

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ЛОВИНСЬКА ВІКТОРІЯ МИКОЛАЇВНА

УДК 582.475:630*5(232)

**БІОПРОДУКТИВНІСТЬ СОСНОВИХ НАСАДЖЕНЬ
БАЙРАЧНОГО СТЕПУ УКРАЇНИ**

06.03.02 «Лісовпорядкування та лісова таксація»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора сільськогосподарських наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису
Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природо-
користування 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
Пастернак Володимир Петрович,
Український ордена «Знак пошани»
науково-дослідний інститут лісового господарства
та агролісомеліорації імені Г. М. Висоцького,
провідний науковий співробітник
лабораторії моніторингу і сертифікації лісів

доктор сільськогосподарських наук, доцент
Гриник Георгій Георгійович,
Державний вищий навчальний заклад
«Національний лісотехнічний
університет України»,
професор кафедри лісової таксації
та лісовпорядкування

доктор сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник
Шпарик Юрій Степанович,
Державний вищий навчальний заклад
«Прикарпатський національний
університет імені Василя Стефаника»,
професор кафедри лісового
і аграрного менеджменту

Захист відбудеться «25» березня 2021 року о 10⁰⁰ 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 «23» лютого 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. Г. Лащенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останніми роками у зв'язку з інтенсивним обговоренням у науковій спільноті змін клімату і загрози глобального потепління на планеті, що викликається накопиченням в атмосфері значної кількості парникових газів, велика увага приділяється питанням депонування таких з атмосфери та акумулювання їх у складі рослин. Важливе місце у вирішенні окресленої проблеми відводиться питанню пізнання вуглецевого бюджету наземних лісових екосистем, яке після ратифікації більшістю країн світу прийнятої у межах Рамкової Конвенції ООН з глобальних змін клімату (UNFCCC) Паризької угоди (2015), стало невід'ємною частиною міжнародної політики. Вуглецедепонувальна функція лісових екосистем безпосередньо пов'язана з формуванням лісової біомаси, за якою визнано величезний потенціал для пом'якшення глобального потепління та яка розглядається як альтернативне джерело енергії.

Максимально точному оцінюванню фітомаси лісів відводиться вирішальне значення в умовах енергетичної кризи, яка нині перетворилася на одну з найбільших проблем не лише в Україні, а й у цілому світі. Інформаційне забезпечення світової наукової літератури з дослідження найважливішого показника біопродуктивності – фітомаси насаджень, досить наповнене. Виконуючи функції природних поглиначів вуглекислого газу та генераторів кисню, компоненти фітомаси є об'єктами досліджень, на яких базуються екологічні прогнози та стратегічні плани у сфері охорони навколишнього середовища.

Варіювання показників фітомаси лісів пояснюються кількома факторами, з яких найсуттєвіший вплив виявляють кліматичні, едафічні умови, водозабезпеченість місцевості, видова належність компонента деревостану, щільність деревини тощо.

Ліси Північного (Байрачного) Степу України в основному представлені штучно створеними насадженнями, екологічні, захисні й соціальні функції яких важко переоцінити. Із хвойних порід для згаданої місцевості сосна звичайна слугує головним лісотвірним видом, який має суттєве екологічне значення для збереження місцевих ландшафтів як доволі стійкий і невибагливий лісотвірний вид. Однак, нині в лісах, де головною лісотвірною породою виступає сосна звичайна, сформованих в умовах жорсткого клімату степової зони, підсилених глобальним потеплінням, спостерігається масове всихання сосняків.

Підтримка та підвищення біопродукційної здатності соснових насаджень, що супроводжується збереженням їхніх захисних і соціальних функцій, а також значущість їх вкладу в глобальні екологічні процеси на часі дуже актуальні й у період сьогодення вважаються найважливішими критеріями сталого управління лісами.

На науковій ниві України розроблення методів оцінювання складників біопродукційного процесу лісових насаджень, зі встановленням їх вуглецедепонувальних, киснепродукувальних функцій проводиться, починаючи з кінця ХХ сторіччя. Серед провідних вітчизняних вчених, які забезпечили вагомий

внесок у вирішення цієї проблеми, слід виокремити П. І. Лакиду (1997, 2002), М. А. Голубця (2000), Л. М. Матушевич (2006), А. М. Білоуса (2009), С. І. Миклуша (2011), В. П. Пастернака (2011), Р. Д. Васишина (2014) та ін.

Однак, наявність численних досліджень не розкриває повністю усіх питань зазначеної проблематики, оскільки донині ще не сформовано повного спектра знань щодо територіального розподілу біопродукції насаджень з охопленням усіх лісорослинних зон, зокрема Байрачного Степу України. Саме це зумовило вибір теми й формування мети, завдань дисертації, з глибоким і детальним дослідженням функціонування соснових насаджень у межах означеного регіону, які виконані за допомогою системного підходу сучасних лісівничо-таксаційних методів та з використанням даних дистанційного зондування Землі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація пов'язана з дослідженнями, які проводилися в межах державних бюджетних тем «Комплексна екологічна оцінка формування лісомеліоративних насаджень в умовах техногенно навантажених урболандшафтів» (номер державної реєстрації 0116U004738, 2016–2018 рр.) та «Концепція сталого функціонування лісонасаджень Північного Степу України в умовах абіотичної трансформації довкілля» (номер державної реєстрації 0118U003525, 2018–2020 рр.). Здобувач є учасником Міжнародного навчального проєкту «EcoMining: Development of Integrated PhD Program for Sustainable Mining & Environmental Activities» (2019–2022 рр.), за підтримки Німецької служби академічного обміну (DAAD).

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження – опрацювання теоретичних основ та розроблення нормативно-інформаційного забезпечення оцінювання біотичної продуктивності соснових лісів Байрачного Степу України на засадах системного підходу.

Відповідно до поставленої мети сформульовано такі завдання:

- провести ретроспективний аналіз та оцінити сучасний стан лісонасаджень сосни в умовах Байрачного Степу України;
- визначити показники локальної й середньої, природної і базисної щільності компонентів надземної фітомаси дерев сосни в умовах регіону;
- розробити регресійні моделі залежностей якісних параметрів компонентів фітомаси стовбура та крони дерев сосни звичайної;
- провести кількісне оцінювання індексу *LAI* шляхом застосування контактного та безконтактного методів;
- здійснити оцінку компонентів фітомаси дерев сосни звичайної;
- розробити емпіричні моделі залежності компонентів надземної фітомаси сосняків від біометричних показників деревостанів;
- опрацювати нормативно-інформаційне забезпечення для дерев і деревостанів сосни звичайної в регіоні проведення досліджень;
- на основі даних супутникових знімків *Sentinel-1A* і *Sentinel-2A* здійснити розрахунок вегетаційних індексів та біофізичних параметрів соснових насаджень;

- розробити мапи розподілу надземної фітомаси сосняків у межах досліджуваної території за даними дистанційного зондування Землі;
- розробити динамічну бонітетну шкалу для штучних соснових деревостанів Байрачного Степу України;
- розробити математичні моделі динаміки таксаційних показників штучних модальних соснових деревостанів із наступною побудовою таблиць ходу росту;
- встановити біопродуктивність соснових насаджень за компонентами надземної фітомаси у віковому діапазоні від 10 до 80 років;
- оцінити динамічні зміни обсягів депонованого вуглецю та генерованого кисню у компонентах надземної фітомаси сосняків;
- оцінити загальну річну продукцію компонентів надземної фітомаси насаджень сосни на основі їх повидільної характеристики;
- надати оцінку екологічному потенціалу соснових насаджень із встановленням поглинальної здатності парникових газів у межах досліджуваного регіону.

Об'єкт дослідження – сучасний стан та особливості росту соснових насаджень Байрачного Степу України (на прикладі Дніпропетровської області).

Предмет дослідження – біотична продуктивність, вуглецепоглиняна, киснетвірна здатність соснових деревостанів та їх динаміка.

Методи дослідження. В основу досліджень дисертації покладено загальнонаукові (аналіз, експеримент, порівняння, моделювання тощо) і конкретні (спеціальні) методи, які використовуються в біометрії, екології, лісовій таксації та інших дисциплінах. Статистичну обробку даних здійснювали за застосування графоаналітичного, кореляційного, регресійного аналізів із залученням програм стандартних пакетів комп'ютерно-інформаційного забезпечення *Excel* та *Statistica*, перевірку значущості отриманих моделей проводили з використанням стандартних статистичних критеріїв. Обробку даних супутникових знімків здійснювали з використанням програмного середовища *SNAP Desktop* за допомогою інструменту *S2 Resampling Processor*. Супутникові знімки *Sentinel-1A* завантажувалися у форматі GRD (Ground Range Detected) та підлягали стандартній процедурі попередньої обробки: радіометричній корекції, фільтрації, геометричній корекції.

Наукова новизна одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження, що характеризуються новизною і виносяться на захист, полягають у наступному:

вперше:

- сформульовано теоретичні засади системного підходу у комплексному дослідженні компонентів біотичної продуктивності дерев та деревостанів сосни звичайної у Байрачному Степу;
- встановлено якісні показники локальної і середньої щільності дерев сосни звичайної компонентів фітомаси стовбура та крони;
- здійснено моделювання компонентів надземної фітомаси дерев і деревостанів сосни звичайної залежно від їх таксаційних характеристик;

- проведено оцінку і порівняння *LAI* асиміляційної складової сосняків, отриманих контактним та безконтактним методом;
- встановлено частку за масою різновікової хвої дерев сосни;
- розроблено динамічну бонітетну шкалу для насінневих соснових насаджень штучного походження;
- опрацьовано таблиці ходу росту модальних соснових деревостанів;
- встановлено кількісні показники поглинання вуглецю та генерування кисню сосновими насадженнями у межах досліджуваного регіону;
- здійснено розрахунок щорічної продукції компонентів надземної фітомаси соснових насаджень та обсяги їх вуглецедепонування;
- оцінено екологічний потенціал сосняків зони Байрачного Степу за різницею між антропогенними викидами діоксиду вуглецю та поглинанням парникових газів;
- визначено вегетаційні індекси та біофізичні параметри соснових лісів, отриманих за допомогою мультиспектральних знімків;
- створено мапи розподілу надземної фітомаси соснових лісів із використанням супутникових знімків *Sentinel-1A* та *Sentinel-2A*.

удосконалено підходи до опрацювання математичних моделей для визначення компонентів надземної фітомаси дерев і деревостанів сосни звичайної в умовах Байрачного Степу України;

отримало подальший розвиток:

- формування бази нормативно-інформаційного забезпечення для визначення якісних і кількісних параметрів компонентів надземної фітомаси дерев і деревостанів сосни звичайної;
- дослідження динаміки таксаційних показників та біопродуктивності в умовах степової зони України.

Практичне значення одержаних результатів. Основні положення, висновки і пропозиції, викладені в дисертації, мають важливе практичне значення для обґрунтування й розроблення сучасних підходів щодо вдосконалення лісогосподарських заходів в умовах Байрачного Степу України. Отримані у дисертації наукові результати також важливі для вирішення лісівничо-екологічних питань у галузі лісового господарства.

Для практичного використання рекомендовано отримані математичні моделі оцінки якісних показників компонентів стовбура і крони дерев сосни звичайної та розроблені регресії оцінювання компонентів фітомаси соснових деревостанів. Побудовані таблиці ходу росту соснових деревостанів за висотою важливі для виконання практичних завдань, які пов'язані з обліком лісових насаджень, зокрема, для встановлення особливостей росту і розвитку сосняків, із відповідною оцінкою динаміки біопродуктивності та запасів вуглецю й кисню. Практичне значення досліджень із дешифрування супутникових знімків *Sentinel-1A* та *Sentinel-2A* полягає у можливості використання методів дистанційного зондування Землі для реалізації алгоритму більш швидкого розрахунку надземної фітомаси насаджень в умовах регіону Байрачного Степу.

Результати досліджень впроваджено у Дніпропетровському обласному управлінні лісового та мисливського господарства, Департаменті екології

та природних ресурсів Дніпропетровської обласної державної адміністрації. Окремі положення дисертації використовуються у навчальному процесі під час викладання дисциплін «Інвентаризація лісів» та «Моделювання продуктивності лісів», для підготовки фахівців за спеціальністю 205 «Лісове господарство» ОС «Магістр», на кафедрі таксації лісу та лісового менеджменту Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаною науковою працею на основі досліджень здобувача, проведених у 2014–2020 рр. Здобувачем сформульовано основні наукові положення, здійснено літературний пошук, опрацьовано методики, проведено збір та обробку матеріалу. Проведення польових досліджень здійснено за участі співробітників кафедри таксації лісу та лісового менеджменту Національного університету біоресурсів і природокористування України, а також студентів Дніпровського державного аграрно-економічного університету. Здобувачем особисто виконано математико-статистичну обробку експериментальних даних та узагальнено основні теоретичні положення щодо отриманих результатів. Опубліковані результати за темою дисертації підготовлено самостійно та у співавторстві. У спільних публікаціях права співавторів не порушено.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення дисертації доповідалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Історико-культурні та природоохоронні аспекти збереження багатовікових дерев» (м. Київ – м. Чигирин, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Проблеми и перспективы исследований растительного мира» (м. Ялта, 2014 р.); 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.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Рослини та урбанізація» (м. Дніпропетровськ, 2016 р.); Генеральній асамблеї EGU-2016 (м. Відень, Австрія, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Ресурсозберігаючі технології та їх правова і економічна оцінка в сільськогосподарському виробництві» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічні дослідження лісових біогеоценозів Степової зони України» (м. Дніпро, 2016 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання сучасної аграрної науки» (м. Умань, 2016 р.); Міжнародній конференції «Динаміка біологічного та ландшафтного різноманіття заповідних територій» (м. Кам'янець-Подільський, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Ліси Східної Європи у Світі, що змінюється» (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Applied biotechnology in mining» (м. Дніпро, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Лісова типологія як основа наближеного до природи лісівництва» (м. Київ, 2019 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 61 наукову працю, з яких 2 монографії у співавторстві, 10 статей у наукових фахових виданнях України,

14 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті у наукових виданнях інших держав, 12 статей у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus/Web of Science, 17 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить анотації, перелік умовних позначень, вступ, шість розділів, висновки, пропозиції виробництву, список використаних джерел (403 найменування) та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 443 сторінки. Основна частина дисертації містить 76 таблиць і 78 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Розділ 1 «Сучасний стан дослідження компонентів біопродуктивності лісів та їхньої динаміки». У теперішніх умовах лісові екосистеми потрапляють під широкий спектр природних і антропогенних негативних впливів, які створюють істотну загрозу не тільки для стану лісів і їх корисних функцій, а й для людського суспільства та загального функціонування існуючих глобальних екосистемних блоків.

Кіотський протокол виявився першим інструментом світового масштабу, спрямованим на питання боротьби з антропогенною зміною клімату на глобальному рівні. Згаданий документ зобов'язав наукове співтовариство розробити стратегію компенсації промислових викидів біологічною фіксацією атмосферного вуглецю як основного біогену планети, таким чином спонукаючи людське суспільство до всебічного пізнання біології глобального вуглецевого циклу.

Поглинання вуглецю лісовими насадженнями відіграє ключову роль у аспекті впровадження заходів щодо пом'якшення кліматичних умов, адже істотне скорочення викидів діоксиду вуглецю може бути отримано за відносно низьких економічних витрат (Шпарик Ю. С., 2016; Vass M. M., Elofsson K., 2016).

Ліси вкрай важливі з точки зору глобальної зміни клімату, оскільки в процесі секвестрації вуглецю вони перетворюють останній у біомасу, таким чином зберігаючи близько 45 % цього елемента в наземній біосфері (Bonan G. B., 2008).

Зміна клімату суттєво впливає на продуктивність лісових екосистем та земель сільськогосподарського призначення, переважно шляхом зміни кількості опадів і температурних закономірностей. Такі непрямі наслідки змінюють ризик пошкодження, наприклад, через більш тривалі періоди посухи. У північних регіонах адаптація лісового господарства може призвести до значного збільшення показників продуктивності, тоді як у лісовому господарстві південних регіонів рослинам потрібні значно ширші механізми адаптаційних можливостей для протидії погіршенню навколишніх умов (Niemełä P., 2015). Наразі передбачено різний сценарій впливу зміни клімату та глобального потепління на накопичення біомаси лісовими насадженнями. Дослідження, проведені протягом останньої чверті століття мають позитивні

тенденції в продуктивності лісів, за винятком регіонів із низькою вологозабезпеченістю, низькою температурою середземноморських або бореальних регіонів (Spiecker H. et al., 1996; Boisvenue C., Running S. W., 2006; Kahle H.-P. et al., 2008). Навіть незначне глобальне потепління клімату може спричинити негативні наслідки для домінуючих євразійських видів дерев, до яких належить і сосна звичайна, переважно у південній частині свого ареалу (Persson B., Beuker E., 1997).

