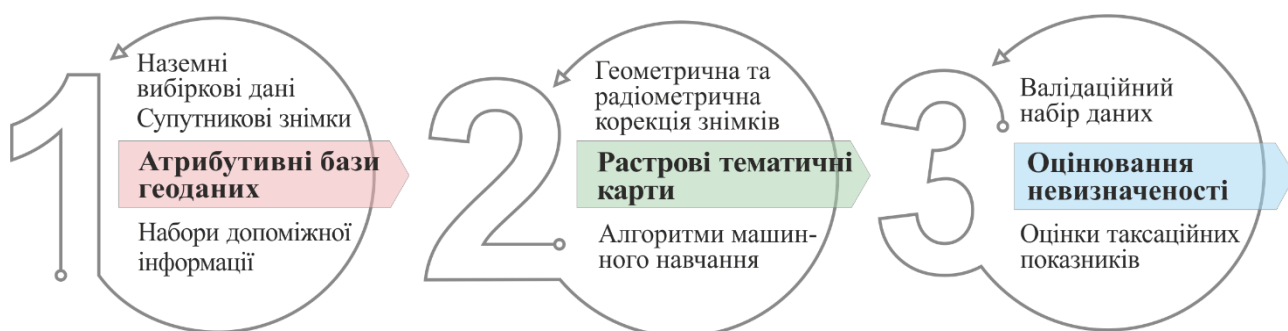


Рис. 1. Блок-схема методики дешифрування супутникових знімків

З метою обґрунтування обсягу навчальної вибірки використано наявний доробок вчених (Olofsson P. et al., 2014) з питань використання глобальної карти Global Forest Change (GFC) як основи для створення стратифікованої вибірки за чотирма класами: лісовий покрив, нелісовий покрив, втрати лісу, відновлення лісу:

$$n = \frac{(\sum W_i \cdot S_i)^2}{[s(\hat{\theta})]^2 + (1/N) \sum W_i \cdot S_i^2} \approx \left(\frac{\sum W_i \cdot S_i}{s(\hat{\theta})} \right)^2, \quad (5)$$

де N – загальна кількість вибірових одиниць в області інтересу (кількість пікселів); $S(\hat{O})$ – прогнозоване значення стандартної помилки оцінювання загальної точності класифікації; W_i – частка площі, віднесеної до i -того класу; S_i – стандартне відхилення у страті, $S_i = \sqrt{U_i \cdot (1 - U_i)}$.

Відповідно до запроєктованої схеми на території кожної адміністративної області налічувалося від 220 до 250 випадкових точок, а загальний обсяг вибірки становив понад 4700 спостережень. Для інтерпретації вибірових одиниць у дисертаційному дослідженні використано web-застосунок Collect Earth (Bey A. et al., 2016), який забезпечив доступ до супутникових знімків Google Earth, Bing Maps та їхню інтерпретацію згідно з розробленою схемою (табл. 4). Під час візуального дешифрування знімків вважали, що кожна вибірова одиниця являє собою центр ділянки площею 0,25 га на місцевості. Рішення про віднесення ділянки до відповідної категорії приймали на основі положення її центра, орієнтовний склад насаджень – за співвідношенням між кількістю точок сітки, які потрапили на крони хвойних чи листяних видів, та їх загальною кількістю для вибірової одиниці.

Таблиця 4

Ієрархічна схема класифікації вибірових одиниць

Категорія земного покриву	Підкатегорія земного покриву
Водойми	Ріки; озера; водосховища
Водно-болотні угіддя	Сезонна водойма; болото низинне; болото верхове; набережна рослинність
Населені пункти	Урбанізовані території; сільські території; транспортні шляхи
Інші непродуктивні землі	Піски; каміння; інші землі
Сільськогосподарські угіддя	Рілля; зрошувальні угіддя; незрошувальні угіддя; фруктові сади
Травостої	Луки; травостої з поодинокими деревами; травостої з кущовою рослинністю; розріджена трав'яна рослинність
Чагарники	Чагарники; чагарники з поодинокими деревами
Ліс	Хвойний ліс (частка хвойних видів у деревному наметі >75 %); листяний ліс (частка листяних видів у деревному наметі >75 %); мішаний ліс; полезахисні лісосмуги; міські насадження; природне відновлення лісу на сільськогосподарських землях; пошкоджені (ті, що всихають) лісові насадження

Обробку супутникових знімків здійснювали на базі платформи GEE API, а також частково для локальних полігонів Київської та Чернігівської областей – у системі R v. 3.5.1. Візуалізацію результатів підготовлено в програмному забезпеченні Quantum GIS (QGIS). Усі системи функціонують за принципом відкритого програмного коду та в комплексі дозволяють виконувати аналіз будь-якого рівня складності.

У четвертому розділі «Оцінювання площі та запасу деревостанів на основі глобальних карт лісового покриву» встановлено точність та особливості застосування глобальних продуктів лісового покриву для картографування рівнинних лісів та оцінювання деревного запасу.

Глобальна карта змін лісового покриву (GFC – Global Forest Change) та неперервні поля зімкнутості деревостанів (LTCCF – Landsat Tree Cover Continuous Fields) є достатньо подібними продуктами, що відображають лісовий покрив за відсотком зімкнутості крон. Для коректного застосування цих карт і підрахунку площі рівнинних лісів необхідно встановити граничні значення зімкнутості та повноти лісових насаджень, на підставі яких розділяють на практиці вкриті та невкриті лісовою рослинністю ділянки. З цією метою залучено лісовпорядні матеріали для 15 державних лісгосподарських підприємств, в яких відібрано понад 10 тис. таксаційних виділів з повнотою 0,3–0,5 (рис. 2).



1. ДП «Гайсинське ЛГ»
2. ДП «Баранівське ЛМГ»
3. ДП «Словечанське ЛГ»
4. ДП «Запорізьке ЛГ»
5. ДП «Мелітопольське ЛМГ»
6. ДП «Долинське ЛГ»
7. ДП «Лубенське ЛГ»
8. ДП «Володимирецьке ЛГ»
9. ДП «Сарненське ЛГ»
10. ДП «Сумське ЛГ»
11. ДП «Шосткинське ЛГ»
12. ДП «Гутянське ЛГ»
13. ДП «Ізюмське ЛГ»
14. ДП «Остерське ЛГ»
15. ВП НУБіП України «Боярська ЛДС»

Рис. 2. Розташування тестових полігонів для верифікації карти GFC

У результаті порівняння відносної повноти деревостанів та відповідними значеннями зімкнутості на карті встановлено, що для території рівнинної частини України вкриті та невкриті лісовою рослинністю ділянки точніше розділяються за порогового значення зімкнутості 40 %. Точність розрахунків контролювалася шляхом порівняння загальної площі лісів, оціненої за картою, та даними державного обліку 2011 року. Використовуючи матриці помилок, для кожної адміністративної області встановлено показники точності класифікації, а також скориговано оцінки площі лісів згідно з глобальною картою GFC (рис. 3).

Згідно з одержаними даними виявлено, що на основі карти GFC можна визначити площу вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок у більшості регіонів із прийнятною точністю. Для трьох областей Полісся України (Волинська, Житомирська, Чернігівська) оцінка площі виявилася істотно більшою, порівняно з даними державного обліку лісів України станом на 01.01.2011 р. Найменшу точність дешифрування зафіксовано для областей із

низьким рівнем лісистості (Запорізька, Миколаївська, Херсонська). На основі порівняння карт зімкнутості деревостанів можна констатувати про наявність зв'язку між їхніми оцінками. Проте карта LTCCF занижує цей показник і, як наслідок, встановленому емпіричним шляхом пороговому значенню згідно з картою GFC 40 % відповідає зімкнутість 25 %.

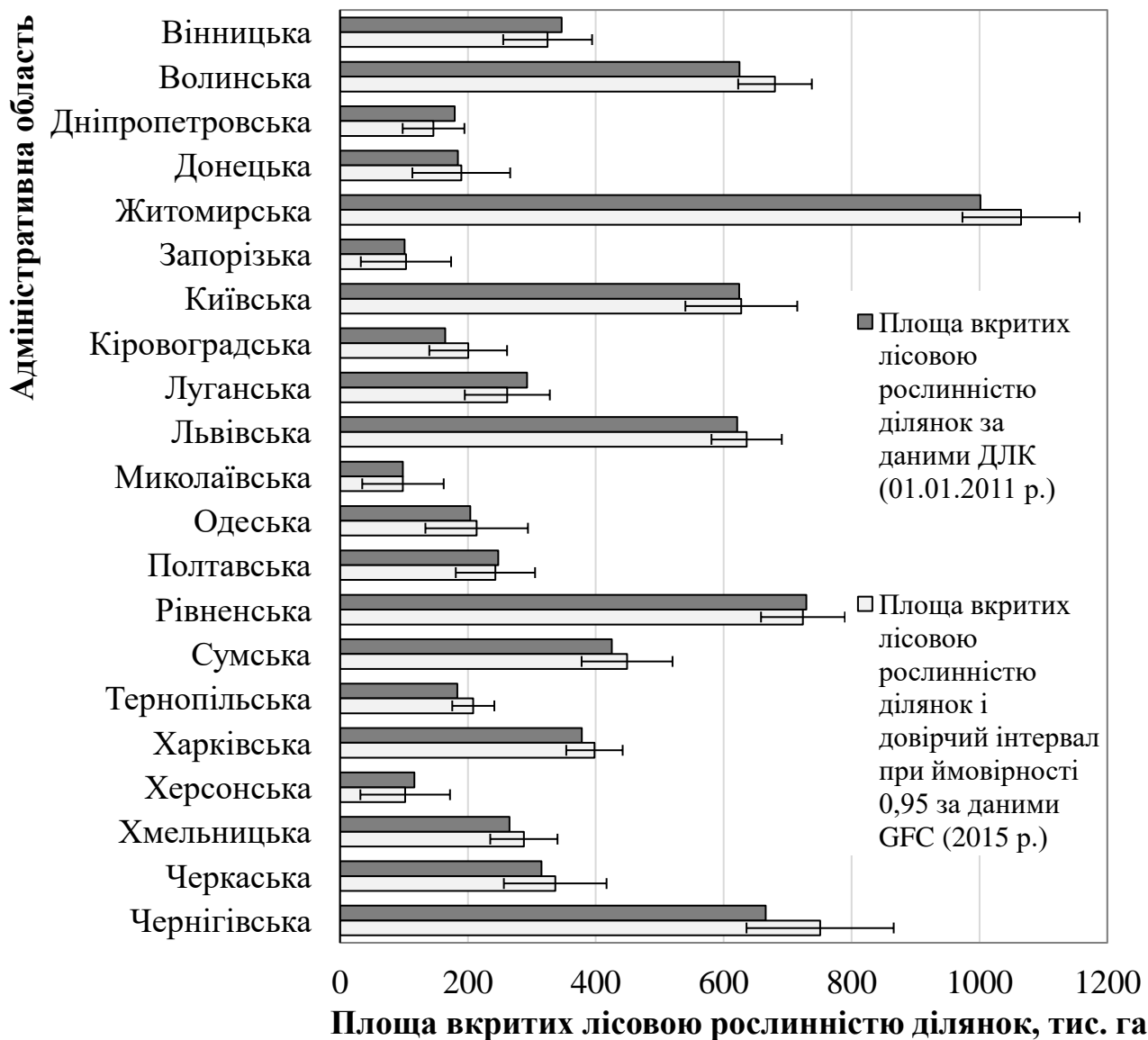


Рис. 3. Площа вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок адміністративних областей рівнинної частини України за даними різних джерел

Найбільший недолік обох карт пов'язаний із низькою достовірністю дешифрування полезахисних смуг степової зони України, що призводить до суттєвого заниження площі лісів у низці південних регіонів. Усе ж карта GFC виявилася точнішою свого аналога (рис. 4).

Точність зазначених неперервних карт порівнювали з двома дискретними лісовими масками – JAXA FNF та GlobeLand30, використовуючи матриці помилок. Згідно з даними табл. 5 найвищу чутливість ідентифікації лісового покриву за показником точності виробника ($P_j = 93\%$) демонструє карта GFC, а найнижчу – GlobeLand30 ($P_j = 58\%$). Проте лісові маски всіх продуктів

мають великі помилки включення нелісових класів, у зв'язку з чим точність користувача коливається в діапазоні 56–68 %.

