

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології
Кафедра лісового та садово-паркового господарства

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

САДУРСЬКА ЛАРИСА МИКОЛАЇВНА

УДК 630*521.1(477.42)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

СЕЗОННА ЗМІНА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
КУЛЬТУР СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ В УМОВАХ
ЗВ'ЯГЕЛЬСЬКОГО НАДЛІСНИЦТВА

205 Лісове господарство

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних наукових досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

_____ Л.М. Садурська

Керівник роботи
Котюк Людмила Анатоліївна
доктор біологічних наук, професор

Висновок кафедри лісового та садово-паркового господарства за результатами попереднього захисту

Протокол засідання кафедри лісового та садово-паркового господарства

№ ____ від «____» 202 р.

Завідувач кафедри лісового та садово-паркового господарства

к.с.-г.н., доцент

Сірук Юрій Вікторович

«____» 202 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувачка вищої освіти Садурська Лариса Миколаївна захистила кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою

за шкалою ECTS

за національною шкалою

Секретар ЕК

Дубницька Ірина Юріївна

АНОТАЦІЯ

Садурська Л.М. Сезонна зміна діелектричних показників культур сосни звичайної в умовах Звягельського надлісництва. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 – лісове господарство. – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

У магістерській роботі наведено результати дослідження поляризаційної ємності та імпеданса молодих лісових насаджень сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) у межах Звягельського надлісництва. Проаналізовано особливості сезонної та річної динаміки діелектричних показників на різних дослідних ділянках. Встановлено, що значення поляризаційної ємності й імпеданса істотно змінюються протягом вегетаційного періоду, а амплітуда їх коливань зумовлюється індивідуальним життєвим станом дерев. Отримані результати підтверджують інформативність комплексного використання електрофізіологічних показників для діагностики функціонального стану лісових культур та створюють передумови для їх застосування у моделях прогнозування росту. Обґрунтовано доцільність використання діелектричних параметрів як методів швидкої індикації санітарного стану дерев і оцінювання екологічного стану лісових екосистем.

Ключові слова: поляризаційна ємність, імпеданс, лісові культури, *Pinus sylvestris*, Звягельське надлісництво.

ANNOTATION

Sadurska L.M. Seasonal variation of dielectric parameters of Scots pine forest crops under the conditions of the Zviahel Forest Management Unit. – Qualifying work on the rights of the manuscript.

Qualification work for the master's degree in specialty 205 – Forestry. – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The master's thesis presents the results of a study on polarization capacitance and impedance of young Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forest stands within the Zviahel Forest Management Unit. The seasonal and annual dynamics of dielectric parameters were analyzed across different experimental plots. It was established that polarization capacitance and impedance values change significantly during the vegetation period, with the amplitude of their fluctuations being determined by the individual vitality status of trees. The obtained results confirm the informativeness of the integrated use of electrophysiological indicators for diagnosing the functional state of forest stands and create prerequisites for their application in growth prediction models. The feasibility of using dielectric parameters as rapid diagnostic tools for assessing tree sanitary condition and evaluating the ecological status of forest ecosystems is substantiated.

Key words: capacitance polarization, impedance, forest crops, *Pinus sylvestris*, Zviahel Forest Management Unit.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ <i>PINUS SYLVESTRIS</i> L. У ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ	8
РОЗДІЛ 2. РАЙОН ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	15
2.1. Особливості району досліджень	15
2.2. Методика досліджень	17
РОЗДІЛ 3. ДИНАМІКА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КУЛЬТУР СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ	21
3.1. Визначення показників імпеданса та поляризаційної ємності	21
3.2. Динаміка діелектричних показників упродовж вегетаційного періоду	25
3.2.1. Весняний період	25
3.2.2. Літній період	29
3.2.3. Осінній період	31
3.3. Теоретичне узагальнення зміни діелектричних показників	32
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	37

ВСТУП

Актуальність теми. Збереження біорізноманіття та генофонду лісових деревних порід є одним із пріоритетних завдань сучасної лісівничої науки в умовах зростаючого антропогенного навантаження та кліматичних змін. Особливої уваги потребують соснові ліси, які відіграють ключову екологічну та господарську роль у лісових екосистемах Житомирського Полісся. Центральні райони регіону впродовж тривалого часу зазнають інтенсивного освоєння, що призводить до поступової деградації та зниження біологічної продуктивності лісових насаджень. У зв'язку з цим актуальним є пошук нових підходів і методів оцінювання фізіологічного стану та життєздатності лісових культур, здатних забезпечити ранню діагностику змін у функціонуванні деревних рослин. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є застосування діелектричних показників, які можуть слугувати інформативним інструментом моніторингу стану соснових насаджень і підвищення ефективності лісівничих заходів.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – дослідження сезонних змін діелектричних показників насаджень сосни звичайної в умовах Звягельського надлісництва на прикладі Гартівського лісництва.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено виконання таких завдань:

1. Надати комплексну лісівничо-таксаційну характеристику культур сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) на тимчасових пробних площах.
2. Проаналізувати сезонну динаміку діелектричних показників лісових культур *Pinus sylvestris* різних категорій санітарного стану впродовж вегетаційного періоду.
3. Встановити взаємозв'язки між діелектричними параметрами та ростовими і біометричними показниками лісових культур *Pinus sylvestris*.

4. Виявити закономірності змін електричного імпедансу та поляризаційної ємності у культур *Pinus sylvestris* залежно від їх санітарного стану.

Об'єктом досліджень є лісові культури сосни звичайної.

Предметом досліджень є закономірності зміни діелектричних показників культур *Pinus sylvestris* упродовж вегетаційного періоду.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовано комплекс лісівничо-таксаційних методів для оцінювання та характеристики лісових культур. Визначення діелектричних показників здійснювали з використанням електрофізіологічних методів. Статистичну обробку експериментальних даних та аналіз отриманих результатів виконували за допомогою математико-статистичних методів.

Публікації.

Садурська Л.М. Застосування електрофізіологічних методів у лісовому господарстві. *Мисливське господарство: Традиції. Досвід. Нові горизонти*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Житомир, 19 вересня 2025 р.). Житомир, 2025. С. 88–89.

Садурська Л.М., Березовський В.П. Електрофізіологічні методи як інструмент оцінки життєздатності та стійкості деревних рослин у системі сталого лісівництва. *Ліс, наука, молодь*: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Житомир, 26 листопада 2025 р.). Житомир, 2025. С. 188–189.

Садурська Л.М. Технологічні досягнення електрофізіології рослин та їх застосування у лісівничих дослідженнях. *Студентські наукові читання 2025* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. присвячені I-му туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт (10 грудня 2025 р.). Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 40.

Практичне значення. Вперше для умов Гартівського лісництва Звягельського надлісництва виявлено екологічні взаємозв'язки

електрофізіологічних показників культур сосни звичайної та категорій стану упродовж вегетаційного періоду.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційне дослідження складається із сорока однієї сторінки друкованого тексту та включає вступ, три розділи, висновки та рекомендації й список використаних джерел. Матеріали роботи доповнені 8 рисунками та 2 аналітичними таблицями. Бібліографія містить 42 найменування вітчизняних та зарубіжних наукових, нормативних та інформаційних джерел, що забезпечують всебічне висвітлення проблематики виконаного дослідження.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

ЕЛЕКТРОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ *PINUS SYLVESTRIS* L. У

ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Рослинний організм є високоорганізованою, цілісною та багатовимірною біологічною системою, у якій структурна й функціональна єдність підтримується завдяки складним регуляторним механізмам. Незважаючи на морфологічну й функціональну різноманітність клітин і тканин, рослина функціонує як єдине фізіологічне ціле. Така цілісність забезпечується симпластичними зв'язками, опосередкованими плазмодесмами, а також наявністю спеціалізованих провідних тканин – ксилеми та флоєми, які здійснюють транспорт води, мінеральних речовин і продуктів фотосинтезу на значні відстані [30]. З позицій електрофізіології рослин встановлено, що рослини володіють власною системою електричної сигналізації, яка відіграє ключову роль у координації фізіологічних процесів. Будь-який зовнішній вплив на окремі органи або тканини викликає зміни мембранного потенціалу на клітинному рівні, які можуть поширюватися у вигляді електричних сигналів по всьому рослинному організму. До таких сигналів належать потенціали дії, варіаційні потенціали та системні потенціали, що відрізняються механізмами виникнення, швидкістю поширення та фізіологічним значенням [32, 33, 40-41].

Електрична сигналізація в рослинах тісно пов'язана з іонними потоками через клітинні мембрани, насамперед із транспортом іонів кальцію, та калію. Регуляція цих потоків здійснюється за участю мембранних каналів, насосів і переносників, активність яких безпосередньо пов'язана з процесами обміну речовин та енергії. У результаті електричні сигнали виконують не лише інформаційну функцію, але й беруть участь у регуляції фізіологічних реакцій рослин, зокрема рухів проростків, фотосинтетичної активності, транспірації та ростових процесів [38].

Базові властивості рослинного організму – подразливість і полярність – формують основу сприйняття сигналів та напрямленої передачі інформації в межах цілісної системи. Полярність визначає просторову організацію електричних і біохімічних градієнтів, тоді як подразливість забезпечує чутливу реакцію рослин на біотичні та абіотичні чинники, зокрема механічні ушкодження, температурні коливання, водний дефіцит і вплив пожеж [18]. Електричні реакції, що виникають за таких умов, сприяють формуванню системних сигналів і координації адаптивних відповідей на рівні всього організму. Таким чином, сучасні уявлення про рослини як динамічні системи зі складними електрофізіологічними та біохімічними мережами взаємодії суттєво змінюють традиційний погляд на них як на пасивні та малореактивні організми. Розуміння електричних процесів у рослинах створює теоретичне підґрунтя для застосування діелектричних показників як діагностичних індикаторів фізіологічного стану та функціональної цілісності деревних порід [30, 40, 41].