Отже, під час вирішення нагальних екологічних та соціологічних проблем, головним напрямом досліджень лісових екосистем стало оцінювання їх біологічної продуктивності, яка виступає основною характеристикою, що визначає процеси циркуляції біогеохімічних речовин. Цей показник стану лісів набув широкого використання в умовах сталого ведення лісового господарства, під час екологічного моніторингу та при моделюванні біомаси насаджень з урахуванням глобального потепління, а також при оцінюванні вуглецедепонувальної та киснепродукувальної екологічних функцій лісів.

Дослідження біологічної продуктивності пов'язані з процесами утворення, трансформації й акумулювання органічної речовини як власне матерії та енергії, а також з аналізом чинників, що прямим чи непрямим чином впливають на продуктивність. Надання інформації щодо комплексної оцінки фітомаси насаджень визнано обов'язковою умовою при виконанні програм із моніторингу лісів міжнародного, європейського, національного рівнів. У свою чергу, виконання вимог міжнародних норм та положень Рамкової конвенції ООН з питань зміни клімату (UNFCCC) щодо надання відомостей з бюджету вуглецю на території конкретних країн неможливе без отримання достовірної інформації про акумульовану в лісах фітотмасу певного регіону.

Визначення біологічної продуктивності потребує системного підходу з використанням спеціальних методів, які ґрунтуються на комплексі наукових дисциплін лісівничого, екологічного та математико-статистичного спрямування. Нині надзвичайно важливим виявився пошук компромісних варіантів у методичних підходах, із формулюванням загальних та специфічних принципів при отриманні результатів та вирішенні означених питань.

Біопродуктивність лісів стала головним об'єктом досліджень таких відомих учених, як А. З. Швиденко (1968), Н. І. Базилевич (1971), А. І. Уткін (1975, 1996), В. К. М'якушко (1978), М. Г. Семечкина (1978), П. І. Лакида (2002, 2006), В. О. Усольцев (2002, 2005, 2007), С. І. Миклуш (2007) та ін. Основними напрямками досліджень біопродуктивності до цього часу залишаються біоценотичний (екологічний) та ресурсознавчий підходи. У світлі існуючих питань сьогодення щодо володіння максимально повною інформацією про лісові екосистеми, як найпотужніші стабілізатори стану навколишнього середовища, спектр вивчення їх біопродуктивності з відповідним формуванням нових напрямів перетворився на значно ширший, адже часто той чи інший вид досліджень досить складно віднести до одного із зазначених напрямів.

Зазвичай, оцінювання продуктивності проводиться методом визначення всього лісового масиву за складовими його компонентами, із закладанням відповідних пробних площ, підбір яких створює передумову для попереднього

виявлення закономірностей зміни біопродуктивності насаджень певної повноти за віковим та едафічним градієнтом із використанням багатofакторного регресійного аналізу.

Метод дистанційного зондування Землі нині слугує ефективним джерелом отримання просторово-часової інформації про ліси на національному та регіональному рівнях, забезпечуючи доповнення наземних досліджень (Лакида П. І., Гілітуха Д. В., 2016; Миронюк В. В., 2019). Методи дистанційного зондування забезпечують ефективне вирішення оцінки просторових параметрів від окремого дерева до масштабу цілого насадження та можуть забезпечувати отримання даних у важкодоступних районах.

Ліс є складною саморегульовальною системою, що постійно перебуває у динаміці. Під впливом абіотичних та антропогенних чинників відбуваються зміни категорій лісових земель, породного складу лісів, вікової структури, інших таксаційних характеристик. Саме тому для прогнозування змін і відтворення лісових ресурсів у близькій та далекій перспективі важливі результати досліджень динамічних біопродукційних процесів, які виступають основою під час оцінювання взаємовпливів людини, її господарської діяльності та лісу. З огляду на значну складність і багатofакторність взаємозв'язків у лісових екосистемах за участі неживих та живих компонентів, широкого застосування у дослідженні подібної складності об'єктів набув у науці системний підхід. Оскільки лісові екосистеми характеризуються високою мінливістю в просторі, зумовленою умовами мікросередовища в їх межах, господарською діяльністю людини, зміною кліматичних і погодних умов, це істотно ускладнює процес їх досліджень. У такому випадку велику допомогу надають статистичні методи дослідження, які дозволяють отримати середні дані з визначеною ймовірністю та ступенем достовірності. Моделювання однорідних статистичних сукупностей розкриває перед науковцем динаміку причинно-наслідкових взаємозв'язків між складовими елементами лісу і показує, що за випадковими явищами знаходяться закономірності, які можна описати математичними залежностями. Методи багатовимірної статистики при цьому мають першочергове значення, адже за їх допомогою можливо визначити кількісні зміни масових явищ із залученням кореляційного, регресійного, дисперсного та інших видів аналізу.

Реєстрація динамічних процесів, що відбуваються у лісових екосистемах, виокремлюється однією із найважливіших інвентаризаційних задач, оскільки за допомогою таких даних можлива побудова прогнозів змін лісонасаджень у часі й просторі та визначення інтегральних показників, зокрема, продуктивності та вуглецевого балансу, які дозволяють оцінити варіювання компонентів лісових екосистем. Найбільшу точність збору інформації зі структури і стану лісового фонду на регіональних рівнях можливо досягти під час проведення польових наземних робіт, при поєднанні отриманих результатів з аналітико-вимірювальним дешифруванням спектрональних супутникових знімків.

Загалом, ефективність впливу людської діяльності на лісові екосистеми в умовах сталого розвитку залежить, насамперед, від попереднього визначення

закономірностей росту і продуктивності лісових насаджень у певних лісорослинних умовах, які значно повніше можуть бути розкриті на основі поглиблених досліджень їх сучасного стану та динамічних змін у лісонасадженнях. Особливо важливі подібні дослідження в штучних насадженнях, які в умовах степової зони менш стійкі і вимагають ретельнішого обґрунтування лісогосподарських заходів.

У межах регіону Північного (Байрачного) Степу України це питання залишається відкритим, хоча подібні результати мають важливе значення для розроблення теоретичної основи створення штучних дендроценозів з оптимальними параметрами для забезпечення максимального продукційного процесу.

Розділ 2 **«Характеристика регіону досліджень»**. Задля повного й адекватного оцінювання біопродукційних процесів та динамічних змін фітомаси лісових екосистем важливе у цьому випадку аналізування ґрунтово-кліматичних умов досліджуваного регіону в умовах глобальних змін клімату. Територія досліджень знаходиться у рівнинній зоні Північного (Байрачного) Степу, південно-східній частині України й зосереджена у Дніпропетровській області між $47^{\circ}28'$ і $49^{\circ}12'$ північної широти та 33° і 37° східної довготи.

Регіон досліджень характеризується хвилясто-рівнинним рельєфом (висота над рівнем моря 100–200 м). За геологічними умовами Дніпропетровська область поділяється на два субрегіони: Український кристалічний щит та Дніпровсько-Донецька западина. Клімат Байрачного Степу помірно-континентальний, із середньомісячною температурою повітря в січні у межах $4-8^{\circ}\text{C}$, у липні – від 21 до 23°C ; середньомісячною кількістю опадів 425–450 мм. Згідно з агрокліматичним районуванням, який висвітлює ступінь сприятливості клімату, Дніпропетровська область відноситься до зони недостатнього зволоження. Серед несприятливих кліматичних явищ регіону – посухи, відлиги, морози з вітрами, суховії і пилові бурі. Регіон вважається водозабезпеченим, що досягається в основному за рахунок транзитного потоку вод Дніпра; локальних водних ресурсів недостатньо. Ґрунти Дніпропетровської області відзначаються зональним характером. Материнською породою для розвитку ґрунтового покриву послугували еолово-делювіальні четвертинні відкладення у вигляді суглинків легкого, середнього і важкого мінерального складу, які вкривають майже всю територію області. Домінуючі в області чорноземні ґрунти різних підтипів.

У зв'язку з виконанням лісовими насадженнями, насамперед, екологічних функцій, вони відіграють значущу роль у життєзабезпеченості населення регіону, який за рівнем акумулювання шкідливих домішок в атмосфері відноситься до одних із найбільш забруднених в Україні. Головними джерелами забруднення повітря регіону виступають промислові підприємства гірничо-металургійного, паливно-енергетичного, хімічного комплексів, транспорт. В області домінують добувна та переробна промисловість, серед яких основне місце посідає чорна металургія з повним циклом виробництва. З розрахунку на 1 км^2 території досліджуваного регіону обсяги викидів шкідливих речовин щорічно становлять 28 т, що у перерахунку на одну людину

досягає 240 кг. Варіювання показника викидів вуглекислого газу в атмосферу області спостерігається в межах від 14030 (2004 р.) до 36950 тис. т (2011 р.); середній показник надходження парникового газу за період з 2004 по 2016 р. був на рівні 24113 тис. т.

Ліси Дніпропетровської області, на які припадає лише 5,6 % від загальної площі регіону (31,923 тис. км²), представлені переважно деревостанами штучного походження; природні ліси наявні лише у заплавах річок та байраках. Площа лісового фонду становить 189,8 тис. га, із площею, вкритою лісовою рослинністю, 179,2 тис. га. Під лісовими землями, підпорядкованими Дніпропетровському обласному управлінню лісового та мисливського господарства, знаходиться 45,7 % (90,8 тис. га), із них вкриті лісовою рослинністю – 65,7 тис. га. На території лісів, підпорядкованих Дніпропетровському обласному управлінню лісового та мисливського господарства, як головні лісотвірні види вирізняються дуб звичайний, робінія несправжньоакація та сосна звичайна, із часткою таких відповідно 31,7 %; 26,7 та 24,6 %.

Лісовій промисловості в економіці області належить незначне місце, переробка деревини не розвинена. Однак, у межах лісового фонду лісгосподарських підприємств проводиться заготівля ліквідної деревини, лісоматеріалів, пиломатеріалів та заготовок, дров'яної деревини для технологічних потреб, дров для опалення.

Розділ 3 «Методологічні засади, методичне та інформаційно-експериментальне забезпечення досліджень». У цьому розділі обґрунтовано комплексний теоретико-методологічний прийом дослідження біопродуктивності соснових насаджень на основі наземного та дистанційного збору даних. На території досліджень використано методи картографування лісового фонду сосни звичайної окремих лісництв за повидільною базою даних та аналізування супутникових знімків.

Програмою наукових досліджень передбачалося встановити сучасний стан сосняків в умовах Північного (Байрачного) Степу України; визначити якісні показники деревини і кори стовбурів та гілок дерев сосни; оцінити біопродуктивність сосни звичайної за компонентами надземної фітомаси стовбура та крони дерев і деревостанів; провести картографування надземної фітомаси сосняків за допомогою ГІС-технологій; побудувати таблиці ходу росту сосняків штучного походження і провести моделювання динаміки їх біопродуктивності, поглинання вуглецю та генерування кисню в соснових насадженнях; розробити алгоритм визначення первинної продукції соснових деревостанів зі встановленням їх екологічного потенціалу в регіоні.

Вибір об'єкта досліджень – сосни звичайної, пояснюється наступними передумовами: здатністю згаданого хвойного виду формувати лісонасадження в умовах Байрачного Степу; необхідністю досконалого оцінювання кількісних параметрів біопродуктивності сосняків, які відіграють важливу стабілізаційну роль для регіону в умовах глобальних змін клімату; невивченістю об'єкта з ракурсу оцінки компонентів надземної фітомаси, а особливо інформаційно-нормативного забезпечення компонентів дерев і деревостанів; нагальною

потребою у формуванні довгострокових знань щодо становлення екологічних прогнозів росту соснових насаджень в умовах степової зони.

Реалізація поставлених завдань передбачала виконання комплексних досліджень із біопродуктивності сосни звичайної за компонентами надземної фітомаси, з урахуванням принципів системного підходу, який передбачає послідовність залучення вхідних даних, власне процесинг та отримання вихідних параметрів, які повинні бути зіставними критеріям збалансованого розвитку.

Як відомо, надземна фітомаса є одним із найбільш поширених параметрів для оцінки продуктивності лісів і коефіцієнтів поглинання вуглецю насадженнями. Цей параметр необхідний для визначення ефективних заходів сталого управління лісами та пом'якшення наслідків глобальної зміни клімату. Для розрахунку компонентів надземної фітомаси застосовано регресійний метод, який найбільш точний і універсальний. Відомо багато функцій, які апроксимують регресійну залежність, однак найчастіше використовується рівняння алометричної (степеневі) функції, або рівняння статичної алометрії (Кофман Г. Б., 1986). У контексті поточної політики щодо пом'якшення викидів парникових газів за участі лісових насаджень, використання алометричних залежностей стало важливим кроком у прогнозуванні надземної біомаси дерев і деревостанів при залученні у моделі дендрометричних змінних, які просто виміряти у природі, зокрема, діаметра на висоті грудей та висоти дерева. З цією метою проведено розроблення подібних моделей та здійснено розрахунки кількості надземної біомаси як на рівні окремого дерева, так і деревостану. За експериментальну базу досліджень слугували результати, отримані на тимчасових пробних площах, закладених у сосняках, які зростають у межах Дніпропетровського регіону (рис. 1).



Рис. 1. Локації тимчасових пробних площ в умовах регіону досліджень

Збір дослідного матеріалу на тимчасових пробних площах здійснювали відповідно до методики, розробленої П. І. Лакидою (2002). Тимчасові пробні площі закладено в соснових деревостанах, сформованих у переважаючих типах лісорослинних умов регіону. Польові дослідження ґрунтувалися на поєднанні таксаційних і біометричних прийомів, тоді як розроблення комплексу нормативно-інформаційного забезпечення (на рівні дерева і деревостану) побудовано на основі застосування статистичних і математичних методів, розроблення моделей розрахунку фітомаси дерев і закономірностях будови деревостанів.

Для повнішої характеристики лісівничо-таксаційної структури та біопродуктивності соснових насаджень використано реляційну повидільну базу даних «Лісовий фонд України» (станом на 01.01.2011 р.) лісгосподарських підприємств Дніпропетровської області, підпорядкованих Державному агентству лісових ресурсів України. В цілому оцінено 5158 виділів, у яких сосна звичайна виступає головною породою. Здійснено розподіл за віковою структурою, таксаційними показниками, типами лісорослинних умов, типами лісу, бонітетами соснових деревостанів Байрачного Степу.

Оцінювання надземної фітомаси сосняків методом дистанційного зондування Землі виконувалося на основі аналізу та оброблення даних супутникових знімків *Sentinel-1A* й *Sentinel-2A*, отриманих із загальнодоступного ресурсу *Copernicus Open Access Hub*.

Для мультиспектральних знімків *Sentinel-2A* за допомогою модуля *Sen2Cor* застосовано їх атмосферну корекцію з метою усунення ефектів впливу атмосфери на результати розрахунків вегетаційних індексів та отримання значень Альbedo земної поверхні у різних спектральних діапазонах.

Картографування надземної фітомаси на прикладі Обухівського лісництва Дніпровського держлісгоспу здійснено на основі *shape-files* за отриманими зі знімків *Sentinel-2A* і *Sentinel-1A* даних вегетаційного (*NDVI*) та поляризаційного (*RDPI*) індексів.

Статистичну обробку експериментального матеріалу проведено з використанням прикладних програм *MS Excel*, *Statistica 12*, а також із залученням геоінформаційних технологій, зокрема, програмного забезпечення *SNAP Desktop*.

Отримані дослідні дані повною мірою репрезентують соснові насадження Байрачного Степу України, і відповідно визначають можливість оцінювання сучасного стану об'єкта досліджень у статичній та динамічній на регіональному рівні.

Крім цього, також представлено аналіз ретроспективного і сучасного стану соснових насаджень Байрачного Степу України.

За допомогою ретроспективного аналізу здійснено оцінювання площ регіону, вкритих лісовою рослинністю та отримано динамічні ряди обліково-ресурсних показників, таких як загальна площа лісових ресурсів Байрачного Степу, площа ділянок земель, вкритих лісовою рослинністю, загальний запас деревини у лісонасадженнях регіону.

Встановлено, що за обліковий період з 1973 по 2011 р., у досліджуваному регіоні збільшилися площа земель, вкритих лісовою рослинністю та загальний запас деревини лісотвірних видів відповідно на 10,2 та 33,5 %.

Для групи хвойних насаджень фіксується незначне збільшення площі, охопленої ними у регіональному масштабі, що становить близько чверті від усієї площі вкритих лісовою рослинністю земель; частка стовбурового запасу деревостанів сосни звичайної за досліджуваний обліковий період збільшилася на 73 % (рис. 2).

