

О. І. ПРИСЯЖНЮК, М. О. ЧЕРНЯК, В. В. МУСІЧ,
Н. О. КОНОНЮК, О. П. ШЕВЧЕНКО, О. Ю. ПОЛОВИНЧУК,
С. М. ШКЛЯРУК, Е. Е. НАВРОЦЬКА, О. В. КОПИТОВ,
М. В. МАРКІВ, Є. В. БОЮН, В. В. СЛОБОДЯНЮК,
Б. М. БОРИСЕНКО, О. В. ЛУК'ЯНЧУК, В. І. КОВАЛЬ



ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ РОСЛИН З ВИКОРИСТАННЯМ ПОРТАТИВНИХ ФОТОМЕТРІВ ВИДИМОГО СПЕКТРУ

НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

КИЇВ 2025

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР І ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

**О. І. Присяжнюк, М. О. Черняк, В. В. Мусіч,
Н. О. Кононюк, О. П. Шевченко, О. Ю. Половинчук,
С. М. Шклярук, Е. Е. Навроцька, О. В. Копитов,
М. В. Марків, Є. В. Боюн, В. В. Слободянюк,
Б. М. Борисенко, О. В. Лук'янчук, В. І. Коваль**

**ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ РОСЛИН
З ВИКОРИСТАННЯМ ПОРТАТИВНИХ
ФОТОМЕТРІВ ВИДИМОГО СПЕКТРУ**

Науково-методичні рекомендації

Київ • 2025

УДК 581.1:535.34:631

*Рекомендовано до опублікування вченою радою
Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
(протокол № 18 від 10.11.2025)*

Рецензенти:

О. М. Ганженко, доктор с.-г. наук, с. н. с.;

Я. П. Макух, доктор с.-г. наук, професор

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН

Присяжнюк О. І., Черняк М. О., Мусіч В. В., Кононюк Н. О., Шевченко О. П., Половинчук О. Ю., Шклярчук С. М., Навроцька Е. Е., Копитов О. В., Марків М. В., Боюн Є. В., Слободянюк В. В., Борисенко Б. М., Лук'янчук О. В., Коваль В. І. Оцінювання стану рослин з використанням портативних фотометрів видимого спектру: науково-методичні рекомендації / НААН України, Ін-т біоенергет. культ. і цукр. буряків. Електрон. вид. Київ : ІБКіЦБ НААН, 2025. 37 с.

ISBN 978-617-8706-23-4 (PDF)

Узагальнено теоретичні та практичні аспекти оцінювання фізіологічного стану рослин із використанням портативних фотометрів видимого спектру. Розглянуто принципи аналізу флуоресценції хлорофілу, характеристики сучасних приладів, методики їх застосування в умовах *in vitro* та польових досліджень. Наведено приклади визначення стресових станів сільськогосподарських культур за показниками фотосистеми II та вмісту проліну. Окрему увагу приділено можливостям ранньої діагностики абіотичних стресів, зокрема посухи, та визначенню критичних фаз росту й розвитку рослин.

Призначено для науковців, агрономів, аспірантів та студентів закладів вищої освіти аграрного профілю.

УДК 581.1:535.34:631

ISBN 978-617-8706-23-4 (PDF)

© Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН, 2025

© Колектив авторів, 2025

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Теоретичні основи застосування та технологічні параметри фотометрів видимого спектру	6
2. Вивчення параметрів стресових станів рослин за допомогою спектрофотометрів в умовах <i>in vitro</i> ...	14
3. Дослідження стресових станів рослин за допомогою фотометрів видимого спектру в польових умовах	20
4. Алгоритм діагностування стресу рослин у польових умовах	26
4.1. Визначення параметрів стресових станів рослин	27
4.2. Ідентифікування основних видів стресу	28
4.3. Моделювання стресових станів рослин	29
Список використаних джерел	36