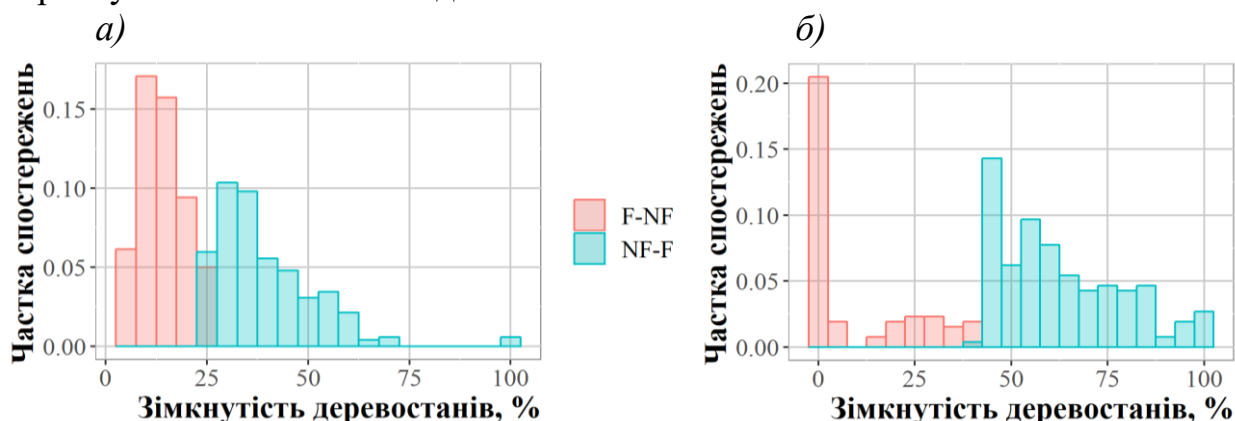


Рис. 4. Вірогідність появи помилок під час класифікації карт зімкнутості деревостанів: *а* – неперервні поля зімкнутості деревостанів LTCCF; *б* – глобальна карта змін лісового покриву GFC (F-NF, NF-F – відповідно відображає вибіркові одиниці вкриті лісовою рослинністю (F), які класифіковано як невкриті (NF), та навпаки за порогового значення 25 % для карти LTCCF і 40 % – для карти GFC).

Таблиця 5

Показники точності класифікації лісового покриву рівнинної частини України за глобальними картами

Глобальна карта	Каппа	Показник точності, %				
		загальна (O)	користувача (U_i)		виробника (P_j)	
			F	NF	F	NF
JAXA FNF	0,551	80	56	95	87	78
GlobeLand30	0,500	82	65	87	58	90
GFC	0,614	83	60	97	93	80
LTCCF	0,667	86	68	95	86	87

Типовими помилками для всіх глобальних продуктів є включення до класу вкритих лісовою рослинністю ділянок травостоїв і чагарників, на яких може зростати деревна рослинність. Карта JAXA FNF у цьому відношенні гарантує найменшу точність. Її недолік пов'язаний також із включенням до лісової маски зрошуваних сільськогосподарських угідь. Тут очевидні переваги має карта GlobeLand30, для створення якої застосовано метод класифікації на основі експертної бази знань про типи земного покриву.

Всі аналізовані лісові маски виявилися неефективними для картографування поєднаних лісових смуг. Крім цього, вагомий внесок у помилки тематичного класу вкритих лісовою рослинністю ділянок роблять фруктові сади – об'єкти з близькими до лісових насаджень спектральними характеристиками.

Глобальна карта запасу деревостанів GlobBiomass виявилася коректною тільки для встановлення загального та середнього запасу лісових насаджень для відносно великих областей інтересу. Зокрема загальні запаси деревостанів відібраних 15 лісгосподарських підприємств виявилися достатньо

узгодженими з даними повидільної бази лісового фонду (рис. 2). Контрольні ж заміри на вибіркових одиницях статистичної інвентаризації лісів Сумської області вказують на істотні помилки глобального продукту на рівні окремого пікселя.

У результаті дослідження зроблено висновок, що глобальні карти лісового покриву можуть стати в майбутньому ефективним інструментом контролю точності лісооблікових робіт, проте, на цьому етапі їхня якість ще є незадовільною. Зазначені обставини спонукають до розробки уніфікованих методів картографування лісових насаджень, придатних для адекватного оцінювання їхньої площі та деревного запасу.

У п'ятому розділі **«Просторові закономірності поширення лісів рівнинної частини України»** опрацьовано методику картографування лісових насаджень за часовими рядами мультиспектральних знімків Landsat 8 OLI та розроблено маску для рівнинних лісів України з просторовим розрізненням 30 м. Крім цього вдосконалено методику дешифрування видового складу лісових насаджень на ландшафтній основі.

Завдяки доступності супутникових знімків різних сенсорів і можливостям обчислювальних технологій, упродовж останніх років поширеними стали фенологічно орієнтовані методи дешифрування вкритих лісовою рослинністю ділянок. На цій основі покращується ідентифікація різних типів рослинності, які мають відмінні характеристики на початку та наприкінці вегетаційного періоду (наприклад, трав'яниста рослинність і лісові насадження, деревостани з переважанням хвойних і листяних видів). Урахування річного циклу розвитку лісових насаджень стало можливим завдяки спеціальним методам обробки часових серій супутникових знімків.

З метою створення лісової маски виконано дослідження динаміки спектральних характеристик земного покриву, в результаті чого розроблено фенологічно орієнтовані методи дешифрування вкритих лісовою рослинністю ділянок. Для цього використано стратифіковану випадкову вибірку обсягом понад 4,5 тис. спостережень, спроектовану для областей рівнинної частини України на основі глобальної карти GFC. Часову серію супутникових знімків створено в середовищі GEE API на основі 1548 знімків Landsat. У часовому діапазоні їх відфільтровано з 01.01.2014 по 31.12.2016 рр., а за величиною хмарності – не більше 30 % (див. табл. 3).

У дисертаційній роботі досліджено спектральні характеристики шести каналів: 4 – Red (0,64–0,67 мкм) видимого діапазону; 5 – NIR (0,85–0,88 мкм) ближнього інфрачервоного діапазону; 6 – SWIR 1 і 7 – SWIR 2 короткохвильового інфрачервоного діапазону (відповідно 1,57–1,65 мкм і 2,11–2,29 мкм); два теплових спектральних канали: 10 – TIRS 1 і 11 – TIRS 2 (відповідно 10,60–11,19 мкм і 11,50–12,51 мкм). Крім цього, створено додаткові канали на основі індексу *NDVI* і таких співвідношень: канал 4 / канал 6, канал 4 / канал 7, канал 5 / канал 6, канал 5 / канал 7, канал 6 / канал 7. Аналізуючи можливість розділення різних класів земного покриву, найбільш

інформативними виявилися канали короткохвильового інфрачервоного діапазону 6 і 7, а також комбінації каналів, наведені на рис. 5. Достатньо важливими для класифікації знімків визначено також співвідношення каналів 6 і 7, яке підкреслює відмінності лісових насаджень та інших категорій земного покриву. Аналогічне твердження теж стосується відношення каналів 5 і 7.

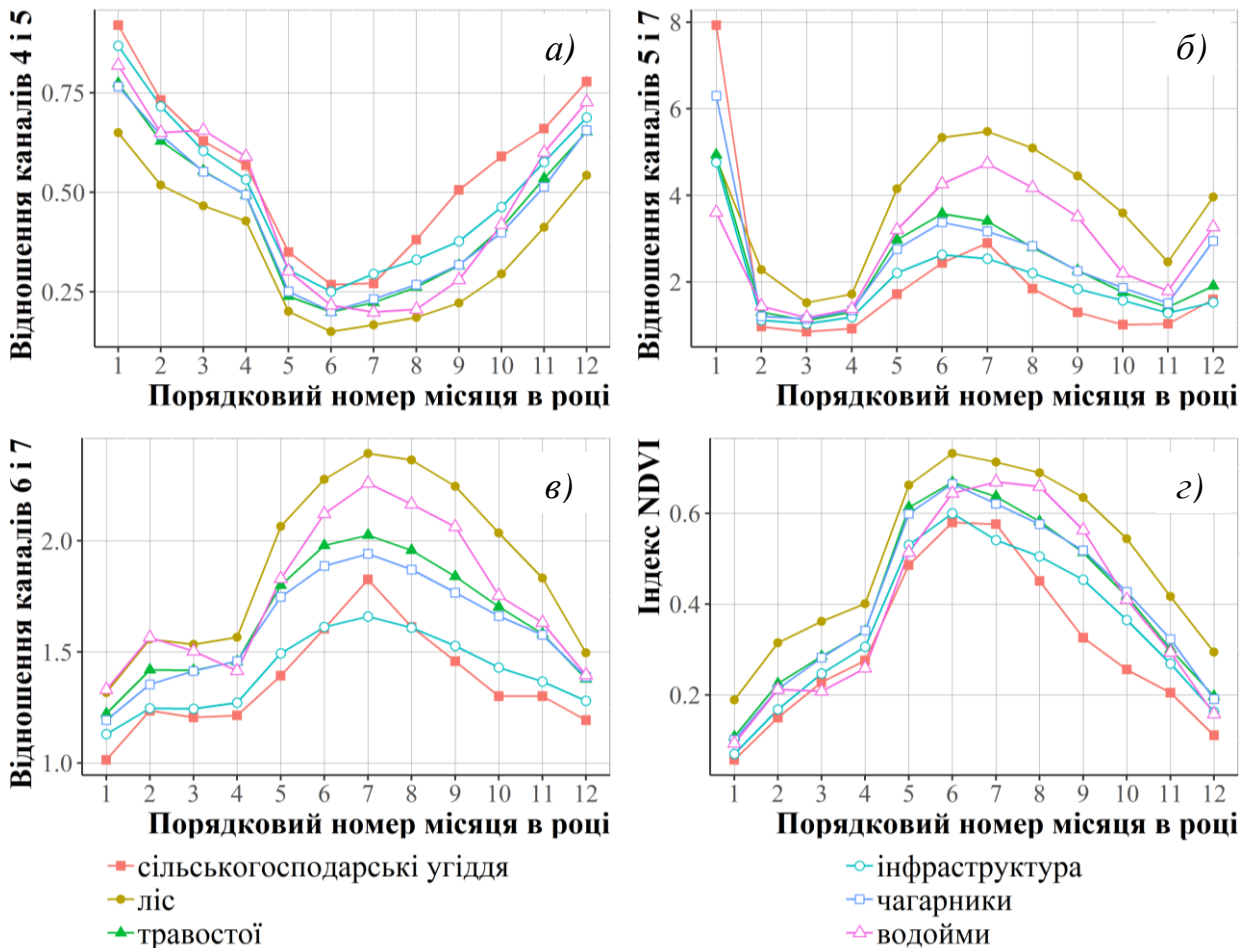


Рис. 5. Динаміка спектральних показників категорій земного покриву в співвідношеннях каналів знімків Landsat 8 OLI: *a* – канали червоного та ближнього інфрачервоного спектра; *б* – канали ближнього та короткохвильового інфрачервоного спектра; *в* – канали короткохвильового інфрачервоного спектра; *г* – вегетаційний індекс нормалізованої різниці

Як відомо, значні труднощі класифікації супутникових знімків пов'язані з розділенням різних типів рослинності. Відповідно до цього виявлено, що діапазони червоного й інфрачервоного спектрів (канали 4 і 5) допомагають виявити відмінності між сільськогосподарськими угіддями та лісовими насадженнями у період стійкого снігового покриву протягом січня. Достатньо чітко тематичні класи розрізняють також у теплових діапазонах випромінювання (канали 10 і 11).

Найбільші відмінності у фенологічному стані трьох груп лісових насаджень (хвойні, листяні та мішані) за знімками Landsat 8 OLI теж проявляються в каналах червоного та інфрачервоного спектра (канали 4 і 5). У безлистому стані (протягом жовтня-квітня) група листяних деревних видів має

більші значення відбиття в червоному діапазоні та найменші – в інфрачервоному. Значна диференціація між трьома групами насаджень зберігається практично протягом усього року в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні каналу 6 і дещо менше – каналу 7. Хвойні деревостани виділяються в усіх комбінаціях діапазонів електромагнітного спектра. Відмінності спектральних показників між листяними та мішаними насадженнями дещо менші, а в період вегетації практично зникають, проте істотно посилюються за відсутності фотосинтетичного апарату.

Розглянуті закономірності сформували необхідні передумови для розробки науково обґрунтованих методів дешифрування видового складу лісових насаджень за часовими серіями супутникових знімків Landsat 8 OLI. На основі відібраних знімків для території рівнинної частини України створено безхмарні мозаїки для чотирьох сезонів: літо, осінь, рік, квітень-жовтень. Дві останні з них зображено на рис. 6.

