

ІНДУКЦІЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦІЇ ЛИСТКІВ САДЖАНЦІВ СОРТУ ЧЕМПІОН ЯК ІНДИКАТОР ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ СУБСТРАТІВ ТА КОНТЕЙНЕРІВ

РОМАНЕНКО В.В. – аспірант

orcid.org/0009-0001-1211-4940

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ГАВРИЛЮК О.С. – доктор філософії (PhD), доцент

orcid.org/0000-0002-4551-6727

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Постановка проблеми. Сучасні інтенсивні технології вирощування саджанців яблуні (*Malus domestica* Borkh.) базуються на контейнерній культурі, що подовжує строки реалізації та підвищує приживлюваність рослин. Обмежений об'єм кореневої системи висуває підвищені вимоги до фізико-хімічних властивостей субстратів і конструкції контейнерів, які визначають водний режим і мінеральне живлення [1, 3]. У зоні нестійкого зволоження, зокрема в Київській області, контейнерні саджанці зазнають термічного й осмотичного стресу, що насамперед впливає на фотосинтетичний апарат і життєздатність сорто-підщепних комбінацій, зокрема сорту Чемпіон [5].

Візуальні методи оцінки не забезпечують раннього виявлення фізіологічних порушень, тому доцільним є використання індукції флуоресценції хлорофілу – неінвазивного методу діагностики ефективності фотосистеми II [2, 7]. Водночас у практиці розсадників зберігається невизначеність щодо оптимальних поєднань контейнерів і субстратів для підщеп різної сили росту (М9, ММ106), що потребує наукового обґрунтування для стандартизації технології та підвищення якості садивного матеріалу сорту Чемпіон [4, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Україна зіткнулася зі значним скороченням придатних для землеробства площ унаслідок російської військової агресії: сади та розсадники опинилися в зонах бойових дій, частина угідь зайнята оборонними спорудами або забруднена мінами й токсичними продуктами вибухів. Території, де велися бойові дії, залишатимуться непридатними для традиційного землеробства ще багато років [8, 9]. Це зумовлює потребу впровадження альтернативних підходів у садівництві.

Одним із рішень є розвиток контейнерної технології вирощування плодкових культур, яка набула широкого поширення у країнах Західної Європи та світі [29, 30, 31]. Зарубіжні дослідження вже тривалий час охоплюють вирощування культур у контейнерах із різними субстратами [19, 23, 27]. В Україні цей напрям також вивчався, однак рівень впровадження технології поступатиметься закордонному досвіду.

У закордонних розсадниках контейнерне вирощування рослин застосовується протягом багатьох десятиліть [1, 22, 30]. Воно забезпечує вищу ефективність використання площі, поживних речовин і води порівняно з ґрунтовою культурою [2, 34, 35]. Як субстрати

використовують органічні й неорганічні матеріали, переважно локального походження [3, 25, 4, 32], зокрема верховий торф, кокосове волокно, кору, рисові висівки, керамзит, вермикуліт, перліт і мінеральну вату [5, 36, 37].

Контейнерні майданчики можна розміщувати на малопродатних для традиційного землеробства територіях – із бідними чи проблемними ґрунтами, високим рівнем ґрунтових вод, кам'янистих ділянках і навіть на місці колишніх полігонів. Водночас технологія потребує значних початкових інвестицій: підготовки території, укриття агротканиною, встановлення поливу та опорних конструкцій.

Для вирощування в закритому кореновому середовищі використовують спеціально підготовлені субстрати з поживних компонентів і добавок (вапнякові матеріали, добрива тощо) [6, 20, 28]. Найпоширенішою основою є верховий торф [7, 26, 33], який цінують за водоутримання, дренаж, аерацію, малу масу та фітосанітарну безпечність [8, 13].

Контейнерне вирощування яблуні дедалі ширше застосовується в інтенсивному садівництві [24, 26], оскільки дає змогу оптимізувати мінеральне живлення, водний режим і кореневий простір рослин [21]. Поєднання типів контейнерів і субстратів може як покращувати, так і обмежувати перебіг фізіологічних процесів, зокрема фотосинтез.

Функціональний стан фотосинтетичного апарату є інтегральним показником життєздатності рослин [10, 17, 33]. Метод індукції флуоресценції хлорофілу – інформативний і неінвазивний інструмент оцінювання ефективності фотосистеми II, виявлення прихованих стресових змін та аналізу адаптаційного потенціалу рослин у різних екосистемах, зокрема за контейнерного вирощування [11, 14, 15, 18].

Параметри індукції флуоресценції хлорофілу дозволяють виявляти чутливість фотосинтетичного апарату до різних стресових чинників і умов вирощування [16]. Тому ІФХ застосовують для оцінювання впливу технологічних прийомів на його функціональний стан [12].

Аналіз ІФХ у листках саджанців яблуні сорту Чемпіон дає змогу оцінити ефективність типів субстратів і контейнерів, оскільки властивості субстрату та обмеження кореневого простору відображаються у флуоресцентних показниках.



Мета. Мета полягала в оцінці впливу різних конфігурацій контейнерів та складу субстратів на показники фізіологічного стану саджанців.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження в умовах контейнерного вирощування саджанців яблуні (*Malus domestica* Borkh.) проводили протягом 2024–2025 рр. на базі садового центру «Пісарді» Бучанського району Київської області (50.50440621864342, 30.18884916588485). Об'єктом дослідження були саджанці яблуні сорту Чемпіон на підщепах М9 та ММ106. Рослини вирощували у двох типах контейнерів, а саме Air Pot (Air Pot – ERCOLE «SP30» об'ємом 12 л, діаметром 28 см. та висотою 26,5 см.) та С12 («В28» об'ємом 12 л, діаметром 28 см. та висотою 24 см.) (рис. 1) із використанням трьох варіантів субстрату (табл. 1).

Для проведення експерименту було підготовлено три типи живильних сумішей, що відрізнялися за компонентним складом та фізико-хімічними характеристиками:

1. Однокомпонентний варіант: торф верховий (рН 5,5–6,5, фракція 0–40 мм);

2. Двокомпонентний субстрат: торф верховий (рН 5,5–6,5, фракція 0–40 мм) у поєднанні з подрібненою корою хвойних порід (фракція 0–5 мм) у співвідношенні 1:1 за об'ємом;

3. Трикомпонентна суміш: торф верховий (рН 5,5–6,5, фракція 0–40 мм), кора хвойних порід (фракція 0–5 мм) та ґрунт супіщаний, змішані у пропорції 2:1:1 відповідно.

Субстрати готувались за допомогою торфо-змішувальної машини італійського бренду Urbinati, яка має продуктивність до 6 м³ за годину.

При приготуванні субстратів проводили вапнування для отримання потрібного рівня кислотності для закладки досліду. Необхідні дослідження із дотриманням методик виконання проводились в агрохімічній лабораторії НУБіП м. Київ. Після отриманих даних проводились розрахунки необхідних доз вапна для кожного окремого варіанту субстрату. Так згідно із розрахунками до I зразку (верховий торф) внесли 0,24 г вапнякового матеріалу на один літр субстрату. До II та III зразків додали відповідно 0,9 г та 0,62 г на один літр субстрату (табл. 1).