Вступ

На сьогодні основним джерелом інформації для формування прогнозів урожайності сільськогосподарських культур залишаються результати польових обстежень стану посівів і звіти регіональних експертів, отримані на основі вибіркового вимірювань. Такий підхід має виражений суб'єктивний характер, що зумовлює його обмежену точність. Навіть застосування безпілотних літальних апаратів для оцінки стану посівів не забезпечує повної інформації щодо росту і розвитку рослин. Це пояснюється тим, що лише на початкових етапах вегетації, коли рослини ще не повністю контролюють поверхню поля, можливо з достатньою точністю дистанційно оцінити їх густоту. У разі забур'янення посівів або формування культурними рослинами листкового апарату, площа якого у 4–5 разів перевищує площу поля, сучасні дистанційні технології не дозволяють коректно оцінити фізіологічний стан рослин.

Сучасні технології вирощування сільськогосподарських культур у переважній більшості базуються на забезпеченні оптимальних умов живлення для формування високопродуктивного асиміляційного апарату. Оптимальний розвиток листкового апарату позитивно впливає на накопичення сухої речовини та рівень урожайності. За умов інтенсифікації агротехнологій подальше підвищення продуктивності без тонкої оптимізації всіх елементів технології вирощування стає неможливим. У зв'язку з цим актуальним є застосування сучасних методів і приладів діагностики фізіологічного стану посівів для точного прогнозування врожайності та якості сільськогосподарської продукції.

Методика оцінки стану рослин із використанням портативних спектрофотометрів видимого спектру забезпечує високий рівень технологічності, комплексність аналізу та адаптацію технологій вирощування до реальних потреб рослин. Її впровадження дозволяє знизити витрати на добрива, засоби захисту рослин і пально-мастильні матеріали приблизно на 20 %, а також підвищити валове виробництво на 15–20 % завдяки оптимізації технологічних процесів. Запропоновану методику доцільно впроваджувати у господарствах різних форм власності, що займаються вирощуванням сільськогосподарських культур.

Актуальність теми досліджень полягає у комплексному вивченні питань діагностики стану рослин із використанням спектрофотометрів видимого спектру. Визначення фізіологічного стану рослин на різних етапах росту і розвитку дає змогу більш повно адаптувати елементи технології вирощування до їхніх потреб. Запропоновані методи аналізу

спрямовані не лише на підвищення точності та інформативності досліджень, але й дозволяють здійснювати неруйнівний моніторинг одних і тих самих рослин від появи сходів до збирання врожаю.

З розвитком інформаційних технологій з'явилася реальна можливість широкого впровадження комп'ютерних методів у сільське господарство. Для цих цілей провідні наукові установи світу та значна частина виробників сільськогосподарської продукції використовують спеціалізовані прилади діагностики рослин. Наявні методи оцінки стану посівів здебільшого базуються на двох підходах – розрахунку індексу NDVI або визначенні індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ, ефект Каутського). У зв'язку з цим серед мобільних діагностичних приладів практично відсутні універсальні високоточні системи, придатні для різних культур. Більшість із них створювалися під конкретні культури або мають обмежену функціональність і потребують постійного залучення фахівців для інтерпретації результатів.

Індекс NDVI обчислюється як нормалізована різниця відбиття у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах спектра і використовується для виявлення ділянок поля, що потребують агротехнічних втручань. Водночас бур'яни, особливо споріднені з культурними рослинами, мають подібні спектральні характеристики, що істотно знижує інформативність цього показника. Іншим підходом є аналіз флуоресценції хлорофілу, який дозволяє досліджувати перебіг фотохімічних процесів у живих рослинах. Інтенсивність флуоресценції істотно змінюється залежно від стану фотосинтетичного апарату, що лежить в основі індукційної кривої флуоресценції хлорофілу або ефекту Каутського. Обмеження цього методу пов'язані з необхідністю фіксації листка та використанням переважно мобільних приладів.