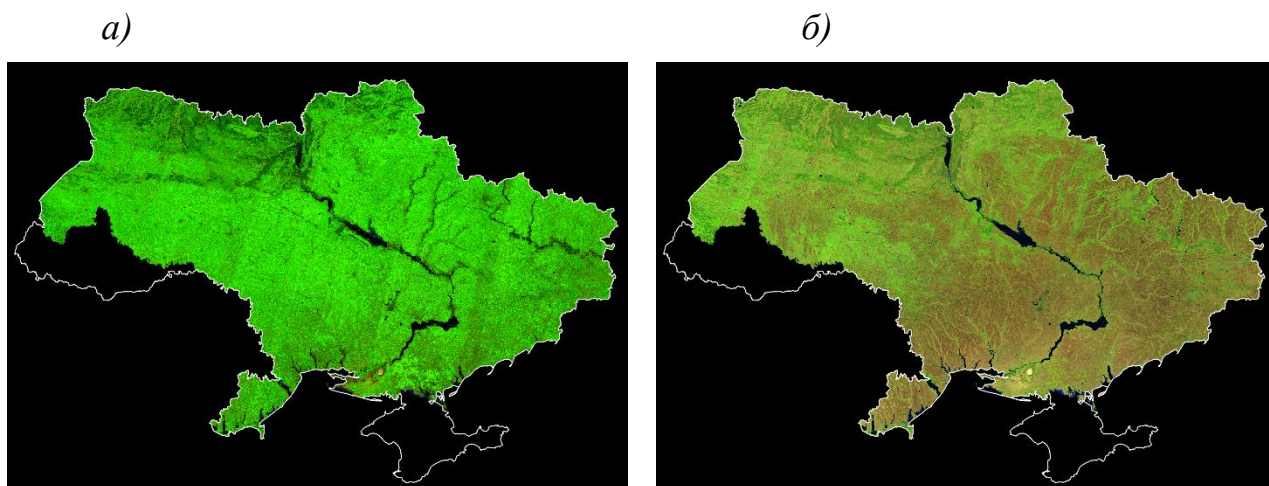


Рис. 6. Безхмарні мозаїки Landsat 8 OLI території рівнинної частини України станом на 2014–2016 рр.: *а* – річна мозаїка (комбінація каналів: 6–5–4); *б* – сезонна мозаїка для періоду квітень-жовтень (25-й перцентиль за комбінації каналів 6–5–4)

У зв'язку з великою кількістю показників, які одержано з сезонних мозаїк, виконано оптимізацію навчальної вибірки. Для цього за допомогою алгоритму машинного навчання Random Forest змінні, представлені в табл. 6, впорядковано залежно від їхнього внеску в загальну точність класифікації. Алгоритм виконувався за послідовного включення кожної наступної за рангом змінної, починаючи від двох найважливіших (географічна довгота та вегетаційний індекс *NDVI* для річної мозаїки), і завершувався, коли всі 53 показники було включено до моделі. У результаті встановлено, що для дешифрування типів земного покриття найменша помилка класифікації досягається на основі 36 показників, а для дешифрування груп лісових насаджень – коли їх налічується 37.

Спектральні показники сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI

Спектральні змінні для мозаїк сезонів літо, осінь, рік	Показники, визначені для мозаїки сезону квітень-жовтень
Відбиття в каналі 4	Мінімальне та максимальне значення відбиття для каналів 4–7 та індексу <i>NDVI</i>
Відбиття в каналі 5	
Відбиття в каналі 6	
Відбиття в каналі 7	
Індекс <i>NDVI</i>	25-й та 75-й перцентилі відбиття для каналів 4–7 та індексу <i>NDVI</i>
Відношення каналів 4 і 5	Медіана відбиття для каналів 4–7 та індексу <i>NDVI</i>
Відношення каналів 5 і 7	
Відношення каналів 6 і 7	Географічні координати X та Y (широта та довгота)
Перетворення типу «ковпак з кистю»	

Класифікацію лісів рівнинної частини України за даними сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI здійснювали згідно із зображеною на рис. 7 блок-схемою.



Рис. 7. Блок-схема дешифрування груп лісових насаджень за сезонними композитними мозаїками Landsat 8 OLI

Реалізація опрацьованої методики класифікації супутникових знімків Landsat 8 OLI для території рівнинної частини України на персональному комп'ютері – практично нездійсненна задача. Адже навіть підготовчий етап роботи зі створення сезонних мозаїк потребує великих витрат часу й ресурсів. У зв'язку з цим, алгоритм обробки знімків від самого початку розроблявся на платформі GEE API, а розрахунки виконано віддалено в хмарному кластері Google. У результаті досліджень для території рівнинної частини України

створено три тематичні карти. Першою з них є карта земного покриття станом на 2014–2016 рр., що включає 8 визначених в табл. 4 тематичних класів. По суті, це найважливіший результат картографування, який слугує основою для лісової маски – бінарного варіанту землекористування (рис. 8). Надалі її деталізація являє собою узагальнену карту видового складу лісових насаджень за трьома групами (хвойні, листяні, мішані).

Враховуючи велику мінливість оцінок площі лісів для окремих адміністративних областей, одержану під час аналізу глобальної карти GFC, точність лісової маски визначено для всієї території рівнинної частини України (табл. 7). Згідно з сучасними методиками наведену матрицю помилок було трансформовано таким чином, щоб її елементи відображали частку площі генеральної сукупності, якій вони відповідають на карті. На цій основі виконано розрахунки невизначеності оцінок площі вкритих лісовою рослинністю ділянок. Відповідно до одержаних результатів, з довірчою ймовірністю 0,95, показники точності користувача (\hat{U}_i) та виробника (\hat{P}_j) для лісової маски коливаються в діапазонах $\hat{U}_i = 0,795 \pm 0,022$ та $\hat{P}_j = 0,845 \pm 0,025$, а оцінка площі рівнинних лісів становить $8572,4 \pm 317,3$ тис. га, або $15,8 \pm 0,6$ % – у відносних показниках лісистості.

Таблиця 7

Матриця помилок класифікації категорій земного покриття за сезонними мозаїками Landsat 8 OLI

Тематичний клас	Опорні дані								Разом
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	сільсько-господарські угіддя	травостої	чагарники	ліс	
Водойми	66	3	0	3	3	2	0	1	78
Водно-болотні угіддя	7	57	0	0	2	6	2	0	74
Населені пункти	1	2	118	3	4	5	14	3	150
Інші непродуктивні землі	0	0	2	6	1	0	0	0	9
Сільськогосподарські угіддя	2	17	51	7	1882	148	26	44	2177
Травостої	1	39	42	13	100	504	128	64	891
Чагарники	0	1	1	0	1	5	25	3	36
Ліс	1	19	14	3	23	121	89	1046	1316
Разом	78	138	228	35	2016	791	284	1161	4731

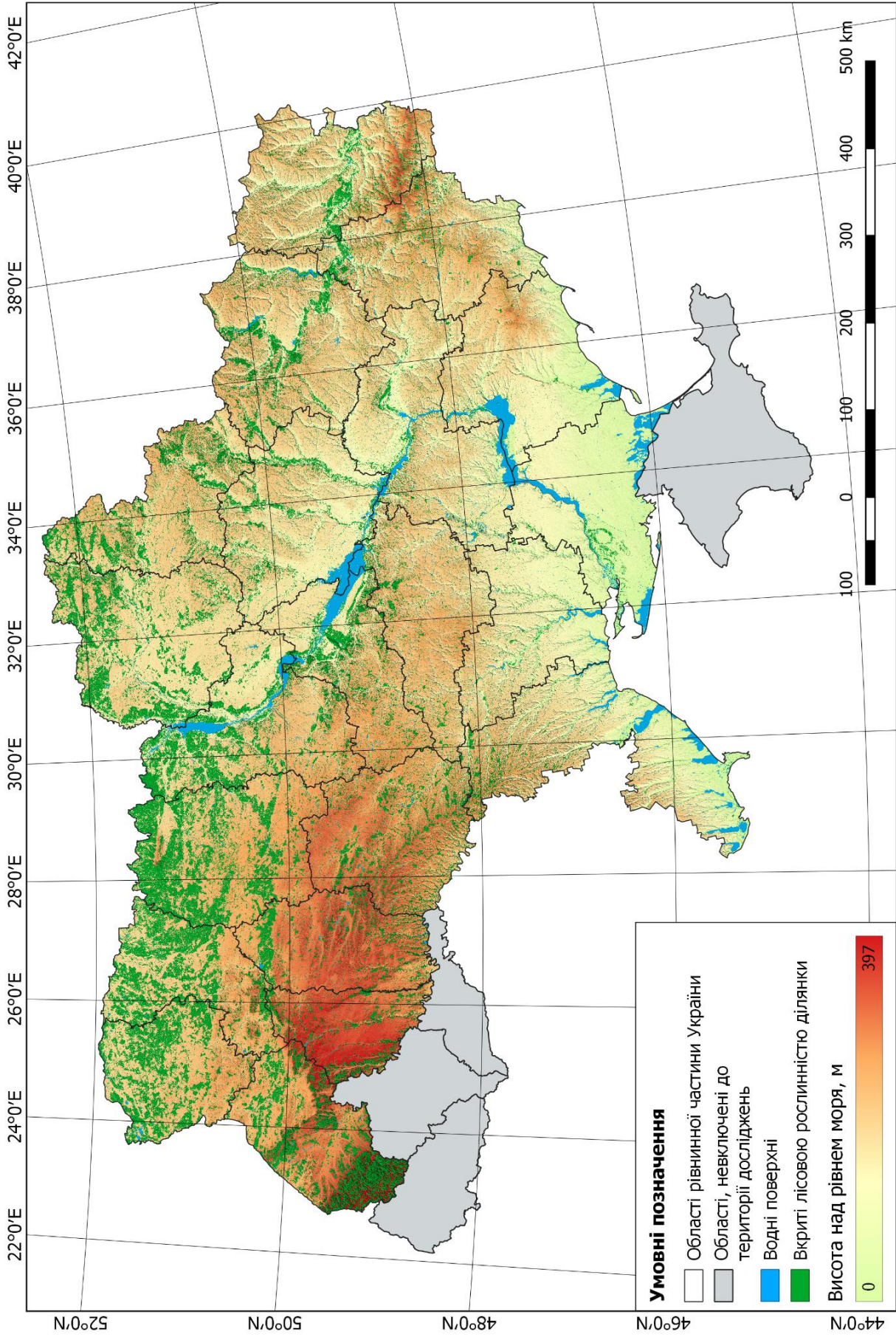


Рис. 8. Лісова маска рівнинної частини України, розроблена за даними супутникових знімків Landsat 8 OLI

Перевищення майже на 1 % оціненої лісистості рівнинної частини України порівняно з офіційними даними (14,4 %), пояснюється не тільки помилками класифікації, а й інтерпретацією в дисертаційному дослідженні поняття «ліс» у біофізичному розумінні. Відповідно, до цього класу потрапили ділянки, вкриті лісовою рослинністю, що ідентифікуються за знімками на основі відповідного ступеня зімкнутості, висоти деревостану тощо. Все ж помилкам властивий широтний градієнт: тоді як для областей поліського регіону (Волинська, Рівненська, Житомирська, Київська, Чернігівська) точність класифікації за двома показниками перевищує 80 %, для степових областей – істотно поступається та знаходиться на рівні 60–70 %.

Створена лісова маска є точною для нефрагментованих ділянок лісового фонду, проте невдало відображає вузькі лінійні насадження завширшки до 30 м. Як наслідок, для областей Поліського регіону оцінка площі вкритих лісовою рослинністю ділянок виявилася приблизно на 10 % завищеною. Це можна пояснити відновленням лісу на колишніх сільськогосподарських землях, що не враховано в матеріалах обліку лісів 2011 року. Крім того, розроблена карта не виключає з розрахунку площу зелених насаджень на території населених пунктів. Загалом узгодженість розробленої лісової маски з наземними даними вища порівняно з даними GFC. Більша частина неточності лісової маски на півдні пов'язана зі структурою лісового фонду цього регіону. Він переважно представлений захисними лісовими насадженнями лінійного типу, які складно дешифруються за супутниковими знімками Landsat. Отже, помилки класифікації можна пов'язати одночасно з просторовим розрізненням знімків (30 м) і незадовільним станом полезахисних смуг, на що акцентують увагу українські вчені (Ткач В. П., 2012).

Порівняно з точністю лісової маски, дешифрування груп деревостанів виявилось менш ефективним. На рівнинній Україні точніше дешифруються хвойні та листяні деревостани, мішані – лише додають невизначеності результатам класифікації. При цьому помилки закладаються на етапі збору опорної інформації про склад лісових насаджень візуальними методами.

На основі одержаних результатів зроблено висновок про доцільність вдосконалення методики на прикладі локального полігону Чернігівської області. Для цього на першому етапі досліджень за знімком SPOT 7 створено лісову маску, далі виконано дешифрування шести поширених на території деревних видів (сосна звичайна, береза повисла, вільха клейка, тополя тремтяча, дуб звичайний та робінія псевдоакація). Для розробки лісової маски залучали дані візуального дешифрування вибіркового одиниць за знімками Google, тоді як дешифрування деревних видів виконано на основі атрибутивної інформації з повидільної бази даних лісового фонду. З метою підвищення точності класифікаційної моделі навчальну вибірку доповнено набором додаткових неспектральних показників. У результаті опрацьовано сучасні принципи ландшафтного методу дешифрування лісових насаджень, в якому застосовуються географічні закономірності росту та поширення деревостанів. У дисертаційному дослідженні вони були враховані завдяки включенню в

класифікаційну модель Random Forest географічних координат X та Y, висоти над рівнем моря та карти ґрунтів території полігону.

Дослідження, виконані на полігоні, стали важливими для усвідомлення локальної точності опрацьованої маски лісів рівнинної частини України. Площа вкритих лісовою рослинністю ділянок відповідно до даних супутникового знімка SPOT 7 становить 1866 га, тоді як згідно з результатами тематичної обробки часових серій Landsat 8 OLI її оцінка виявилася дещо заниженою – 1776 га. Враховуючи, що просторове розрізнення супутникових знімків відрізняється в п'ять разів, одержане відхилення 5 % можна визнати неістотним. Значно більшою виявилася помилка глобальної карти GFC. Площа вкритих лісовою рослинністю ділянок за цією картою найменша та становить 1215,5 га. Одержані результати підтвердили ефективність розробленої методики дешифрування щільних часових серій супутникових знімків Landsat та локальну точність маски рівнинних лісів України.

У шостому розділі «**Прикладні рішення регіональної інвентаризації лісів за даними наземних і супутникових вимірювань**» опрацьовано методику поєднання даних таксації лісових насаджень на вибіркових одиницях лісової інвентаризації для картографування та статистичного оцінювання показників лісового фонду.