Закладання та проведення дослідження проходило в польових умовах відповідно до «Методики проведення польових досліджень з плодовими культурами» (рис. 2–3, табл. 2).

Розміщення варіантів на дослідній ділянці робили на основі систематичного методу розміщення варіантів. Саджанці знаходились в плівковій теплиці до 1 травня. Із травня для закалювання всі саджанці



Air Pot (контейнер А)



C12 (контейнер Б)

Рис. 1. Типи дослідних контейнерів для вирощування саджанців сорту Чемпіон із закритою кореневою системою

Таблиця 1

Фізичні властивості та рН субстратів

Зразки	РН(вихідна)	Щільність г/см³		вологість W%	Добавка в перерахунку на фізичну масу вапнякового матеріалу в г/л вологого зразка субстрату	РН(отриманне)
		На сухий зразок	На вологий зразок			
Торф верховий (Субстрат 1)	6,5	0,105	0,52	79,88	0,24	6,8
Торф+кора (Субстрат 2)	5,2	0,139	0,51	72,73	0,90	6,7
Торф+кора+ґрунт (Субстрат 3)	6,3	0,160	0,66	75,52	0,62	6,8



Air Pot (контейнер А)



C12 (контейнер Б)

Рис. 2. Посадка саджанців у контейнери за використання торфу (Субстрат 1)

Air Pot (А)



C12 (Б)

Рис. 3. Рослини сорту Чемпіон у різних типах контейнерів

переміщувались із теплиці на відкриту площадку під затіняючою сіткою, де знаходились протягом трьох днів. Після закалювання висаджені однорічні саджанці розмістили на відкритій шпалерній площадці із

підключенням крапельного зрошення до кожного контейнеру та підв'язуванням до тросів з бамбуковими опорами. На шпалерній площадці саджанці розміщують за схемою 1,0×0,5 м.

Таблиця 2

Схема досліду з вирощування саджанців яблуні сорту 'Чемпіон' у контейнерній культурі

Підщепа	Тип контейнера	Субстрат
Підщепа MM106	AirPot (Контейнер А)	Верховий торф (Субстрат 1)
		Верховий торф + кора хвойних порід (Субстрат 2)
		Верховий торф + кора хвойних порід + ґрунт (Субстрат 3)
	Контейнер c12 (Контейнер Б)	Верховий торф (Субстрат 1)
		Верховий торф + кора хвойних порід (Субстрат 2)
		Верховий торф + кора хвойних порід + ґрунт (Субстрат 3)
Підщепа М9	AirPot (Контейнер А)	Верховий торф (Субстрат 1)
		Верховий торф + кора хвойних порід (Субстрат 2)
		Верховий торф + кора хвойних порід + ґрунт (Субстрат 3)
	Контейнер c12 (Контейнер Б)	Верховий торф (Субстрат 1)
		Верховий торф + кора хвойних порід (Субстрат 2)
		Верховий торф + кора хвойних порід + ґрунт (Субстрат 3)

Експрес-діагностику фізіологічного стану саджанців яблуні сорту Чемпіон здійснювали методом індукції флуоресценції хлорофілу з використанням портативного хронофлуорометра «*Floratest*», який забезпечує контроль функціональної активності фотосистеми II (PSII). Прилад розроблений в Інституті кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України та широко застосовується для оцінювання фотосинтетичної активності рослин за неінвазивною методикою.

Хронофлуорометр «*Floratest*» реєструє індукційні зміни флуоресценції хлорофілу, відомі як «крива Каутського», форма якої відображає перебіг основних фотохімічних і фотобіохімічних процесів у хлоропластах листків. Аналіз параметрів цієї кривої дозволяє оцінити функціональний стан фотосинтетичного апарату та його реакцію на умови вирощування.

Дослідження проводили у третій декаді липня, у період повного формування листових пластинок. Вимірювання здійснювали у п'ятикратному повторенні; тривалість одного циклу реєстрації становила 4 хв.

Для оцінювання функціонального стану фотосинтетичного апарату листків використовували комплекс флуоресцентних показників, а саме:

F_0 – «фоновий» рівень флуоресценції; залежить від втрат енергії збудження під час міграції пігментною матрицею, а також від вмісту молекул хлорофілу, які не мають функціонального зв'язку з реакційними центрами (РЦ);

F_{PL} – («плато») – рівень флуоресценції на час досягнення тимчасового сповільнення зростання її сигналу, зумовлений швидким насиченням енергією реакційних центрів PS2, які не відновлюють первинний акцептор Q_A , тобто не передають енергію на електронно-транспортний ланцюжок (біохімічні реакції, виробництво АТФ – основного «палива» клітини, необхідного для її роботи);

F_p – максимальне значення флуоресценції;

F_t – стаціонарний рівень, який характеризується динамічною рівновагою між процесами, які зумовлюють

збільшення флуоресценції, та процесами, які призводять до її зменшення.

Аналітичним методом було розраховано наступні показники:

K_{pl} – коефіцієнт плато за насичуючого фотосинтезу інтенсивності збуджуючого світла (вище 400 Вт/м²), характеризує частку первинних акцепторів електронів PS2 – Q_A , що не відновлюють реакційні центри:

K_i – коефіцієнт індукції флуоресценції хлорофілу показує частку хлорофілів, які беруть участь у фотосинтезі, від загальної їхньої кількості та визначає ефективність світлової фази фотосинтезу: F_v/F_p ($F_v = F_p - F_0$);

Rfd – коефіцієнт ефективності темнових фотохімічних процесів або коефіцієнт спаду флуоресценції, який характеризує квантову ефективність фотосинтезу (індекс життєздатності): $(F_p - F_t)/F_t$.

Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали з використанням методів описової статистики та дисперсійного аналізу. Достовірність впливу підщепи, типу контейнера та субстрату на флуоресцентні показники фотосинтетичного апарату визначали за допомогою трифакторного ANOVA з подальшим пост-хок тестом Тьюкі ($p \leq 0,05$). Взаємозв'язки між параметрами індукції флуоресценції хлорофілу оцінювали кореляційним аналізом.

Результати дослідження. Оцінювання параметрів індукції флуоресценції хлорофілу листків яблуні сорту Чемпіон на підщепі М9 засвідчило варіабельність функціонального стану пігментного комплексу залежно від технологічних варіантів контейнерного вирощування та складу субстратів (табл. 3). Фоновий рівень флуоресценції (F_0) змінювався у межах 208–283 в. од., при середньому значенні 247,2, стандартному відхиленні 30,2 та коефіцієнті варіації 12,2 %, що характеризує помірний розкид показника між варіантами.