У сучасній лісовій екології та лісівництві значну увагу приділяють вивченню впливу чинників навколишнього середовища на фізіологічний стан деревних рослин та, відповідно, на структурну та функціональну стабільність лісових екосистем і біогеоценозів [12, 14]. Сосна звичайна, як домінантна лісоутворююча порода на Поліссі, відіграє ключову роль у підтриманні цілісності та продуктивності лісових біогеоценозів. Стан окремих дерев безпосередньо впливає на життєздатність, стійкість та адаптивний потенціал усього насадження, тоді як загальний стан насаджень визначає особливості кругообігу поживних речовин і потоків енергії [1, 34-36].

Лісові екосистеми є високодинамічними, ієрархічно організованими системами, у яких абіотичні чинники (температура, вологість та трофність ґрунту, освітленість) і біотичні взаємодії (конкуренція, вплив шкідників і хвороб) взаємодіють у складний, часто нелінійний спосіб. Екологічні закони описують фундаментальні принципи формування, функціонування та стійкості лісових екосистем і біогеоценозів, надаючи теоретичну основу для

інтерпретації реакцій дерев та лісових насаджень на змінні природні та антропогенні чинники. Сукупний вплив чинників навколишнього середовища на фізіологію дерев можна концептуалізувати як закон системної взаємодії, що відображає взаємозалежність екологічних, фізіологічних і структурних процесів у лісових екосистемах [39].

З позицій електрофізіології рослин, вплив стресових чинників на *Pinus sylvestris* – таких як посуха, температурні екстремуми, механічні пошкодження або пожежі – викликає зміни мембранного потенціалу клітин, іонного транспорту та водного режиму на рівні тканин і всього дерева. Ці фізіологічні зміни проявляються у вигляді вимірюваних змін діелектричних властивостей рослинних тканин. Зокрема, електричний імпеданс і поляризаційна ємність є чутливими показниками водного стану, цілісності мембран і метаболічної активності дерев [42]. Діелектричні показники інтегрують інформацію як про короткострокові фізіологічні реакції (наприклад, закриття продихів, зміни тургору), так і про довгострокові адаптивні процеси (зміни швидкості росту, стійкість до стресу), що робить їх надзвичайно інформативними для оцінки функціонального стану *Pinus sylvestris* за різних умов середовища. Застосування діелектричних вимірювань у дослідженнях соснових лісів забезпечує новий методологічний підхід для раннього виявлення реакцій на стрес, безперервного моніторингу життєздатності дерев та кількісної оцінки адаптивного потенціалу деревостанів. Варіації імпедансу та поляризаційної ємності можуть бути пов'язані з конкретними екологічними чинниками та стадіями розвитку насаджень, що дозволяє оцінювати вплив біотичних і абіотичних факторів на різних рівнях організації – від клітинної фізіології до динаміки деревостану. Включення діелектричних показників у лісоекологічні та лісівничі дослідження сприяє кращому розумінню системних взаємодій у лісових екосистемах і біогеоценозах, формує підґрунтя для розробки прогностичних моделей продуктивності та стану насаджень і підтримує науково

обґрунтовані стратегії сталого управління та охорони соснових лісових ландшафтів [14].

Біологічні та, зокрема, лісівничі властивості сосни звичайної за різних типів умов місцезростання досі не вивчені достатньо повно, незважаючи на широке поширення виду в межах ареалу та його участь у різноманітних біогеоценозах. Цей пробіл у знаннях є особливо відчутним з огляду на екологічне та економічне значення *Pinus sylvestris* як домінантної лісоутворюючої породи в багатьох помірно-кліматичних і бореальних екосистемах. Вивчення того, як специфічні умови місцезростання – зокрема тип ґрунту, забезпеченість вологою, температурний режим та вплив природних чинників стресу – впливають на ріст, продуктивність та адаптивні реакції сосни, є ключовим для розробки ефективних стратегій лісового господарства та охорони лісів [2, 31].

Крім того, детальні дослідження фізіологічних, морфологічних та ростових характеристик *Pinus sylvestris* у різних екологічних умовах необхідні для прогнозування динаміки деревостанів, оцінки стійкості до абіотичних і біотичних чинників та підтримання стабільності й біорізноманіття лісових екосистем і біогеоценозів [3, 6, 9-11, 16-17, 25, 26]. У контексті зростаючого антропогенного навантаження на лісові ресурси, змін клімату та потреби у сталому використанні деревини та недревних лісових продуктів дослідження, яке поєднує дані про сайтоспецифічні лісівничі характеристики з фізіологічними показниками, зокрема діелектричними та електрофізіологічними, дозволяє отримати більш точне та прогностично значуще уявлення про життєздатність дерев та стан деревостанів [2, 4, 5].

Рух води є ключовим чинником, що визначає фізіологічні функції, ріст та життєздатність дерев і, відповідно, стабільність соснових лісових екосистем та біогеоценозів. Поглинута кореневими волосками вода проходить спочатку лише декілька міліметрів через живі клітини паренхіми кореня, а потім потрапляє до судин ксилеми, які забезпечують довгостроковий транспорт води по дереву. Такий короткодистанційний рух

води через живі клітини можливий завдяки наявності градієнтів всмоктуючої сили, що поступово зростають від кореневого волоска до прилеглих до судин ксилеми паренхіматозних клітин, забезпечуючи ефективне поглинання та розподіл води навіть за різних умов місцезростання соснових лісів Українського Полісся [20, 21].

Дослідження водного балансу *Pinus sylvestris* значно розширюються завдяки поєднанню вдосконалених традиційних методів та новітніх підходів, зокрема електрофізіологічних і діелектричних вимірювань. Фізіологічні процеси у дереві безпосередньо залежать від структури та розподілу води у тканинах. Фракційний склад води – вільної, зв’язаної та осмотично активної – особливо чутливий до дефіциту вологи у ґрунті, що характерно для окремих біогеоценозів соснових лісів. За нестачі води відбувається перерозподіл водних фракцій, зростає відсоток зв’язаної води, що супроводжується змінами біохімічних процесів, зокрема накопиченням водорозчинних білків та інших гідрофільних сполук, здатних утримувати вологу. Такі механізми є критично важливими для підтримки тургору, метаболічної активності та життєздатності сосни в умовах стресу [30].

Важливим є те, що зміни водного стану дерев прямо впливають на їх діелектричні показники. Показники, такі як імпеданс і поляризаційна ємність, інтегрують інформацію про гідратацію, цілісність мембран і фізіологічну активність дерев. Ці параметри дозволяють оцінювати функціональний стан *Pinus sylvestris* у межах лісових екосистем і біогеоценозів, відображаючи як короткострокові реакції на зміни умов середовища, так і довгострокові адаптивні процеси. Таким чином, діелектричні показники виступають надійним індикатором життєздатності дерев, водного балансу та їх здатності протистояти стресовим чинникам. Комплексне вивчення водного режиму, фізіології та діелектричних властивостей *Pinus sylvestris* дозволяє не лише поглибити розуміння фізіологічних процесів на клітинному та тканинному рівні, але й забезпечує цілісну оцінку адаптивного потенціалу дерев і стану соснових лісових екосистем під впливом різних природних та антропогенних

чинників. Це створює наукову основу для прогнозування динаміки деревостанів, підвищення стійкості екосистем і розробки обґрунтованих заходів сталого управління та охорони лісових ресурсів [21, 21].

Прогнозування майбутнього стану дерев на основі вимірювань молодих особин, що зазвичай називають ранньою діагностикою швидкості росту, є фундаментальним підходом у лісовій науці [19]. На рівні деревостанів прогнозування лісівничих показників, часто термінологічно позначуване як «хід росту», формалізується за допомогою комплексних таблиць для основних лісоутворюючих порід, включно з сосною звичайною, класифікованих за класом бонітету, лісо-рослинними умовами, природною зоною та регіоном. Для ефективного планування та управління лісовими насадженнями необхідна відповідність між оцінками продуктивності, отриманими на рівні окремих дерев у ранньому віці, та фактичними показниками деревостану. Досягнення цієї відповідності вимагає глибокого розуміння біологічних механізмів та законів розвитку дерев, а також стратегії та тактики онтогенезу у конкретних умовах середовища та конкурентних взаємодій [30].

Питання ранньої діагностики росту актуальне на всіх етапах вирощування лісу. Відбір кращих за розвитком екземплярів на основі ознак раннього росту практикується в лісівництві вже давно. Однак дерева у деревостанах десятиліттями зазнають конкурентного тиску сусідніх рослин, що значною мірою впливає на їх траєкторії росту, морфологічне диференціювання та загальну продуктивність. Особливо це стосується густих насаджень сосни звичайної, де доступність ресурсів – світла, води та поживних речовин – розподілена неоднорідно.

Експериментальні дослідження модельних дерев після проріджування показали наявність різних типів росту та онтогенетичних патернів, яких загалом виділяють близько десяти. Ці варіації відображають як вплив середовища, так і внутрішній генетичний потенціал дерев. Хоча генетична основа різних типів росту обговорювалася давно, механізми, що визначають

різноманітність траєкторій росту та динаміку деревостанів, лише зараз починають уточнюватися. Розуміння цих механізмів є критично важливим для прогнозування розвитку деревостанів, оптимізації лісівничих заходів та підвищення адаптивного потенціалу сосни звичайної за різних умов місцезростання [7].