Загалом NDVI-аналіз працює у спектральному діапазоні 625–750 нм і вище, тоді як методи ІФХ охоплюють діапазон 670–770 нм. Водночас у рослинах наявні різні фотопігменти – хлорофіли а і b, каротиноїди, флавіни, меланіни, кожен з яких має власні спектри поглинання та флуоресценції. Комплексний аналіз цих спектрів дозволяє отримати детальну інформацію про стан фотосинтетичного апарату, забезпеченість елементами живлення, водний режим, наявність стресу та ураження листового апарату.

Таким чином, спільними недоліками існуючих методів діагностики стану рослин є обмеженість застосування, аналіз лише частини спектра, висока вартість обладнання, низька гнучкість приладів, відсутність відкритих методик аналізу та обмежена придатність для різних культур. Вирішення цих проблем активно досліджується у провідних наукових центрах світу та в Україні, зокрема в Інституті кібернетики НАН України.

1. Теоретичні основи застосування та технологічні параметри фотометрів видимого спектру

Аналіз видимого спектру, що випромінюється листками рослин, базується, зокрема, на методах визначення слідів флуоресценції хлорофілу, для чого необхідне спеціальне обладнання – фотометри.

Усі пристрої, що вимірюють індукцію флуоресценції хлорофілу, можна поділити на дві категорії: експериментальні установки та серійні прилади. Серійні прилади зазвичай створюються під конкретні завдання, тому їхні можливості обмежені, проте вони мають перевагу у вигляді портативності. Наприклад, фірма Heinz Walz GmbH випускає серію флуорометрів (понад 11 моделей) з різним рівнем портативності та спеціалізації. Функції флуорометра та газового аналізатора поєднані у приладі LI-6400-40 (LI-COR, США), що дає змогу одночасно вимірювати поглинання CO₂ та індукційні переходи флуоресценції хлорофілу.

Перелік найвідоміших приладів для вимірювання індукції флуоресценції хлорофілу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика спектрофотометрів

Назва приладу	Виробник	Особливості конструкції та роботи	Вимірювані показники
1	2	3	4
Флуорометр FluoroPenFm-100	PSI – Photon Systems Instruments, Чехія	Прилади модуляційного типу мають подібні сенсорні модулі, до яких належать вузли програмованого опромінювання, прийому, виділення та вимірювання сигналів флуоресценції. Інтенсивність актинічного опромінення регульована в межах від 0 до 3000 МКВ на хвилях 450 та 650 нм. Прийом сигналів флуоресценції відбувається в діапазоні хвиль від 697 до 750 нм. Сенсорний модуль розміщено всередині приладу, а опромінення листка і прийом флуоресценції здійснюють через спеціальне вікно.	