Максимальна флуоресценція (F_p) варіювала від 596 до 955 в. од. і в середньому становила $807,9 \pm 34,7$ (SE). Найвищі значення F_p відзначено у листках плодушок на субстратах 2 і 3, що свідчить про підвищений потенціал

збудження та інтенсивність роботи фотосистеми II за цих комбінацій умов. Співвідношення F_0/F_p коливалося від 23 % до 41 %, відображаючи різний ступінь збереження ефективності первинних фотохімічних реакцій. Потенційна змінна флуоресценція (F_v) у середньому становила $560,9 \pm 33,0$, що вказує на загалом високий функціональний резерв фотосистеми II за досліджених умов.

Інтегральні показники функціональної активності листового апарату демонстрували відносно стабільні значення. Зокрема, коефіцієнт індукції флуоресценції (K_i) змінювався в межах 0,594–0,753, а середній рівень становив $0,689 \pm 0,015$. Індекс Rfd варіював від 1,08 до 1,88 при середньому значенні $1,53 \pm 0,07$. Порівняльний аналіз мінливості свідчить, що найбільший розкид був характерний саме для F_0/F_p ($CV = 33,9\%$), тоді як F_0 , F_p , F_v , K_i та Rfd відзначалися відносно стабільнішим характером варіювання. Загалом це відображає відносну стабільність фотосинтетичного апарату саджанців M9 у межах випробуваних технологічних комбінацій, за одночасної чутливості стрес-індикатора F_0/F_p до зміни умов вирощування (табл. 3).

За результатами трифакторного дисперсійного аналізу (табл. 4) встановлено, що тип контейнера, склад субстрату та тип плодового утворення не мали статистично достовірного впливу на мінімальну флуоресценцію хлорофілу F_0 ($p > 0,05$). Відсутність достовірних змін цього показника свідчить про збереження структурної організації фотосистеми II та відсутність деструктивного впливу досліджуваних агротехнічних факторів на первинні фотохімічні процеси.

Стабільність значень F_0 у всіх варіантах досліду вказує на високу толерантність фотосинтетичного апарату саджанців яблуні до умов контейнерного вирощування. Це підтверджує, що досліджувані субстрати та типи контейнерів не спричиняють порушень енергетичного балансу пігментної матриці, а відмінності між пагонами та плодовими утвореннями мають функціональний, а не стресовий характер.

За результатами трифакторного дисперсійного аналізу встановлено, що тип контейнера, склад субстрату та тип плодового утворення не мали статистично достовірного впливу на коефіцієнт індукції флуоресценції

Таблиця 3

Показники функціональної активності пігментного комплексу листків яблуні сорту Чемпіон на підщепі M9

Тип контейнера	Субстрат	Зразок із плодового утворення/ пагона	F ₀ , в. од.	F _p , в. од.	F ₀ /F _p , %	F _v	K _i , в. од.	Rfd, в. од.
Air Pot (А)	Субстрат 1	Пагін	208	816	25	608	0,745	1,76
		Плодушка	283	955	30	672	0,704	1,84
	Субстрат 2	Пагін	219	885	25	667	0,753	1,24
		Плодушка	220	640	34	420	0,656	1,08
	Субстрат 3	Пагін	214	771	28	557	0,722	1,56
		Плодушка	228	800	29	572	0,715	1,33
C12 (Б)	Субстрат 1	Пагін	272	870	31	598	0,688	1,62
		Плодушка	248	940	26	692	0,736	1,88
	Субстрат 2	Пагін	282	694	41	413	0,594	1,44
		Плодушка	277	955	29	677	0,709	1,49
	Субстрат 3	Пагін	232	596	39	364	0,611	1,44
		Плодушка	283	773	37	491	0,634	1,69
Середнє			247,2	807,9	28,9	560,9	0,689	1,53
SD			30,2	120,3	9,8	114,2	0,053	0,24
SE			8,7	34,7	2,8	33,0	0,015	0,07
CV, %			12,2	14,9	33,9	20,4	7,713	15,89

Таблиця 4

Результати трифакторного ANOVA для показників F_0 , K_i та Rfd у саджанців яблуні на підщепі M9

Фактор	F_0		K_i		Rfd	
	F	p	F	p	F	p
Тип контейнера	0,64	0,59	1,26	0,33	2,04	0,18
Субстрат	0,33	0,77	0,33	0,78	5,21	0,035
Тип зразка	0,92	0,46	0,96	0,44	0,26	0,82
Контейнер × субстрат	0,73	0,53	0,64	0,6	3,04	0,09
Контейнер × тип зразка	0,56	0,63	2,06	0,18	3,04	0,09
Субстрат × тип зразка	0,63	0,6	0,05	0,95	0,56	0,63

Примітка: жирним виділено статистично достовірні відмінності при $p \leq 0,05$.

хлорофілу (K_f , F_v/F_p) ($p > 0,05$). Значення показника в усіх варіантах досліду перебували в межах фізіологічної норми, що свідчить про стабільне функціонування світлової фази фотосинтезу. Проте у контейнері C12 різниця між пагонами та плодовими утвореннями за ефективністю світлової фази фотосинтезу була більш вираженою, ніж в AirPot.

Відсутність достовірних змін коефіцієнта K_f за різних варіантів контейнерів і субстратів свідчить про високу толерантність фотосистеми II до умов контейнерного вирощування. Виявлені тенденції у взаємодії контейнера та типу плодового утворення можуть вказувати на роль морфофункціональних особливостей листків у регуляції ефективності фотосинтезу.

За результатами трифакторного дисперсійного аналізу встановлено, що коефіцієнт спаду флуоресценції хлорофілу (Rfd) істотно залежав від складу субстрату. Зокрема, використання субстрату 2 спричиняло достовірне зниження індексу життєздатності фотосинтетичного апарату ($p \leq 0,05$). Вплив типу контейнера та морфологічного типу пагонів мав характер тенденцій і не досяг рівня статистичної значущості.

Висока чутливість показника Rfd до складу субстрату підтверджує його інформативність для експрес-оцінки функціонального стану рослин. Виявлене зниження Rfd на субстраті 2 може свідчити про порушення узгодженості між світловими та темновими фотохімічними реакціями, що має важливе практичне значення для оптимізації технології контейнерного вирощування саджанців яблуні.

Пост-хок аналіз Tukey HSD (табл. 5) показав, що використання субстрату 2 достовірно знижувало індекс життєздатності фотосинтетичного апарату (Rfd) порівняно з субстратами 1 та 3 ($p \leq 0,05$). Різниця між субстратами 1 і 3 були статистично недостовірні. Це свідчить про значущий вплив складу субстрату на ефективність темнових фотохімічних процесів у саджанців яблуні.

Таблиця 5

Пост-хок порівняння коефіцієнта спаду флуоресценції (Rfd) між субстратами за результатами ANOVA та Tukey HSD

Субстрат	Rfd ($M \pm SE$)	Група (Tukey HSD)
Субстрат 1	$1,62 \pm 0,07$	a
Субстрат 2	$1,21 \pm 0,06$	b
Субстрат 3	$1,65 \pm 0,08$	a

Примітка: Різні літери (a, b) означають статистично достовірні відмінності між середніми при $p \leq 0,05$ (Tukey HSD). Середні з однаковою літерою не відрізняються достовірно.