Крім того, інтегрування ранньої діагностики росту з фізіологічними та біофізичними показниками – такими як водний баланс, цілісність мембран і діелектричні властивості – забезпечує більш комплексну оцінку життєвості дерев. Параметри, такі як електричний імпеданс і поляризаційна ємність тканин дерев, надають кількісну інформацію про функціональний стан молодих дерев, пов'язуючи ознаки раннього росту з довгостроковим потенціалом росту та стійкістю у межах лісових екосистем і біогеоценозів. Поєднання традиційних методів вимірювання росту з електрофізіологічними та діелектричними показниками дозволяє розробляти прогнозні моделі продуктивності деревостанів, обґрунтовувати стратегії відбору чи проріджування та впроваджувати лісівничі практики, що максимізують екологічну стабільність і економічну ефективність [15].

Таким чином, рання діагностика росту у сосни звичайної є не лише інструментом відбору перспективних дерев, а й інтегративною рамкою для розуміння взаємодії генетики, онтогенезу, факторів середовища та біофізіологічних процесів, що визначають розвиток деревостанів. Такий підхід є необхідним для сталого управління лісами, збереження біорізноманіття та підтримки стійких і продуктивних соснових лісових екосистем у межах природного ареалу виду. Отже, комплексне вивчення біологічних та лісівничих властивостей *Pinus sylvestris* у різних умовах місцезростання має не лише наукове значення, а й практичну цінність для адаптивного управління лісами, підвищення стійкості екосистем і забезпечення сталого використання лісових ресурсів у межах природного ареалу виду [31].

РОЗДІЛ 2

РАЙОН ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Особливості району досліджень.

Звягельське надлісництво було створене в ході реорганізації лісогосподарської мережі підприємств України у рамках Державного спеціалізованого підприємства «Ліси України». Як структурний підрозділ філії «Столичний лісовий офіс», надлісництво сформоване на базі територій колишніх лісогосподарських підрозділів Житомирської області (ДП «Новоград-Волинське ДЛІМГ», ДП «Городницьке ЛГ» та ДП «Смільчинське ЛГ») та призначене для координації лісоуправління, управління лісовими ресурсами та забезпечення охорони й раціонального використання лісових екосистем [24].

Основними напрямками діяльності Звягельського надлісництва є планування та реалізація комплексних заходів лісоуправління, включно з лісовпорядкуванням, доглядом за насадженнями, природним відновленням лісу, залісненням деградованих земель, а також охороною лісів від незаконних рубок, пожеж та шкідників. Надлісництво забезпечує єдність ведення лісового господарства на підвідомчих територіях та координує діяльність підпорядкованих лісництв з метою оптимального використання продуктивного та екологічного потенціалу лісових екосистем [24].

Відповідно до матеріалів безперервного лісовпорядкування станом на 01 січня 2025 року, загальна площа лісового фонду Звягельського надлісництва становить 118 998,6 га. Основну частину цієї території займають землі, вкриті лісовою рослинністю, площа яких складає 104 724,0 га, або 88,0 % від загальної площі лісового фонду. Значна частка вкритих лісом земель представлена штучно створеними насадженнями – лісовими культурами, площа яких становить 39 877,7 га, що відповідає 38,1 % площі лісовкритих земель [24].

Площа земель, не вкритих лісовою рослинністю, складає 9 905,4 га і включає різні категорії лісових ділянок, які перебувають на різних етапах лісовідновлення та господарського використання. Зокрема, найбільшу частку серед них займають не зімкнуті лісові культури – 3 901,4 га, а також зруби – 2 176,8 га. До складу нелісованих земель також входять галявини та пустирі (185,5 га), біогалявини (58,6 га), а також лісові шляхи, просіки, протипожежні розриви й осушувальні канали загальною площею 2 614,5 га. Інші категорії лісових ділянок займають 968,6 га [24].

Загальна площа лісових ділянок у межах Звягельського надлісництва становить 114 629,4 га, що відповідає 96,3 % площі лісового фонду. Наведена структура земель свідчить про високий рівень лісистості території та значну роль штучно створених насаджень у формуванні лісового покриву регіону, що зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на оцінку стану, росту та функціонування лісових культур, зокрема сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.), у сучасних умовах господарювання та кліматичних змін [24].

Звягельське надлісництво включає 19 лісництв [24].

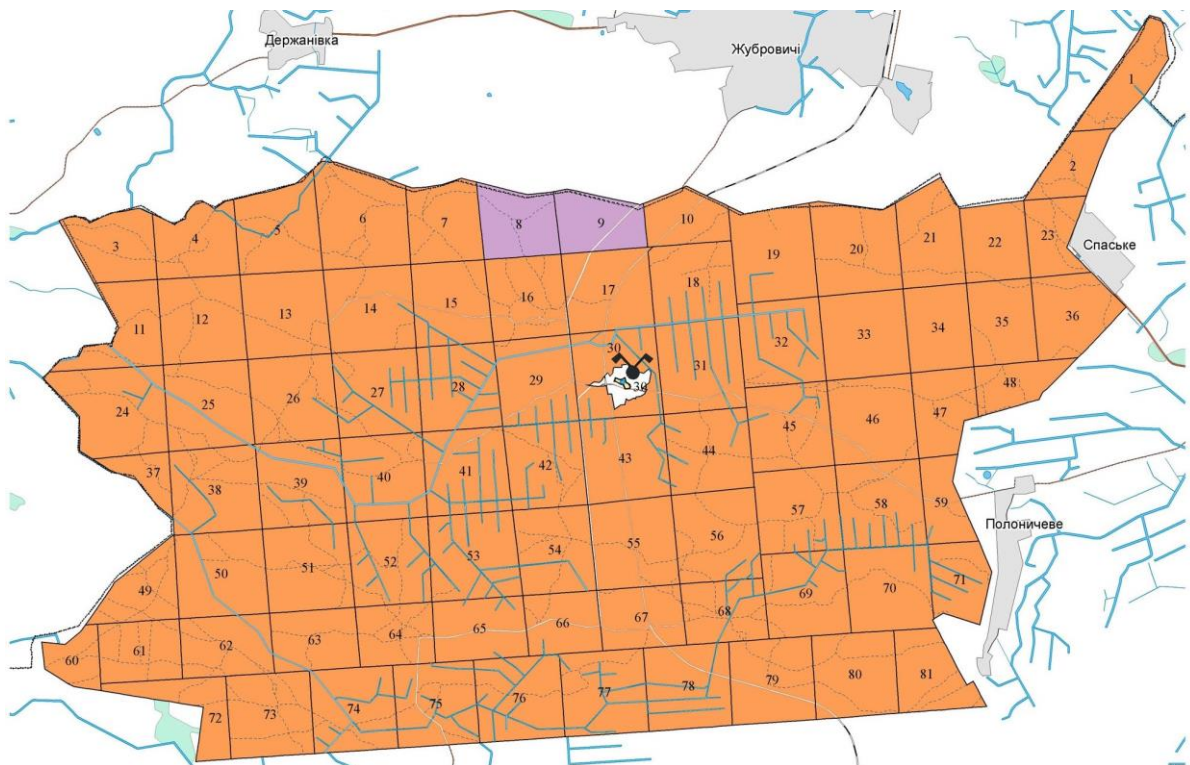


Рис. 2.1. Територія Гартівського лісництва

Дослідження діелектричних показників сосни звичайної проведено нами на території Гартівського лісництва (рис. 2.1). Лісництво має площу 8050 га та розбите на 8 обходів. Площа вкрита лісом становить 7730 га. Основною породою є сосна звичайна. Площа лісових культур у лісництві становить 30 га. Територія Гартівського лісництва належить до Центрального Українського Полісся та відноситься до зони змішаних лісів Східно-Європейської рівнини. Клімат регіону помірно-континентальний і характеризується середньою температурою січня -6°C , липня $+17-19^{\circ}\text{C}$, річною $+6-7^{\circ}\text{C}$, а максимальні морози досягають -30°C . Безморозний період триває 150–170 днів, період із середньодобовими температурами вище 0°C – 240–260 днів, а вегетаційний період із середньою температурою понад 5°C триває від другої декади квітня до третьої декади жовтня. Весняні заморозки на ґрунті спостерігаються 5–10 травня, осінні – наприкінці вересня–початку жовтня. Середньорічна кількість опадів становить 550–600 мм, із яких 300–350 мм випадає в період активної вегетації; сніговий покрив сягає 10–30 см і зберігається 95–110 днів, проте нестійкий через часті відлиги. Упродовж останніх 7–8 років спостерігається зміщення сезонного розподілу опадів: більшість дощу випадає навесні та восени, тоді як у літній період спостерігається дефіцит вологи. Поєднання літньої посухи та підвищення максимальної температури створює сприятливі умови для розвитку судинного мікозу та поширення верхівкового короїду. Рельєф території переважно рівнинний із незначними підвищеннями та котловинними впадинами. Ці кліматичні та рельєфні умови визначають продуктивність та стан лісових насаджень, зокрема молодих культур сосни звичайної, і мають ключове значення для планування лісгосподарських заходів [22-24].

2.2. Методика досліджень

До другої половини XX століття досягнення електрофізіології рослин майже не застосовувалися у лісівничих дослідженнях і практиці моніторингу

лісових насаджень [37]. Поява портативних приладів для вимірювання параметрів LCR (індуктивність, ємність, опір) на початку 1980-х років стала важливим технологічним кроком уперед. Зокрема, у колишньому срср промислово виготовляли аналоговий LCR-метр Ф-4320, що працював на частоті 1 кГц. На той час це був єдиний прилад, здатний одночасно визначати два ключові діелектричні параметри, критично важливі для електрофізіологічних досліджень рослин: імпеданс і поляризаційну ємність [8, 15].