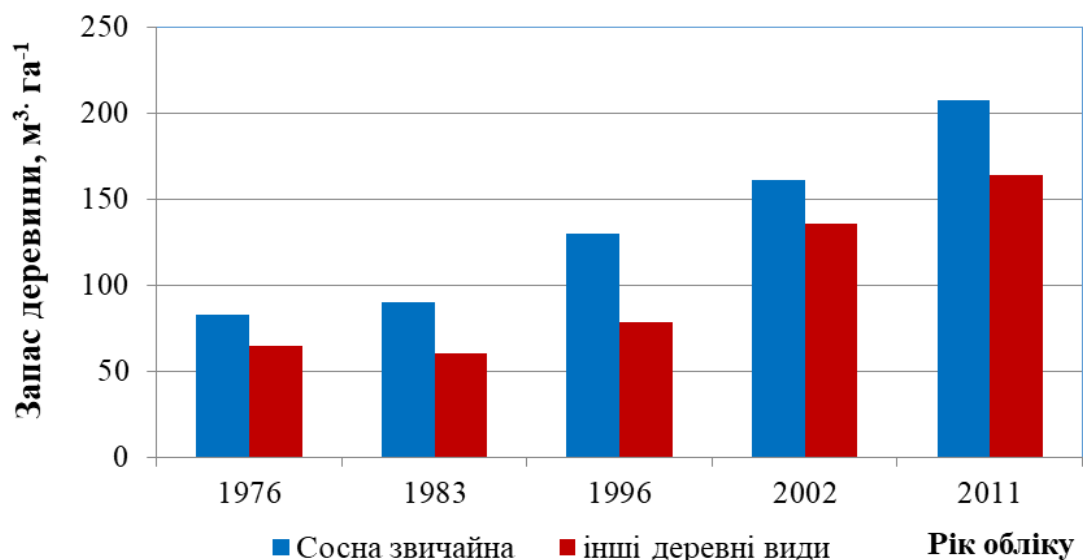


Рис. 2. Динаміка середнього запасу лісових насаджень Байрачного Степу у період з 1973 по 2011 р.

Організація раціонального лісовикористання починається з вивчення деревостанів, на запас і товарність яких впливають такі фактори, як вік насаджень, їх відповідність лісорослинним умовам, режим лісовирощування, головний напрям ведення лісового господарства, наявність вогнищ шкідників та хвороб тощо (Гірс О. А., 2009).

З метою оцінювання сучасного стану соснових лісів надано характеристику останніх в цьому аспекті на основі опрацювання даних повидільної бази, з детальним аналізом лісівничо-таксаційної структури досліджуваних деревостанів сосни.

Загальна площа соснових насаджень Байрачного Степу становить 21472,9 га із запасом деревини 4571,1 тис. м³. Соснові деревостани природного походження зростають на площі 3693,8 га (17,2 %), тоді як під лісовими культурами цієї породи знаходиться 17779,1 га, або 82,8 % від усієї площі соснових насаджень регіону.

За коефіцієнтом складу на території досліджень встановлено переважання чистих деревостанів, із повним домінуванням сосни звичайної на загальній площі 17578 га (81,8 %).

Для деревостанів сосни звичайної дослідженого регіону спостерігається асиметрія розподілу вікових груп із переважанням середньовікових насаджень – 58,5 %, а також молодняків (32,7 %), що представлено на рис. 3.

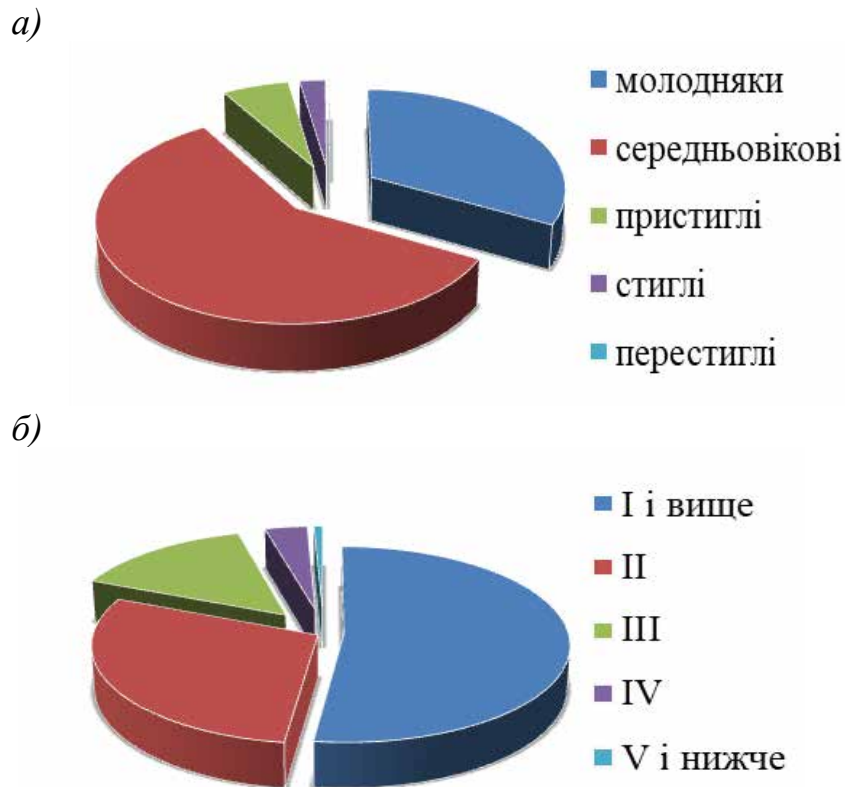


Рис. 3. Структура соснових деревостанів Байрачного Степу за віковими групами (а) та класами бонітету (б), % від площі

Середній вік панівної групи сосняків – 60 років, молодняків – 23 роки з відповідними середніми запасами 292 та 92 м³·га⁻¹. Віковий діапазон соснових деревостанів Байрачного Степу охоплює 15 класів. Найбільші площі охоплює сосна у віці із третього по сьомий класи.

За інтенсивністю росту насадження сосни Байрачного Степу можна вважати високопродуктивними, оскільки на площі 11183 га (52,1 %) згадана порода зростає за I і вище класами бонітету. Друге місце з 1/3 від площі сосняків за насадженнями II класу бонітету, 3,4 % становлять насадження IV класу бонітету і лише 0,7 % площі знаходиться під деревостанами сосни V і нижчих бонітетних класів.

Деревостани сосни звичайної у досліджуваному регіоні формуються в 17 едатопах – А₀₋₃, В₁₋₄, С₀₋₄, Д₀₋₃. Сухі та свіжі гігרותопи тут переважають, із 41,1 та 56,5 % від усієї площі сосняків відповідно та із 2/3 території в суборових умовах. Найвищі показники середнього запасу деревини сосни фіксуються для деревостанів 8 класу віку в борових та суборових умовах. У грудях зберігається тенденція поступового зростання кількості деревини, включно до 9 класу віку. Зі збільшенням віку, після досягнення породою максимуму запасу, в усіх типах лісорослинних умов спостерігається зниження цього показника, що, насамперед, обумовлюється старінням насаджень.

Як показав розподіл площі сосни звичайної за відносною повнотою, досліджувана порода на ~ 1/2 площі (11778,6 га) формує деревостани високої, на 7569,6 га – середньої повноти і лише 9,9 % площі – це низькоповнотні

соснові насадження та рідколісся. Середня відносна повнота соснових насаджень у зоні Байрачного Степу становить 0,71, істотно залежить від віку, значно зменшуючись у перестійних деревостанах.

У процесі дослідження біопродуктивності соснових лісів у статистиці та динаміці використано дані тимчасових пробних площ, закладених здобувачем в умовах Байрачного Степу. Віковий діапазон дерев у деревостанах тимчасових пробних площ – 9–90 років. Відносна повнота насаджень знаходилася в межах від 0,13 до 1,04; 44 % тимчасових пробних площ закладено у середньовікових насадженнях.

Розділ 4 «Характеристика якісних показників компонентів надземної фітомаси дерев сосни». Під час дослідження біологічної продуктивності лісів із розробкою відповідного нормативно-інформаційного забезпечення компонентів фітомаси дерев і деревостанів, важливим етапом стало визначення локальної та середньої базисної щільності компонентів стовбура і крони. Щільність слугує показником якості деревної сировини та має ряд переваг над іншими характеристиками (Полубояринов О. І., 1976).

Оцінювання природної локальної щільності компонентів фітомаси стовбура виявило істотну дисперсію отриманих значень, причому із значно суттєвішим варіюванням показників щільності кори. У межах досліджуваних груп віку (молодняки, середньовікові, пристиглі екземпляри) природна щільність деревини зменшується від окоренка до відносної висоти $0,50h$, після чого відзначається тенденцією до зростання. Природна локальна щільність кори стовбурів характеризується суттєвим зростанням із висотою стовбура у групі молодняків (майже втричі від висоти $0h$ до $0,75h$), за зменшення інтенсивності наростання у середньовікових, а особливо пристиглих насадженнях.

На відміну від природної, тенденція варіювання вздовж стовбура показника базисної щільності деревини дерев сосни звичайної для екземплярів усіх вікових груп характеризується спадним типом. Залежно від віку спостерігається зростання базисної локальної щільності деревини з фіксацією найвищого показника у пристиглому віці сосни. Перевищення значення пошукової величини сосни пристиглого віку досягало 25,8 %, порівняно з екземплярами групи молодняків.

Варіювання показника середньої базисної щільності деревини дерев сосни для досліджуваного діапазону віку (від 9 до 90 років) становить 47,8 %. Мінімальне значення базисної щільності деревини ($254 \text{ кг} \cdot (\text{м}^3)^{-1}$) фіксується для наймолодшого екземпляра (9 років); зі зростанням віку реєструється помірне збільшення параметра для старших дерев. Отримані результати узгоджуються з даними О. І. Полубояринова (1976), який констатує, що із віком у хвойних порід, незалежно від товщини річного шару, утворюється важча деревина.

Представлено також результати моделювання показників середньої щільності компонентів фітомаси дерев від таксаційних параметрів: віку, діаметра (на висоті 1,3 м) та висоти дерева. Середня базисна щільність деревини збільшується зі зростанням усіх досліджуваних таксаційних параметрів дерева (рис. 4).

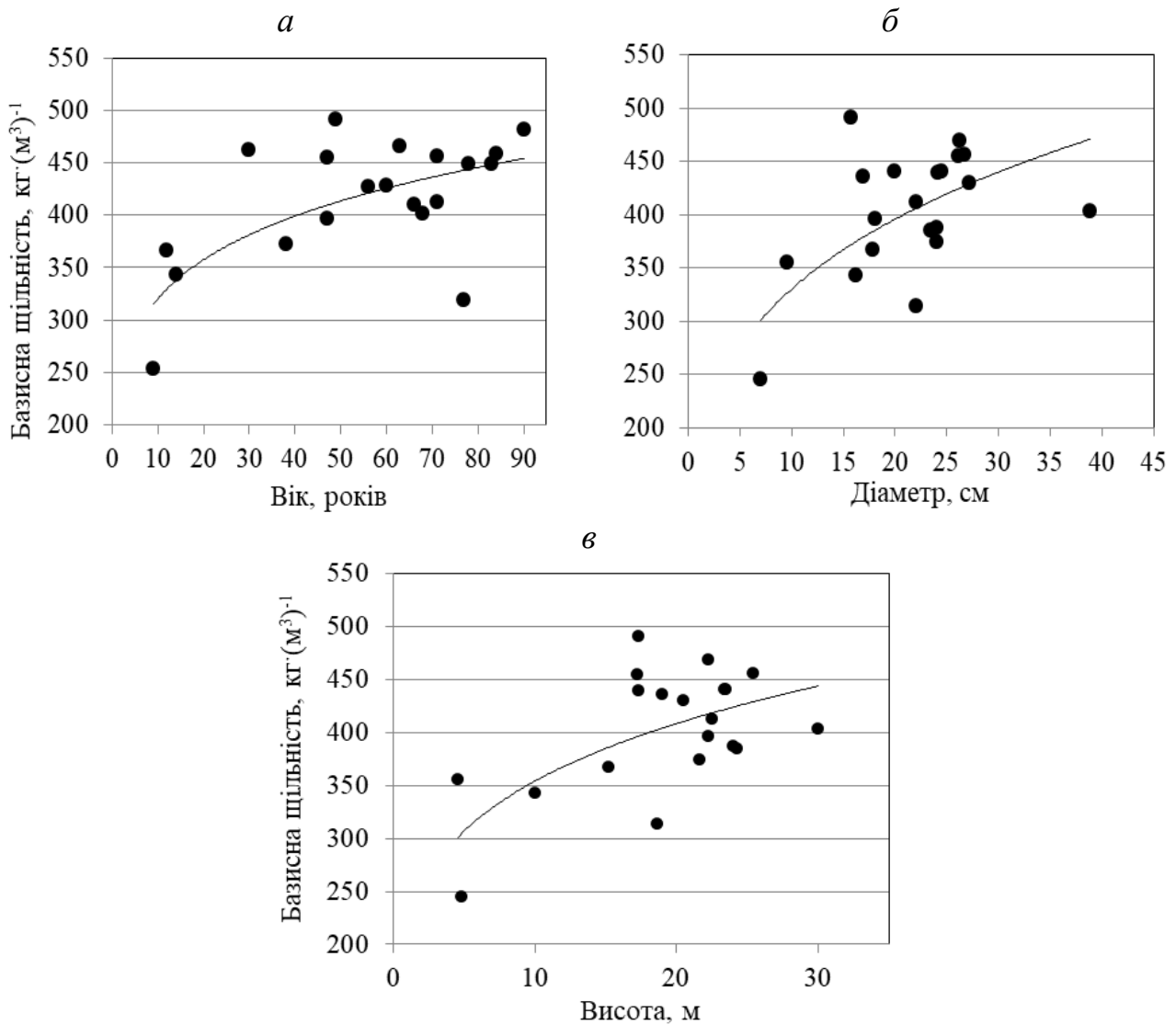


Рис. 4. Залежність середньої базисної щільності деревини сосни звичайної від віку (*a*), діаметра на висоті 1,3 м (*б*) та висоти (*в*) дерева

Величина середньої базисної щільності кори виявляє тенденцію до поступового збільшення з віком, однак, за умови зростання діаметра та висоти дерева спадає. Загалом, показники базисної щільності кори стовбура характеризуються істотнішим варіюванням вздовж лінії тренду, порівняно зі значеннями цього ж параметра деревини.

На основі отриманих даних розроблено регресійні моделі оцінювання природної і базисної щільності компонентів стовбура залежно від таксаційних параметрів дерев сосни. Як встановлено, найбільш статистично значущими за перевіреними критеріями детермінації та Фішера виявилися двофакторні моделі залежності оцінки базисної щільності деревини стовбурів залежно від висоти й віку, діаметра та віку, а також висоти та діаметра дерева.

Порівняльний аналіз значень середньої щільності компонентів фітомаси дерев сосни показав, що пошукова величина для деревини практично збігається із результатами, встановленими для умов Лісостепу, тоді як у зоні Полісся природна щільність істотно перевищує таку для зони Степу, хоча базисна більша лише на 3,0 % (табл. 1).

Порівняльна характеристика середньої щільності компонентів фітомаси стовбура сосни звичайної

Щільність, кг·(м ³) ⁻¹	Компо- нент стовбура	Регіон досліджень				
		Байрачний Степ	Лісостеп (А. Є. Шамрай)	Відхилення від Байрачного Степу, %	Українське Полісся (П. І. Лакида)	Відхилення від Байрачного Степу, %
Природна	деревина	831	824	-0,8	909	9,4
	кора	661	529	-20,0	578	-12,6
Базисна	деревина	414	408	-1,4	427	3,1
	кора	317	288	-9,1	277	-12,6

Середня як природна, так і базисна щільність кори, за результатами проведених досліджень вища за такі в умовах Полісся та Лісостепу на 13,0, 20,0 % та 9,0, 13,0 % відповідно. Регіональні розбіжності у значеннях показника середньої щільності підтверджують необхідність її визначення в конкретних умовах. Середні значення базисної щільності надалі було використано для розрахунків фітомаси соснових деревостанів в умовах Байрачного Степу.

Здійснено також оцінювання якісних показників компонентів крони дерев сосни звичайної в умовах Байрачного Степу. Статистичний аналіз щільності компонентів фітомаси крони дерева засвідчив нормальний їх розподіл, за виключенням показників асиметрії і ексцесу, отриманих для середньої базисної щільності кори гілок.

Зі збільшенням таксаційних параметрів дерева найзначніше залежно від діаметра відбувається зменшення показника природної щільності компонентів гілок крони як деревини, так і кори. Встановлені залежності природної щільності для компонента деревини у корі гілок від основних таксаційних показників аналогічні до залежностей щільності деревини гілок.

Тенденцію нисхідного типу визначено й для базисної щільності деревини гілок дерева, однак, у характері впливу біометричних факторів простежується дещо вираженіша тенденція залежно від збільшення висоти, а не діаметра дерева. За усередненою лінією тренду встановлено тенденцію спадання величини базисної щільності кори гілок, яка, насамперед, залежить від віку дерева. Як для природної, так і базисної щільності деревини й кори гілок дерев зафіксовано загальний тренд зниження значень зі зростанням віку, діаметра та висоти дерева. В цілому, для дослідження біопродуктивності соснових деревостанів рекомендовано використання розрахованих середніх значень базисної щільності фітомаси компонентів гілок дерев сосни звичайної: 436 кг·(м³)⁻¹ для деревини гілок, 338 кг·(м³)⁻¹ для кори гілок, 416 кг·(м³)⁻¹ для деревини гілок у корі.