Функціональні параметри пігментного комплексу листків яблуні сорту Чемпіон на середньорослій підщепі MM106 характеризувалися помірною варіабельністю залежно від умов контейнерного вирощування та складу субстрату (табл. 6). Фоновий рівень флуоресценції хлорофілу (F_0) змінювався в межах 218–288 в. од., а середнє значення становило $242,9 \pm 5,9$ (SE), що

свідчить про відносно невелику мінливість показника між варіантами досліду.

Максимальна флуоресценція (F_p) варіювала від 640 до 1 072 в. од. при середньому значенні $870,8 \pm 45,9$, причому найбільші величини були зафіксовані на субстратах 3 як у пагонів, так і у плодушок. Це вказує на підвищений фотосинтетичний потенціал фотосистеми II за цих умов. Співвідношення F_0/F_p коливалося у межах 22–39 %, відображаючи відмінності у співвідношенні між фоновими втратами енергії та максимальною флуоресцентною відповіддю, а потенційна змінна флуоресценція (F_v) у середньому становила $627,9 \pm 45,9$, що характеризує наявність достатнього резерву функціональної активності фотосистеми.

Інтегральні показники також підтверджують збереження працездатності фотосинтетичного апарату за досліджених умов. Зокрема, коефіцієнт індукції флуоресценції (K_f) змінювався в межах 0,614–0,778 (середнє $0,712 \pm 0,017$), а індекс Rfd – від 1,07 до 2,29 (середнє $1,58 \pm 0,13$). За структурою мінливості найбільша варіабельність була характерна для Rfd (CV = 27,6 %) та F_v (CV = 25,3 %), тоді як інші параметри демонстрували більш стабільний характер. Це свідчить, що світлова фаза та первинні фотохімічні процеси загалом залишалися відносно стабільними, тоді як показники, пов'язані з ефективністю використання енергії та функціональним станом темнових процесів, є чутливішими до зміни умов контейнерного вирощування у саджанців на підщепі MM106 (табл. 4).

За умов контейнерного вирощування саджанців яблуні на підщепі MM106 показник фонового рівня флуоресценції хлорофілу (F_0) також не залежав достовірно від типу контейнера, складу субстрату чи морфологічного типу зразка ($p > 0,05$) (табл. 7). Незважаючи на наявність тенденцій, значущих змін F_0 не спостерігалося, що свідчить про стабільний стан фотосистеми II у рослин цієї підщепи.

Для підщепи MM106 коефіцієнт індукції флуоресценції (KI) значною мірою залежав від типу контейнера та субстрату ($p \leq 0,05$). Найвищі значення K_f спостерігались у саджанців, вирощених в контейнерах AirPot на субстраті 2. Взаємодія типу контейнера та субстрату частково знижувала ефект субстрату 2, що свідчить про складну фізіологічну регуляцію світлової фази фотосинтезу.

Для підщепи MM106 показник коефіцієнта ефективності темнових фотохімічних процесів (Rfd) не змінювався достовірно під впливом типу контейнера, субстрату чи типу зразка ($p > 0,05$). Взаємодії факторів також не мали значного ефекту. Це свідчить про стабільний стан фотосинтетичного апарату у саджанців MM106 у досліджуваних умовах контейнерного вирощування.

Кореляційний аналіз показників індукції хлорофільної флуоресценції засвідчив наявність тісних функціональних зв'язків між більшістю досліджуваних параметрів фотосинтетичного апарату (табл. 8). Найвищий позитивний кореляційний зв'язок встановлено між максимальним рівнем флуоресценції (F_p) та змінною флуоресценцією (F_v) ($r = 0,984$), що є очікуваним з огляду

Таблиця 6

Показники функціональної активності пігментного комплексу листків яблуні сорту Чемпіон на підщепі MM106

Тип контейнера	Субстрат	Зразок із плодового утворення/ пагона	F ₀ , в. од.	F _p , в. од.	F ₀ /F _p , %	F _v	K _i , в. од.	Rfd, в. од.
Air Pot (A)	Субстрат 1	Пагін	256	662	39%	406	0,614	1,20
		Плодушка	288	828	35%	540	0,652	1,07
	Субстрат 2	Пагін	240	660	36%	420	0,636	1,14
		Плодушка	228	640	36%	412	0,644	1,91
	Субстрат 3	Пагін	244	1 072	23%	828	0,772	1,91
		Плодушка	232	1 044	22%	812	0,778	1,93
C12 (Б)	Субстрат 1	Пагін	240	853	28%	613	0,719	1,13
		Плодушка	240	1 012	24%	772	0,763	2,01
	Субстрат 2	Пагін	236	872	27%	636	0,729	1,18
		Плодушка	221	803	27%	582	0,725	1,37
	Субстрат 3	Пагін	272	1 056	26%	784	0,742	1,81
		Плодушка	218	947	23%	730	0,770	2,29
Середнє			242,9	870,8	28,8	627,9	0,712	1,58
SD			20,4	159,1	6,0	159,2	0,059	0,44
SE			5,9	45,9	1,7	45,9	0,017	0,13
CV, %			8,4	18,3	20,9	25,3	8,356	27,58

Таблиця 7

Результати трифакторного ANOVA для показників F_0 , K_i та Rfd у саджанців яблуні на підщепі MM106

Фактор	F_0		K_i		Rfd	
	F	p	F	p	F	p
Тип контейнера	1,64	0,24	10,73	0,01	0,61	0,60
Субстрат	0,38	0,29	7,39	0,07	0,86	0,49
Тип зразка	2,47	0,13	3,90	0,06	0,49	0,67
Контейнер × субстрат	2,47	0,34	5,28	0,12	0,27	0,46
Контейнер × тип зразка	1,36	0,16	0,54	0,64	0,64	0,59
Субстрат × тип зразка	1,71	0,24	1,00	0,21	0,11	0,80

Примітка: жирним виділено статистично достовірні відмінності при $p \leq 0,05$.

Таблиця 8

Матриця парних коефіцієнтів кореляції між показниками індукції хлорофільної флуоресценції

	F_0 , в. од.	F_p , в. од.	F_0/F_p , %	F_v	K_i , в. од.	Rfd, в. од.
F_0 , в. од.	1,00					
F_p , в. од.	0,16	1,00				
F_0/F_p , %	0,07	-0,71	1,00			
F_v	-0,02	0,98	-0,73	1,00		
K_i , в. од.	-0,39	0,83	-0,73	0,92	1,00	
Rfd, в. од.	-0,05	0,54	-0,46	0,56	0,49	1,00

на розрахункову природу показника F_v ($F_p - F_0$) та свідчить про узгоджену зміну цих параметрів. Високий позитивний зв'язок також відзначено між коефіцієнтом індукції (K_i) та F_v ($r = 0,915$), а також між K_i та F_p ($r = 0,834$), що вказує на тісну залежність ефективності фотохімічних процесів від рівня максимальної та змінної флуоресценції.