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
Флуорометр FMS-1	Hansatech Instruments, Велика Британія	Конструктивно розділений на затискач листка та оптоелектронний вузол, який розміщений у блоці керування і з'єднаний із затискачем оптоволоконним кабелем. Сенсорний модуль має джерела опромінення з такими технічними параметрами: довжина хвилі опромінення – 470, 594, 735 нм, інтенсивність AL – 0–3000 мкЕ, 50 кроків, SP – 0–20 000 мкЕ, 100 кроків. Джерело світла – галогенна лампа. Довжина оптоволоконного кабелю – 1,5–10 м. Пляма опромінення має діаметр 7 мм.	
Хлорофілометр CCV-200 plus	ADC BioScientific, Велика Британія	Подібний до сенсорів хлорофіл-спектрометрів та хлорофіл-флуорометрів, оскільки має джерело опромінювання здебільшого на хвилі поглинання хлорофілу та фотоприймач у вигляді фотодіода, інтегрованого з підсилювачем, які орієнтовані на освітлену пляму діаметром 4–8 мм з протилежної до опромінення сторони листка.	Індекс вмісту хлорофілу або ICH
Флуорометр OS5P+	OPTI-Sciences, США	Конструктивно розділений на затискач листка та оптоелектронний блок, який розміщений у приладі і з'єднаний із затискачем оптоволоконним кабелем. Сенсорний модуль створює режими двокольорового освітлення на хвилях 450 та 660 нм. Фотоприймачем є Pin-фотодіод у спектральній області 700–750 нм. Автоперемикання від 1 до 10 000 точок у секунду, залежно від тесту та фази тесту. Автоматизована процедура для оптимального встановлення модульованої інтенсивності світла. Мультиспалах F _M -корекція для всіх адаптованих до світла протоколів.	Y _(II) , ETR, ФАР, температура листка, F _V /F _M , F _V /F _O , F _O , F _M , F _V , F _O ', F _M s, F _S , gETR _{MAX} , I _k , Hendrickson (Y(NPQ), Y(NO)), Y _(II) , NPQ, F _V /F _M), Kramer (q _L , Y(NPQ), Y(NO), Y _(II) , F _V /F _M), Puddle (NPQ, q _N , q _P , Y(II), F _V /F _M), q _E , q _M , q _T , q _Z , i q _L -, OJIP, ABS/RC, TR _O /RC, DI _O /CS, ET _O /RC, TR _O /ABS, ET _O /TR _O , ET _O /CS, RC/CS _O , RC/CS _M , S, M, T.

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
Флуорометр OS3ор +	OPTI-Sciences, США	Конструктивно прилад представлений моноблоком з окремими кліпсами, що використовуються для темної адаптації зразка. Фотодіодний детектор має смуговий фільтр 700–750 нм з використанням модульованого червоним імпульсом світла, генерованого масивом червоних світлодіодів 660 нм, та змінною частотою дискретизації від 10 мкс до секунд	F_V/F_M та F_V/F_0 , а також параметри протоколу Штрассера, включаючи: O , t_{100} , K , J , I , P , t_{FM} , PI_{ABS} , V_j , M_0 та A
OSip	OPTI-Sciences, США	Конструктивно розділений на вимірювальний та основний блок. Для насичення використовується білий світлодіод із фільтром 690 нм. Для ідентифікації застосовується метод імпульсної модуляції за допомогою PIN-фотодіода зі смуговим фільтром 700 ~ 750 нм. Автоперемикання від 10 до 10 000 точок у секунду, залежно від фази тесту, тривалість тесту від 0,1 секунди до 12 годин	$\Delta F_M/F_M$ або $Y(II)$, F_V/F_M , NPQ , $Y(NPQ)$, $Y(NO)$, ETR_{MAX} , α , I_k , I_m , ΦAP , ETR та температура листа
Набір для визначення стресу рослин PSK	OPTI-Sciences, США	Конструктивно представлений двома окремими приладами. Виробляється зі світлодіодами з червоним модульованим світлом (660 нм з фільтром 690 нм) або синім модульованим світлом (450 нм). Містить два датчики RGB для вимірювання відбивної здатності, пропускання та поглинання листків, датчик ΦAP , та фотодіод із смуговим фільтром від 700 до 750 нм.	$Y(II)$ та F_V/F_M , поглинання листа, включаючи коефіцієнт пропускання та ΦAP
Вимірювач вмісту хлорофілу CCM-200plus	OPTI-Sciences, США	Конструктивно виконаний у формі моноблоку. Є вдосконаленою версією поширеного хлорофілометра CCV-200 plus. Вимірює оптичне поглинання у двох різних смугах хвиль: 653 нм (хлорофіл) та 931 нм. Детектор: кремнієвий фотодіод із вбудованим підсилювачем для вимірювання поглинання, контролю потужності та компенсації температури	Індекс вмісту хлорофілу, або ICH
Флуорометр F_V/F_M	OPTI-Sciences, США	Моноблок, що використовує кліпсу для темної адаптації зразків. Джерелом світла є масив червоних світлодіодів 660 нм з фільтром 690 нм. Для ідентифікації використовується фотодіод зі смуговим фільтром від 700 до 750 нм.	F_V/F_M , F_V/F_0 , F_0 , та F_M