Майже всі процеси, що відбуваються у лісових екосистемах, зокрема, формування первинної продукції, залежать від розміру та площі, що охоплює їх асимілююча частина (Forrester D. I. et al., 2017). Індекс площі листової поверхні – *LAI* (leaf area index) має ключове значення під час дослідження вегетативної складової лісів, адже згаданий показник відображає міру активності фотосинтетичних процесів.

На території Байрачного Степу проведені дослідження зі встановлення показника *LAI* деревостанів сосни звичайної контактним методом. За результатами, діапазон досліджуваного параметра змінювався від 1,1 до $3,36 \text{ м}^2 \cdot (\text{м}^2)^{-1}$; середній показник *LAI* становить $1,86 \text{ м}^2 \cdot (\text{м}^2)^{-1}$. Визначено, що динамічні зміни *LAI* сосняків характеризуються висхідною лінією тренду для молодих рослин, після досягнення дерев середнього віку – спадним типом.

Окрім визначення *LAI* прямим контактним способом, здійснено розрахунок цього показника на основі безконтактного методу обчислення площі прогалін напівсферичних фотографій намету. Подібні методи досліджень лісових ландшафтів ґрунтуються на цифровій обробці зображень, зменшують трудомісткість і збільшують ступінь об'єктивності дешифрування, порівняно із наземними експериментальними методами.

За використання наземного методу діапазон значень *LAI* соснових деревостанів мав варіабельність змін від 1,12 до $2,13 \text{ м}^2 \cdot (\text{м}^2)^{-1}$, тоді як для безконтактного вимірювання вказаний параметр коливається від 1,13 до $1,74 \text{ м}^2 \cdot (\text{м}^2)^{-1}$. Середнє значення *LAI* ($1,49 \text{ м}^2 \cdot (\text{м}^2)^{-1}$) для деревостанів сосни звичайної, виміряне прямим методом вище за таке, отримане безконтактним методом ($1,35 \text{ м}^2 \cdot (\text{м}^2)^{-1}$) на 8,8 %.

Залежно від уведених у регресійні рівняння таксаційних аргументів, для розрахунку *LAI* контактним і безконтактним методами запропоновані рівняння одно-, дво- та трифакторної регресії. Найбільш статистично значущими виявилися однофакторні моделі, де як аргументи виступають діаметр крони дерева та повнота насадження, а також множинні регресії із включенням у рівняння діаметра крони й довжини крони, діаметра крони, висоти і діаметра стовбура дерева на висоті 1,3 м.

Розділ 5 «Фітомаса дерев і деревостанів сосни звичайної Байрачного Степу України». Останнім часом, не зважаючи на інтенсивний розвиток новітніх технологій з питань оптичної фізики, дистанційного зондування Землі, ГІС-технологій тощо, вкрай важливим залишається розвиток базових знань щодо складових компонентів фітомаси лісів, отриманих на основі наземних досліджень, необхідність проведення яких обґрунтовується, насамперед, вищою точністю вимірювань та можливістю врахування усіх компонентів надземної фітомаси рослинного об'єкта (Asner G.P. et al., 2000; Drusch M. et al., 2012; Шпарик Ю. С., 2016; Forkuor G. et al., 2019).

Проведення досліджень із визначення біопродуктивності соснових лісонасаджень Байрачного Степу у статиці здійснювали моделюванням залежності компонентів фітомаси дерев і деревостанів сосни звичайної від основних їх таксаційних показників, із залученням методів регресійного та статистичного аналізів.

За основні аргументи регресійних рівнянь розглядалися наступні таксаційні показники дерева (деревостану): середній діаметр на висоті 1,3 м – d (D), середня висота – h (H), відносна повнота (P) насадження. При цьому застосовувалася наступна алометрична функція залежності компонентів надземної фітомаси деревостану від його параметрів (1):

$$Ph = f(D, H, P), \quad (1)$$

де Ph – фітомаса відповідного компонента (деревина, кора, хвоя тощо) надземної фітомаси; $f(D, H, P)$ – функції таксаційних ознак деревостану.

Після проведеного моделювання за основу для вибору того чи іншого рівняння розрахунку компонента фітомаси слугували уявлення щодо характеру залежності змодельованого показника та результатів статистичної точності апроксимації й адекватності регресійних рівнянь, які перевірялися за стандартним алгоритмом.

Розроблення нормативно-інформаційного забезпечення компонентів фітомаси стовбурів дерев сосни звичайної здійснювали з використанням побудованих моделей об'єму деревини стовбура (v_d), кори стовбура (v_k) та стовбура у корі (v_{cm}) дерев сосни звичайної залежно від таксаційних параметрів діаметра і висоти дерева (табл. 2) та через їх добуток на щільність відповідних компонентів фітомаси.

Таблиця 2

**Моделі для оцінювання об'ємів фітомаси
компонентів стовбура дерев сосни звичайної**

Компонент фітомаси	Вид рівняння	R^2	F -критерій	
			$F_{\text{факт.}}$	$F_{\text{крит.}}$
Деревина	$v_d = 0,00002 \cdot d^{1,967} \cdot h^{1,175}$	0,96	73,62	3,16
Кора	$v_k = 0,000064 \cdot d^{2,398} \cdot h^{-0,232}$	0,87	29,46	3,16
Стовбур у корі	$v_{cm} = 0,000040 \cdot d^{2,035} \cdot h^{0,930}$	0,96	68,36	3,16

За розробленими нормативами визначено збільшення значень компонентів фітомаси деревини та стовбурів у корі зі зростанням висоти та діаметра ($d_{1,3}$) дерева, тоді як для компонента кори зі збільшенням висоти дерева фіксується зниження фітомаси у межах одного ступеня товщини.

Надалі виконано оцінювання якісних ознак асиміляційної фракції крони сосняків із визначенням частки хвої у деревній зелені (P_L , %) та вмісту абсолютно сухої речовини у хвої (S_L). Варіабельність показника частки деревної зелені дерев сосни для досліджуваного регіону становила 49,8–71,6 %. Найнижчі показники визначеного параметра встановлено для найстарших екземплярів 90-річного віку, максимальні – для 30-річних дерев сосни. При збільшенні висоти і діаметра дерева фіксується зменшення частки хвої у деревній зелені. Вміст абсолютно сухої речовини у хвої показав варіабельність цього показника від 0,430 до 0,680, із середнім значенням $\approx 0,520$. На відміну від частки деревної зелені, показник вмісту абсолютно сухої речовини у хвої вирізнявся тенденцією до зростання, з наступним поступовим зниженням відносно таксаційних параметрів.

Для встановлення залежностей формування фітомаси фракцій деревної зелені (q_{dz}), гілок у свіжозрубаному стані (q_{zil}), хвої в абсолютно сухому

стані ($q_{хв}$) проаналізовано придатність рівняння степеневого виду ($y=ax^b$) із введенням у нього таких факторів впливу, як вік (a), діаметр на висоті 1,3 м ($d_{1,3}$), висота (h) дерева, протяжність ($l_{кр}$) та діаметр ($d_{кр}$) крони дерева. За кореляційним аналізом для компонентів фітомаси крони спостерігається наявність прямого кореляційного зв'язку з усіма таксаційними показниками, а найтісніша кореляція (0,60–0,70) виявлена між компонентами деревної зелені, гілок і хвої з діаметром стовбура дерева на висоті 1,3 м.

Отримані регресійні моделі залежності фітомаси компонентів крони від біометричних параметрів адекватно описують дослідний матеріал, про що свідчать значення коефіцієнтів детермінації та розподіл залишків моделей. Варто зазначити, що рівняння регресії розрахунку фітомаси деревної зелені ($R^2=0,60-0,80$) та хвої ($R^2=0,63-0,68$) демонструють вищі коефіцієнти детермінації, порівняно з регресіями фітомаси гілок ($R^2=0,41-0,49$). Найприйнятніші моделі залежності фітомаси компонентів крони одержано за використання алометричної степеневої моделі із вхідними аргументами діаметра (1,3 м), висоти дерева; саме ці моделі надалі використовувалися для формування нормативно-довідникової бази фітомаси крони дерев в умовах Байрачного Степу (табл. 3).

Таблиця 3

**Моделі для оцінювання об'ємів фітомаси
компонентів крони дерев сосни звичайної**

Компонент фітомаси	Вид рівняння	R^2	F -критерій	
			$F_{факт.}$	$F_{крит.}$
Деревна зелень (свіжозрубаний стан)	$q_{дз} = 0,438 \cdot d^{2,826} \cdot h^{-1,628}$	0,72	82,1	3,16
Гілки (свіжозрубаний стан)	$q_{гил} = 0,253 \cdot d^{2,489} \cdot h^{-1,199}$	0,48	25,5	3,16
Хвоя (абсолютно сухий стан)	$q_{хв} = 0,154 \cdot d^{3,144} \cdot h^{-2,011}$	0,63	56,2	3,16

Для показника фітомаси компонентів крони притаманний обернений зв'язок із висотою дерева, тобто зі збільшенням віку рослин та відповідним їхнім зростанням у висоту відбувається зменшення концентрації фітомаси органів асиміляції та гілок. У свою чергу, визначено, що зі зростанням діаметра дерева відбувається збільшення фітомаси крони дерев.

В межах досліджень особливостей накопичення фітомаси та функціонування крони дерев сосни у досліджуваному регіоні, проведено визначення частки хвої різного віку для згаданої породи. Як показали отримані результати, в умовах Байрачного Степу майже половина маси хвої (47,3 %) дерев сосни звичайної належить до однорічної, третина – до дворічної і лише п'ята частина – до хвої третього року життя.

Отримані результати, які характеризують особливості функціонування фотосинтетичного апарату сосни в умовах Байрачного Степу, надалі послугували підґрунтям для здійснення розрахунків фітомаси хвої соснових деревостанів у річному еквіваленті.

Однією зі складових дослідження біопродукційних процесів у соснових насадженнях Байрачного Степу стало розроблення інформаційно-нормативного забезпечення деревостанів сосни у дослідженому регіоні. За опрацьованим

алгоритмом на основі робочого масиву даних, насамперед, проведено кореляційний аналіз тісноти зв'язків основних компонентів фітомаси стовбурів деревостанів з їх основними таксаційними ознаками. Встановлено прямий сильний зв'язок для компонентів фітомаси стовбура у корі (0,83) та деревини стовбура (0,84) із середніми діаметром (1,3 м) та висотою деревостану, тоді як значення коефіцієнта кореляції фітомаси кори з усіма таксаційними показниками, окрім повноти, демонструє наявність помірною зв'язку (0,58).

З метою отримання нормативно-довідкової інформації здійснено пошук і відібрано регресійні моделі для оцінки фітомаси стовбурів та крони соснових деревостанів Північного Степу України (табл. 4).

Таблиця 4

Моделі для оцінювання об'ємів фітомаси компонентів стовбура та крони соснових деревостанів

Компонент фітомаси	Вид рівняння	R^2	F-критерій	
			$F_{\text{факт.}}$	$F_{\text{крит.}}$
Деревина стовбура	$Ph_{\text{дер}} = 1,986 \cdot D^{0,072} \cdot H^{1,332} \cdot P^{0,940}$	0,83	39,30	3,24
Кора стовбура	$Ph_{\text{стов.}} = 2,646 \cdot D^{0,053} \cdot H^{1,308} \cdot P^{1,028}$	0,83	83,16	3,24
Стовбур у корі	$Ph_{\text{кори}} = 0,738 \cdot D^{-0,180} \cdot H^{1,336} \cdot P^{1,846}$	0,69	15,04	3,24
Деревна зелень	$Ph_{\text{дз}} = 2,312 \cdot D^{1,362} \cdot H^{-0,599} \cdot P^{1,604}$	0,74	15,83	3,24
Гілки крони	$Ph_{\text{гил.}} = 1,335 \cdot D^{1,702} \cdot H^{-0,983} \cdot P^{1,443}$	0,71	12,94	3,24
Хвоя крони	$Ph_{\text{хв.}} = 1,136 \cdot D^{1,212} \cdot H^{-0,582} \cdot P^{1,702}$	0,69	19,17	3,24

Зареєстровано більш істотну дисперсію отриманих значень компонентів фітомаси крони, порівняно з компонентами стовбура, з відповідно меншими показниками детермінації та критерію Фішера для розроблених моделей.

Моделі для розрахунку фітомаси компонентів стовбура включали аргументи лише з додатними значеннями коефіцієнтів рівнянь, що свідчить про наявність прямолінійного зв'язку включених параметрів із результуючою фітомасою стовбурів деревостанів. Однак, у розроблених рівняннях оцінювання фітомаси компонентів крони деревостану спостерігається прямий зв'язок із середнім діаметром та відносною повнотою насадження, тоді як з висотою деревостану зв'язок обернений.

Здійснено розрахунок показника відношення надземної фітомаси стовбурів деревостану до його запасу у корі (конверсійний коефіцієнт). Встановлено, що для модальних соснових деревостанів цей показник характеризується незначною варіабельністю, зокрема, для насаджень із відносною повнотою 0,8 він знаходиться у межах від 0,42 до 0,46.

Тенденція спадання коефіцієнта відношення із віком подібна до результатів, отриманих для сосни звичайної у інших регіонах України. Однак, слід відзначити, що саме значення показника відношення надземної фітомаси до запасу соснових деревостанів в умовах Байрачного Степу є нижчим за таке близько на 15 % (Полісся та Лісостеп) та 13 % (Нижньодніпровські піски) (П. І. Лакида, 2002).

Моделі компонентів надземної фітомаси стали підґрунтям для практичного їх втілення з розробленням інформаційного забезпечення соснових модальних деревостанів за використання вхідних параметрів середнього

діаметра, середньої висоти та відносної повноти насадження. Оцінювання фітомаси стовбурів і крони проведено з формуванням нормативно-довідкової бази, де діапазон середніх діаметрів деревостанів знаходиться у межах від 4 до 30 см, середніх висот – від 4 до 28 м, а відносних повнот – від 0,6 до 0,9.

Оцінка фітомаси сосняків на основі даних дистанційного зондування Землі. Розроблені алометричні залежності, отримані за допомогою деструктивного контактного методу, стали підґрунтям для оцінювання розподілу фітомаси соснових деревостанів засобами ГІС-технологій у межах регіону досліджень.

Встановлення кількісних показників соснових насаджень виконано за допомогою мультиспектральних і радарних космічних знімків зі супутників *Sentinel-2A* і *Sentinel-1A*, з використанням вегетаційних індексів та біофізичних ознак, які пов'язані з біопродуктивними показниками рослинних угруповань.

Для оперативного й швидкого визначення подібних показників на великих площах, вкритих лісовою рослинністю, проводяться дослідження на основі мультиспектральних знімків *Sentinel-2A*. Проте при всіх своїх перевагах і широкому застосуванні, під час вирішення завдання постійного моніторингу оптичним даним характерний величезний недолік їхньої залежності від погодних умов. Внаслідок цього для порівняння отриманих результатів здійснено радіометричне калібрування знімків з *Sentinel-1A*, проведене за спрощеною процедурою, яка передбачала використання даних відбиття на сенсорі (Станкевич С. А., Пестова І. О., 2014).

За допомогою проведеного розрахунку отриманих з *Sentinel-2A* спектральних показників *NDVI*, *LAI*, *Chl_{a,b}*, *FAPAR*, *TVI*, *FCOVER* та показника *RDPI*, визначеного за допомогою радарних знімків із *Sentinel-1A*, здійснено розроблення математичних залежностей надземної фітомаси соснових деревостанів, найточніші з яких наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Моделі для оцінювання надземної фітомаси соснових деревостанів методами дистанційного зондування Землі

Вид супутника	Вид рівняння	R^2	F-критерій	
			$F_{\text{факт.}}$	$F_{\text{крит.}}$
<i>Sentinel-2A</i>	$Ph = 563,620 \cdot NDVI^{1,251}$	0,70	30,72	9,33
<i>Sentinel-2A</i>	$Ph = 550,474 \cdot NDVI^{1,140} \cdot FAPAR^{0,096}$	0,70	14,22	6,53
<i>Sentinel-1A</i>	$Ph = 730,79 \cdot RDPI^{3,260}$	0,70	–	–

На основі обробки мультиспектральних і радарних знімків супутників *Sentinel-2A* та *Sentinel-1A* проведено трансформацію змодельованих даних у надземну фітомасу зі створення відповідних мап розподілу фітомаси соснових насаджень у межах досліджуваного регіону (Обухівське лісництво Дніпровського держлісгоспу Байрачного Степу), що подано на рис. 5 та рис. 6.

За даними обробки знімків *Sentinel-2A* значення надземної біомаси лісових площ досліджуваної території коливається від 75 до 309 т·га⁻¹. Середнє значення надземної біомаси у межах 49 кварталів становить 140 т·га⁻¹.