Показник співвідношення F_0/F_p демонстрував виражені від'ємні кореляції з F_p ($r = -0,713$), F_v ($r = -0,735$)

та K_i ($r = -0,729$), що відображає фізіологічну закономірність: зі зростанням ефективності фотосистеми II та інтенсивності фотохімічних перетворень частка мінімальної флуоресценції у структурі максимуму зменшується. Індекс життєздатності Rfd мав помірні позитивні кореляції з F_p ($r = 0,544$), F_v ($r = 0,560$) та K_i ($r = 0,485$), що свідчить про його узгоджені зміни з інтегральними показниками фотосинтетичної активності, однак із меншою чутливістю порівняно з параметрами індукційної

кривої. Зв'язок R_{fd} із F_0/F_p був від'ємним ($r = -0,462$), що додатково підтверджує його придатність як індикатора функціонального стану фотосинтетичного апарату.

Мінімальна флуоресценція (F_0) не виявила суттєвих кореляцій з іншими показниками ($|r| \leq 0,39$), що свідчить про її відносну незалежність від варіацій ефективності фотохімічних процесів у досліджених варіантах та меншу інформативність як самостійного діагностичного критерію. Загалом встановлена структура кореляційних зв'язків підтверджує узгодженість змін параметрів F_p , F_v , K_i та R_{fd} і свідчить про їх високу діагностичну цінність для комплексної оцінки функціонального стану фотосинтетичного апарату рослин.

Висновки. Упродовж 2024–2025 рр. методом індукції флуоресценції хлорофілу встановлено, що досліджувані технологічні комбінації «тип контейнера × субстрат × тип зразка (пагін/плодушка)» загалом забезпечують фізіологічно прийнятний рівень функціонування фотосистеми II у саджанців яблуні сорту Чемпіон на підщепах М9 та ММ106. Мінімальна флуоресценція F_0 не зазнавала статистично достовірних змін під впливом типу контейнера, субстрату та типу зразка як для підщепи М9, так і для ММ106 ($p > 0,05$), що свідчить про відсутність ознак деструкції/порушення первинних фотохімічних процесів у межах варіантів досліду. Для підщепи М9 коефіцієнт індукції K_i (F_v/F_p) змінювався у межах 0,594–0,753 і не залежав достовірно від типу контейнера, субстрату чи типу зразка ($p > 0,05$). Це вказує на відносну стабільність ефективності світлової фази фотосинтезу за випробуваних умов контейнерного вирощування. Водночас для підщепи М9 індекс життєздатності R_{fd} істотно визначався складом субстрату ($p = 0,035$): субстрат 2 забезпечував достовірно нижчі значення R_{fd} ($1,21 \pm 0,06$) порівняно із субстратами 1 ($1,62 \pm 0,07$) та 3 ($1,65 \pm 0,08$) (Tukey HSD, $p \leq 0,05$). Отже, показник R_{fd} є найбільш чутливим критерієм для вибору субстрату при вирощуванні саджанців на підщепі М9. Для підщепи ММ106 встановлено достовірний вплив типу контейнера на K_i ($p = 0,01$), а вплив субстрату та типу зразка проявлявся на рівні тенденції ($p = 0,07$ та $p = 0,06$ відповідно). Найвищі значення K_i зафіксовано в Air Pot на субстраті 3 ($0,772$ – $0,778$), тоді як у контейнері С12 K_i залишався стабільно високим у всіх субстратах ($0,719$ – $0,770$). Для підщепи ММ106 показник R_{fd} не змінювався достовірно під впливом типу контейнера, субстрату та типу зразка ($p > 0,05$), що свідчить про відносну стабільність темнових фотохімічних процесів у межах досліджених варіантів. Кореляційний аналіз підтвердив високу узгодженість ключових флуоресцентних параметрів: найтісніший зв'язок встановлено між F_p та F_v ($r = 0,984$), а також між K_i і F_v ($r = 0,915$) та K_i і F_p ($r = 0,834$). Показник F_0/F_p мав виражені від'ємні кореляції з F_p , F_v та K_i ($r \approx -0,71$... $-0,74$), що підтверджує його індикаторний характер щодо зниження ефективності фотохімічних перетворень. Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розширенням вибірки та повторенням вимірювань у різні періоди вегетації для перевірки стабільності встановлених ефектів, поглибленим аналізом причин зниження R_{fd} на субстраті 2

у підщепи М9, поєднанням параметрів ІФХ із морфометричними та якісними показниками саджанців для формування інтегральних критеріїв оптимізації технології контейнерного вирощування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Alexander P. D., Bragg N. C. Defining sustainable growing media for sustainable UK horticulture. *Acta Horticulturae*. 2014. № 1034. P. 219–225. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1034.27>
- Amoroso G., Frangi P., Piatti R., Ferrini F., Fini A., Faoro M. Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm // *HortScience*. 2010. Vol. 45, No. 12. P. 1824–1829. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.12.1824>
- Blok C., Urrestarazu M. Substrate growing developments in Europe 2010–2027 [Electronic resource]. *Horticom*. Available at: <https://www.horticom.com/portada/> (accessed: 19.01.2026).
- Burnett S. E., Mattson N. S., Williams K. A. Substrates and fertilizers for organic container production of herbs, vegetables, and herbaceous ornamental plants grown in greenhouses in the United States. *Scientia Horticulturae*. 2016. Vol. 208. P. 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.001>
- Danjon F., Danquechin Dorval A., Meredieu C. *Pinus pinaster* root architecture 2 to 5 years after container rearing and outplanting: tropism loss, root clustering and resilience. *Plant and Soil*. 2025. Vol. 508. P. 441–467. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06807-3>
- Ellis B. W. *Container and small-space gardening for the South: How to grow flowers and food no matter where you live*. Chapel Hill : UNC Press Books, 2024. 320 p.
- ELsysis M., Einhorn T. Air root pruning containers alter root architecture and increase canopy and root growth of apple trees compared to field grown liners. *Acta Horticulturae*. 2020. No. 1281. P. 251–256. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.34>
- Gilman E. F., Paz M. Root system morphology influenced by container design, retention time, and root pruning. *Arboriculture & Urban Forestry*. 2014. Vol. 40. P. 16–26. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2014.002>
- Gilman E. F., Paz M., Harchick C. Effect of container type and root pruning on growth and anchorage after planting *Acer rubrum* L. into landscape soil. *Arboriculture & Urban Forestry*. 2016. Vol. 42, No. 2. P. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2016.006>
- Gilman E. F., Paz M., Harchick C. Effect of eight container types and root pruning during nursery production on root architecture of *Acer rubrum*. *Arboriculture & Urban Forestry*. 2016. Vol. 42, No. 1. P. 31–45. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2016.003>
- Gruda N. Sustainable peat alternative growing media. *Acta Horticulturae*. 2012. No. 927. P. 973–979. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.120>
- Gruda N. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*. 2019. Vol. 9, No. 6. P. 298. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- Gruda N., Caron J., Prasad M., Maher M. J. Growing media. In: *Encyclopedia of Soil Sciences*. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2016. P. 1053–1058.
- Hassan M. K., Kataja R., Pappinen A. *State-of-the-art and business development of a tree seedling*