У дисертаційній роботі проаналізовано ефективність різних конфігурацій вибіркових ділянок інвентаризації лісу, використовуючи дослідні дані, зібрані науковцями кафедри таксації лісу та лісового менеджменту Національного університету біоресурсів і природокористування України в ході спланованого експерименту на полігоні Київської області протягом 2017–2018 рр. Використовуючи координати положення облікових дерев, для кожного з них розраховано відстань до центра пробної площі (табл. 8).

Таблиця 8

Параметри конфігурацій пробних ділянок вибіркової інвентаризації лісу

Шифр конфігурації*	Параметри вибіркової одиниці**				
	основна ділянка		додаткова ділянка		реласкопічний коефіцієнт
	R_{max} , м	d , см	R_I , м	d , см	
F 1262–8	12,62	$\geq 8,0$	–	–	–
N 398–12	12,62	$\geq 12,0$	3,98	6,0–11,9	–
N 564–12	12,62	$\geq 12,0$	5,64	6,0–11,9	–
N 798–12	12,62	$\geq 12,0$	7,98	6,0–11,9	–
N 564~977–12	9,77	$\geq 12,0$	5,64	6,0–11,9	–
TA 1262–1	12,62	$\geq 8,0$	–	–	1
TA 1262–2	12,62	$\geq 8,0$	–	–	2
TA 1128–1	11,28	$\geq 8,0$	–	–	1
TA 977–1	9,77	$\geq 8,0$	–	–	1
AC-1	–	$\geq 8,0$	–	–	1

Примітка. *F – кругові пробні площі постійного радіуса; N – концентричні проби; TA – комбіновані ділянки; AC – реласкопічні пробні площі. ** R_{max} , R_I – відповідно радіуси основної та додаткової ділянки; d – діаметр облікових дерев

Відповідно до розташування дерев на пробній площі та їхніх діаметрів обчислено зони включення (*IZ*) для всіх облікових дерев за різних конфігурацій концентричних і комбінованих ділянок. Останні поєднують принципи кругової та кутової вибірки з різною величиною реласкопічного коефіцієнта та максимального радіуса, що обмежує зону відбору дерев критичним кутом повнотоміра Біттерліха. Ефективність таксації лісових насаджень за різних конфігурацій пробних ділянок досліджували на основі порівняння результатів оцінювання таксаційних показників із відповідними даними, одержаними на пробних площах постійного радіуса (F 1262–8).

У дисертаційній роботі проаналізовано вплив зміни радіуса підпроби концентричних ділянок з 3,98 до 7,98 м за граничного діаметра дерев 12 см на точність оцінки суми площ перерізів і густоти насаджень (табл. 9). Дослідження особливостей комбінованої вибірки полягало в одночасному аналізі впливу на точність величини реласкопічного коефіцієнта та максимального радіуса, який обмежує зону відбору дерев. Цей радіус відсікає критичний кут, за допомогою якого виконується відбір дерев у насадженні. Отже, для проб фіксованої площі ймовірність відбору дерев залежить від радіуса проб і густоти деревостану, для реласкопічних проб – від величини критичного кута (ширини прицільної рамки повнотоміра) та розмірів дерев (зазвичай діаметра на висоті 1,3 м), то для комбінованих – одночасно від максимального радіуса зони відбору, критичного кута та діаметра дерев.

Таблиця 9

**Точність оцінки сум площ перерізів і кількості дерев
на 1 га за різних конфігурацій пробних ділянок**

Шифр конфігурації	Кількість облікових дерев	Середнє квадратичне відхилення		Систематична помилка	
		м ² ·га ⁻¹	шт.·га ⁻¹	м ² ·га ⁻¹	шт.·га ⁻¹
F 1262–8	2851	–	–	–	–
N 398–12	2713	0,5	74	–0,0	1
N 564–12	2736	0,5	54	0,0	5
N 798–12	2772	0,2	30	0,0	4
N 564~977–12	1722	4,9	93	–11	–121
ТА 1262–1	2412	1,1	82	0,3	14
ТА 1262–2	1833	3,1	130	0,3	10
ТА 1128–1	2078	4,1	89	1,0	22
ТА 977–1	1644	5,7	96	1,0	21
АС-1	4097	7,9	89	–4,0	–15

На основі одержаних даних можна констатувати про істотний вплив зменшення площі основної проби на точність одержаних оцінок. З практичних міркувань перевагу варто віддати варіантам із меншим радіусом додаткової проби. Метод комбінованої вибірки характеризується істотно вищою мінливістю оцінок таксаційних показників, яка закономірно зростає зі збільшенням реласкопічного коефіцієнта та зменшенням зони відбору. У контексті подальшого поєднання даних вибіркової таксації лісових насаджень і матеріалів супутникової зйомки визначено перспективні конфігурації ділянок із

радіусом основної проби 12,62 м: F 1262–8, TA 1262–1, N 398–12. Для реласкопічного методу таксації (АС-1) одержано найбільші систематичні та середньоквадратичні відхилення оцінки сум площ перерізів деревостанів.

З метою дешифрування таксаційних показників виконано діагностику k -NN методу, використовуючи зазначені конфігурації пробних ділянок. Як джерело дистанційних даних використано супутникові знімки відразу трьох сенсорів: Landsat 8 OLI, SPOT 7 та PlanetScope. Це достатньо різнопланові дані, що являють собою відповідно сезонні мозаїки супутникових спостережень з просторовим розрізненням 30 м, окрему сцену мультиспектрального знімка з розміром пікселя 6×6 м і часову серію спостережень за просторового розрізнення 3,125 м. Вплив конфігурації пробних площ на величину середнього квадратичного відхилення $RMSD$ проаналізовано за базової імплементації k -NN методу, яка передбачає використання Евклідової відстані та параметра $k=1$. Дослідження виконано в статистичному пакеті `yaImpute` для системи R v. 3.5.1, використовуючи чотири типи пробних ділянок (табл. 10).

Таблиця 10

Величина середнього квадратичного відхилення оцінок суми площ перерізів дерев на 1 га за різних конфігурацій пробних ділянок та типів даних дистанційного зондування Землі, $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$

Тип спектральних даних	Шифр конфігурації пробних ділянок			
	F 1262–8	N 398–12	TA 1262–1	АС-1
PlanetScope	11,6	11,6	11,7	9,2
SPOT 7	11,2	11,2	11,4	10,4
Landsat 8 OLI	10,1	10,0	10,2	9,7

Порівнюючи оцінки сум площ перерізів деревостанів, можна зробити висновок, що часові серії супутникових спостережень відіграють більшу роль у дешифруванні, ніж просторове розрізнення знімків. Оцінка значень цього показника на підставі окремої сцени SPOT 7 суттєво поступається точності як за серією супутникових знімків PlanetScope, так і за сезонними мозаїками Landsat 8 OLI. Звідси випливає економічна доцільність інвентаризації великих територій із використанням часових серій безкоштовних супутникових знімків Landsat 8 OLI.

Вибір величини k є суб'єктивним рішенням, яке приймається на основі багатьох чинників. Коректніше в цьому відношенні спрацьовують малі значення k , які дозволяють зберегти коваріацію між різними показниками вибірки та перенести її на цільовий набір даних. Збільшуючи кількість сусідів, на основі яких здійснюється прогноз досліджуваного показника за k -NN методом, істотно обмежується діапазон мінливості його значень. У разі обробки сезонних мозаїк Landsat 8 OLI обчислення Евклідової відстані забезпечило найменшу середню квадратичну помилку $8,2 \text{ м}^2$ при $k=9$, що на $2,9 \text{ м}^2$ менше, ніж при $k=1$. Проте ця перевага може проявлятися виключно під час оцінювання середнього значення суми площ перерізів дерев на 1 га або за наявності великого обсягу навчальної вибірки (рис. 9).

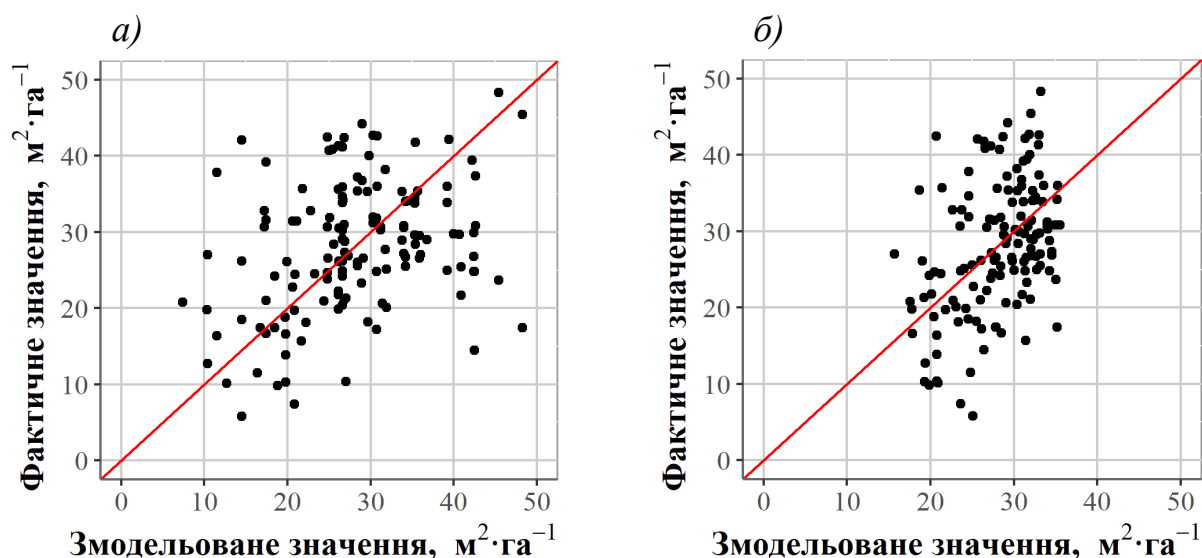


Рис. 9. Співвідношення між фактичними (F 1262–8) і змодельованими значеннями сум площ перерізів дерев (Landsat 8 OLI): *a* – за $k=1$; *б* – за $k=9$

Проведені експериментальні дослідження формують необхідне наукове підґрунтя для ефективного використання k -NN методу під час регіональної інвентаризації лісів за даними дистанційних і вибіркового наземних вимірювань. Одержані дані щодо основних налаштувань алгоритму (джерело наземної та спектральної інформації, кількість і метод пошуку найближчих сусідів) використано для дешифрування таксаційних показників на території Сумської області (рис. 10).

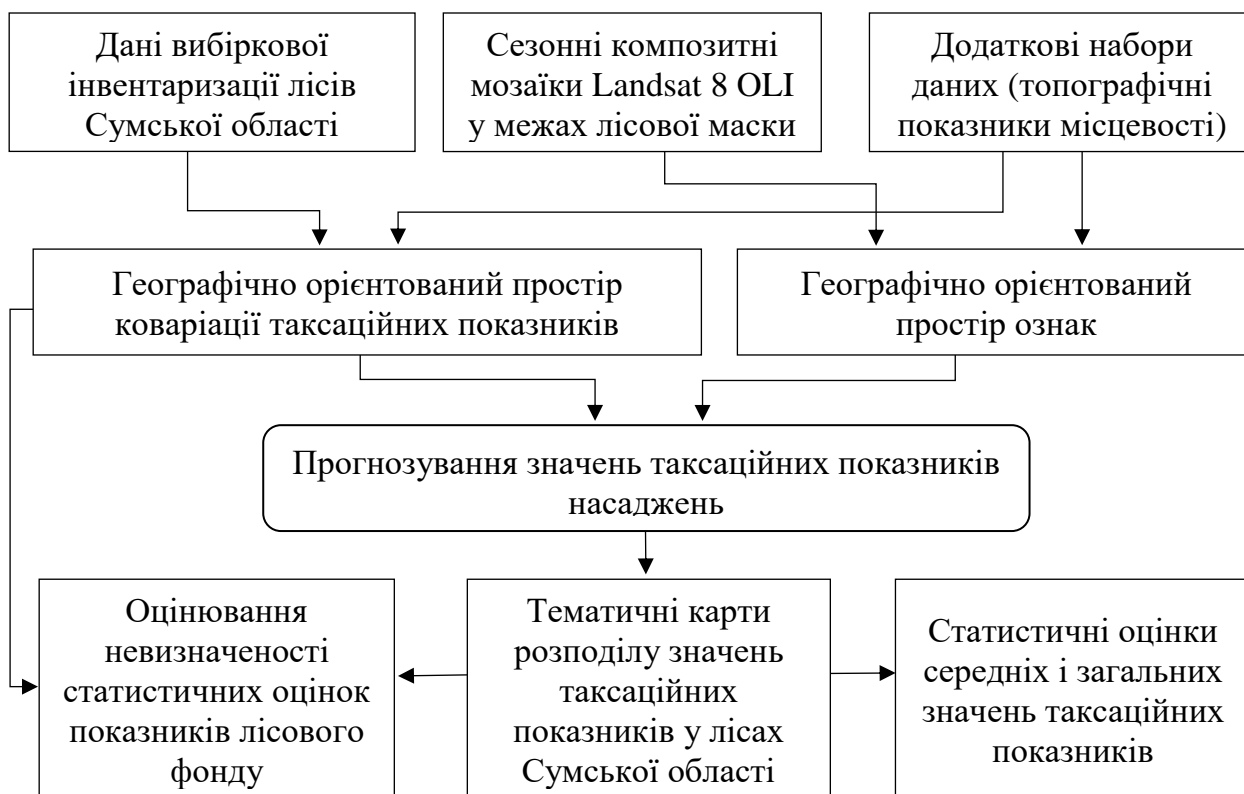


Рис. 10. Блок-схема розрахунків статистичної інвентаризації лісів згідно з k -NN методом

Методика прогнозування сум площ перерізів і запасу деревостанів на основі k -NN методу базується на поєднанні трьох ключових наборів геопросторових даних: результатів обробки матеріалів натурної таксації лісових насаджень; радіометрично та геометрично коригованих мультиспектральних супутникових знімків Landsat 8 OLI, скомпонованих у вигляді безхмарних сезонних мозаїк; додаткових наборів даних про топографічні показники місцевості. Задля узгодження методичних прийомів наземних і дистанційних вимірювань на основі k -NN методу змодельовано розподіл суми площ поперечних перерізів восьми найпредставленіших деревних видів Сумської області. Градієнти розподілу суми площ перерізів було трансформовано в тематичну карту, що відображає поширення панівних (за абсолютною повнотою) деревних видів у складі лісових насаджень (рис. 11).