Сучасні прилади дозволяють значно розширити можливості таких досліджень. Зокрема, імпеданс можна вимірювати за допомогою приладу Ц-4314 на частоті 500 Гц у поєднанні з датчиком електронного вологоміра деревини ЕВ-2К. В Україні експериментальні дослідження підтвердили придатність цифрового вольтметра В7-38, що характеризується високим вхідним опором, для реєстрації біоелектричної активності рослин. Такі інструменти забезпечують точнішу та оперативнішу фіксацію електричних параметрів, що відкриває можливості для інтеграції електрофізіології у практику оцінки фізіологічного стану та життєздатності лісових насаджень різного породного складу [29].

Особливе значення це має для молодих насаджень сосни звичайної, де традиційні морфологічні та ростові показники ще не дозволяють достовірно оцінити стан дерев. Вимірювання діелектричних параметрів – імпедансу та поляризаційної ємності – у поєднанні з контролем водного балансу та фізіологічної активності тканин дозволяє виявляти ранні зміни у гідратації, цілісності мембран та метаболічній активності дерев. Це забезпечує точнішу ранню діагностику росту, дозволяє прогнозувати продуктивність деревостанів та оптимізувати лісівничі заходи, такі як проріджування чи добір перспективних екземплярів [13].

Таким чином, інтеграція сучасних електрофізіологічних і діелектричних методів у лісівничі дослідження відкриває нові перспективи для контролю стану молодих насаджень *Pinus sylvestris*, підвищення

адаптивного потенціалу та забезпечення стійкості лісових екосистем у різних умовах місцезростання [27-28].

Діелектричні показники насаджень сосни звичайної визначали за методикою, запропонованою Г.Т. Криницьким [15]. Вимірювання проводили комбінованим приладом (шигометром) моделі Ф4320, який працює на стандартизованій частоті 1000 Гц. Ця методика дозволяє точно визначати поляризаційну ємність, а також активну складову комплексного ємнісного опору, змодельовану за паралельною схемою заміщення. Прилад сертифікований для роботи за температури навколишнього середовища від +10 до +35 С та відносної вологості повітря, що не перевищує 80%, що забезпечує надійність та відтворюваність результатів у контрольованих умовах [15].

Оцінка діелектричних показників забезпечує чутливий та інтегративний індикатор фізіологічного стану молодих дерев сосни. Зміни поляризаційної ємності та комплексного імпедансу відображають варіації вмісту води, цілісності мембран і метаболічної активності тканин. Такі вимірювання особливо цінні на ранніх етапах розвитку насаджень, коли традиційні морфологічні або ростові параметри не завжди здатні зафіксувати тонкі реакції дерев на стрес. Моніторинг діелектричних характеристик дозволяє виявляти ранні відхилення життєздатності, оцінювати вплив факторів середовища, таких як вологість ґрунту і коливання температури, а також прогнозувати потенційні траєкторії росту дерев.

Отже, використання діелектричних вимірювань доповнює традиційні лісівничі та фізіологічні методи, забезпечуючи неdestructивний і кількісний підхід до оцінки функціонального стану *Pinus sylvestris* у молодих лісових екосистемах. Такий підхід підвищує здатність ефективно управляти деревостанами, оптимізувати ранні лісівничі втручання та підтримувати високий адаптивний потенціал дерев у мінливих умовах середовища.

Прилад для вимірювання діелектричних показників працює від батареї постійного струму 7–9 В (зазвичай типу «крона»). Вимірювання проводять за

допомогою спеціально сконструйованого щупа, який складається з двох електродів з інертних металів, розташованих на відстані 20 мм один від одного. За методикою Г.Т. Криницького [15] електроди вводять приблизно на 10 мм у тканини в області кореневої шийки культур сосни звичайної. Точність та відтворюваність діелектричних вимірювань значною мірою залежать від умов навколишнього середовища. Дослідження слід проводити за сприятливих погодних умов, уникаючи високих температур, опадів або підвищеної вологості повітря. Особлива увага приділяється сухості кори рослини, оскільки наявність вологи на поверхні може створити небажані електричні шляхи, що призведе до завищених або нестабільних показників. Зміни таких факторів, як температура та вологість, впливають на провідність і ємність тканин, а отже, на значення поляризаційної ємності та імпедансу, що реєструються. Тому контроль цих умов є необхідним для отримання відтворюваних та репрезентативних даних і для точної оцінки фізіологічного стану молодих насаджень сосни.

Дотримання цих методичних рекомендацій дозволяє використовувати діелектричні вимірювання як надійний та недеструктивний метод для моніторингу гідратації, цілісності мембран і функціональної активності молодих дерев сосни звичайної, що сприяє ранній діагностиці росту та реакцій на стрес у лісових екосистемах.

РОЗДІЛ 3

ДИНАМІКА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ

3.1. Визначення показників імпеданса та поляризаційної ємності

Визначення імпеданса та ємності поляризаційної культур *Pinus sylvestris* проводили тричі у вегетаційний період на протязі 2025 року. Перший раз проміри проводили на початку вегетації (весняний період) – це березень 2025 року. Другий раз заміри здійснювали у період активної вегетації (літній період) – це серпень місяць 2025 року. Третій раз вимірювання здійснили в осінній період – це жовтень 2025 року.

Як уже ми зазначали дослідження ємності поляризаційної та імпеданса проводили на території Гартівського лісництва Звягельського надлісництва. Три пробні площі (ПП) закладали у 10 (вид. 17), 43 (вид. 46) та 79 (вид. 41) кварталах відповідно (рис 3.1., 3.2, та 3.3).

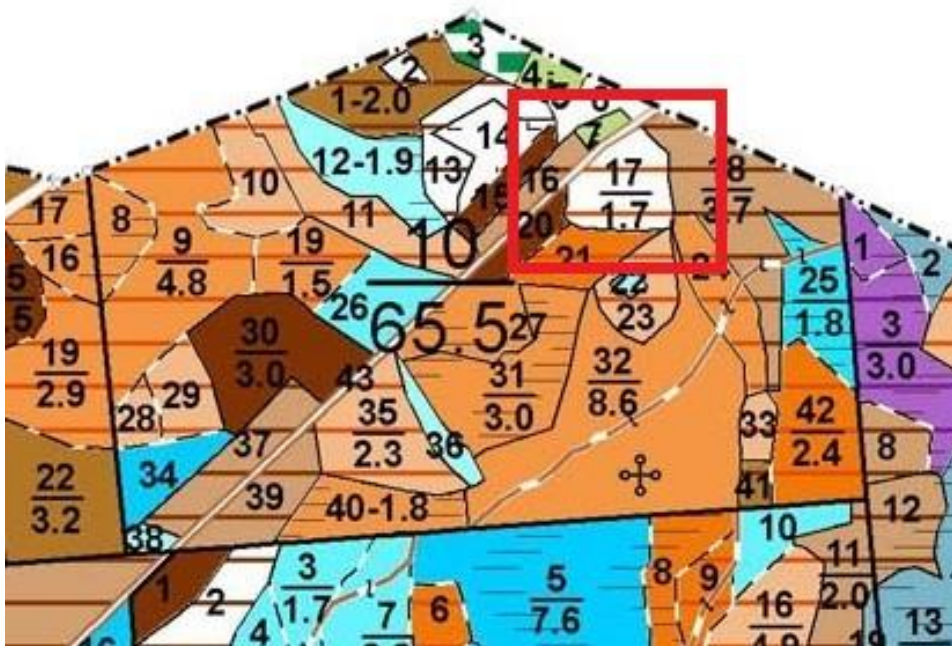


Рис. 3.1. Схема розташування ПП1 (впорядкування 2018 року).

і ПП2, ялини європейської та осики на ПП3 (табл. 3.1). На першій ПП було проведено доповнення, а на двох інших освітлення різкого ступеня інтенсивності. На цих ділянках регулярно проводився агротехнічний догляд.

Таблиця 3.1.

Лісівничо-таксаційна характеристика ПП у Гартівському лісництві

# ПП	Квартал / виділ	Площа, га	Склад	Вік, роки	Природне поновлення	ТЛУ	Примітка
1.	10/17	1,7	8Сз2Дз	15	----	ВздС	доповнення
2.	43/46	1,3	10Сз	15	6Бп4Дз	СздСа	освітлення 25%
3.	79/41	1,4	8Сз2Ялє	15	5Дз3Бп2Ос	СзгдС	освітлення 20%

Тимчасову пробну площу визначали як один посадковий ряд сосни звичайної у межах виділу. Вибір посадкових рядів здійснювали шляхом незалежної рандомізації з використанням таблиці випадкових чисел з метою забезпечення статистичної репрезентативності вибірки та мінімізації суб'єктивного впливу дослідника. У межах кожного відібраного ряду діелектричні та електрофізіологічні вимірювання проводили на 20 послідовних модельних деревах, розташованих у центральній частині ряду, що дозволяло зменшити крайові ефекти та мікроекологічну мінливість, пов'язану з крайніми деревами.

Обрана кількість модельних дерев вважалася достатньою для відображення мінливості та надійної характеристики інтенсивності й динаміки фізіологічних процесів, які відображаються у діелектричних показниках, зокрема імпедансі та поляризаційній ємності, у молодих насадженнях сосни звичайної. Усі вимірювання здійснювали виключно на життєздатних, візуально здорових деревах без ознак механічних пошкоджень, значної дефоліації крони або патологічних уражень, оскільки

такі чинники можуть істотно впливати на електрофізіологічні реакції та спотворювати інтерпретацію результатів.

Дерева нежиттєздатні, пригнічені або з вираженими ознаками фізіологічного стресу з аналізу виключали. Такий підхід забезпечував порівнянність результатів між пробними площами та підвищував достовірність оцінювання функціонального стану дерев сосни звичайної на основі електрофізіологічних показників.