- nursery: A guidebook on an advanced forest nursery management. Helsinki, 2024. 180 p. Available at: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5255-4>
15. Havryliuk O. S., Kondratenko T. Y., Mezhenyskyj V. M. et al. Photosynthetic potential of *Malus domestica* columnar group. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15421/022401>
 16. Гаврилюк О., Кондратенко Т., Китаєв І. Діагностика функціонального стану рослин колоноподібних сортів яблуні. *Plant and Soil Science*. 2019. Т. 10, № 2. DOI: <https://doi.org/10.31548/agr2019.02.070>
 17. Гаврилюк О., Шевчук Н., Мазур Б. Якісні показники однорічних саджанців яблуні колоноподібного типу. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2023. Т. 19, № 5. DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovid5\(105\).2023.005](https://doi.org/10.31548/dopovid5(105).2023.005)
 18. Kasampalis D. S., Tsouvaltzis P., Ntoulos K. et al. The use of digital imaging, chlorophyll fluorescence and Vis/NIR spectroscopy in assessing the ripening stage and freshness status of bell pepper fruit. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 187. P. 106265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106265>
 19. Kim H. S., Kim K. H. Physical properties of the horticultural substrate according to mixing ratio of peatmoss, perlite and vermiculite. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 2011. Vol. 44, No. 3. P. 321–330. DOI: <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2011.44.3.321>
 20. Kim J. K., Shawon M. R. A., An J. H. et al. Influence of substrate composition and container size on the growth of tissue culture propagated apple rootstock plants. *Agronomy*. 2021. Vol. 11, No. 12. P. 2450. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122450>
 21. Kormanek M., Malek S., Tabor S. Resistance to pulling seedlings out of the nursery container. *Forests*. 2024. Vol. 15, No. 12. P. 2157. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15122157>
 22. Larcher F., Scariot V. Assessment of partial peat substitutes for the production of *Camellia japonica*. *HortScience*. 2009. Vol. 44, No. 2. P. 312–316. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.312>
 23. Majsztik J., Owen J. S. Improving nutrient management in the cultivation of ornamental plants in greenhouse, container and field production. *Achieving Sustainable Cultivation of Ornamental Plants*. Cambridge : Burleigh Dodds Science Publishing, 2020. P. 279–302. DOI: <https://doi.org/10.19103/AS.2020.0066.11>
 24. Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С. Функціональна діагностика адаптивності інтродукованих видів роду сніжноягідник (*Symphoricarpos Duhamel*) в умовах Києва. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2018. Т. 71, № 1. DOI: <https://doi.org/10.31548/dopovid18.01.010>
 25. McGrath D., Henry J., Munroe R., Williams C. From propagation to field: Influence of tray design on tree seedling quality and performance. *Journal of Environmental Horticulture*. 2021. Vol. 39, No. 1. P. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.24266/0738-2898-39.1.33>
 26. Nazim S., Gruda N. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*. 2019. Vol. 9, No. 6. P. 298. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
 27. Raviv M. Can compost improve sustainability of plant production in growing media?. *Acta Horticulturae*. 2017. No. 1168. P. 119–133. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1168.16>
 28. Салаш П., Вальтера Ю. Субстрати для розсадників. *Садівництво*. 2005. № 57. С. 367–371.
 29. Savvas D., Gianquinto G., Tüzel Y., Gruda N. Soilless culture. *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops*. Rome : FAO, 2013. P. 303–354.
 30. Совакова М., Соваков О., Китаєв О. Екологічна толерантність видів липи (*Tilia* L.) за фото- та термоіндукованими змінами флуоресценції хлорофілу листків. *Український журнал лісівництва та деревинознавства*. 2014. № 198, Ч. 2. С. 285–293.
 31. Телепенько Ю. Ю., Сіленко В. О. Структурно-функціональний стан листків нових сортів ожини (*Rubus* L.) в умовах Лісостепу України. *Plant and Soil Science*. 2019. № 286. С. 260–266.
 32. Tuxun A., Xiang Y., Shao Y. et al. Soilless cultivation: precise nutrient provision and growth environment regulation under different substrates. *Plants*. 2025. Vol. 14, No. 14. P. 2203. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14142203>
 33. Vasylenko O., Kondratenko T., Havryliuk O. et al. The study of the productivity potential of grape varieties according to the indicators of functional activity of leaves. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2021. Vol. 15. P. 639–647. DOI: <https://doi.org/10.5219/1638>
 34. Venig A., Teuşdea A. C., Peticilă A. Optimizing nursery production of apple trees: assessing the dose response to water and fertilizer in two cultivars. *Horticulturae*. 2025. Vol. 11, No. 12. P. 1425. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11121425>
 35. Larcher F., Scariot V. Assessment of partial peat substitutes for the production of *Camellia japonica*. *HortScience*. 2009. Vol. 44, No. 2. P. 312–316. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.312>
 36. Kim H. S., Kim K. H. Physical properties of the horticultural substrate according to mixing ratio of peatmoss, perlite and vermiculite. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 2011. Vol. 44, No. 3. P. 321–330. DOI: <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2011.44.3.321>
 37. Tuxun A., Xiang Y., Shao Y., Son J. E., Yamada M., Yamada S., Tagawa K., Baiyin B., Yang Q. Soilless cultivation: precise nutrient provision and growth environment regulation under different substrates. *Plants*. 2025. Vol. 14, No. 14. P. 2203. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14142203>

REFERENCES:

1. Alexander, P. D., & Bragg, N. C. (2014). Defining sustainable growing media for sustainable UK horticulture. *Acta Horticulturae*, 1034, 219–225. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1034.27>
2. Amoroso, G., Frangi, P., Piatti, R., Ferrini, F., Fini, A., & Faoro, M. (2010). Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm. *HortScience*, 45(12), 1824–1829. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.12.1824>
3. Blok, C., & Urrestarazu, M. (2026). Substrate growing developments in Europe 2010–2027. *Horticom*. <https://www.horticom.com/portada/>