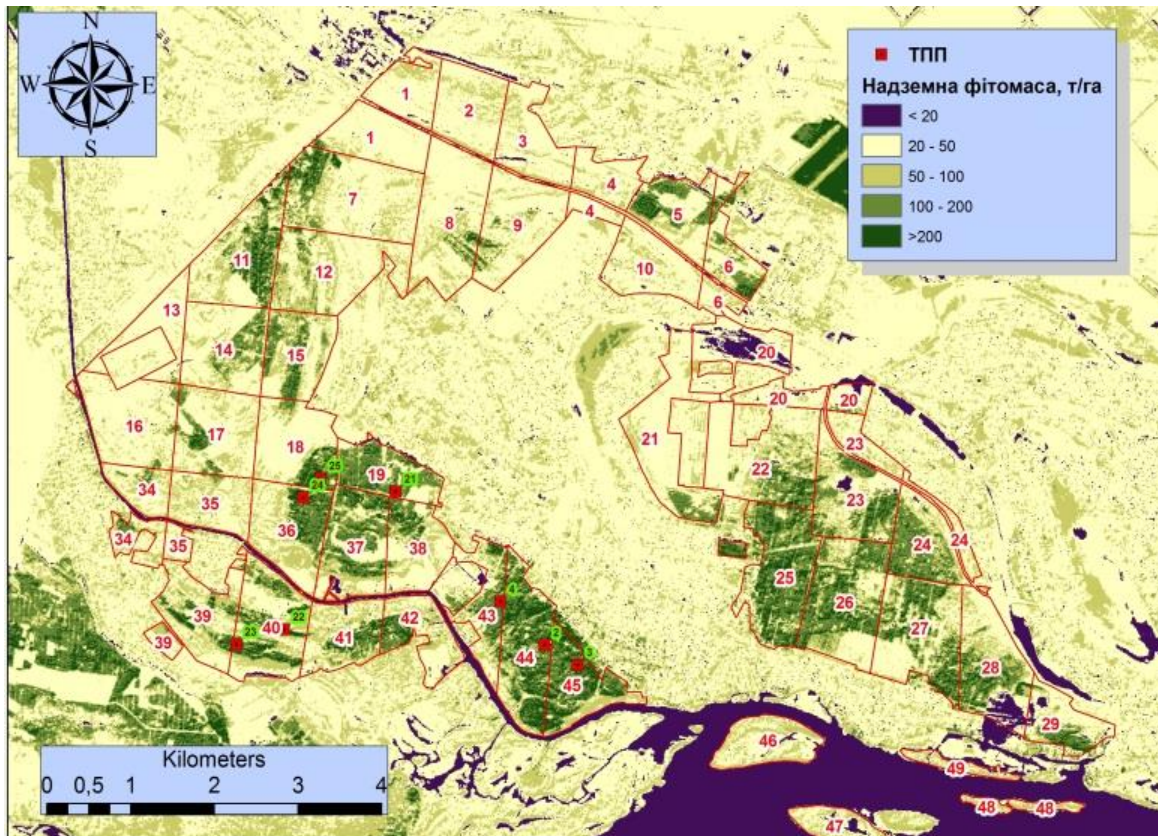
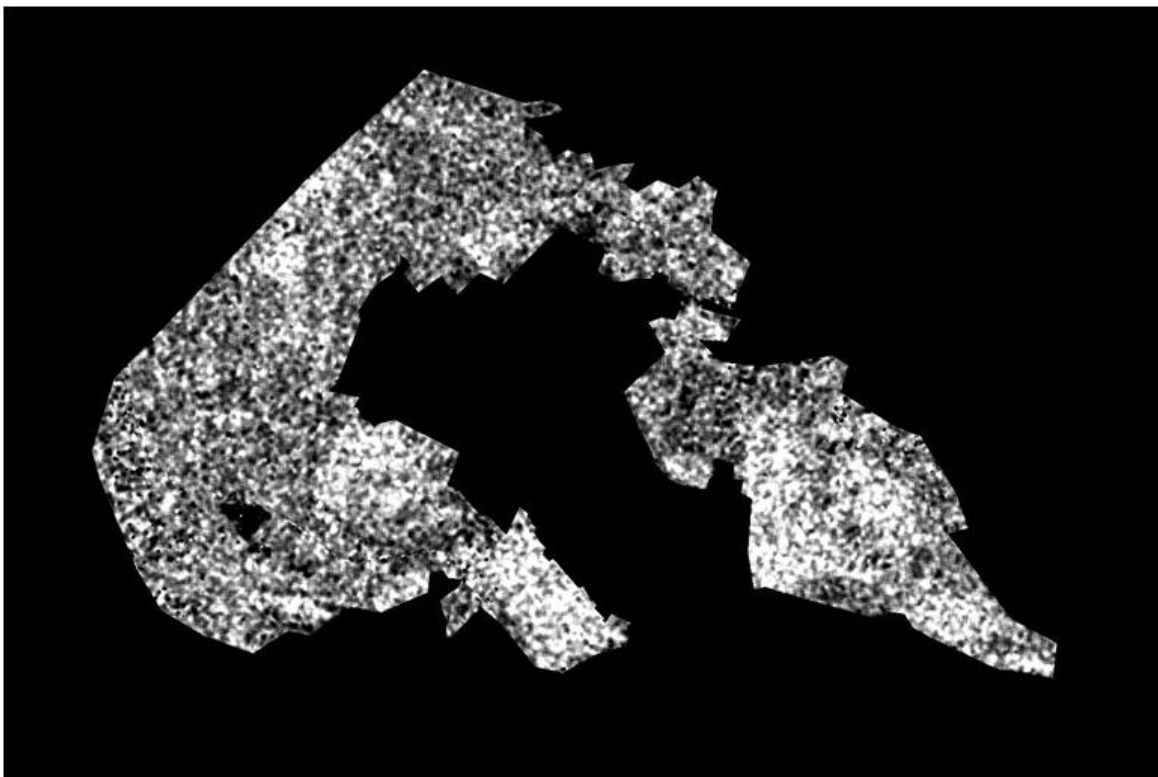


Рис. 5. Мапа розподілу надземної фітомаси соснових деревостанів на території Обухівського лісництва за даними супутникових знімків *Sentinel-2A*



2,7  326,4

Рис. 6. Мапа розподілу надземної фітомаси соснових деревостанів на території Обухівського лісництва за даними супутникових знімків *Sentinel-1A*

Діапазон фітомаси сосняків за даними, отриманими на основі радарних знімків *Sentinel-1A* знаходиться у межах від 2,7 (чорний колір) до 326,4 т·га⁻¹ (білий колір); середній показник фітомаси у межах досліджуваного лісництва досягає 162 т·га⁻¹.

Точність карти розподілу надземної фітомаси за даними супутникових знімків оцінена за середньоквадратичною похибкою (RMSE), яка у випадку використання супутникових знімків *Sentinel-2A* становила 37,22, *Sentinel-1A* – 51,65 т·га⁻¹.

Порівняння отриманих даних виявило незначну різницю між розрахованою фітомасою соснових деревостанів залежно від використання оптико-електронної чи радіолокаційної апаратури. Середній показник надземної біомаси при оцінюванні знімків *Sentinel-1A* вищий на 13,6 %, порівняно з отриманим результатом для *Sentinel-2A*. Відмінність в отриманих результатах, насамперед, пояснюється різним принципом формування таких супутникових зображень, а також часом проведення супутникової зйомки. Більш точним способом оцінювання біомаси сосняків виявився метод із використанням оптико-електронної апаратури, однак лише за умови обробки супутникових знімків, отриманих у зимовий період.

Як результат, отримані оцінки фітомаси дерев і деревостанів сосни звичайної з використанням бази даних державного обліку лісового фонду та застосуванням ГІС-технологій можна імплементувати на всю територію Байрачного Степу. Це, у свою чергу, надасть можливість оцінювання величини пулу вуглецю, а також ведення більш обґрунтованої лісогосподарської політики у межах досліджуваного регіону.

Розділ 6 «Динаміка росту, біопродуктивності та екологічний потенціал соснових деревостанів». Моделювання росту і продуктивності деревостанів слугує одним з основних методів виявлення закономірностей функціонування та прогнозування розвитку лісів як найскладніших біологічних систем в умовах глобального потепління та змін клімату. Пізнання загальних закономірностей лісоформаційного процесу, динаміки продуктивності лісових фітоценозів, а також розроблення емпіричних моделей росту ґрунтуються на оцінці таксаційних параметрів деревостанів, набуло не тільки теоретичного, а й практичного застосування з визначенням меж можливого господарського використання лісонасаджень в умовах конкретного регіону.

Існуючі нормативи більшою мірою описують ріст і розвиток «нормальних» та оптимальних насаджень, чистих за своїм складом, із високою повнотою та продуктивністю (Нікітін К. Є., 1987; Строчинский А. А., Швиденко А. З., Лакида П. И., 1992). Особливості функціонування існуючих деревостанів, з урахуванням впливу навколишнього середовища, визначають особливості ходу росту модальних (реальних) деревостанів, які за ступенем зімкненості, зазвичай, середньоповнотні. Нині на території України розроблення таблиць ходу росту модальних деревостанів здійснено такими науковцями як П. І. Лакида (1988), В. Ю. Юхновський (2003), А. З. Швиденко (2008), С. І. Миклуш (2011), Р. Д. Васишин (2014), Г. Г. Гриник, О. Ю. Гром'як (2014), В. П. Пастернак, В. В. Назаренко, Ю. В. Карпець, (2014),

О. П. Бала, І. М. Матейко (2019) та ін. Однак, для окремих регіонів, зокрема Байрачного Степу України, до цього часу ще не виконано формування таблиць ходу росту. Процес моделювання з інтеграцією динамічних процесів зміни таксаційних складових соснових деревостанів із ростом, зі складанням відповідних таблиць визначився найбільш актуальним завданням.

Із метою встановлення особливостей росту насаджень сосни в умовах Байрачного Степу та підбору однорідних експериментальних даних першочерговим завданням стало розроблення динамічної бонітувальної шкали. Воно відбулося на основі існуючої загальнобонітетної шкали, з якої вибрано висоту деревостанів сосни звичайної у базовому віці 60 років («Лісотаксаційний довідник», 2003). Порівняння особливостей ходу росту у висоту змодельованих кривих насінневих соснових деревостанів різних класів бонітету із модифікованою існуючою бонітетною шкалою висот виявило наступне (рис. 7).

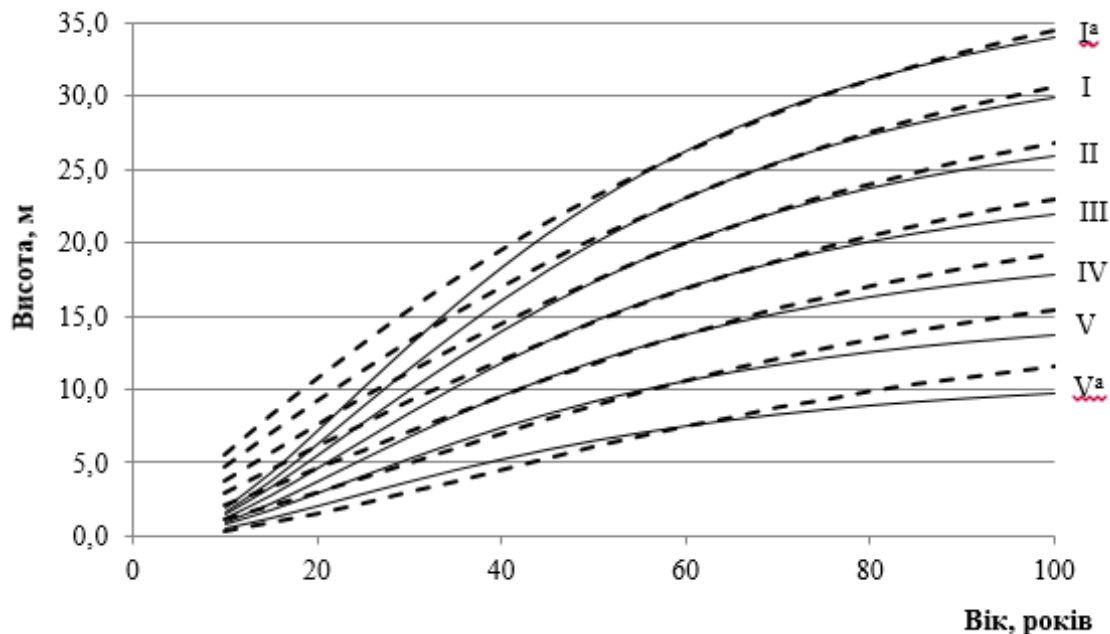


Рис. 7. Висоти верхніх меж I^a, I, II, III, IV, V та V^a класів бонітету змодельованої динамічної шкали (суцільні лінії) та існуючої загальнобонітетної шкали (пунктирні лінії) для насінневих соснових деревостанів

Так, криві росту відображають дещо знижену інтенсивність росту у досліджуваному регіоні, порівняно із загальнобонітетною шкалою, що більше виражено для деревостанів наймолодшого віку найвищих класів бонітету (I^a, I, II) та деревостанів старшого (понад 60 років) віку найнижчих бонітувальних класів (IV, V та V^a).

Розроблена динамічна бонітетна шкала культур сосни стала підґрунтям для побудови таблиць ходу росту на основі матеріалів повидільної бази даних, із розподілом за бонітетами 4016 виділів штучних модальних насаджень сосни звичайної та експериментальної бази даних з тимчасових пробних площ. Побудовано моделі динаміки таксаційних показників сосняків, зокрема, середньої висоти й діаметра, запасу стовбурової деревини ростучого

деревостану та його вирубуваної частини, а також загальної продуктивності, середнього і поточного приростів сосняків.

Вирівнювання динаміки середньої висоти та середнього запасу деревостану проводили з використанням функції росту Мітчерліха, рівняння якої має наступний вигляд:

$$H_{cp} = a_0 \cdot (1 - e^{-a_1 \cdot A})^{a_2}, \quad (2)$$

де H_{cp} – середня висота деревостану, м; A – середній вік деревостану, років; a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти регресії.

Для моделювання середнього діаметра соснових насаджень використано алометричну залежність ступеневого виду.

Отримані моделі динаміки таксаційних показників сосняків підлягали графоаналітичному та статистичному аналізу, з формуванням відповідних таблиць ходу росту соснових деревостанів для найбільш представлених у межах регіону класів бонітету. Фрагмент отриманих таблиць для штучних насаджень сосни І класу бонітету наведено у табл. 6.

Таблиця 6

**Хід росту модальних штучних деревостанів
сосни звичайної І класу бонітету**

Вік, років	Деревостан								Частина, що вирубується					Загальна продуктивність, м ³	Загальний приріст, м ³ ·га ⁻¹ ·рік ⁻¹	
	середня висота, м	середній діаметр, см	кількість дерев, шт.	сума площ поперечних перерізів, м ²	видове число	запас, м ³ ·га ⁻¹	зміна запасу, м ³ ·га ⁻¹		середня висота, м	середній діаметр, см	кількість дерев, шт.	сума площ поперечних перерізів, м ²	запас, м ³ ·га ⁻¹		середній	поточний
							середня	поточна								
10	1,7	2,8	3643	2,0	1,016	4	0,4	–	1,5	1,9	–	–	–	4	0,4	–
15	3,6	5,0	3016	5,9	0,850	18	1,2	3,0	3,2	3,5	627	0,6	2	20	1,3	3,3
20	5,9	7,5	2464	10,9	0,746	48	2,4	5,9	5,2	5,3	552	1,2	5	54	2,7	6,9
25	8,3	10,1	1985	15,8	0,675	88	3,5	8,0	7,4	7,2	479	1,9	10	104	4,2	10,0
30	10,6	12,6	1591	19,9	0,622	131	4,4	8,7	9,6	9,1	394	2,5	15	162	5,4	11,7
35	12,9	15,1	1285	23,0	0,583	172	4,9	8,2	11,7	11,0	306	2,9	20	223	6,4	12,1
40	15,0	17,5	1052	25,2	0,552	208	5,2	7,2	13,6	12,8	233	3,0	23	282	7,0	11,7
45	16,9	19,7	875	26,7	0,528	238	5,3	6,0	15,4	14,6	177	3,0	24	336	7,5	10,8
50	18,6	21,9	740	27,8	0,509	263	5,3	4,9	17,0	16,3	135	2,8	24	385	7,7	9,8
55	20,1	23,9	637	28,5	0,493	283	5,1	4,0	18,5	18,1	104	2,7	24	429	7,8	8,8
60	21,4	25,8	555	29,0	0,480	299	5,0	3,2	19,8	19,7	81	2,5	23	468	7,8	7,9
65	22,6	27,6	491	29,4	0,470	312	4,8	2,6	20,9	21,3	64	2,3	22	503	7,7	7,1
70	23,6	29,3	440	29,6	0,461	322	4,6	2,1	21,9	22,9	52	2,1	21	534	7,6	6,3

Розроблені моделі оцінки таксаційних показників середньої висоти, середнього діаметра, середнього запасу характеризуються високими коефіцієнтами детермінації, отримані коефіцієнти рівняння рівнянь регресії значущі на п'ятивідсотковому рівні, а фактичні значення t -критерію Стьюдента

перевищують критичне його значення. Отже, звідси можна констатувати факт високої статистичної значущості розроблених моделей.