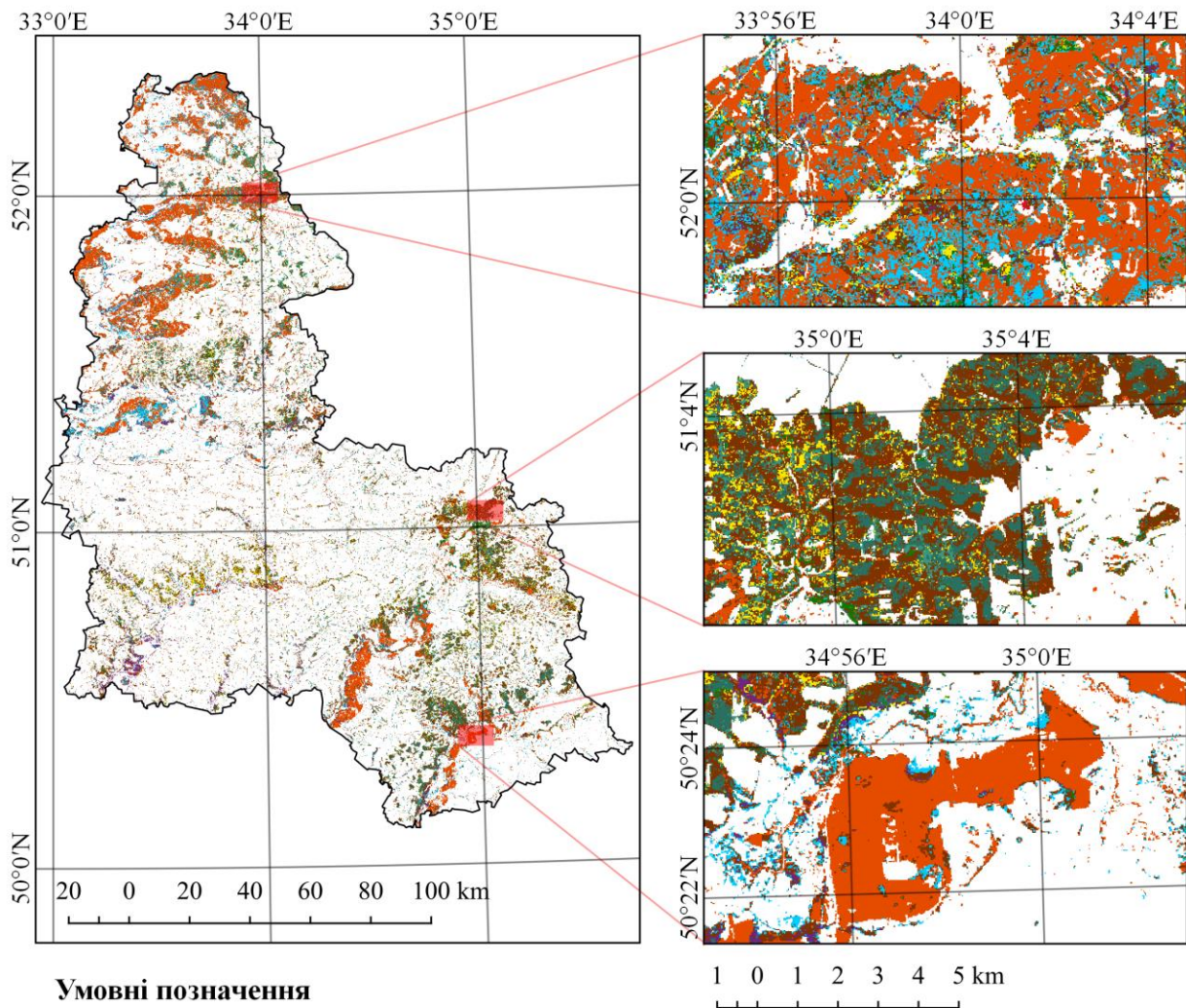


Рис. 11. Деревні види, які домінують у лісових насадженнях Сумської області

Дешифрування знімків проводили за адаптованою для GEE API версією алгоритму, який здійснює прогноз значень змінної відповідно до k -NN методу при $k=1$. Як міру відстані для пошуку сусідів застосовано різницю значень загальної суми площ перерізів деревостанів у n -мірному Евклідовому просторі. Отже, на території Сумської області спостерігається специфічний розподіл площі лісових насаджень різного видового складу. На півночі області зростають лісові насадження, де домінує сосна звичайна. Приблизно $\frac{1}{4}$ соснових лісів є чистими за складом, ще майже $\frac{1}{2}$ – з домішкою одного або двох деревних видів. Значно меншу площу займають лісові насадження з переважанням берези повислої та дуба звичайного, ще рідше трапляються деревостани, де головною породою є осика. На півдні видове різноманіття насаджень істотно зростає, причому спостерігається зміна головних лісотвірних видів. У насадженнях лісостепової зони області панівними є ясен звичайний, дуб звичайний і липа дрібнолиста. Вільха клейка приурочена до понижених ділянок, що частіше знаходяться в західній частині області.

Створена карта дозволила встановити розподіл площі вкритих лісовою рослинністю ділянок за домінантними видами. Для порівняння результатів використано відносні значення фактичного розподілу площ лісових насаджень за основними лісотвірними деревними видами, які одержано за повидільною базою даних про лісовий фонд області та наведено на рис. 12.

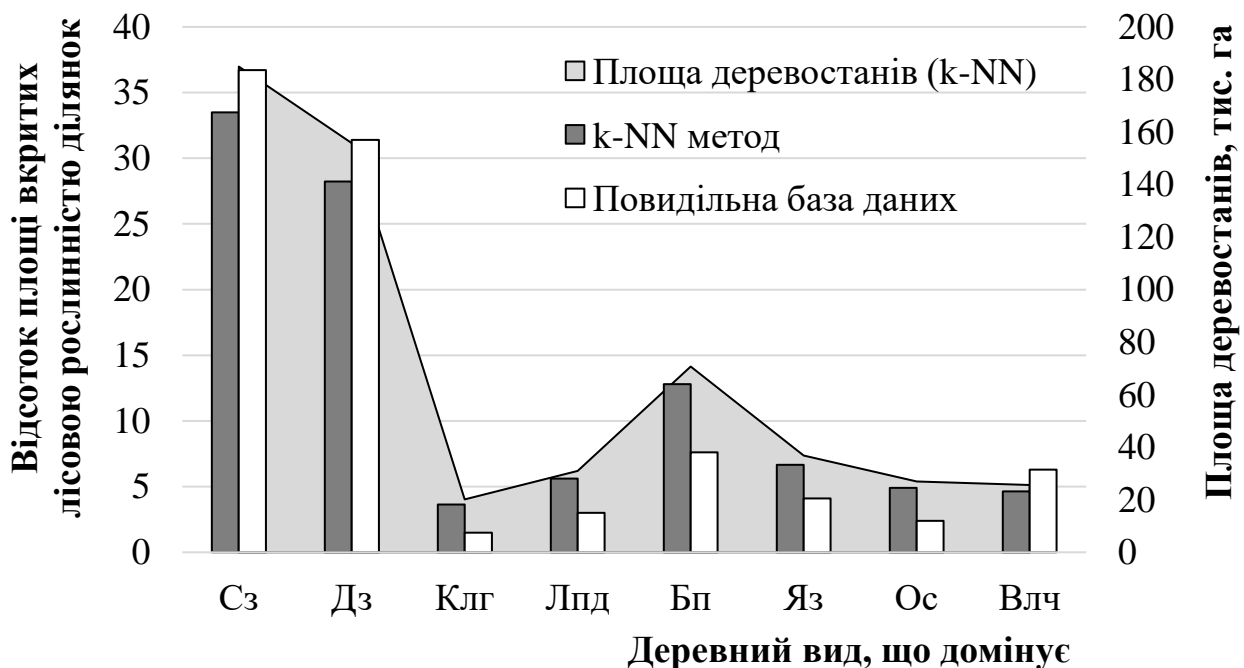
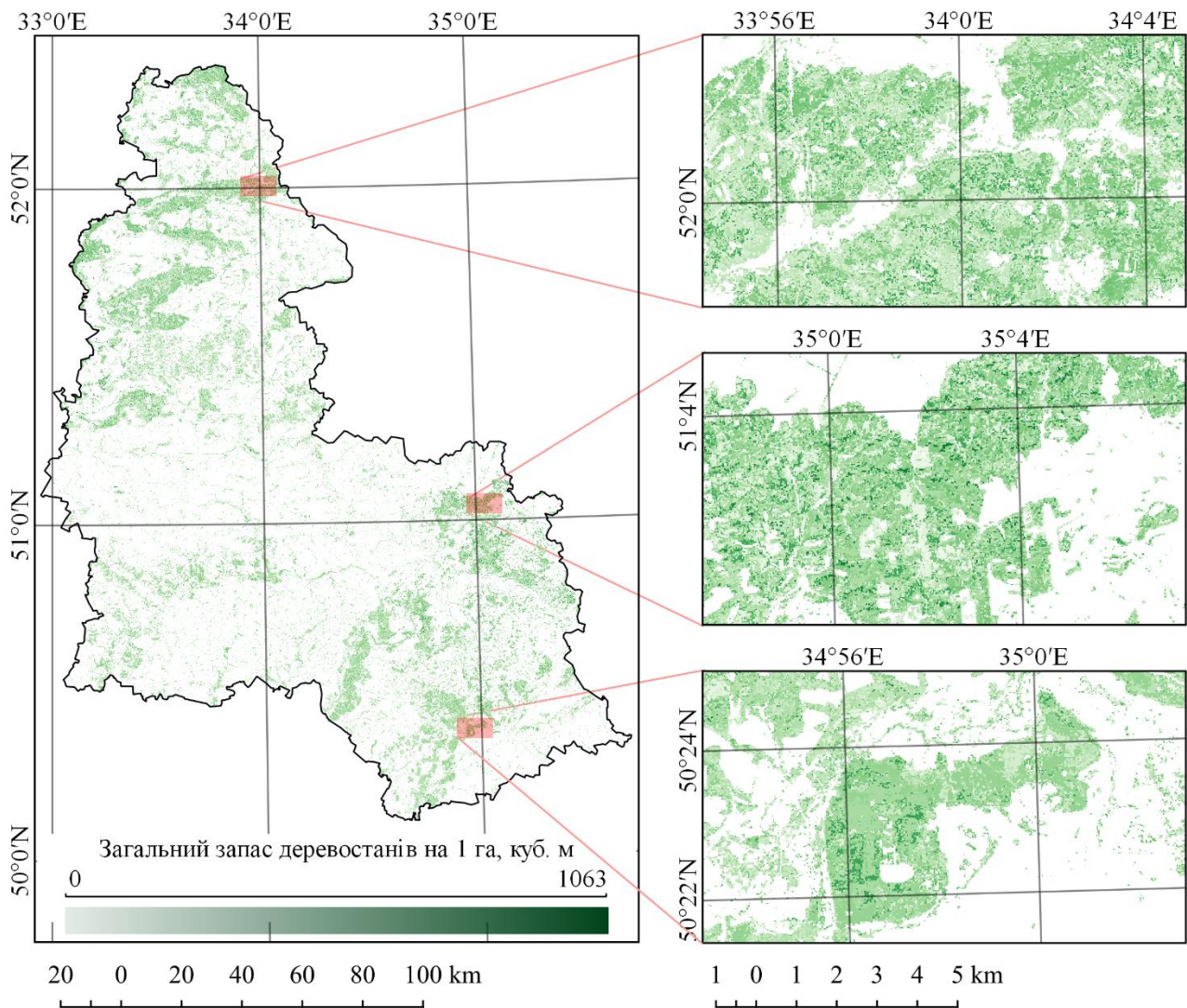


Рис. 12. Порівняння прогнозних і фактичних даних про розподіл площі лісових насаджень за основними лісотвірними деревними видами (Сз – сосна звичайна, Дз – дуб звичайний, Клг – клен гостролистий, Лпд – липа дрібнолиста, Бп – береза повисла, Яз – ясен звичайний, Ос – тополя тремтяча, Влч – вільха клейка)

Відповідно до прогностичного картографування відзначається певне перевищення площі соснових і дубових деревостанів, які переважають у структурі лісового фонду області. Це можна пояснити, з одного боку,

помилками дешифрування, а з іншого – класифікацією лісових насаджень у практиці лісовпорядного проектування за головними породами.