4. Burnett, S. E., Mattson, N. S., & Williams, K. A. (2016). Substrates and fertilizers for organic container production of herbs, vegetables, and herbaceous ornamental plants grown in greenhouses in the United States. *Scientia Horticulturae*, 208, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.001>
5. Danjon, F., Danquechin Dorval, A., & Meredieu, C. (2025). *Pinus pinaster* root architecture 2 to 5 years after container rearing and outplanting: Tropism loss, root clustering and resilience. *Plant and Soil*, 508, 441–467. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06807-3>
6. Ellis, B. W. (2024). Container and small-space gardening for the South: How to grow flowers and food no matter where you live. UNC Press Books.
7. ELsyy, M., & Einhorn, T. (2020). Air root pruning containers alter root architecture and increase canopy and root growth of apple trees compared to field grown liners. *Acta Horticulturae*, 1281, 251–256. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.34>
8. Gilman, E. F., & Paz, M. (2014). Root system morphology influenced by container design, retention time, and root pruning. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40, 16–26. <https://doi.org/10.48044/jauf.2014.002>
9. Gilman, E. F., Paz, M., & Harchick, C. (2016a). Effect of eight container types and root pruning during nursery production on root architecture of *Acer rubrum*. *Arboriculture & Urban Forestry*, 42(1), 31–45. <https://doi.org/10.48044/jauf.2016.003>
10. Gilman, E. F., Paz, M., & Harchick, C. (2016b). Effect of container type and root pruning on growth and anchorage after planting *Acer rubrum* L. into landscape soil. *Arboriculture & Urban Forestry*, 42(2), 73–85. <https://doi.org/10.48044/jauf.2016.006>
11. Gruda, N. (2012). Sustainable peat alternative growing media. *Acta Horticulturae*, 927, 973–979. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.120>
12. Gruda, N. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soil-less culture systems. *Agronomy*, 9(6), 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
13. Gruda, N., Caron, J., Prasad, M., & Maher, M. J. (2016). Growing media. In R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of soil sciences* (3rd ed., pp. 1053–1058). CRC Press.
14. Hassan, M. K., Kataja, R., & Pappinen, A. (2024). *State-of-the-art and business development of a tree seedling nursery: A guidebook on an advanced forest nursery management*. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5255-4>
15. Havryliuk, O. S., Kondratenko, T. Y., Mezhenyskyj, V. M., Shevchuk, L. M., Baranovska, O. D., Tonkha, O. L., Litvinov, D. V., & Mazur, B. M. (2024). Photosynthetic potential of *Malus domestica* columnar group. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 15(1), 3–9. <https://doi.org/10.15421/022401>
16. Havryliuk, O., Kondratenko, T. E., & Kytaiev, O. I. (2019). Diahnostyka funktsionalnoho stanu roslyn kolonopodibnykh sortiv yabluni [Diagnostics of the functional state of plants of colonial varieties of apple]. *Plant and Soil Science*, 10(2). <https://doi.org/10.31548/agr2019.02.070> [in Ukrainian]
17. Havryliuk, O., Shevchuk, N., & Mazur, B. (2023). Yakisni pokaznyky odnorichnykh sadzhantsiv yabluni kolonopodibnoho typu [Quality indicators of one-year columnar apple seedlings]. *Naukovi dopovidi Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy*, 19(5). [https://doi.org/10.31548/dopovidi5\(105\).2023.005](https://doi.org/10.31548/dopovidi5(105).2023.005) [in Ukrainian]
18. Kasampalis, D. S., Tsouvaltzis, P., Ntoulos, K., Gertsis, A., Gitas, I., & Siomos, A. S. (2021). The use of digital imaging, chlorophyll fluorescence and Vis/NIR spectroscopy in assessing the ripening stage and freshness status of bell pepper fruit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106265. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106265>
19. Kim, H. S., & Kim, K. H. (2011). Physical properties of the horticultural substrate according to mixing ratio of peatmoss, perlite and vermiculite. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44(3), 321–330. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2011.44.3.321>
20. Kim, J. K., Shawon, M. R. A., An, J. H., Yun, Y. J., Park, S. J., Na, J. K., & Choi, K. Y. (2021). Influence of substrate composition and container size on the growth of tissue culture propagated apple rootstock plants. *Agronomy*, 11(12), 2450. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122450>
21. Kormanek, M., Malek, S., & Tabor, S. (2024). Resistance to pulling seedlings out of the nursery container. *Forests*, 15(12), 2157. <https://doi.org/10.3390/f15122157>
22. Larcher, F., & Scariot, V. (2009). Assessment of partial peat substitutes for the production of *Camellia japonica*. *HortScience*, 44(2), 312–316. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.312>
23. Majsztrik, J., & Owen, J. S. (2020). Improving nutrient management in the cultivation of ornamental plants in greenhouse, container and field production. In *Achieving sustainable cultivation of ornamental plants* (pp. 279–302). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2020.0066.11>
24. Mamonova, R. Y., Kytaiev, O. I., Shykhaliyeva, H. M., Slyusar, S. I., & Kolesnyk, Y. S. (2018). Funktsionalna diahnostyka adaptivnosti introdukovanykh vydiv rodu snizhnoiahidnyk (*Symphoricarpos* DuRoi) v umovakh kyieva [Functional diagnostics of adaptability of introduced species of the genus *Symphoricarpos* in Kyiv city conditions]. *Naukovi dopovidi Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy*, 1(71). <https://doi.org/10.31548/dopovidi2018.01.010> [in Ukrainian]
25. McGrath, D., Henry, J., Munroe, R., & Williams, C. (2021). From propagation to field: Influence of tray design on tree seedling quality and performance. *Journal of Environmental Horticulture*, 39(1), 33–40. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-39.1.33>
26. Nazim, S., & Gruda, N. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(6), 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
27. Raviv, M. (2017). Can compost improve sustainability of plant production in growing media? *Acta Horticulturae*, 1168, 119–133. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1168.16>
28. Salash, P., & Valtera, Yu. (2005). Substraty dlia rozsadnykh [Substrates for nurseries]. *Sadivnytstvo*, 57, 367–371. [in Ukrainian]
29. Savvas, D., Gianquinto, G., Tüzel, Y., & Gruda, N. (2013). Soilless culture. In W. Baudoin (Ed.), *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops* (pp. 303–354). FAO.

30. Sovakova, M., Sovakov, O., & Kytaiev, O. (2014). Ekologichna tolerantnist vydiv lypy (*Tilia* L.) za foto- ta termoindukovanyymi zminamy fluorestsentsii khlorofilu lystkiv [Ecological tolerance of linden species (*Tilia* L.) by photo- and thermo-induced changes in chlorophyll fluorescence of leaves]. *Ukrainskyi zhurnal lisivnytstva ta derevynoznavstva*, 198(2), 285–293. [in Ukrainian]
31. Telepenko, Y. Y., & Silenko, V. O. (2019). Strukturno-funktsionalnyi stan lystkiv novykh sortiv ozhyny (*Rubus* L.) v umovakh Lisostepu Ukrainy [Structural and functional state of the leaves of the blackberry (*Rubus* L.) new cultivars in the conditions of the Ukraine's Lisosteppe]. *Plant and Soil Science*, 286, 260–266. [in Ukrainian]
32. Tuxun, A., Xiang, Y., Shao, Y., Son, J. E., Yamada, M., Yamada, S., Tagawa, K., Baiyin, B., & Yang, Q. (2025). Soilless cultivation: Precise nutrient provision and growth environment regulation under different substrates. *Plants*, 14(14), 2203. <https://doi.org/10.3390/plants14142203>
33. Vasylenko, O., Kondratenko, T., Havryliuk, O., Andrusyk, Y., Kutovenko, V., Dmytrenko, Y., Grevtseva, N., & Marchyshyna, Y. (2021). The study of the productivity potential of grape varieties according to the indicators of functional activity of leaves. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 15, 639–647. <https://doi.org/10.5219/1638>
34. Venig, A., Teşde, A. C., & Peticilă, A. (2025). Optimizing nursery production of apple trees: Assessing the dose response to water and fertilizer in two cultivars. *Horticulturae*, 11(12), 1425. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11121425>