Як наслідок проведених досліджень нами отримані показники поляризаційної ємності та імпеданса культур сосни Гартівського лісництва та представлені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

**Діелектричні показники ЛК сосни звичайної
в умовах Гартівського лісництва**

№ ПП	C, нФ		R, кОм	
	$M^{\pm m}$	V, %	$M^{\pm m}$	V, %
<i>Весняний період 2025 року</i>				
1	$8,04^{\pm 0,28}$	16,34	$32,23^{\pm 0,96}$	17,03
2	$8,08^{\pm 0,31}$	19,45	$31,73^{\pm 1,03}$	16,76
3	$6,92^{\pm 0,21}$	10,23	$36,10^{\pm 1,35}$	17,53
<i>Літній період 2025 року</i>				
1	$23,15^{\pm 0,44}$	15,55	$10,98^{\pm 0,38}$	15,12
2	$23,50^{\pm 1,91}$	19,71	$10,13^{\pm 0,24}$	17,20
3	$20,25^{\pm 0,75}$	18,03	$11,40^{\pm 0,31}$	12,03
<i>Осінній період 2025 року</i>				
1	$16,13^{\pm 0,79}$	18,11	$12,05^{\pm 0,54}$	14,83
2	$16,55^{\pm 0,75}$	19,05	$11,80^{\pm 0,71}$	18,23
3	$16,08^{\pm 0,98}$	17,45	$13,05^{\pm 0,65}$	13,71

У наступних підрозділах нами буде розглянуто особливості зміни діелектричних показників за періодами року у межах одного вегетаційного періоду.

3.2. Динаміка діелектричних показників упродовж вегетаційного періоду

3.2.1. Весняний період

Діелектричні вимірювання проводили у весняний період, у березні 2025 року. Аналіз мінливості показав, що коефіцієнт варіації імпедансу на тимчасових пробних площах перебував у вузькому інтервалі 14,16–17,53%, що свідчить про високий ступінь однорідності цього показника. Натомість поляризаційна ємність характеризувалася більшою варіабельністю, з коефіцієнтами варіації у межах 10,23–19,45%.

Середні значення поляризаційної ємності, зафіксовані на дослідних площах ПП1–ПП3, змінювалися від $6,92 \pm 0,21$ до $8,08 \pm 0,31$ нФ. Статистичний аналіз засвідчив відсутність достовірних відмінностей між показниками поляризаційної ємності на ПП1 та ПП2 ($F = 0,0099 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$).

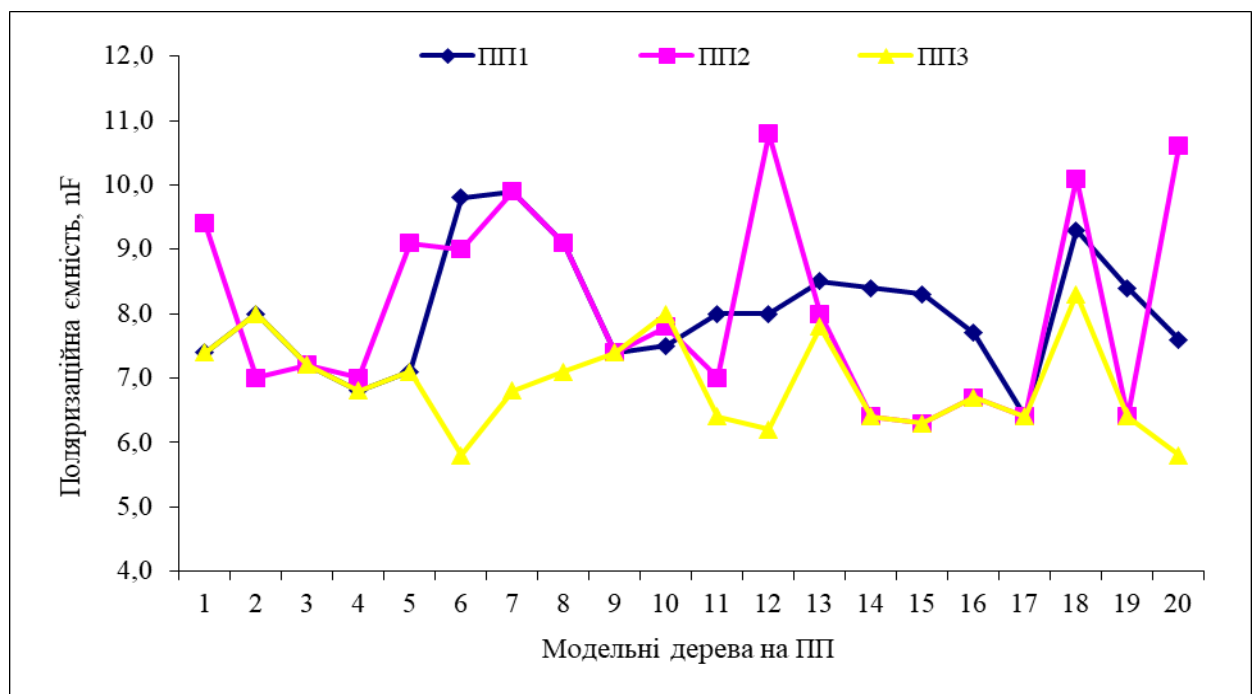


Рис. 3.4. Показники поляризаційної ємності сосни звичайної на ПП у весняний період

Водночас встановлено наявність статистично значущих відмінностей між ПП2 і ПП3 ($F = 9,49 > F_{0,95}(1;39) = 4,09$), а також між ПП1 і ПП3 ($F = 17,65 > F_{0,95}(1;39) = 4,09$).

Таким чином, показники поляризаційної ємності на пробних площах, закладених у кварталах 10 та 43, достовірно відрізнялися від відповідних значень, отриманих на ПП3, розташованій у кварталі 79 (рис. 3.4), що вказує на просторово зумовлену неоднорідність діелектричних властивостей дерев сосни звичайної у межах досліджуваних насаджень.

Виявлені відмінності показників поляризаційної ємності між дослідними пробними площами мають чітке фізіологічне тлумачення та відображають особливості функціонального стану тканин сосни звичайної у ранньовесняний період. Відомо, що поляризаційна ємність тісно пов'язана з вмістом води у живих тканинах, цілісністю та проникністю клітинних мембран, а також інтенсивністю іонно-транспортних процесів у камбіальних і провідних тканинах.

Підвищені значення поляризаційної ємності, зафіксовані на ПП3, свідчать про вищий рівень гідратації клітин і посилену мембранну поляризацію, що може бути інтерпретовано як прояв більшої фізіологічної активності дерев на початкових етапах вегетаційного періоду. Це вказує на більш ранню активацію метаболічних процесів, зокрема відновлення діяльності камбію та інтенсифікацію сокоруху, порівняно з насадженнями на ПП1 і ПП2.

Водночас відсутність статистично достовірних відмінностей між ПП1 і ПП2 свідчить про подібний фізіологічний стан дерев на цих ділянках, що, ймовірно, зумовлено близькими лісорослинними умовами, структурою насаджень та мікрокліматичними чинниками. Нижчі значення поляризаційної ємності, зафіксовані на цих пробних площах, можуть вказувати на уповільнений перехід дерев від стану зимового спокою до активного функціонування або на знижену інтенсивність водно-іонного обміну в тканинах.

Таким чином, встановлена просторово зумовлена диференціація показників поляризаційної ємності відображає відмінності у фізіологічній готовності дерев сосни звичайної до початку вегетації та підтверджує високу чутливість електрофізіологічних показників до навіть незначних змін екологічних і едафічних умов. Отримані результати обґрунтовують доцільність використання діелектричних параметрів як інформативних індикаторів для оцінювання функціонального стану та адаптивних реакцій лісових насаджень за різних умов місцезростання.

Результати вимірювань імпеданса на ПП наведено на рис. 3.5. У весняний період досліджень значення загального електричного опору тканин сосни звичайної коливалися в межах від $31,73 \pm 1,03$ до $36,10 \pm 1,35$ кОм залежно від пробної площі. За результатами статистичного аналізу встановлено, що показники імпеданса на ПП1 та ПП2 достовірно не відрізнялися між собою ($F = 0,12 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$).