Картографування просторового розподілу запасу деревостанів на території Сумської області здійснено за k -NN алгоритмом, на основі якого виконано дешифрування видового складу лісових насаджень. Для цього застосовано попередній простір ознак та матрицю відстаней між сусідами при $k=1$, побудовану на основі значень суми площ перерізів деревостанів. Завдяки спільній матриці відстаней досягнуто абсолютної узгодженості між прогнозованими даними сум площ перерізів і запасу деревостанів: кожному пікселю растру, для якого встановлено перший показник для i -того деревного виду, приписано відповідне значення запасу деревостану (рис. 13).



Умовні позначення

□ Адміністративна границя Сумської області

Рис. 13. Розподіл загального запасу деревостанів на території Сумської області відповідно до k -NN методу

Порівняння запасів деревостанів за основними елементами лісу свідчить про високу узгодженість між фактичними (одержаними на основі вибірки) та

прогнозними (одержані за k -NN методом) показниками запасу деревостанів. На основі показників точності k -NN методу обчислені в табл. 11 значення середнього запасу деревостанів на 1 га за елементами лісу можуть бути скориговані на величину систематичної помилки відповідно до рівняння (6):

$$\hat{M}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{y}_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (6)$$

де \hat{M}_j – скориговане значення середнього запасу j -того деревного виду на 1 га, м^3 ; N – кількість елементів (пікселів), які беруть участь у розрахунку середнього значення запасу за моделлю; n – обсяг вибірки (дані наземної вибіркової інвентаризації); \hat{y}_i – прогнозне значення запасу для i -того пікселя, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$; y_i – значення запасу, встановлене для i -тої вибіркової одиниці, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$.

Таблиця 11

Показники точності дешифрування запасу деревостанів за k -NN методом

Елемент лісу	Вибіркова інвентаризація		k -NN метод		
	кількість вибірових одиниць	середній запас, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$	середній запас, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$	систематична помилка, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$	помилка середнього значення, $\text{м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$
Сосна звичайна	167	312	301	-4,2	7,8
Дуб звичайний	184	131	134	2,3	2,4
Клен гостролистий	133	44	41	-0,3	1,1
Липа дрібнолиста	123	74	74	1,4	1,6
Береза повисла	130	67	87	6,8	5,1
Ясен звичайний	84	102	80	2,3	1,7
Тополя тремтяча	42	64	71	1,5	1,0
Вільха клейка	22	141	139	0,3	0,3
Усі елементи лісу	375	330	333	3,8	4,0

Отже, враховуючи систематичну ($3,8 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$) та основну помилку ($4,0 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$) можна стверджувати, що середнє значення запасу лісових насаджень Сумської області за ймовірності 0,95 знаходиться в діапазоні $329 \pm 8 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$. Створені карти попиксельного розподілу запасу деревостанів Сумської області використано для обчислення загальних запасів. Також важливе значення розроблених продуктів полягає в можливості оцінювання запасу деревостанів для, так званих, «малих територій». Таким чином, у дисертаційній роботі вперше проведено оцінювання запасу лісових насаджень для адміністративних районів Сумської області, що є ключовою перевагою інвентаризації лісів на основі матеріалів супутникової зйомки.

Відповідно до одержаних результатів спостерігаються певні просторові закономірності розподілу деревного запасу лісових насаджень. Найбільшим його середнім значенням (понад $350 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$) характеризуються соснові деревостани Шосткинського району, тоді як в чотирьох районах центральної частини області (Глухівський, Путивльський, Буринський і Білопільський) він

не перевищує $200\text{--}250\text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$. Відносно високі значення середнього запасу дубових деревостанів (понад $173\text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$) зустрічаються в низці районів південної частини Сумської області, в більшості з них зростають також ясеневі деревостани, середній запас яких досягає $140\text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$. Встановлено також, що просторовий розподіл середнього запасу деревостанів ясена звичайного та клена гостролистого найтісніше корелює із запасами дуба звичайного, які часто утворюють мішані лісові насадження. Для території дослідження характерним є відносно велике значення середнього запасу клейковільхових деревостанів. Оскільки поширення вільхи клейкої пов'язане з пониженими ділянками рельєфу, то запаси деревостанів понад $150\text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$ є типовими для районів, де протікають найбільші ріки області та формують специфічні форми заплавної ландшафтів. На основі створених тематичних карт встановлено розподіл площі кожного деревного виду за адміністративними районами та обчислено загальні запаси деревини, що акумулюються в лісових насадженнях області (рис. 14).

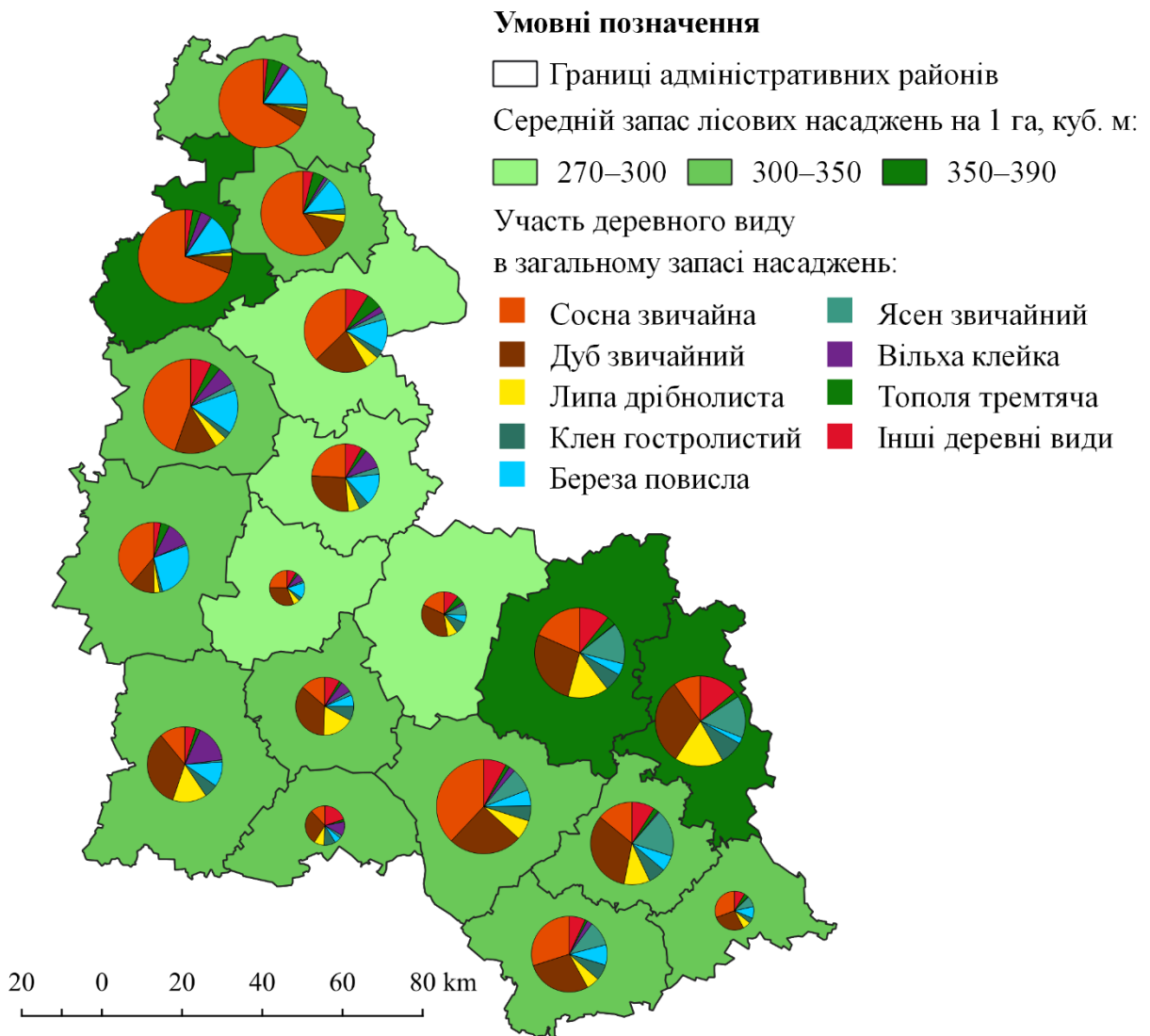


Рис. 14. Розподіл загального запасу деревостанів основних лісотвірних видів Сумської області відповідно до k -NN методу

Таким чином, у дисертаційній роботі вдосконалено методику проведення інвентаризації лісу, яка завдяки поєднанню вибірових наземних спостережень і повного покриття території супутниковими знімками підсилює результати обліку лісового фонду статистичними методами. Важливою перевагою опрацьованої технології є можливість створення та постійного оновлення картографічних матеріалів про стан і показники лісового фонду.

Сучасні риси статистичної інвентаризації лісів визначають такі поняття, як територіальна основа вибірки, її інтенсивність та конфігурація пробних ділянок. Проте впровадження технологій супутникової зйомки вимагає врахування додаткових параметрів вибірового методу під час обліку лісів. У разі успішного розв'язання поставленої проблеми можливості та інформативність обліку лісу наземними методами суттєво покращується.

ВИСНОВКИ

У дисертації виконано теоретичне обґрунтування технології обліку лісів рівнинної частини України з використанням наземних вибірових і дистанційних вимірювань показників лісового фонду. Розроблені методичні та прикладні аспекти удосконалюють науковий рівень статистичної інвентаризації та картографування лісів, орієнтуючись на сучасні тенденції розв'язання цієї проблеми в світі. За результатами проведеного дослідження сформульовано такі основні висновки:

1. Опрацьовані теоретичні основи поєднання технології наземного та дистанційного збору даних підвищують точність і сферу застосування результатів статистичного обліку рівнинних лісів України. Доведено, що вибірові методи лісової таксації є основою для розробки технології дистанційного оцінювання показників лісових насаджень, а використання даних супутникової зйомки – інструментом обліку лісів усіх форм власності та підпорядкування за єдиним науково-методичним принципом.

2. Під час інвентаризації лісів дистанційними методами мають застосовуватися ефективні конфігурації пробних ділянок, які оптимізують співвідношення між обсягом польових робіт і точністю статистичних оцінок показників лісового фонду. Перспективними для обліку рівнинних лісів визначено концентричні пробні площі, а також поєднання реласкопічних і кругових ділянок із радіусом основної проби 12,62 м. У результаті експериментальних досліджень опрацьовано непараметричний метод прогнозування об'єму облікових дерев та обчислення запасу деревостанів на пробних ділянках лісової інвентаризації.

3. Щільні часові серії супутникових знімків Landsat слугують важливим джерелом даних для лісової інвентаризації значних територій, оскільки забезпечують неперервне покриття всієї території рівнинної частини України впродовж понад як 40-річного періоду. Обробка цих даних зумовлює проблему Великих даних, яку доречно вирішувати з використанням «хмарних» технологій. У цьому контексті в дисертаційній роботі доведено ефективність відкритої платформи Google Earth Engine API.

4. Серед глобальних продуктів лісового покриву з просторовим розрізненням 25–30 м найточнішою для картографування та встановлення площі рівнинних лісів України виявилася карта Global Forest Change. У зв'язку з фрагментованістю лісів, її доречно використовувати виключно для Поліського регіону території дослідження.

5. Вагомим практичним результатом дисертаційної роботи є лісова маска території рівнинної частини України, яку розроблено за знімками Landsat 8 OLI станом на 2014–2016 рр. Точність лісової маски в середньому становить 80 %, а площа рівнинних лісів України згідно з її даними оцінюється на рівні $8572,4 \pm 317,3$ тис. га (7766,7 тис. га – за офіційними даними), що відповідає показнику лісистості $15,8 \pm 0,6$ % (14,4 % – за офіційними даними).

6. Непараметричний k -NN метод дешифрування супутникових знімків забезпечує достовірну оцінку видового складу та запасу лісових насаджень. Він перспективний для запровадження національної інвентаризації лісів із використанням методів наземних вибіркових спостережень і дистанційного оцінювання показників лісового фонду.

7. Запровадження технології інвентаризації лісів на основі даних супутникової зйомки розширює можливості обліку лісів для малих територій. З цією метою необхідно використовувати розроблену в дисертаційній роботі методику статистичного оцінювання показників лісового фонду та непараметричний алгоритм k -NN методу. Технологія дозволяє встановлювати площу, середні та загальні запаси стовбурової деревини в лісових насадженнях об'єкта інвентаризації та його локальних частин.

ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

1. У системі обліку лісових ресурсів України нагальним залишається запровадження технологій дистанційного оцінювання показників лісового фонду, що збільшить рівень довіри громадськості до його результатів завдяки неупередженим методам збору даних. З цією метою запропоновано алгоритми дешифрування лісових насаджень на основі часових серій супутникових знімків.

2. Під час неперервного лісовпорядкування для уточнення змін у лісовому фонді рекомендовано застосовувати актуалізовані лісові маски, розроблені на основі некомерційних супутникових знімків.