Змодельовані значення запасів деревини відрізнялися неістотними відхилення від фактичних, що свідчить про достатньо точний опис моделлю емпіричних даних.

Варіабельність змін показників середньої висоти, середнього діаметра, суми площ поперечних перерізів, кількості стовбурів на 1 га представлено на рис. 8.

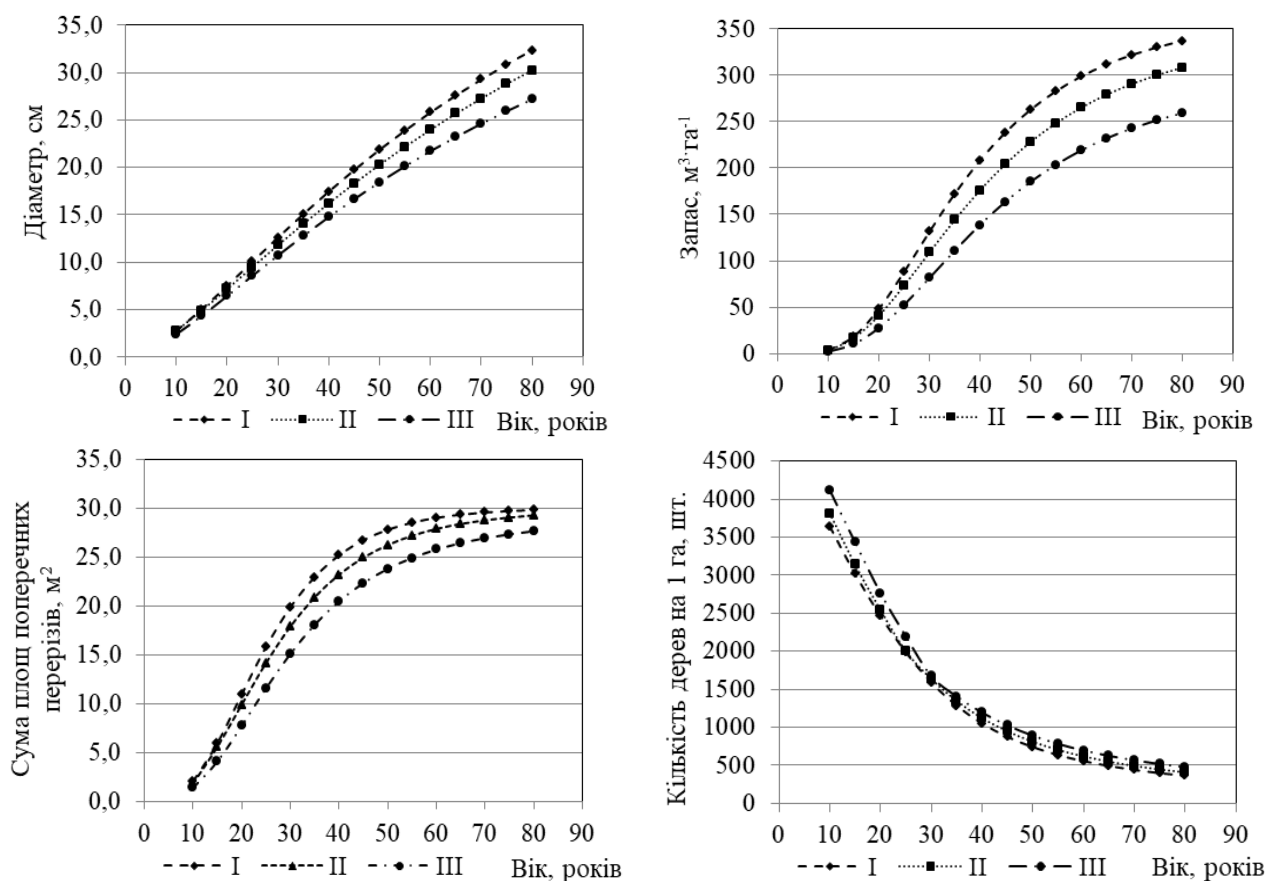


Рис. 8. Динаміка змін таксаційних параметрів штучних модальних соснових деревостанів I, II та III класів бонітету

Як засвідчують наведені дані, з віком у рослин, відповідно до збільшення класу бонітету, спостерігається зростання величин досліджуваних параметрів, за виключенням показника кількості дерев у насадженні, варіювання якого має зворотню тенденцію.

За одержаними результатами розроблено таблиці ходу росту модальних штучних соснових деревостанів 10–80 років для найбільш представлених у межах регіону класів бонітету (I^a–IV), які відображають закономірності росту сосняків в умовах Байрачного Степу України.

У межах завдання здійснено порівняльний аналіз значень таксаційних показників сформованих таблиць із подібними, що розроблені для інших регіонів України. Найбільші розбіжності між отриманими та порівнюваними досліджуваними таксаційними параметрами спостерігаються для деревостанів наймолодшого віку.

Розроблені таблиці ходу росту надалі доцільно враховувати під час проведення у насадженнях сосни звичайної рубок догляду та як складову раціональної системи ведення лісового господарства у регіональних умовах.

Динаміка біопродуктивності. Інтенсивність процесів поглинання, депонування та емісії в атмосферу вуглецю у лісових екосистемах залежить від лісорослинних умов, складу і структури деревно-чагарникової рослинності, віку, повноти та інших таксаційних показників насаджень. Тому для визначення запасів вуглецю у лісових екосистемах, обсягів поглинання та емісії парникових газів потрібно володіти детальною інформацією про фітомасу рослинності та її динаміку.

Моделювання регресійних залежностей таксаційних параметрів у динаміці стали підґрунтям для наступного розроблення динамічних (імітаційних) моделей біопродукувальних, вуглецедепонувальних та киснепродукувальних процесів у соснових насадженнях досліджуваного регіону. Розроблення таблиць подібного характеру дозволяє спрогнозувати закономірності формування біологічної продукції деревостанів із практичним застосуванням результатів досліджень під час розрахунків розміру лісокористування у конкретних умовах.

На основі отриманих моделей розрахунку компонентів надземної фітомаси побудовано таблиці динаміки біопродуктивності компонентів фітомаси стовбура і крони соснових деревостанів для I^a–IV класів бонітету (табл. 7).

Таблиця 7

Динаміка біологічної продуктивності штучних модальних соснових деревостанів I класу бонітету Байрачного Степу України за компонентами надземної фітомаси

Вік, років	Середня висота, м	Середній діаметр, см	Стовбуровий запас, м ³ ·га ⁻¹	Фітомаса в абсолютно сухому стані, т·га ⁻¹							Відношення надземної фітомаси до запасу, т·(м ³) ⁻¹
				стовбурів			крон			надземна	
				деревина	кора	разом	гілки	хвоя	разом		
10	1,7	2,8	4	4,3	1,2	5,4	1,29	0,84	2,13	7,6	2,14
15	3,6	5,0	18	9,4	1,8	11,2	1,48	0,95	2,42	13,6	0,74
20	5,9	7,5	48	16,1	2,4	18,5	1,73	1,09	2,82	21,3	0,44
25	8,3	10,1	88	26,6	3,8	30,4	2,49	1,56	4,05	34,5	0,39
30	10,6	12,6	131	40,2	5,8	46,0	3,58	2,23	5,81	51,8	0,39
35	12,9	15,1	172	53,1	7,5	60,6	4,46	2,73	7,19	67,8	0,39
40	15,0	17,5	208	65,0	8,7	73,7	5,18	3,10	8,28	81,9	0,39
45	16,9	19,7	238	76,7	9,9	86,6	5,97	3,48	9,45	96,1	0,40
50	18,6	21,9	263	87,7	11,0	98,7	6,75	3,84	10,59	109,3	0,42
55	20,1	23,9	283	97,1	11,9	108,9	7,44	4,12	11,56	120,5	0,43
60	21,4	25,8	299	106,1	12,7	118,8	8,19	4,43	12,62	131,4	0,44
65	22,6	27,6	312	113,8	13,3	127,1	8,89	4,68	13,57	140,7	0,45
70	23,6	29,3	322	120,1	13,7	133,8	9,51	4,87	14,38	148,2	0,46

Динаміка змін фітомаси компонентів стовбурової частини досить узгоджена й подібна для досліджуваних класів бонітету, з поступовим наростанням фітомаси з віком деревостану. Інтенсифікація біопродукційних процесів характерна для гілок і хвої крони, з відповідним збільшенням фітомаси з віком, але обернено пропорційною щодо збільшення класу бонітету.

Оцінювання бюджету вуглецю в аспекті його депонування у фітомасі насаджень, зокрема у надземній його частині, вкрай важливий етап під час визначення глобальної біосферної ролі лісових насаджень. Для розрахунків депонованого вуглецю використано основні положення методики за G. Matthews (1993), згідно з якою для фітомаси здерев'янілих частин сосни використовували перехідний коефіцієнт 0,5, для асиміляційної частини – 0,45.

Стосовно досліджуваних класів бонітету запаси вуглецю фітомаси, акумульованої сосновими деревостанами, істотно варіюють і зменшуються відповідно до зростання бонітетного індексу. Пул вуглецю в фітомасі досліджуваних компонентів сосняків змінюється з віком від 3,8 (10 років) до 70,4 (70 років) тС·га⁻¹ (I клас бонітету). Основна маса депонованого вуглецю зосереджена у стовбуровій частині деревостану, на частку якого припадає 73,0–90,5 %.

Також за результатами розрахунків загальної фітомаси модальних соснових деревостанів Байрачного Степу встановлено динаміку змін киснепродуктивності компонентів надземної фітомаси у віковий період від 10 до 80 років. Відповідно до визначеного тренду биопродукційних та вуглецедепонувальних процесів, варіабельність генерованого кисню у досліджуваних соснових деревостанах ідентична.

Продукція соснових деревостанів. Оцінювання вуглецевих функцій лісових екосистем неможливе без вивчення показників біопродукційного процесу, серед яких найвагоміший – чиста первинна продукція – органічна речовина, яка продукується лісонасадженням на одиниці площі за одиницю часу. В українській науковій літературі продукцію компонентів фітомаси часто ототожнюють з їхнім поточним приростом.

Алгоритм оцінювання продукції соснових насаджень у річному еквіваленті включав поетапне калькулювання усіх компонентів їх надземної фітомаси з урахуванням величини поточного приросту деревини стовбура та відсотка утвореного приросту компонентів фітомаси.

Отримані у результаті моделювання поточного приросту деревини стовбура та його відсотка від таксаційних показників деревостану рівняння мали коефіцієнти детермінації від 0,44 до 0,92 і були статистично значущими за розрахунками *F*-критерію Фішера. У найприйнятніших моделях як вхідні аргументи виступали вік деревостану, сума площ поперечного перерізу, відносна повнота, висота та діаметр стовбура на висоті 1,3 м у різному комбінуванні вказаних параметрів.

Оцінювання стовбурової продукції здійснювали через добуток поточного приросту деревини соснових деревостанів (розрахованого через вік та абсолютну повноту) на величину середньої базисної щільності деревини стовбура (0,414 т·(м³)⁻¹).

Визначено, що в умовах Байрачного Степу за рік найбільше продукції формується у деревостанах середньої вікової групи, тоді як максимальна її кількість при сумі площ поперечного перерізу $30 \text{ м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$ становить $4,1 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$ (табл. 8).

Таблиця 8

Продукція деревини стовбура соснових деревостанів, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$

Сума площ поперечних перерізів, $\text{м}^2 \cdot \text{га}^{-1}$	Вік, років												
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
6	0,8	0,8											
8	1,2	1,1	1,0										
10	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2								
12	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3					
14	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4		
16	2,6	2,4	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6
18	2,9	2,7	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	2,0	1,9	1,9	1,8	1,8
20		3,1	2,9	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0
22			3,2	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,2
24			3,5	3,3	3,2	3,1	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,5	2,5
26				3,7	3,5	3,3	3,2	3,1	3,0	2,9	2,9	2,8	2,7
28				4,0	3,8	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2	3,1	3,0	3,0
30					4,1	4,0	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3	3,2

Для розрахунку загальної продукції деревини на основі повидільної бази даних регіону використовували математичну залежність поточного приросту від показників віку, висоти та відносної повноти деревостану.

Основними регресійними моделями для розрахунку загальної продукції компонентів фітомаси кори стовбура та фітомаси компонентів крони також визначено рівняння із вхідними аргументами віку, середньої висоти та відносної повноти деревостану. З метою розрахунку річної продукції хвої використано середній кількісний коефіцієнт хвої першого року, з часткою такої 47,0 % від усїєї фотосинтетичної фракції фітомаси деревостанів сосни звичайної.

Загальну продукцію надземної частини соснових деревостанів Байрачного Степу визначали як суму продукції деревини, фітомаси кори стовбура та фітомаси гілок з урахуванням відсотка річного приросту зазначених компонентів, а також фітомаси хвої, помноженої на частку однорічної хвої (4):

$$Pr_{\text{дст}} = (Z_{\text{дст}} \cdot Q_{\text{дст}}) + (Ph_{\text{к}} \cdot V_{\text{Зк}}) + (Ph_{\text{Г}} \cdot V_{\text{ЗГ}}) + Ph_{\text{хв}} \cdot 0,47. \quad (4)$$

Підібрані алометричні моделі було використано для оцінки еколого-ресурсного потенціалу деревостанів сосни звичайної, які в умовах Байрачного Степу функціонують на площі 21472,9 га. Для розрахунку продукції залучено реляційну базу даних щодо соснових насаджень, які розподілені на території дев'яти лісових господарств та одного природного заповідника «Дніпровсько-Орільський» у межах досліджуваного Дніпропетровського регіону.

Через переведення річної продукції фітомаси у кількість акумульованого сосняками вуглецю за рік показано його перерозподіл у межах лісових господарств досліджуваного регіону (рис. 9).



Рис. 9. Розподіл вуглецю, депонованого в річній продукції надземної фітомаси соснових деревостанів державних лісових підприємств Дніпропетровського регіону

Визначено, що загальна річна продукція фітомаси надземної частини сосняків досліджуваного регіону становить $111726,3 \text{ т} \cdot \text{рік}^{-1}$, із середньою продукцією $5,16 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$, з яких на стовбурову частину та гілки припадає $3,46 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$, хвоєю – $1,70 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$.

Для оцінки екологічної ролі у загальному вуглецевому циклі соснових насаджень для вкритих лісовою рослинністю ділянок Дніпропетровського обласного управління лісового і мисливського господарства (станом на 2011 р.), проведено зіставлення даних щодо депонованого ними вуглецю з кількістю викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря (за період з 2004 по 2015 р.).

Дніпропетровська область відноситься до однієї з найбільш промислово розвинених областей України, де показники викидів забруднюючих речовин в атмосферу досягають величезних значень. Середня кількість викидів діоксиду вуглецю в досліджуваному регіоні становить 6,5793 млн т, тоді як показник

депонування вуглецю – 55,6 тис. т (станом на 2011 р.), або 1,2 % обсягу поглинання щорічних викидів CO₂ з атмосфери з регіону. Однак, у цілому лісові насадження, навіть за рахунок тільки соснових деревостанів, здатні акумулювати «шкідливий» вуглець, перетворюючи його на фітомасу, чим надають неоціненну екологічну послугу людству та всьому живому.

ВИСНОВКИ

У дисертації викладено результати досліджень біопродуктивності соснових насаджень Байрачного Степу України (на прикладі Дніпропетровської області) в умовах змін клімату. Розроблені нормативно-довідкові таблиці оцінювання дерев і деревостанів сосни звичайної у статиці та динаміці дозволяють використовувати вказане інформаційне забезпечення в умовах малолісних районів Степової зони. За результатами досліджень слід виокремити наступні висновки та узагальнення.

1. За допомогою ретроспективного аналізу отримано динамічні ряди таких обліково-ресурсних показників, як загальна площа лісових ресурсів Байрачного Степу, площа ділянок земель, вкритих лісовою рослинністю, загальний запас деревини у лісонасадженнях. На основі експериментальної бази даних охарактеризовано сучасний стан сосняків, площі яких переважно зайняті деревостанами I та I^a класів бонітету, середньовікової категорії.

2. Для умов Байрачного Степу встановлено показник середньої базисної щільності компонентів стовбура сосни звичайної, який для деревини становить 414 кг·(м³)⁻¹, кори – 317 кг·(м³)⁻¹. Побудовані регресійні залежності якісних ознак компонентів фітомаси стовбура та крони дерев сосни від основних таксаційних параметрів. Тренд збільшення з віком, діаметром та висотою стовбура фіксується для значень показника базисної щільності деревини стовбура, тоді як середня базисна щільність кори визначається нисхідною тенденцією залежно від таксаційних показників. Середня щільність деревини гілок крони сосни становить 436 кг·(м³)⁻¹, кори гілок – 338 кг·(м³)⁻¹.