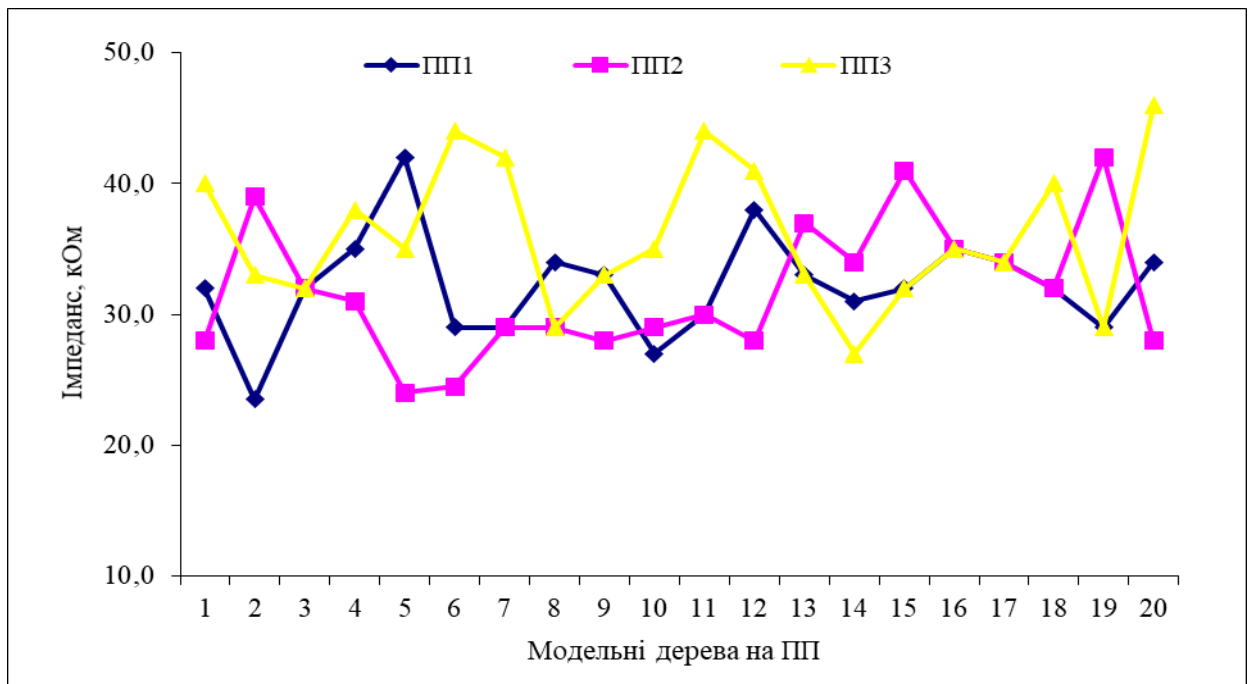


Рис. 3.5. Показники імпеданса сосни звичайної на ПП у весняний період

Водночас однофакторний дисперсійний аналіз засвідчив наявність статистично значущих відмінностей між значеннями імпеданса на ПП2 і ПП3 ($F = 6,88 > F_{0,95}(1;39) = 4,09$), а також між ПП1 і ПП3 ($F = 6,58 > F_{0,95}(1;39) =$

4,09). Отримані результати свідчать про диференційовану електрофізіологічну реакцію тканин дерев сосни звичайної залежно від умов місцезростання.

Коефіцієнти варіації імпеданса на всіх пробних площах виявилися надзвичайно близькими і коливалися у межах 16,76–17,53 %. Така однорідність є нетиповою, оскільки зазвичай показники імпеданса характеризуються вищою мінливістю порівняно з поляризаційною ємністю. Зафіксоване вирівнювання рівнів варіації може свідчити про відносно однорідний функціональний стан провідних тканин у молодих насадженнях сосни звичайної в ранньовесняний період.

Виявлені відмінності значень імпеданса між дослідними пробними площами можуть бути інтерпретовані з позицій фізіологічного стану дерев сосни звичайної та специфіки екологічних умов місцезростання. Електричний імпеданс рослинних тканин тісно пов'язаний із рівнем їх зволоження, рухливістю іонів, проникністю клітинних мембран і функціональним станом провідних елементів, насамперед тканин ксилеми та флоєми. Зниження значень імпеданса, як правило, свідчить про вищий вміст води та кращу іонну провідність, що є характерним для сприятливіших ґрунтово-гідрологічних і температурних умов у ранньовесняний період.

Відсутність статистично достовірних відмінностей між показниками імпеданса на ПП1 і ПП2 вказує на подібність едафічних і мікрокліматичних умов, що зумовлює близький рівень зволоження тканин і фізіологічної активності дерев. Натомість достовірно вищі значення імпеданса, зафіксовані на ПП3, свідчать про підвищений електричний опір тканин, що може бути наслідком обмеженої доступності вологи, уповільненого початку сокоруху або збільшення частки зв'язаної води у клітинних стінках і мембранах. Такі особливості є типовими для ділянок із менш сприятливим водним режимом або специфічними ґрунтовими властивостями, які стримують водопоглинання на початкових етапах вегетації.

Майже однакові значення коефіцієнта варіації імпеданса на всіх пробних площах свідчать про синхронність фізіологічної реакції молодих насаджень сосни звичайної на початку вегетаційного періоду. Така однорідність, імовірно, зумовлена домінуванням ендегенних сезонних механізмів регуляції водного балансу та метаболічної активності над локальними мікроекологічними чинниками у ранньовесняний період. В екологічному аспекті виявлені закономірності підтверджують високу чутливість електрофізіологічних показників до умов місцезростання та їхню придатність для оцінювання функціонального стану і адаптивних реакцій сосни звичайної в межах лісових екосистем.

3.2.2. Літній період

У період активної вегетації (літній період) мінливість діелектричних показників на ПП залишалася відносно низькою, що свідчить про помірний рівень однорідності функціонального стану тканин сосни звичайної. Коефіцієнти варіації коливалися в межах 15,55–19,71 % для поляризаційної ємності та 12,03–17,20 % для імпеданса. Ці показники свідчать про те, що, незважаючи на просторову неоднорідність мікросередовища, загальний фізіологічний стан молодих дерев у межах кожної пробної площі був відносно стабільним протягом періоду інтенсивного росту.

Середні значення поляризаційної ємності на дослідних пробних площах ПП1–ПП3 коливалися від $20,25 \pm 0,75$ до $23,50 \pm 1,91$ нФ. За результатами однофакторного дисперсійного аналізу виявлено статистично достовірні відмінності поляризаційної ємності між ПП1 та ПП3 ($F = 7,86 > F_{0,95}(1;39) = 4,09$) та між ПП2 і ПП3 ($F = 7,06 > F_{0,95}(1;39) = 4,09$), у той час як між ПП1 та ПП2 статистично достовірної різниці не спостерігалось ($F = 0,08 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$). Це свідчить про просторово зумовлену різницю в діелектричних властивостях тканин, що відображає відмінності у

фізіологічній активності насаджень сосни звичайної залежно від умов конкретних місцезростань.

З фізіологічної точки зору, поляризаційна ємність тісно пов'язана з вологістю тканин, цілісністю мембран та ефективністю іонного транспорту. Вищі значення поляризаційної ємності на ППЗ можуть свідчити про кращу зволоженість живих клітин, підвищену метаболічну активність або більшу частку вільної води в тканинах, що сприяє іонній провідності та загальній електрохімічній чутливості елементів ксилеми та флоєми. Натомість нижчі значення на ПП1 та ПП2 можуть відображати дещо зменшену водність тканин або затримку активації провідних та камбіальних тканин через мікросередовищні фактори, такі як нерівномірне зволоження ґрунту, затінення або локальні відмінності температури.

З екологічної точки зору, ці відмінності підкреслюють високу чутливість діелектричних показників до умов місцезростання та мікрональної варіабельності. Водночас відносно низькі коефіцієнти варіації на всіх пробних площах свідчать про узгоджену фізіологічну реакцію молодих насаджень сосни звичайної протягом літа, що відображає координацію водного та іонного балансу, поляризаційних процесів мембран і метаболічної активності. Використання таких електрофізіологічних показників дозволяє отримати цінну інформацію про функціональний стан дерев, їх адаптивні реакції та потенціал росту у конкретних лісових екосистемах, надаючи можливість швидкого та неінвазивного моніторингу здоров'я насаджень. У серпні були виміряні значення імпедансу тканин сосни звичайної, які коливалися від $10,13 \pm 0,24$ до $11,40 \pm 0,31$ кОм на дослідних пробних площах. Статистичний аналіз показав відсутність достовірних відмінностей між ПП1 та ПП2 ($F = 3,56 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$) та між ПП1 і ПП3 ($F = 0,81 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$). Водночас між ПП2 та ПП3 було зафіксовано статистично достовірну різницю ($F = 6,88 > F_{0,95}(1;39) = 4,09$) за результатами однофакторного дисперсійного аналізу. Отримані дані свідчать, що інтенсивність фізіологічних процесів у насадженнях сосни звичайної

проявляє просторову мінливість між пробними площами, що відображає особливості умов місцезростання щодо зволоженості тканин, іонної провідності та загальної функціональної активності дерев у літній період. Така варіабельність підкреслює чутливість показників імпеданса як індикаторів фізіологічного стану та адаптивних реакцій молодих дерев у межах лісових екосистем.

Протягом весняного періоду взаємозв'язок між імпедансом та поляризаційною ємністю досліджуваних дерев сосни звичайної виглядав переважно неструктурованим. Проте до літнього сезону антагоністичні тенденції між цими діелектричними показниками виявили більш послідовний і організований характер. Слід зазначити, що зміни електрофізіологічних показників демонструють чіткий обернений зв'язок: збільшення поляризаційної ємності стабільно супроводжується зниженням імпеданса і навпаки. Ця взаємозалежність простежується як на рівні окремих пробних площ, так і у кожного дерева протягом усього вегетаційного періоду, відображаючи координацію фізіологічних процесів у тканинах.

Протягом літнього періоду вегетації спостерігалось виражене збільшення поляризаційної ємності у модельних деревах сосни звичайної, причому середні значення майже утричі перевищували показники весняного періоду. Зокрема, поляризаційна ємність зросла у 2,87 раза на ПП1, у 2,91 раза на ПП2 та у 2,93 раза на ПП3. Одночасно імпеданс тканин зазнав помітного зниження: на ПП1 – у 2,93 раза, на ПП2 – у 2,96 раза, на ПП3 – у 3,17 раза. Такі обернені зміни діелектричних показників відображають посилену фізіологічну активність і підвищену ефективність водно-іонного транспорту в тканинах під час періоду максимального росту.

3.2.3. Осінній період

Протягом осінньої фази вегетаційного періоду дерева сосни звичайної поступово переходять у стан спокою. Коефіцієнти варіації

електрофізіологічних показників на пробних площах залишалися відносно невисокими, коливаючись від 17,45% до 19,05% для поляризаційної ємності та від 13,71% до 18,23% для імпеданса. У порівнянні з літнім періодом значення поляризаційної ємності на дослідних ПП1–ПП3 знизилися приблизно на 30%, варіюючи від $16,08 \pm 0,98$ до $16,55 \pm 0,75$ нФ. Статистично достовірних відмінностей поляризаційної ємності між будь-якими парами порівняння не виявлено: ПП1–ПП3 ($F = 0,002 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$), ПП2–ПП3 ($F = 0,20 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$) та ПП1–ПП2 ($F = 0,13 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$).