3. Статистичній інвентаризації лісу запропоновано технологію поєднання методів наземного та дистанційного збору даних для картографування лісових насаджень і статистичного оцінювання показників лісового фонду, яка включає такі елементи:

- непараметричний алгоритм обчислення запасу деревостанів на вибіркових ділянках інвентаризації лісу;
- алгоритмічне забезпечення для прогнозування значень таксаційних показників деревостанів за матеріалами наземних і дистанційних спостережень;
- методика інвентаризації лісів малих територій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. Строчинський А. А., **Миронюк В. В.** Таксація зелених насаджень міста Києва: теорія та практика: [монографія]. Корсунь-Шевченківський, 2015. 179 с. *(Здобувачем виконано натурні обстеження, здійснено статистичну обробку дослідних матеріалів, опрацьовано методика використання супутникових знімків різного просторового розрізнення для картографування насаджень на території населених пунктів).*

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. **Миронюк В. В.**, Строчинський А. А. Особливості моделювання об'єму дерев міських зелених насаджень. Біоресурси і природокористування. 2010. Т. 2. № 1–2. С. 91–94. *(Здобувачем здійснено збір дослідного матеріалу, опрацьовано математичні моделі для обчислення об'єму дерев клена).*

3. **Миронюк В. В.**, Кохан С. С., Востоков А. Б. Особливості визначення видового складу міських зелених насаджень за даними супутникових знімків GeoEye-1. Біоресурси і природокористування. 2012. Т. 4. № 5–6. С. 176–182. *(Здобувачем виконано збір дослідних даних і статистичну обробку спектральних показників для п'яти деревних видів).*

4. **Миронюк В. В.**, Свинчук В. А. Методичні основи обліку міських зелених насаджень із використанням супутникових знімків різного просторового розрізнення. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2012. Вип. 171. Ч. 2. С. 75–82. *(Здобувачем розроблено схему територіальної основи вибірки та обчислено площу насаджень на основі супутникових знімків).*

5. Миронюк В. В. Сучасні методи оцінки таксаційних показників лісових насаджень на основі дешифрування космічних знімків. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2013. Вип. 187. Ч. 1. С. 209–215.

Статті у наукових фахових виданнях України,

включених до міжнародних наукометричних баз даних:

6. Гілітуха Д. В., **Миронюк В. В.** Удосконалення технологій таксаційного дешифрування супутникових знімків високого просторового розрізнення. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2012. № 7 (36). Режим доступу до статті: http://nd.nubip.edu.ua/2012_7/12gdv.pdf. *(Здобувачем опрацьовано методика ідентифікації дерев у насажденні за супутниковими знімками та виконано локалізацію дерев на пробних площах).*

7. Гірс О. А., **Миронюк В. В.**, Кутя М. М. Розпізнавання лісопаркових ландшафтів зеленої зони м. Києва за даними ДЗЗ. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2012. № 7 (36). Режим доступу до статті: <http://www.nbu.gov.ua/e->

journals/Nd/2012_7/12gdv.pdf. *(Здобувачем розроблено математичну модель для оцінювання зімкнутості деревостанів за супутниковими знімками Landsat).*

8. Миронюк В. В. Особливості впливу умов урбанізованого середовища на біометричні параметри дерев міських зелених насаджень. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2013. Вип. 187. Ч. 3. С. 159–166.

9. Лакида П. І., **Миронюк В. В.**, Гілітуха Д. В. Аналіз та інтерпретація карти високого просторового розрізнення лісових екосистем Полісся України. Збалансоване природокористування. 2014. № 4. С. 5–9. *(Здобувачем розроблено алгоритм дешифрування лісових насаджень на основі глобальної карти Global Forest Change, встановлено взаємозв'язок фактичної зімкнутості деревостанів з відповідними показниками карти).*

10. Свинчук В. А., Кашпор С. М., **Миронюк В. В.** Математичні моделі об'єму деревних стовбурів основних лісоутворювальних порід України. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2014. Вип. 198. Ч. 2. С. 58–64. *(Здобувачем виконано узагальнення методів моделювання об'єму стовбурів дерев, розроблено математичну модель видового числа стовбурів сосни в перестійних деревостанах).*

11. Зібцев С. В., **Миронюк В. В.**, Гілітуха Д. В. Динаміка лісового покриву Чорнобильської зони відчуження за даними глобальної карти лісових екосистем високого просторового розрізнення. Лісове і садово-паркове господарство. 2015. № 6. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/9956/8862>. *(Здобувачем виконано дешифрування вкритих лісовою рослинністю ділянок на основі глобальної карти Global Forest Change).*

12. Миронюк В. В. Перспективи використання k-NN методу класифікації космічних знімків для лісової інвентаризації України. Збалансоване природокористування. 2015. № 2. С. 9–15.

13. Миронюк В. В., **Поліщук В. В.** Порівняльний аналіз різних підходів до моделювання твірної стовбурів берези повислої. Лісове і садово-паркове господарство. 2016. № 9. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/9003/8278>. *(Здобувачем опрацьовано модель збігу стовбурів берези повислої).*

14. **Миронюк В. В.**, Геогіян М. І. Застосування стратифікованої вибірки для регіональної оцінки площі лісів України за даними глобальних карт лісового покриву. Збалансоване природокористування. 2017. № 1. С. 69–74. *(Здобувачем розроблено схему територіальної вибірки та розраховано площу вкритих лісовою рослинністю ділянок за адміністративними одиницями України).*

15. Миронюк В. В. Сезонна динаміка спектральних характеристик земного покриву та її роль у дешифруванні лісових насаджень за знімками Landsat. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2017. Вип. 266. С. 54–64.

16. Георгіян М. І., **Миронюк В. В.** Дешифрування видового складу лісових насаджень за даними супутникових знімків Sentinel-2. Лісове і садово-паркове господарство. 2017. № 11. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/8807/8118>. *(Здобувачем розроблено алгоритм дешифрування супутникових знімків на базі «хмарної» платформи Google Earth Engine API).*

17. **Миронюк В. В.**, Білоус А. М. Узгодженість оцінок площі лісів за даними глобальної карти змін лісового покриву і мультиспектральних супутникових знімків. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2017. Т. 27. № 5. С. 38–42. *(Здобувачем виконано дешифрування знімка RapidEye та глобальної карти Global Forest Change).*

18. Миронюк В. В. Підбір незалежних змінних для класифікації лісового покриву за сезонними мозаїками. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2017. Вип. 278. С. 66–76.

19. Миронюк В. В. Класифікація лісового покриву за сезонними композитними мозаїками Landsat. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2018. Т. 28. № 1. С. 28–33.

20. Миронюк В. В. Аналіз точності глобальних карт зімкнутості деревостанів для території рівнинної частини України. Біоресурси і природокористування. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 115–123.

21. **Миронюк В. В.**, Білоус А. М., Дячук П. П., Федина К. Р. Точність вибіркової таксації лісу залежно від конфігурації пробних ділянок. Біоресурси і природокористування. 2018. Т. 10. № 5–6. С. 146–155. *(Здобувачем розроблено територіальну схему збору дослідного матеріалу, виконано ГІС-аналіз і статистичну обробку масиву даних).*

22. Биченко В. Б., Биченко В. В., **Миронюк В. В.** Моделювання об'єму ділових сортиментів дуба звичайного з використанням рівнянь твірної деревних стовбурів. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2018. Вип. 288. С. 6–17. *(Здобувачем підготовлено алгоритм для моделювання збігу та об'єму стовбурів дерев дуба).*

Статті у наукових виданнях інших держав:

23. Кашпаров В. А., **Миронюк В. В.**, Журба М. А., Зибцев С. В., Глуховский А. С., Жукова О. М. Радиологические последствия пожара в Чернобыльской зоне отчуждения в апреле 2015 года. Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57. № 5. С. 512–527. *(Здобувачем підібрано часову серію супутникових знімків і виконано дешифрування ступеня пошкодження лісових насаджень пожежею).*

24. Bilous A., **Myroniuk V.**, Holiaka D., Bilous S., See L., Schepaschenko D. Mapping growing stock volume and forest live biomass: a case study of the Polissya region of Ukraine. Environmental Research Letters. 2017. Vol. 12 (10). P. 1–13. *(Здобувачем виконано моделювання таксаційних показників деревостанів за даними супутникової зйомки, встановлено розподіл площі лісових насаджень залежно від їхнього видового складу).*

25. Evangeliou N., Zibtsev S., **Myroniuk V.** et al. Resuspension and atmospheric transport of radionuclides due to wildfires near the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2015: An impact assessment. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. *(Здобувачем на підставі даних супутникової зйомки встановлено площу пожеж і виконано ГІС-аналіз результатів класифікації лісових територій, пошкоджених пожежею).*

Статті в інших наукових виданнях:

26. Свинчук В. А., Строчинський А. А., **Миронюк В. В.**, Гірс О. А. Особливості просторово-параметричної структури соснових деревостанів залежно від їхнього походження. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2010. № 6 (22). Режим доступу до статті: <http://nd.nubip.edu.ua/2010-6/10svvdto.pdf>. *(Здобувачем виконано аналіз повидільної бази даних про показники лісового фонду).*

27. **Миронюк В. В.**, Свинчук В. А., Гірс О. А. Використання вибірково-статистичних методів у системі моніторингу міських зелених насаджень. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2011. № 2 (24). Режим доступу до статті: http://nd.nubip.edu.ua/2011_2/11mvw.pdf. *(Здобувачем узагальнено сучасний досвід використання статистичних методів в умовах урбанізованого середовища).*

28. Миронюк В. В. Вибірковий метод визначення площі міських зелених насаджень із використанням даних ДЗЗ. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2011. № 6 (28). Режим доступу до статті: http://nd.nubip.edu.ua/2011_6/11mvv.pdf.

29. Кашпаров В. А., Журба М. А., Киреев С. И., Зибцев С. В., **Миронюк В. В.** Оценка ожидаемых доз облучения участников пожаротушения в Чернобыльской зоне отчуждения в апреле 2015 г. Ядерная физика та енергетика. 2015. Т. 16. № 4. С. 399–407. *(Здобувачем відтворено динаміку лісової пожежі, використовуючи часові серії супутникових знімків).*

Науково-методичні рекомендації:

30. Гірс О. А., **Миронюк В. В.**, Кохан С. С., Кутя М. М. Методичні рекомендації щодо обліку лісів і зелених насаджень в умовах урбанізованого середовища на основі даних ДЗЗ: рекомендації для підприємств із утримання та експлуатації зелених насаджень, лісопаркових господарств і проектних організацій. К., 2012. 30 с. *(Здобувачем опрацьовано технологію поєднання супутникових знімків різного просторового розрізнення для дешифрування насаджень на території населених пунктів).*

31. Білоус А. М., **Миронюк В. В.** Оцінювання екосистемних функцій лісів за даними наземних вимірювань та дистанційного зондування Землі: науково-методичні рекомендації. К., 2017. 56 с. *(Здобувачем розроблено методику використання супутникових знімків для картографування екосистемних функцій лісів).*

32. Лакида П. І., **Миронюк В. В.** Методичні рекомендації щодо оцінки стану та динаміки лісів за даними ДЗЗ. К., 2018. 36 с. *(Здобувачем обґрунтовано технологію використання часових рядів супутникових спостережень для картографування лісів рівнинної частини України).*

Тези наукових доповідей:

33. Миронюк В. В. Використання k-NN методу класифікації космічних знімків в середовищі R для визначення запасу насаджень. Біоресурси лісових та урбанізованих екосистем: відтворення, збереження і раціональне використання: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–24 квітня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 53–54.

34. Миронюк В. В. Використання матеріалів космічної зйомки для картування територій, пройдених пожежами. Виклики XXI століття та їхнє вирішення у лісовому комплексі й довкіллі: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 7–9 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 65–66.

35. Миронюк В. В., **Білоус А. М.** Характеристика набору геопросторових даних для моделювання породного складу лісових насаджень. Актуальні проблеми лісового сектору та садово-паркового господарства: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 14–15 квітня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 62. *(Здобувачем виконано геометричну та радіометричну корекцію супутникових знімків, створено навчальну вибірку для дешифрування видового складу лісових насаджень).*

36. Білоус А. М., **Миронюк В. В.**, Голяка Д. М. Оцінювання фітомаси лісів за даними дистанційного зондування землі. 16 Українська конференція з космічних досліджень, м. Одеса, 22–27 серпня 2016 року: тези доповіді. Одеса, 2016. С. 184–185. *(Здобувачем виконано дешифрування показників фітомаси лісових насаджень на основі k-NN методу).*

37. Білоус А. М., Голяка Д. М., **Миронюк В. В.** Теоретичні засади і технічні параметри створення експериментального полігону для наземних і дистанційних вимірювань параметрів лісових екосистем. Землеустрій, кадастр та охорона земель в Україні: сучасний стан, європейські перспективи: Міжнародна конференція, присвячена 20-річчю створення факультету землевпорядкування, м. Київ, 23–24 вересня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 177–180. *(Здобувачем обґрунтовано вимоги до параметрів систем дистанційного зондування Землі).*

38. Миронюк В. В., **Білоус А. М.** Поєднання даних знімків RapidEye і повидільної таксації для оцінки запасу наземної біомаси лісових насаджень. Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні: VIII Міжнародна науково-практична конференція, м. Ужгород – Синевир, 6–8 жовтня 2016 року: тези доповіді. Ужгород, 2016. С. 252–257. *(Здобувачем створено навчальну вибірку та виконано прогнозування запасу лісових насаджень на основі супутникових знімків).*

39. Миронюк В. В. Оцінювання площі лісів України за даними глобальних карт лісового покриву. Здоров'я лісів, екосистемні послуги та лісові продукти для суспільства: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 6–7 квітня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 50–51.