3. Дослідження частки за масою різновікової хвої дерев сосни виявили найбільшу кількість у сосняках досліджуваного регіону хвої першого року (47,3 %). Встановлено, що середнє значення *LAI* для насаджень сосни звичайної Байрачного Степу України становить 1,86 м²·(м²)⁻¹. Порівняння зазначеного показника контактним та безконтактним методом демонструє вищу точність розроблених регресійних залежностей у випадку отримання індексу за допомогою хемісферичних панорам.

4. Найбільш статистично значущими для оцінювання компонентів фітомаси стовбурів та крони сосняків виявилися рівняння залежності алометричного типу від таксаційних показників висоти, діаметра та відносної повноти соснових деревостанів. Побудовані моделі стали підґрунтям для розроблення нормативно-довідкового забезпечення визначення компонентів надземної фітомаси сосни звичайної на подеревному рівні та для оцінювання деревостану у цілому.

5. Оцінена наземним методом фітомаса соснових деревостанів стала підґрунтям для розроблення регресійних залежностей із залученням даних мультиспектральних і радарних супутникових знімків *Sentinel-2A* та *Sentinel-1A*, а комбінування розроблених моделей з виконаною мапою – основою для регіональної оцінки розподілу біомаси сосняків в умовах Байрачного Степу України (на прикладі Обухівського лісництва Дніпровського держлісгоспу).

6. Здійснено розроблення математичних моделей динаміки таксаційних показників середньої висоти, середнього діаметра, середнього запасу, видового числа, суми площ поперечних перерізів та кількості стовбурів на одиницю площі з наступною побудовою таблиць ходу росту для штучних модальних соснових деревостанів Байрачного Степу України.

7. Змодельовано динамічні зміни біопродуктивності, обсягів депонованого вуглецю та генерованого кисню у модальних штучних соснових насадженнях за компонентами фітомаси стовбурової частини та крони у віковому діапазоні від 10 до 80 років.

8. Побудовані на основі експериментальних даних і повидільної бази даних ВО «Укрдержліспроект» динамічна бонітетна шкала та моделі динаміки таксаційних показників (біопродуктивності) для модальних соснових насаджень Байрачного Степу України – вагомий результат дисертації, оскільки вказані нормативи вперше розроблено для досліджуваних умов та виявили досить високі статистичні показники адекватності та точності.

9. На основі використання бази даних повидільної таксаційної характеристики соснових деревостанів Байрачного Степу України встановлено, що загальна продукція їх надземної частини становить $11726,3 \text{ т} \cdot \text{рік}^{-1}$, а середня річна продукція – $5,16 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$.

10. Як виявило оцінювання екосистемних функцій сосняків у загальному вуглецевому циклі, показник депонування карбону сосновими деревостанами становить 55,6 тис. т (станом на 2011 р.), або лише 1,2 % обсягу поглинання щорічних викидів CO_2 в атмосферу у досліджуваному регіоні, який визнано одним із найбільш промислово розвинених в Україні.

ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

Для практичного використання під час ведення лісового господарства у регіоні досліджень рекомендовано:

- регресійні моделі для встановлення середніх показників щільності компонентів фітомаси дерев сосни звичайної;
- кількісна характеристика обсягів компонентів надземної фітомаси на подеревному рівні та рівні деревостану сосни звичайної;
- алгоритм обчислення щорічної продукції за компонентами надземної фітомаси соснових деревостанів;
- карта розподілу депонування вуглецю сосновими деревостанами у межах лісгосподарських підприємств Державного агентства лісових ресурсів України;

- таблиці ходу росту соснових деревостанів різних класів бонітету зони Байрачного Степу України;
- показники динаміки біопродуктивності, вуглецедепонування та генерованого кисню соснових насаджень;
- мапа розподілу загальної надземної фітомаси, отриманої за результатами обробки супутникових знімків *Sentinel-1A* та *Sentinel-2A*;
- обсяги поглинання викидів діоксиду вуглецю сосновими деревостанами у межах досліджуваного регіону.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Лакида П. І., Василюшин Р. Д., Блищик В. І., Терентьев А. Ю., Лакида І. П., Домашовець Г. С., Володимиренко В. М., Білоус А. М., Матушевич Л. М., Мельник О. М., Лакида М. О., Алексіюк І. Л., **Ловинська В. М.**, Стратій Н. В. Хвойні деревостани України: фітомаса та експериментальні дані. Корсунь-Шевченківський, 2016. 480 с. *(Здобувачем здійснено агрегацію дослідних даних тимчасових пробних площ соснових деревостанів у Байрачному Степу, опрацьовано додатки).*
2. Lakyda P. I., Vasylyshyn R. D., Blyshchuk V. I., Lakyda I. P., Terentiev A. Yu., Domashovets H. S., Volodymyrenko V. M., Bilous A. M., Matushevych L. M., Melnyk O. M., Lakyda M. O., Aleksiiuk I. L., **Lovynska V. M.**, Stratii N. V. Experimental data on live biomass of Ukrainian coniferous forests. Kyiv, 2018. 453 p. *(Здобувачем здійснено агрегацію дослідних даних тимчасових пробних площ соснових деревостанів у Байрачному Степу, опрацьовано додатки).*

Статті у наукових фахових виданнях України

3. Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Аналіз структури насаджень Кіровського лісництва Дніпропетровського лісгоспу за крайніми градієнтами зволоження ґрунту. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2012. Вип. 171 (3). С. 218–223. *(Здобувачем досліджено сучасний стан за таксаційними параметрами соснових насаджень Кіровського лісництва у різних гідрогенних ланках).*
4. **Ловинська В. М.**, Поліщук В. В. Стан і продуктивність природних та штучних деревостанів *Pinus sylvestris* L. Придніпровського Північного Степу України. Автохтонні та інтродуковані рослини. 2014. Вип. 10. С. 94–99. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, виконано збір експериментальних даних, узагальнено висновки).*
5. **Ловинська В. М.**, Ситник С. А. Стан та продуктивність деревостанів *Pinus sylvestris* L. та *Robinia pseudoacacia* L. природного заповідника «Дніпровсько-Орільський». Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. 2014. Вип. 33. № 1. С. 191–196. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, проведено оцінювання сучасного стану соснових деревостанів природного заповідника, узагальнено висновки).*

6. **Ловинська В. М.**, Ситник С. А., Думинський Г. П. Ретроспективний аналіз динаміки лісових ресурсів Дніпропетровської області. Вісник аграрної науки Причорномор'я. 2014. Вип. 81. № 4. С. 129–134. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, проведено оцінювання динамічних рядів таксаційних параметрів лісів Дніпропетровської області).*

7. Ситник С. А., **Ловинська В. М.**, Олійник О. С. Моніторинг стану деревостанів *Pinus sylvestris* L. та *Robinia pseudoacacia* L. рекреаційно-оздоровчих лісів Лівобережного Північного Степу України. Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. 2014. С. 115–119. *(Здобувачем проаналізовано таксаційну структуру деревостанів сосни звичайної рекреаційно-оздоровчих лісів регіону, узагальнено висновки).*

8. **Ловинська В. М.**, Балабак А. Ф., Маслікова К. П., Молибога А. С. Лісівничо-таксаційна характеристика соснових деревостанів в умовах Лівобережного Придніпровського Степу України. Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. 2015. Вип. 87. Ч. 1. С. 30–36. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, охарактеризовано лісівничо-таксаційну структуру соснових деревостанів, узагальнено висновки).*

9. **Ловинська В. М.**, Балабак А. Ф., Маслікова К. П., Поліщук В. В. Показники компонентів фітомаси деревної зелені *Pinus sylvestris* L. в умовах степового Придніпров'я. Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. 2016. Вип. 88. Ч. 1. С. 164–171. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, оцінювання компонентів крони соснових деревостанів, узагальнено висновки).*

10. Ловинська В. М. Вивчення закономірностей формування крони сосни звичайної Північного Степу України. Таврійський науковий вісник. 2016. Вип. 101(3). С. 203–208.

11. Ловинська В. М. Локальна щільність компонентів фітомаси стовбурів *Pinus sylvestris* L. Північного Степу України. Вісник аграрної науки Причорномор'я. 2018. Вип. 3(99). С. 73–78.

12. Ловинська В. М. Нормативи оцінки компонентів фітомаси стовбура соснових деревостанів Північного Степу України. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2019. Вип. 1. С. 11–18.

**Статті у наукових фахових виданнях України,
включених до міжнародних наукометричних баз даних**

13. Ловинська В. М. Продуктивність соснових насаджень Лівобережного Придніпровського Степу. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2014. Вип. 198. № 1. С. 90–98.

14. Лакида П. І., **Ловинська В. М.** Особливості функціонування соснових деревостанів Придніпровського Північного Степу України. Лісівництво та агролісомеліорація. 2014. Вип. 125. С. 19–24. *(Здобувачем оцінено сучасний стан соснових деревостанів у межах Байрачного Степу України).*

15. Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Структура деревостанів головних лісотвірних порід сухих типів лісу Кочерезького лісництва Новомосковського

лісгоспу. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2014. Вип. 24.4. С. 153–158. *(Здобувачем здійснено оцінювання типологічної структури соснових деревостанів Кочерезького лісництва, узагальнено висновки).*

16. Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Вплив типів лісорослинних умов на запас деревини лісоутворювальних порід Степового Придніпров'я України. Лісівництво та агролісомеліорація. 2015. Вип. 126. С. 99–105. *(Здобувачем здійснено оцінювання запасів деревостанів сосни звичайної у різних типах лісорослинних умов, узагальнено висновки).*

17. Ситник С. А., **Ловинська В. М.**, Думинський Г. П. Аналіз стану насаджень за участю основних лісотвірних порід державного підприємства «Дніпропетровське лісове господарство». Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2015. Вип. 25.1. С. 92–96. *(Здобувачем здійснено збір даних та проаналізовано лісівничо-таксаційну структуру соснових деревостанів Дніпропетровського держлісгоспу, узагальнено висновки).*

18. Грицан Ю. І., Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Природно-заповідний фонд у структурі лісового господарства Дніпропетровської області. Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. 2016. Вип. 41. № 3. С. 23–27. *(Здобувачем здійснено збір дослідних даних з оцінюванням таксаційних показників соснових деревостанів природно-заповідного фонду за даними повидільної бази даних ВО «Укрдержліспроект»).*

19. **Ловинська В. М.**, Лакида П. І. Оцінка вмісту вуглецю та енергії у надземній фітомасі соснових деревостанів Північного Байрачного Степу України. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2016. Вип. 255. С. 73–80. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, проведено збір даних, узагальнено висновки).*

20. Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Енергетичний потенціал насаджень головних лісоутворюваних порід Північного Степу України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2016. Вип. 129. С. 146–152. *(Здобувачем здійснено збір і статистичне оброблення експериментальних даних, узагальнено висновки).*

21. **Ловинська В. М.**, Лакида П. І. Щільність деревини та кори стовбурів сосни звичайної в умовах Північного Степу України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2017. Вип. 130. С. 185–192. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, виконано збір експериментальних даних та оцінювання якісних параметрів дерев сосни звичайної).*

22. Лакида П. І., **Ловинська В. М.** Фітомаса компонентів крони дерев *Pinus sylvestris* L. Північного Степу України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2018. Вип. 133. С. 85–92. *(Здобувачем проведено моделювання компонентів фітомаси крони за даними тимчасових пробних площ, узагальнено висновки).*

23. **Ловинська В. М.**, Лакида П. І. Оцінка індексу площі листової поверхні деревостанів сосни звичайної в умовах Північного Степу України. *Agrology*. 2018. Вип. 1. Т. 3. С. 254–260. *(Здобувачем виконано збір*

експериментальних даних та оцінювання функціонування асиміляційної складової сосни звичайної, узагальнено висновки).

24. Ловинська В. М. Надземна фітомаса стовбурів *Pinus sylvestris* L. у деревостанах Північного Степу України. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2018. Вип. 28 (8). С. 79–82.

25. Лакида П. І., **Ловинська В. М.** Загальна продукція соснових деревостанів Північного Придніпровського Степу України. Лісівництво та агролісомеліорація. 2019. Вип. 134. С. 96–103. *(Здобувачем здійснено моделювання та розрахунок річної продукції соснових деревостанів за даними повидільної бази даних ВО «Укрдержліспроєкт»).*

26. Лакида П. І., **Ловинська В. М.** Нормативи оцінки продуктивності крони соснових деревостанів в умовах Північного Степу України. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2019. № 18. С. 101–108. *(Здобувачем отримано дані інформаційно-довідкового забезпечення компонентів крони сосняків Байрачного Степу, узагальнено висновки).*

Статті у наукових виданнях інших держав

27. **Lovynska V.**, Sytnyk S., Kharytonov M., Loza I. Features of pine stands function in Dnieper North Steppe, Ukraine. Agriculture and Forestry. 2016. № 62 (1). P. 155–163. *(Здобувачем проведено постановку завдання, опрацювання даних, узагальнено висновки).*

28. **Lovynska V.**, Sytnyk S., Kharytonov M., Katan L., Gumentyk M. Urban Forests Biometric Assessment in the Northern Steppe of Ukraine Scientific. Miestų želdynų formavimas. 2016. № 1 (13). P. 228–236. *(Здобувачем проведено опрацювання експериментальних даних з таксаційної структури соснових насаджень, узагальнено висновки).*

29. Sytnyk S., Zverkovsky V., Kharytonov M., Klimkina I., **Lovynska V.** Environmental Feasibility of Forest Reclamation of Mining Dumps of the Western Donbass. Miestų želdynų formavimas. 2018. № 1 (15). P. 268–275. *(Здобувачем виконано оцінювання акумулятивних властивостей фітомасою соснових насаджень на рекультиваційних землях).*

Статті у наукових виданнях,

включених до міжнародних наукометричних баз даних

Scopus/Web of Science

30. **Lovynska V.**, Sytnyk S. The structure of Scots pine and Black locust forests in the Northern Steppe of Ukraine. Journal of Forest Science. 2016. № 62 (7). P. 329–336. *(Здобувачем виконано збір експериментального матеріалу, моделювання таксаційних параметрів сосняків).*

31. **Lovynska V. M.**, Sytnyk S. A., Maslikova K. P., Gritsan Y. I. Analysis of the productivity of pine stands in plantations in the Northern Steppe of Ukraine. Biosystems Diversity. 2017. № 25 (1). P. 39–43. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, оцінювання продуктивності деревостанів сосни звичайної в умовах регіону, узагальнено висновки).*

32. Sytnyk S., **Lovynska V.**, Lakyda I. Foliage biomass qualitative indices of selected forest forming tree species in Ukrainian Steppe. *Folia Oecologica*. 2017. № 44. P. 38–45. (Здобувачем проведено опрацювання дослідних даних і отримано результати оцінки асиміляційної складової сосни звичайної, узагальнено висновки).

33. **Lovynska V.**, Lakyda P., Sytnyk S., Kharytonov M., Piestova I. LAI estimation by direct and indirect methods in Scots pine stands in Northern Steppe of Ukraine. *Journal of Forest Science*. 2018. № 64 (12), P. 514–522. (Здобувачем здійснено постановку проблеми, опрацювання експериментальних наземних даних із визначення LAI соснових насаджень, узагальнено висновки).

34. **Lovynska V.**, Sytnyk S., Gritsan Y. Energy potential of main forest-forming species of stands in the Northern Steppe, Ukraine. *Journal of Forest Science*. 2018. № 64. P. 25–32. (Здобувачем здійснено збір і обробку експериментальних даних, розраховано енергетичний потенціал соснових деревостанів, узагальнено висновки).

35. Sytnyk S., **Lovynska V.**, Lakyda P., Maslikova K. Basic density and crown parameters of forest forming species within Steppe zone in Ukraine. *Folia Oecologica*. 2018. № 45. P. 82–91. (Здобувачем здійснено збір експериментального матеріалу із визначенням якісних показників крони сосни звичайної).

36. Zverkovskyy V. M., Sytnyk S. A., **Lovynska V. M.**, Kharytonov M. M., Lakyda I. P., Mykolenko S. Yu., Pardini G., Margui E., Gispert M. Remediation potential of forest forming tree species within northern steppe reclamation stands. *Ekológia*. 2018. № 37 (1). P. 69–81. (Здобувачем виконано збір даних, оцінювання депонувального потенціалу соснових деревостанів Північного Степу).

37. Gritsan Y. I., **Lovynska V. M.**, Sytnyk S. A. Radial increment dynamics in *Pinus sylvestris* stands within the Northern Steppe of Ukraine. *Biosystems Diversity*. 2018. № 26 (3). P. 213–217. (Здобувачем здійснено постановку проблеми, оцінювання впливу кліматичних чинників на радіальний приріст деревостанів сосни звичайної, узагальнено висновки).