Романенко В.В., Гаврилюк О.С. Індукція флуоресценції листків саджанців сорту чемпіон як індикатор ефективності різних типів субстратів та контейнерів

Мета. Оцінити фізіологічний стан саджанців яблуні (*Malus domestica* Borkh.) сорту 'Чемпіон' за показниками індукції флуоресценції хлорофілу з метою експрес-діагностики ефективності різних субстратів і типів контейнерів у технології контейнерного вирощування. **Методи.** Дослідження проведено у 2024–2025 рр. на базі садового центру «Пісарді» (Бучанський район Київської області) на підщепах М9 та ММ106. Саджанці вирощували в контейнерах об'ємом 12 л типу Air Pot (ERCOLE «SP30») та С12 («В28») із використанням трьох варіантів субстратів: верхній торф; торф із подрібненою корою хвойних порід (1:1); торф, кора та супіщаний ґрунт (2:1:1). Кислотність субстратів коригували вапнуванням до рН 6,7–6,8. Експрес-діагностику проводили в третій декаді липня методом індукції флуоресценції хлорофілу з використанням портативного хронофлуорометра «Floratest» у п'ятикратному повторенні з визначенням параметрів F_0 , F_p , F_0/F_p , F_v , K_i (F_v/F_p) та Rfd ($(F_p - F_t)/F_t$). Статистичну обробку здійснювали методом трифакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з пост-хок тестом Тьюкі ($p \leq 0,05$) і кореляційного аналізу. **Результати.** Встановлено, що мінімальна флуоресценція F_0 не зазнавала статистично достовірних змін під впливом типу контейнера, складу субстрату та морфологічного типу зразка (пагін/плодушка) на обох підщепах ($p > 0,05$), що свідчить про відсутність деструктивного впливу досліджуваних технологічних комбінацій на первинні фотохімічні процеси.

Для підщепи М9 значення F_0 становили 208–283 в. од., F_p – 596–955 в. од., K_i – 0,594–0,753, Rfd – 1,08–1,88; при цьому лише склад субстрату достовірно впливав на показник Rfd ($F=5,21$; $p=0,035$), зумовлюючи його зниження у варіанті субстрату 2. Для підщепи ММ106 параметри перебували в межах: F_0 – 218–288 в. од., F_p – 640–1072 в. од., K_i – 0,614–0,778, Rfd – 1,07–2,29; статистично значущим чинником для K_i був тип контейнера ($F=10,73$; $p=0,01$), тоді як вплив субстрату та типу зразка проявлявся на рівні тенденцій. Кореляційний аналіз засвідчив тісний зв'язок між F_p і F_v ($r=0,984$) та високу узгодженість K_i з F_v ($r=0,915$) і F_p ($r=0,834$), що підтверджує високу діагностичну інформативність інтегральних показників. **Висновки.** Отримані результати обґрунтовують доцільність використання параметрів індукції флуоресценції хлорофілу для швидкого скринінгу технологічних комбінацій «контейнер × субстрат» у виробництві саджанців яблуні із закритою кореневою системою. Найбільш чутливими діагностичними маркерами виявилися показник Rfd для підщепи М9 та коефіцієнт індукції K_i для підщепи ММ106.

Ключові слова: яблуня, індукція флуоресценції хлорофілу, контейнерне вирощування, субстрат, підщепа, фотосистема II, Rfd .

Romanenko V.V., Havryliuk O.S., Chlorophyll fluorescence induction in 'Champion' apple saplings as an indicator of the efficiency of various substrate types and containers

Purpose. To assess the physiological status of apple (*Malus domestica* Borkh.) nursery trees of the cultivar 'Champion' using chlorophyll fluorescence induction as a rapid diagnostic tool for evaluating the effectiveness of different substrates and container types in container-based production. **Methods.** The study was conducted in 2024–2025 at the "Pisardi" garden center (Bucha district, Kyiv region, Ukraine) on the M9 and MM106 rootstocks. Nursery trees were grown in two 12-L containers: Air Pot (ERCOLE "SP30") and C12 ("B28"), using three substrate formulations: high-moor peat; peat with shredded conifer bark (1:1); and peat, bark, and sandy loam soil (2:1:1). Substrate acidity was adjusted by liming to pH 6.7–6.8. Rapid diagnostics were carried out in the third decade of July using chlorophyll fluorescence induction measured with a portable chronofluorometer "Floratest" in five replications. The parameters F_0 , F_p , F_0/F_p , F_v , K_i (F_v/F_p), and Rfd ($(F_p - F_t)/F_t$) were analyzed. Factor effects were evaluated by three-way ANOVA followed by Tukey's post-hoc test ($p \leq 0.05$) and correlation analysis. **Results.** The minimum fluorescence F_0 showed no statistically significant changes under the effects of container type, substrate composition, or sample morphotype (shoot/spur) on either rootstock ($p > 0.05$), indicating the absence of a destructive impact of the tested technological combinations on primary photochemical processes. For the M9 rootstock, F_0 ranged from 208 to 283 a.u., F_p from 596 to 955 a.u., K_i from 0.594 to 0.753, and Rfd from 1.08 to 1.88; substrate composition was the only factor that significantly affected Rfd ($F=5.21$; $p=0.035$), with substrate 2 causing a decrease in the vitality index. For the MM106 rootstock, the parameters ranged as follows: F_0 218–288 a.u., F_p 640–1072 a.u., K_i 0.614–0.778, and Rfd 1.07–2.29; container type was a significant factor for K_i ($F=10.73$; $p=0.01$), whereas the effects of substrate and sample type were observed only as trends. Correlation analysis revealed a strong relationship

between Fp and Fv ($r=0.984$) and a high consistency of Ki with Fv ($r=0.915$) and Fp ($r=0.834$), confirming the diagnostic value of integral indicators. **Conclusions.** The results substantiate the feasibility of using chlorophyll fluorescence induction parameters for rapid screening of “container × substrate” combinations in the production of apple nursery

trees with a closed root system. The most sensitive diagnostic markers were Rfd for the M9 rootstock and Ki for the MM106 rootstock.

Key words: apple, chlorophyll fluorescence induction, container cultivation, substrate, rootstock, photosystem II, Rfd.

Дата першого надходження статті до видання: 09.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 06.05.2026