40. **Миронюк В. В.**, Білоус А. М. Аналіз карт зімкнутості деревостанів як інструменту для оцінки площі лісів України. Стале управління лісовим комплексом та збалансований розвиток урболандшафтів: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 27 березня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 37–38. *(Здобувачем виконано класифікацію карт зімкнутості деревостанів).*

41. Миронюк В. В. Використання сезонних композитних мозаїк Landsat для оцінки та картографування лісових ресурсів. Актуальні проблеми наук про життя та природокористування: IV Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, м. Київ, 25–27 квітня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. Ч. 1. С. 150–153.

42. Миронюк В. В., Білоус А. М. Нові можливості інвентаризації лісових ресурсів на основі супутникової зйомки. Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–25 травня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. Т. 2. С. 41–42. *(Здобувачем обґрунтовано технологію поєднання вибіркової інвентаризації лісу та даних супутникової зйомки для картографування й оцінки показників лісового фонду).*

43. **Миронюк В. В.**, Білоус А. М., Дячук П. П. Методика обчислення стовбурового запасу лісових насаджень на пробних ділянках вибіркової інвентаризації лісу. Проблеми розвитку лісової таксації, лісовпорядкування та інвентаризації лісів: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 6–8 грудня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 96–97. *(Здобувачем опрацьовано непараметричний алгоритм прогнозування об'єму облікових дерев на пробних ділянках лісової інвентаризації).*

44. **Myroniuk V.**, Bilous A. Combining RapidEye Satellite Images and Forest Inventory Data for Assessment of Forest Biomass. LITTERIS ET ARTIBUS: 6th International Youth Science Forum, Lviv, Ukraine, November 24–26, 2016: Proceedings. Lviv, 2016. P. 488–489. *(Здобувачем виконано дешифрування супутникової інформації та оцінено запас деревостанів на основі технологій дистанційного зондування Землі).*

45. Kutia M., Gautam M., **Myroniuk V.** The Use of Sentinel-2 Imagery and Random Forest Classifier for Kyiv City Suburban Forest Mapping. The 3rd Global Forum of Ecological Economics in Forestry, Nanchang, China, May 20–21, 2017: Proceedings. Nanchang, 2017. P. 27–39. *(Здобувачем підготовлено безхмарні мозаїки знімків Landsat для дешифрування лісових насаджень).*

46. Kutia M., **Myroniuk V.**, Sarkissian A. J. Evaluation of Sentinel-2 Compositing Mosaics and Random Forest Method for Tree Species Distribution Mapping in Suburban Areas of Kyiv City, Ukraine. Proceedings of the International Workshop on Environmental Management, Science and Engineering. 2018. Vol. 1. P. 597–604. *(Здобувачем оцінено вплив спектральних змінних на точність дешифрування лісових насаджень за знімками Sentinel).*

47. Lakyda P., Bilous A., **Myroniuk V.** et al. Disturbances impact on carbon emissions in forest ecosystems of Ukrainian Polissya. Cool Forests at Risk? The Critical Role of Boreal and Mountain Ecosystems for People, Bioeconomy, and Climate, IIASA, Laxenburg, Austria, September 17–20, 2018: Proceedings.

Laxenburg, 2018. P. 72. *(Здобувачем виконано картографування порушень у лісових екосистемах).*

48. Gregory M., Bell D., Gorelick N., **Myroniuk V.** Utilizing high-performance and data-rich cloud platforms for nearest neighbor imputation models: Bringing NN to the cloud. ForestSAT 2018: Entering a New Era in Forest Observation and Analysis, College Park, Maryland, USA, October 1–5, 2018: Proceedings. Available at: <https://forestsat2018.forestsat.com/wp-content/uploads/2018/09/program-online-3.pdf>. *(Здобувачем виконано обробку матеріалів вибіркової таксації лісу та підготовлено атрибутивні таблиці для дешифрування запасу деревостанів).*

49. **Myroniuk V.**, Khan Y. Spatio-temporal analysis of illegal mining in Ukraine using remote sensing. Addressing Ecological and Social Challenges for Forests and Forest Management: International scientific and practical conference, Kyiv, Ukraine, October 22–24, 2018: Proceedings. Kyiv, 2018. P. 67. *(Здобувачем розроблено алгоритм виявлення порушень в лісах і оцінено площі ділянок з незаконним видобутком бурштину).*

АНОТАЦІЯ

Миронюк В. В. Теоретичне та експериментальне обґрунтування інвентаризації лісів рівнинної частини України за даними супутникової зйомки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора сільськогосподарських наук зі спеціальності 06.03.02 «Лісовпорядкування та лісова таксація». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню теоретичних і прикладних аспектів обліку рівнинних лісів України з використанням технологій наземного та дистанційного збору даних. Методологічну основу дослідження формують принципи вибірково-статистичної інвентаризації лісів і дешифрування мультиспектральних супутникових знімків оптичного діапазону.

У дисертаційній роботі проаналізовано точність поширених глобальних карт лісового покриву з просторовим розрізненням 25–30 м (100 м – для запасу деревостанів). У результаті опрацьовано рекомендації з їхнього використання для попереднього оцінювання площі та запасу рівнинних лісів України.

На основі часових серій супутникових знімків Landsat 8 OLI опрацьовано лісову маску лісів рівнинної частини України, яка має просторове розрізнення 30 м та точність близько 80 %. На прикладі локального експериментального полігону обґрунтовано ландшафтний метод дешифрування видового складу лісових насаджень.

Використовуючи дані експериментальної інвентаризації лісів, проведеної на локальному полігоні Київської та Сумської областей, розроблено методику картографування видового складу та запасу лісових насаджень, використовуючи вибіркові дані наземних досліджень і суцільне покриття території супутниковими знімками. На цій основі обґрунтовано технологію статистичної інвентаризації лісів малих територій.

Ключові слова: рівнинні ліси України, лісистість, вибіркова інвентаризація лісу, реласкопічна таксація, мультиспектральні супутникові знімки, *k*-NN метод, Google Earth Engine.

АННОТАЦІЯ

Миронюк В. В. Теоретическое и экспериментальное обоснование инвентаризации лесов равнинной части Украины по данным спутниковой съемки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук по специальности 06.03.02 «Лесоустройство и лесная таксація». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2019.

Диссертация посвящена исследованию теоретических и прикладных аспектов учета равнинных лесов Украины с использованием технологий наземного и дистанционного сбора данных. Методологическую основу исследования формируют принципы избирательно-статистической инвентаризации лесов и дешифрирования мультиспектральных спутниковых снимков оптического диапазона.

В диссертационной работе проанализирована точность распространенных глобальных карт лесного покрова с пространственным разрешением 25–30 м (100 м – для запаса древостоев). В результате разработаны рекомендации по их использованию для предварительной оценки площади и древесного запаса равнинных лесов Украины.

На основании временных серий спутниковых снимков Landsat 8 OLI получено лесную маску лесов равнинной части Украины, которая имеет пространственное разрешение 30 м и точность около 80 %. На примере локального экспериментального полигона обоснован ландшафтный метод дешифрирования видового состава лесных насаждений.

Используя данные экспериментальной инвентаризации лесов, проведенной на полигонах Киевской и Сумской областей, разработано методику картирования видового состава, а также запаса лесных насаждений, используя выборочные данные наземных исследований и сплошное покрытие территории спутниковыми снимками. На этом основании разработано технологию статистической инвентаризации лесов малых территорий.

Ключевые слова: равнинные леса Украины, лесистость, выборочная инвентаризация леса, реласкопическая таксація, мультиспектральные спутниковые снимки, *k*-NN метод, Google Earth Engine.

ANNOTATION

Myroniuk V. V. Theoretical and Experimental Substantiation of Forest Inventory in Flat Land Ukraine Using Satellite Imagery. – The Manuscript.

The thesis for awarding an academic degree of Doctor of Agriculture Sciences on specialty 06.03.02 «Forest Inventory and Forest Mensuration». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to investigation of theoretical and applied aspects of assessment of flat land forests in Ukraine using ground truth and Earth observation data of forest stands parameters. The experimental research is based on multisource data collected within 21 administrative regions of flat land Ukraine and three local test areas established in Kyiv, Chernigiv and Sumy regions. The data provide sample-based measurements of forest stands variables on 156 fixed radius and angle counting plots established in Kyiv test area, as well as 333 circular sample plots located in Sumy region. The field data for the Chernihiv region were collected during visual standwise forest inventory, thus forest stands parameters estimated in each compartment have been made available in spatial database. Besides, more than 4500 sample units distributed within flat land Ukraine have been visually interpreted using Google's satellite images having sub-meter spatial resolution.

The analysis geographic and climatic factors associated with the study region has allowed to prove the necessity of time series of Landsat 8 OLI satellite images to be the primary source of spectral data for the entire territory of flat land Ukraine as well as for Sumy pilot area, albeit the commercial satellite images SPOT 7 and PlanetScope have been used for other two local test areas. The experimental data have been processed in a form of integrated geodatabases by automated algorithms prepared for R statistical software and for Google Earth Engine cloud-based platform.

In the dissertation, an accuracy of four global forest products of 25–30 m spatial resolution has been analysed. Exploring the relationship of tree cover extracted from the Global Forest Change (GFC) data and relative stocking of forest stands, the 40 % tree cover percentage value has been adopted as a threshold for distinction between forested and unforested areas within flat land Ukraine. In comparison with analogous product Landsat Tree Cover Continuous Fields (LTCCF), the GFC map has appeared to be more advanced in terms of accuracy and applicability for forest area dynamics assessment. Analysis of discrete forest masks Global PALSAR-2/PALSAR Forest/Non-Forest Map (JAXA FNF) and GlobeLand30 has revealed a major misclassification of forested areas under severe fragmentation patterns of flat land forest Ukraine. The results of global map of forest biomass GlobBiomass showed that it over approximates the data so that the mapped growing stock volume at pixel level is not agreed with the field measurements data. Nevertheless, the map could be used for preliminary assessment of total and mean values of growing stock volumes for large areas that has been successfully tested on 15 randomly chosen forest enterprises distributed throughout the study region.

To map forested areas in flat land Ukraine using Landsat 8 OLI imagery, the land cover reflectance properties in different spectral bands have been investigated. As a result, phenology-based methods of classification for processing time series of satellite observations have been substantiated, thus more than 1500 scenes of Landsat 8 OLI have been merged into cloudless mosaics for the following four seasons: yearly, summer, autumn and April-October. Google Earth Engine API for cloud-based computation allowed to run high performance algorithms for creation, processing and classification of Landsat 8 OLI seasonal mosaics, while nonparametric method Random Forest was efficient to deal with multidimensional training dataset. Finally, forest mask for flat land of Ukraine has been created having

30 m spatial resolution. Its user's τ and producer's accuracy are 0.795 ± 0.022 and 0.845 ± 0.025 accordingly, albeit for Polissia regions the accuracy is higher, but for Steppe zone it is on the contrary, lower. The forest mask allowed to estimate forested area which for the flat land Ukraine is 8572.4 ± 317.3 thousands hectares. Forest cover for the territory is estimated to be 15.8 ± 0.6 %. The analogous values according to the state forest assessment data are significantly lower, 7766.7 thousand hectares and 14.4 % respectively. The overestimation of forested area can be explained due to the forests that are not included in the state forest assessment data (for example, urban forests).

Theoretical and applied aspects of sample-based forest inventory using satellite images allowed to select the most effective plot configurations. Thus, truncated angle count sampling with plot radius of 12.62 m and basal area factor $BAF=1$; and nested circular plots with radii of sub-plots 12.62 and 3.98 m have proved to be the best suitable for forest inventory. Based on local experimental data nonparametric technique for predicting volume of model trees and assessment of growing stock volume by tree species on sample plots has been developed.

Basal area of main tree species in forest stands of Sumy region have been mapped using data collected by Centre of national forest inventory during 2013 and custom version of k -NN (k -Nearest Neighbors) algorithm written for Google Earth Engine API. Per-pixel distribution of basal area allowed to map tree species abundance, composition and tree species richness of forest stands. Applying the same distance matrix between nearest neighbors, growing stock volume for each tree species have been mapped for the region. As it was computed, the 95 % confidence interval for mean value of growing stock volume for Sumy region is 329 ± 8 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, while in different districts of the region mean value varies between 268 and 385 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$. The estimated values are significantly higher of those in the official forest inventory database. Besides, forested area and total growing stock volume of forest stands for major tree species were assessed.

As a result of the conducted study, the forest inventory for small areas has been shown as promising in case of sample-based forest inventory and wall-to-wall mapping of forests by satellite imagery.

Key words: flat land forest of Ukraine, forest cover, sample-based forest inventory, angle counting sampling, multispectral satellite imagery, k -NN method, Google Earth Engine.

Підписано до друку 07.06.19
Ум. друк. арк. 1,9
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Обл.-вид.арк. 1,9
Зам. № 190513

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55