Аналогічно, показники імпеданса у осінній період достовірно не відрізнялися від літніх значень і коливалися в межах $11,80 \pm 0,71 - 13,05 \pm 0,65$ кОм (у літній період – 12,03–17,20 кОм). Відмінностей між будь-якими парами ПП також не зафіксовано: ПП1–ПП2 ($F = 0,106 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$), ПП1–ПП3 ($F = 1,18 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$) та у парі ПП2–ПП3 ($F = 1,88 < F_{0,95}(1;39) = 4,09$).

Отримані дані свідчать про загальне зниження поляризаційної ємності на всіх пробних площах у порівнянні з літнім періодом, що відображає зменшення метаболічної та електрофізіологічної активності тканин у міру підготовки дерев до стану спокою. Такі сезонні зміни діелектричних показників підкреслюють чутливість вимірювань імпеданса та поляризаційної ємності як індикаторів фізіологічного стану насаджень сосни звичайної.

3.3. Теоретичне узагальнення зміни діелектричних показників

Аналіз змін діелектричних показників молодих насаджень сосни звичайної протягом вегетаційного періоду 2025 року показав виразні сезонні закономірності, що відображають фізіологічний стан дерев та інтенсивність життєвих процесів у різні періоди року (рис. 3.6 -3.7).

У весняний період, при низьких позитивних температурах (березень), спостерігалася відносно низька поляризаційна ємність (6,92–8,08 нФ) і високий імпеданс (31,73–36,10 кОм), що свідчить про обмежену активність провідних тканин у період відновлення вегетації. Взаємозв'язок між показниками імпеданса та поляризаційної ємності виглядав хаотичним, відображаючи поступовий запуск фізіологічних процесів у деревостані після зимового спокою.

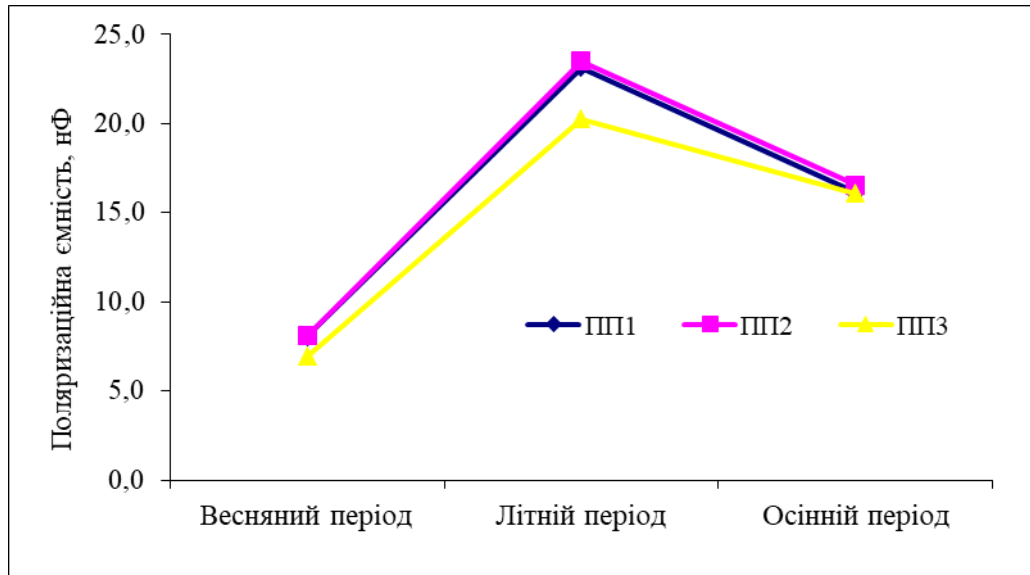


Рис. 3.6. Зміна показників поляризаційної ємності сосни звичайної на ПП у 2025 р.

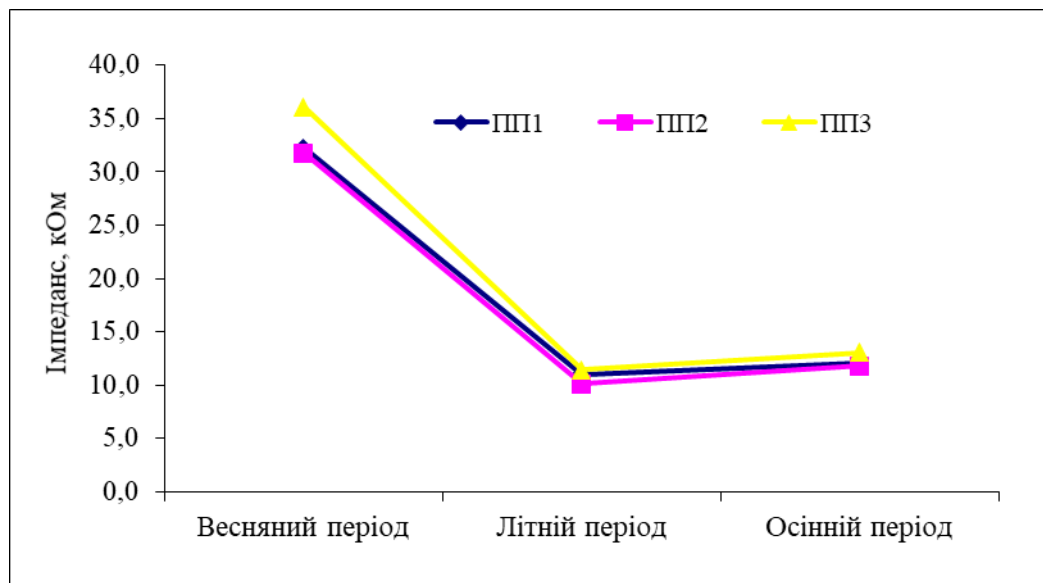


Рис. 3.7. Зміна показників імпеданса сосни звичайної на ПП у 2025 р.

У літній період відзначалося максимальне підвищення поляризаційної ємності (20,25–23,50 нФ) і відповідне зниження імпеданса (10,13–11,40 кОм), що вказує на активне функціонування провідних тканин і посилений транспорт води та іонів у деревині. Середні значення поляризаційної ємності зросли майже утричі порівняно з весною, а імпеданс знизився у 2,9–3,2 рази, демонструючи чітку обернену залежність між цими показниками. Така антагоністична динаміка свідчить про посилену метаболічну активність і ефективну роботу водного і електролітного транспорту, що забезпечує інтенсивний ріст і розвиток дерев.

У осінній період (жовтень), під час підготовки дерев до спокою, спостерігалось зниження поляризаційної ємності приблизно на 30% порівняно з літнім максимумом (16,08–16,55 нФ), тоді як імпеданс залишався відносно стабільним (11,80–13,05 кОм). Незважаючи на зниження поляризаційної ємності, статистично достовірних відмінностей між пробними площами не виявлено. Це вказує на те, що дерева ще активно вегетують і не перейшли повністю у стан спокою.

Загальні висновки демонструють, що найістотніші зміни електрофізіологічних показників відбуваються під час переходу від стану спокою до активної вегетації, а подальші сезонні коливання (літо–осінь) відображають природну координацію фізіологічних процесів у тканинах дерев. Дослідження підтверджують, що імпеданс та поляризаційна ємність є високочутливими індикаторами функціонального стану молодих насаджень *Pinus sylvestris* і можуть слугувати надійними інструментами для моніторингу біофізіологічної активності та ефективності водного транспорту у лісових екосистемах.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У межах дослідження проаналізовано сезонну динаміку діелектричних показників молодих культур сосни звичайної, що зростають у лісорослинних умовах Гартівського лісництва Звягельського надлісництва. Отримані експериментальні дані дали змогу узагальнити закономірності змін електрофізіологічних характеристик дерев упродовж вегетаційного періоду.

1. Пробні площі були закладені в однорідних умовах місцезростання та представлені лісовими культурами однакового віку, способу створення і схеми змішування порід, що мінімізувало вплив структурних чинників на результати вимірювань. Протягом року значення поляризаційної ємності сосни звичайної характеризувалися виразною сезонною мінливістю: у весняний період вони становили $6,92 \pm 0,21 - 8,08 \pm 0,31$ нФ, у літній – $20,25 \pm 0,75 - 23,50 \pm 1,91$ нФ, а в осінній – знижувалися до $16,08 \pm 0,98 - 16,55 \pm 0,75$ нФ.

2. Імпеданс тканин дерев демонстрував протилежну динаміку і в середньому змінювався від $31,73 \pm 1,03 - 36,10 \pm 1,35$ кОм у весняний період до мінімальних значень улітку ($10,13 \pm 0,24 - 11,40 \pm 0,31$ кОм), з подальшим незначним підвищенням восени до $11,80 \pm 0,71 - 13,05 \pm 0,65$ кОм. Така сезонна інверсія показників свідчить про тісний взаємозв'язок між електрофізіологічними характеристиками та інтенсивністю фізіологічних процесів у деревних тканинах.

3. Виявлена просторово зумовлена диференціація поляризаційної ємності відображає відмінності у фізіологічній готовності дерев до початку активної вегетації та підтверджує високу чутливість діелектричних параметрів до змін екологічних і едафічних умов. Це свідчить про можливість використання поляризаційної ємності та імпеданса як інформативних індикаторів функціонального стану і адаптивних реакцій лісових насаджень.

4. Близькі значення коефіцієнтів варіації імпеданса на всіх пробних площах у весняний період вказують на синхронність фізіологічної відповіді

молодих культур сосни звичайної, що, ймовірно, зумовлено домінуванням внутрішніх сезонних механізмів регуляції водного режиму та метаболічної активності над локальними мікроекологічними чинниками.