38. Gritsan Y. I., **Lovynska V. M.**, Sytnyk S. A., Hetmanchuk A. I. Dendroindication of ecoclimatic condition in forest remediation area within Northern Steppe of Ukraine. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2019. № 10 (4). P. 457–463. (Здобувачем здійснено постановку проблеми, оцінювання впливу кліматичних чинників на таксаційні показники сосни звичайної, узагальнено висновки).

39. Gritsan Y. I., Sytnyk S. A., **Lovynska V. M.**, Tkalic I. I. Climatogenic reaction of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus sylvestris* within Northern Steppe of Ukraine. *Biosystems Diversity*. 2019. № 27 (1). P. 16–20. (Здобувачем здійснено оцінювання впливу температури і опадів на приріст деревини сосни звичайної, узагальнено висновки).

40. **Lovynska V.**, Lakyda P., Sytnyk S., Lakyda I., Gritsan Y., Hetmanchuk A. Stem production of Scots pine and black locust stands in Ukraine's Northern Steppe. *Journal of Forest Science*. 2019. № 65. P. 461–471. (Здобувачем здійснено

постановка проблеми, моделювання щорічної продукції компонентів фітомаси стовбурів сосняків).

41. **Lovynska V.**, Buchavyi Yu., Lakyda P., Sytnyk S., Gritzan Yu., Sendziuk R. Assessment of pine aboveground biomass within Northern Steppe of Ukraine using Sentinel-2 data. *Journal of Forest Science*. 2020. № 66 (8). P. 339–348. *(Здобувачем здійснено постановку проблеми, збір експериментальної бази даних, моделювання, узагальнено висновки).*

Статті в інших наукових виданнях

42. Ситник С. А., **Ловинська В. М.**, Величко В. М. Лісівничо-таксаційний аналіз лісів Дніпропетровської області. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Біологія, екологія*. 2013. Вип. 21. С. 76–82. *(Здобувачем проаналізовано лісівничу та таксаційну структуру соснових деревостанів регіону досліджень, узагальнено висновки).*

43. Ситник С. А., **Ловинська В. М.**, Маслікова К. П. Базисна щільність стовбурів головних деревних порід лісостанів Північного Степу України. *Екологія і ноосферологія*. 2016. Вип. 27. Ч. 3–4. С. 27–34. *(Здобувачем проведено аналітичний огляд, здійснено збір і оброблення дослідних даних, визначено якісні показники сосни звичайної).*

44. Ситник С. А., **Ловинська В. М.**, Грицан Ю. І., Маслікова К. П. Аналіз показників асиміляційної складової у структурі надземної фітомаси деревних порід степових лісостанів України. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Біологія, екологія*. 2016. Вип. 24. Ч. 2. С. 378–383. *(Здобувачем здійснено моделювання фотосинтетичних показників дерев сосни звичайної, узагальнено висновки).*

Тези наукових доповідей

45. Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Пам'ятки природи Кочерезького лісництва ДП «Новомосковський лісгосп» Дніпропетровської області. Історико-культурні та природо-охоронні аспекти збереження багатовікових дерев: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–25 жовтня 2013 року: тези доповіді, Київ-Чигирин, 2013. С. 35–37. *(Здобувачем досліджено пам'ятки природи Дніпропетровської області).*

46. Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Вікова структура та продуктивність деревостанів *Robinia pseudoacacia* L. та *Pinus sylvestris* L. рекреаційно-оздоровчих лісів Дніпропетровської області. Проблеми и перспективы исследований растительного мира: Международная научно-практическая конференция молодых ученых, г. Ялта, 13–16 мая 2014 года: тезисы доклада, Ялта, 2014. С. 155–156. *(Здобувачем проаналізована таксаційна структура соснових насаджень рекреаційних лісів).*

47. Sytnyk S., **Lovynska V.**, Kharitonov M., Loza I. Effect of forest site type on the growing stock of forest-forming species under conditions of the Dnieper Steppe, Ukraine. *Sixth International Agrosym 2015: Scientific Agricultural Symposium*. 2015. P. 2118–2125. *(Здобувачем проведено опрацювання даних оцінки впливу лісорослинних умов на запас сосняків).*

48. Лакида П. І., Матушевич Л. М., **Ловинська В. М.** Особливості методики оцінки бічної поверхні хвої. 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. 39–41. *(Здобувачем проаналізовано оцінювання фотосинтетичного апарату сосни).*

49. **Ловинська В. М.**, Петренко Д. П. Продуктивність природних та штучних соснових насаджень залежно від типів лісорослинних умов степового Придніпров'я України. 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. 43–45. *(Здобувачем проведено оцінювання впливу лісорослинних умов на продуктивність насаджень).*

50. Ловинська В. М. Аналіз вікової структури штучних соснових деревостанів Північного Придніпровського Степу України. Виклики ХХІ 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. 28–30.

51. Ловинська В. М. Компоненти фітомаси деревної зелені соснових деревостанів Північного Придніпровського Степу України. Рослини та урбанізація: Міжнародна науково-практична конференція, м. Дніпропетровськ, 16–17 лютого 2016 року: тези доповіді. Дніпропетровськ, 2016. С. 153–155.

52. Грицан Ю. І., Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Застосування лісових меліорацій на ландшафтно-екологічній основі Північного Степу України. Ресурсозберігаючі технології та їх правова і економічна оцінка в сільсько-господарському виробництві: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 27–28 квітня 2016 року: тези доповіді. К., 2016. С. 146–147. *(Здобувачем проаналізовано оцінювання стану лісомеліоративних соснових насаджень регіону досліджень).*

53. Грицан Ю. І., Ситник С. А., **Ловинська В. М.** Стан та перспективи розвитку об'єктів природно-заповідного фонду у структурі лісового господарства Дніпропетровської області. Динаміка біологічного та ландшафтного різноманіття заповідних територій: Міжнародна конференція, м. Кам'янець-Подільський, 25–27 травня 2016 року: тези доповіді. Кам'янець-Подільський, 2016. С. 35–38 *(Здобувачем охарактеризовано сучасний стан соснових насаджень в структурі природно-заповідного фонду).*

54. **Lovynska V. M.**, Sytnyk S. A. The analysis of the assimilation component parameters of the aboveground biomass of forest-forming species in the Steppe of Ukraine. Agrosym: VII International Scientific Agricultural Symposium, 06–09 October 2016. Jahorina, Bosnia and Herzegovina. P. 1159. *(Здобувачем охарактеризовано асиміляційну складову соснових насаджень).*

55. Piestova I. O., Stankevich S. A., Kharytonov M. M., Sytnyk S. A., **Lovynska V. M.** Multispectral/Radar Data Fusion for Woodland Classification Improvement. Open Conference Systems, Earth observations for sustainable development and security (GEO-UA 2016), 10 October 2016: theses of the report.

К., 2016. URL://geoss-conf.ikd.kiev.ua/index.php/geo-conf/2016/paper/view/29. (Здобувачем здійснено збір та обробку експериментальних даних).

56. **Ловинська В. М.**, Грищан Ю. І. Лісівничо-таксаційна характеристика деревостанів сосни звичайної в умовах Північного Степу України. Екологічні дослідження лісових біогеоценозів Степової зони України: Міжнародна наукова конференція, м. Дніпро, 25–27 жовтня 2016 року: тези доповіді. Дніпро, 2016. С. 46–47. (Здобувачем охарактеризовано таксаційну структуру соснових деревостанів).

57. **Ловинська В. М.**, Ситник С. А. Якісні показники надземної фітомаси домінантного компоненту лісостанів байрачного Степу України. Актуальні питання сучасної аграрної науки: IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Умань, 22 листопада 2016 року: тези доповіді, Умань, 2015. С. 122–123. (Здобувачем здійснено оцінювання щільності компонентів фітомаси стовбурів сосни звичайної).

58. Ловинська В. М. Бюджет вуглецю лісостанів *Pinus sylvestris* L. Північного Степу України. Рослини та урбанізація: VI Міжнародна науково-практична конференція, м. Дніпро, 1–2 березня 2017 року: тези доповіді. Дніпро, 2017. С. 161–162.

59. Ловинська В. М. Локальна щільність деревини і кори стовбурів сосни звичайної в умовах Північного Степу України. Ліси Східної Європи у Світі, що змінюється: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 27–30 вересня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 75.

60. Lovynska V. M. The Use of Coniferous Plants as Phytoremediators of Technosoil in Ukrainian Steppe. Applied biotechnology in mining: Proceeding of the International Conference, Dnipro, 25–27 April 2018: theses of the report. Dnipro, 2018. P. 36.

61. Ловинська В. М. Залежність показників надземної частини фітомаси соснових деревостанів від умов зволоження Північного Степу України. Лісова типологія як основа наближеного до природи лісівництва: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 9–12 жовтня 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 55–56.

АНОТАЦІЯ

Ловинська В. М. Біопродуктивність соснових насаджень Байрачного Степу України. 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, 2021.

У дисертації узагальнено теоретичні основи та сформульовано практичне обґрунтування системи моделей для встановлення якісних і кількісних характеристик компонентів надземної фітомаси дерев та деревостанів сосни звичайної Байрачного Степу України.

Представлено результати моделювання компонентів фітомаси стовбура та крони дерев і деревостанів сосни звичайної у штучних насадженнях Байрачного Степу України. На основі отриманих моделей розроблено нормативно-довідкову базу для оцінювання компонентів надземної фітомаси сосняків, які функціонують в умовах досліджуваного регіону.

Наведено результати обробки мультиспектральних (*Sentinel-2A*) та радарних (*Sentinel-1A*) супутникових знімків зі встановленими показниками вегетаційних індексів та біофізичних параметрів соснових деревостанів досліджуваного регіону. За індексами *NDVI* (*Sentinel-2A*) та *RDPI* (*Sentinel-1A*) розраховано надземну біомасу сосняків та проведено картографування її розподілу в межах регіону досліджень.

Визначено особливості росту та розроблено динамічну бонітетну шкалу соснових деревостанів в умовах Байрачного Степу України. Робота також містить результати оцінювання біопродукційних процесів соснових деревостанів у динаміці та передбачає використання розроблених таблиць ходу росту для встановлення вуглецедепонувальної та киснепродукувальної здатності сосняків у досліджуваному регіоні.

Ключові слова: біотична продуктивність, сосна звичайна, моделювання, щільність компонентів надземної фітомаси, Байрачний Степ, вуглецедепонування, киснепродуктивність, таблиці ходу росту, мультиспектральні та радарні супутникові знімки, річна продукція.

АННОТАЦІЯ

Ловинская В. Н. Биопродуктивность сосновых насаждений Байрачной Степи Украины. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук по специальности 06.03.02 «Лесоустройство и лесная таксация». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2021.

В диссертации обобщены теоретические основы и сформулировано практическое обоснование системы моделей для установления качественных и количественных характеристик компонентов надземной фитомассы деревьев и древостоев сосны обыкновенной Байрачной Степи Украины.

Представлены результаты моделирования компонентов фитомассы ствола и кроны деревьев и древостоев сосны обыкновенной в искусственных насаждениях Байрачной Степи Украины. На основе полученных моделей разработана нормативно-справочная база для оценки компонентов надземной фитомассы сосняков, которые функционируют в условиях исследуемого региона.

Приведены результаты обработки мультиспектральных (*Sentinel-2A*) и радарных (*Sentinel-1A*) спутниковых снимков с установленными показателями вегетационных индексов и биофизических параметров сосновых древостоев исследуемого региона. С помощью индексов *NDVI* (*Sentinel-2A*) и *RDPI*

(*Sentinel-1A*) рассчитана наземная биомасса сосняков и проведено картографирование её распределения в пределах региона исследований.

Определены особенности роста и разработана динамическая бонитетная шкала сосновых древостоев в условиях Байрачной Степи Украины. Работа также содержит результаты оценки биопродукционных процессов сосновых древостоев в динамике и предусматривает использование разработанных таблиц хода роста для установления углероддепонирующей и кислород-продуцирующей способности сосняков исследуемого региона.

Ключевые слова: биотическая продуктивность, сосна обыкновенная, моделирование, плотность компонентов надземной фитомассы, Байрачная Степь, углероддепонирование, кислородпродуктивность, таблицы хода роста, мультиспектральные и радарные спутниковые снимки, годовая продукция.

ANNOTATION

Lovynska V. M. Biotic Productivity of Scots Pine Plantation Within Ravine Steppe of Ukraine. 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, 2021.

The thesis provides the theoretical bases and the practical substantiation of system of models for establishment of qualitative and quantitative characteristics of components of aboveground phytomass of pine trees and stands within the ravine Steppe of Ukraine is formulated.

The assessment of bioproductivity of Scots pine trees and stands in the conditions of the ravine Steppe was carried out with the use of systematic analysis of forest ecosystems and the involvement of modern both general and specific methods.

Based on the retrospective analysis, time series of such accounting and resource indicators as the total area of forests of the ravine Steppe, the area of land covered with forest vegetation, the total wood stock of forest plantations were obtained. The curve of changes in the values of the total wood stock characterizes the dynamics, clearly aimed to increasing this indicator by 33.5 % over the analyzed period of time.

Studies of the local basic density of Scots pine trunk wood revealed its growth with the age of plants and the corresponding highest rate in the group of mature age. Local basic density exceeds such in the plants of young group by 25.8 %. For the bark fraction, no clear dependence of the local basic density on the tree height was found.

It is determined that with increasing age of pine trees there is an increase in the average basic density of the trunk wood, the trend of which increases is 47.8 % (for plants with age from 9 to 90 years).

The general tendency of decrease in values of both natural, and basic density of wood and bark of branches of trees with growth of biometric parameters of a tree such as age, diameter and height are fixed. The average values of phytomass density

of the components of Scots pine tree branches were calculated – $436 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3)^{-1}$ for wood of branches, $338 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3)^{-1}$ for bark of branches, $416 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3)^{-1}$ for wood in bark of branches.

The values of leaf area index (*LAI*) of pine stands were obtained, which depending on the age of stands vary from 1.1 to $3.36 \text{ m}^2\cdot(\text{m}^2)^{-1}$. A comparison of the *LAI* obtained by the contact and non-contact methods is performed.

The results of modeling the components of the phytomass of the trunk and crown of Scots pine trees in artificial plantations of the rapirian Steppe of Ukraine are presented. Allometric models have been developed that show the dependence of the volume of fractions of Scots pine trunk on the height and diameter of the tree. Based on the obtained models, a set of regulatory-reference materials for estimating the components of the phytomass of the trunk and crown of Scots pine trees in freshly cut and completely dry conditions were constructed.

It is shown that the aboveground phytomass of wood and wood in the bark of Scots pine increases with the height and diameter of the tree. At the same time, the phytomass of the trunk bark tends to decrease with height at a constant value of the tree diameter. The size of the phytomass of greenery, branches and needles increases with increasing diameter, while with increasing trunk height for all studied crown components revealed a decrease.

The results of phytomass evaluation of the components of the trunk and crown of pine stands of the studied region are presented. It is determined that the increase of all investigated components of aboveground phytomass of trunks occurs with the increase of average heights and diameters of stands. The regression equations for estimating the phytomass of the components of the crown parameters are elaborated and showed a direct positive relationship between the phytomass of any structural component of the crown of the stand with average diameter and relative planting density, while with the height of the stand the relationship is inverse. The normative-reference materials for the assessment of the phytomass of the trunk and crown of pine stands, which function in the conditions of the riparian Steppe, are given.

The results of processing of multispectral (*Sentinel-2A*) and radar (*Sentinel-1A*) satellite images with the established indicators of vegetation indices and biophysical parameters of pine stands of the studied region are presented. According to the indicators *NDVI* (*Sentinel-2A*) and *RDPI* (*Sentinel-1A*), the aboveground biomass of pine stands was calculated and its distribution within the study region was mapped.

Peculiarities of growth are determined, a dynamic bonitat scale is developed and the bioproductivity of artificial pine stands in dynamics in the conditions of riparian Steppe is estimated. Modeling of the main biometric indicators of modal pine stands of artificial origin of the studied region is carried out.

On the basis of the elaborated mathematical dependences of estimation of components of aboveground phytomass of stands the algorithm of calculation of production in annual equivalent of pines within riparian Steppe is constructed. It is established that the total annual phytomass production of the aboveground part of the pines of the studied region is $111726.3 \text{ t}\cdot\text{yr}^{-1}$, an average production of $5.16 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$. Based on the database of Ukrderzhlisproekt and the obtained

experimental data from the temporary sample plots, the ecological carbon depositing role of artificial pine plantations was assessed by comparing the indicator of annual production and greenhouse gas emissions in the region.

Key words: biotic productivity, Scots pine, modeling, density of aboveground phytomass components, ravine Steppe, carbon sequestration, oxygen productivity, growth tables, multispectral and radar satellite images, annual production.

Підписано до друку 22.02.2021 року. Формат 60x84\16
Ум. друк. арк. 1,9 Обл.-вид.арк. 1,9
Наклад 100 прим. Зам. № 210075

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, тел.: 527-81-55, e-mail: nubip_druk@ukr.net
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4097 від 17.06.2011