5. Упродовж вегетації встановлено чіткий обернений зв'язок між імпедансом і поляризаційною ємністю: зростання поляризаційної ємності супроводжується зниженням імпеданса і навпаки. Ця закономірність проявляється як на рівні окремих пробних площ, так і на рівні індивідуальних дерев, відображаючи узгодженість електрофізіологічних процесів у тканинах сосни звичайної.

6. Зменшення значень поляризаційної ємності в осінній період порівняно з літнім свідчить про поступове зниження метаболічної активності та підготовку дерев до стану спокою. Отримані результати підтверджують високу інформативність діелектричних показників як інструменту діагностики фізіологічного стану та сезонної динаміки лісових насаджень сосни звичайної.

7. Використання імпеданса та поляризаційної ємності є ефективним інструментом для оцінювання життєвого стану сосни звичайної, оскільки ці показники чутливо й оперативно відображають зміни водного балансу, проникності клітинних мембран та інтенсивності метаболічних процесів у тканинах дерев. Їх поєднане застосування дає змогу неінвазивно діагностувати рівень фізіологічної активності, виявляти адаптивні реакції на екологічні умови та своєчасно фіксувати ранні ознаки стресу, що робить електрофізіологічні методи перспективними для наукового аналізу і практичного моніторингу стану соснових насаджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Генсірук С.А. Ліси України: монографія. Львів: Українські технології, 2002. 496 с.
2. Гордієнко М.І., Гордієнко Н.М. Лісівничі властивості деревних рослин. Київ: ТОВ «Віста», 2005. 818 с.
3. Дерев'янчук Ю. Л., Заїка В. К. Морфофізіологічна реакція дерев сосни звичайної, уражених опеньком осіннім. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011, т. 21, № 19. С. 18-24.
4. Заячук В.Я. Дендрологія. Голонасінні. Львів: Камула, 2005. 176 с.
5. Заячук В.Я. Дендрологія. Львів: СПОЛОМ, 2014. 646 с.
6. Заїка В.К. Діелектричні показники сосни звичайної на радіаційно забруднених територіях. *Науковий вісник УкрДЛТУ*. 2004, т.14, №1. С. 12–15.
7. Заїка В.К., Руденко А.В. Морфофізіологічні особливості дерев сосни звичайної в борах Малого Полісся. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012, т. 22, № 9. С. 9–13.
8. Клим В.В., Сергійчук Б.В., Іваненко І.І. Основні етапи вивчення електрофізіологічних властивостей деревних порід. *Стан і майбутнє лісового господарства, деревообробки та землевпорядкування* : збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених (9-10 жовтня 2023, м. Харків, Україна). Харків, 2023. С. 31–32.
9. Кратюк О.Л. Особливості впливу напіввільного утримання мисливських тварин на діелектричні показники сосни звичайної. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019, т. 29, № 8. С. 43–45.
10. Кратюк О.Л. Сезонна зміна діелектричних показників сосни звичайної в умовах напіввільного утримання мисливських тварин. *Екологічні науки*. 2019, т. 27, № 4. С. 192–196.

11. Кратюк О.Л. Зміна діелектричних показників сосни звичайної в умовах напіввільного утримання кабана дикого. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020. Т.30, №4. С. 25–30.

12. Кратюк О.Л., Бовсуновський М.П., Бабич М.М., Кордиш В.О. Використання електрофізіологічних показників для визначення життєвого стану дерев сосни звичайної. *Наукові читання – 2020*. Житомир: Житомирський національний агроекологічний університет, 2020. С. 41–42.

13. Кратюк О.Л., Клим В.В., Сергійчук Б.В. Особливості застосування діелектричних показників у вивченні електрофізіологічних параметрів деревних порід. *Природно – ресурсний комплекс Західного Полісся в контексті сталого розвитку* : збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Березне, 16-17 травня 2023 року. Березне : НСІ НУВГП, 2023. С. 116–117.

14. Криницький Г.Т. Електрофізіологічні дослідження деревних рослин в Україні. *Фізіологія рослин в Україні на межі тисячоліть*. 2001, т.2. С. 233–237.

15. Криницький Г.Т. Про методику використання електрофізіологічних показників для визначення життєздатності деревних рослин. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*. 1992, т.23. С. 3–10.

16. Криницький Г.Т., Галушка В.П. Електрофізіологічна реакція сосни звичайної на добування живиці. *Науковий вісник УкрДЛТУ*. 2005, т. 15, №2. С. 8–13.

17. Криницький Г.Т., Заїка В.К. Електрофізіологічна реакція культур сосни звичайної на високі рівні хронічного радіаційного опромінення. *Науковий вісник УкрДЛТУ*. 2004, т. 14, №5. С. 8–14.

18. Кузик А.Д. Вплив низової пожежі на насадження сосни звичайної. *Науковий вісник УкрДЛТУ*. 2012, т. 22, №7. С. 19–26.

19. Лавний В. В., Криницький Г.Т. Електрофізіологічні показники підросту деревних порід. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011, т.21, № 17. С.86–90.
20. Литвак П.В., Ткачук В.І. Дендрологія. Житомир: Полісся, 2002. 338с.
21. Литвак П.В., Таргонський П.Н., Бруцький Ю.В. Скарби лісових екосистем Полісся. Житомир : Державний агроекологічний університет, 2006. 430 с.
22. Маринич О.М., Шищенко П.Г. Фізична географія України : підручник. Київ: Знання, 2005. 511 с.
23. Національний атлас України / Інститут географії НАН України, ТОВ «Інтелектуальні системи ГЕО», КПІ. Київ : Картографія, 2008. 440 с.
24. План ведення господарства (План лісоуправління). Державне спеціалізоване господарське підприємство «Ліси України» Філія «Столичний лісовий офіс» Звягельське надлісництво. Київ. 2025. 41 с. URL: <https://e-forest.gov.ua/wp-content/uploads/2025/04/Plan-lisoupravlinnia-Zviahelske-nadlisnytstvo.pdf>
25. Рибак Ю.Л. Електрофізіологічні показники уражених сосновим вертуном дерев сосни звичайної в умовах Західного Полісся. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012, т.22, № 12. С. 42–48.
26. Рибак Ю.Л., Заїка В.К. Зміна електрофізіологічної активності у дерев сосни звичайної, уражених шютте звичайним. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013, т. 23, № 2. С. 90–96.
27. **Садурська Л.М.** Застосування електрофізіологічних методів у лісовому господарстві. *Мисливське господарство: Традиції. Досвід. Нові горизонти*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Житомир, 19 вересня 2025 р.). Житомир, 2025. С. 88–89.
28. **Садурська Л.М.,** Березовський В.П. Електрофізіологічні методи як інструмент оцінки життєздатності та стійкості деревних рослин у системі сталого лісівництва. *Ліс, наука, молодь*: матеріали XIII Всеукраїнської

науково-практичної конференції (м. Житомир, 26 листопада 2025 р.). Житомир, 2025. С. 188–189.

29. Садурська Л.М. Технологічні досягнення електрофізіології рослин та їх застосування у лісівничих дослідженнях. *Студентські наукові читання 2025* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. присвячені I-му туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт (10 грудня 2025 р.). Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 40.

30. Скляр В. Г. Екологічна фізіологія рослин [Електронний ресурс] / В. Г. Скляр, Ю. А. Злобін / за ред. Ю. Л. Злобіна. - Суми : Університетська книга, 2015. 271 с.

31. Ткачук В.І. Проблеми вирощування сосни звичайної на Правобережному Поліссі. Житомир: Волинь, 2004. 464 с.

32. Fromm J., Spanswick R. Characteristics of action potentials in willow (*Salix viminalis* L.). *J. Experimental Botany*. 1993. Vol.44. P. 1119–1125.

33. Gibert D., Le Mouel J., Lambs L., Nicollin F., Perrier F. Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk. *Plant Sci*. 2006. Vol.171. P. 572–584.

34. Gindl W., Loppert H.G., Wimmer R. Relationship between streaming potential and sap velocity in *Salix Alba* L. *Phyton*. 1999. Vol.39. P. 217–224.

35. Gora Evan M., Yanoviak Stephen P. Electrical properties of temperate forest trees: a review and quantitative comparison with vines. *Canadian Journal of Forest Research*. 2015. Vol.45. P. 236–245.

36. Gurovich Luis A. Electrophysiology of Woody Plants. *Electrophysiology - From Plants to Heart*. Dr. Saeed Oraii (Ed.). InTech. 2012. P.1–24.

37. Kratiuk O.L., Kratyuk V.L. Plant electrophysiology trends in forestry research. *Topical issues of methods of teaching natural sciences: International scientific and practical conference* (Lublin, December 27–28, 2019) Lublin, Republic of Poland : Baltija Publishing. 2019. P. 78–81.

38. Repo T., Oksanen E., Vapaavuori E. Effects of elevated concentrations of ozone and carbon dioxide on the electrical impedance of leaves of silver birch (*Betula pendula*) clones. *Tree Physiol.* 2004. Vol. 24. P. 833–843.

39. Stahlberg R. Historical overview on plant neurobiology. *Plant Signaling and Behavior.* 2006. Vol.1. P. 6–8.

40. Volkov A.G. Plant Electrophysiology: Theory and Methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg., 2006. 508 p.

41. Volkov A.G. Plant Electrophysiology: Signaling and Responses. Springer-Verlag Berlin Heidelberg., 2012. 377 p.

42. Wargo P.M., Skutt H.R. Resistance to pulsed electrical current: an indicator of stress in forest trees. *Canadian Journal of Forest Research.* 1975. Vol.5, K4. P. 557–561.