<i>Продовження таблиці 1</i>			
1	2	3	4
Система моніторингу стресу рослин PSP32	OPTI-Sciences, США	Блок вимірювання стану рослин, що дозволяє приєднати від 1 до 32 вимірювальних головок. Опроміювання зразків здійснюється за допомогою синього світлодіоду 455 нм з шириною напівдіапазону 18 нм. Також може використовуватись червоний світлодіод 640 нм, з шириною напівдіапазону 18 нм. Для ідентифікації застосовується PIN-фотодіод із смуговим фільтром 700–750 нм. Автоперемикання від 1 до 10 000 точок на секунду, залежно від тесту та фази тесту. Призначений для вимірювання зразків 24 години на добу, 7 днів на тиждень, протягом місяців. Працює від сонячної енергії, заряду акумулятора або струму мережі. Дані можуть бути отримані за допомогою Wi-Fi, стільникового телефону, картки даних SD, радіостанції точка-точка, Ethernet, супутникового телефону або USB-накопичувача.	$Y_{(II)}$, ETR, ФАР, температура листя, F_{MS} , F , F_V/F_M , F_V/F_0 , F_0 , F_M , F_V , F_0' , Hendrickson ($Y(NPQ)$), $Y(NO)$, $Y_{(II)}$, NPQ, F_V/F_M), Kramer (q_L , $Y(NPQ)$, $Y(NO)$, $Y_{(II)}$, F_V/F_M), Puddle (NPQ, q_N , q_P , $Y_{(II)}$, F_V/F_M), q_E , q_M , q_T , q_Z , i_{q_L} . Ruban/Murchie pNPQ i q_{Pa}
Флуорометр-система аналізу фотосинтезу iFL	OPTI-Sciences, США	Портативна система вимірювання флуоресценції хлорофілу з повністю програмованим контролем мікроклімату. Джерела світла: білий світлодіод з фільтром 690 нм. 7500 мкмоль та світлодіод 660 нм із фільтром 690 нм. Автоматизована процедура для оптимального встановлення модульованої інтенсивності світла. Сині, червоні та зелені датчики для вимірювання поглинання світла, а також датчики ФАР: два діоди. Один всередині флуорометричної камери для ФАР на рівні листків. Другий датчик поверх флуорометра і використовується для автоматичного узгодження інтенсивності ФАР навколишнього середовища. Детектор PIN-фотодіод зі смуговим фільтром 700 ~ 750 нм. Автоперемикання від 10 до 10 000 точок у секунду, залежно від фази тесту.	F_{PSII} , J, ФАР, α , температура листка, F_V/F_M , F_V/F_0 , F_0 , F_M , F_V , F_0' , Hendrickson ($Y(NPQ)$), $Y(NO)$, $Y_{(II)}$, NPQ, F_V/F_M), Kramer (q_L , $Y(NPQ)$, $Y(NO)$, $Y_{(II)}$, F_V/F_M), Puddle (NPQ, q_N , q_P , $Y_{(II)}$, F_V/F_M), Laisk, Yin, Kok протокол для Rd, провідність мезофілу, CO_2 на місці карбоксилування, H_2O , Rd дихання при світлі

<i>Продовження таблиці 1</i>			
1	2	3	4
Портативна система на система вимірювань	OPTI-Sciences, США	Конструктивно складається з двох модулів – листкової камери та основного блоку. Інфрачервоний газоаналізатор (IRGA), диференціально відкрита система, автоматичний нуль IRGA, автоматична компенсація атмосферного тиску та температури.	CO ₂ , H ₂ O, ФАР, температура листка, температура в камері
Портативна система вимірювання фотосинтезу IСрго-Т	OPTI-Sciences, США	Конструктивно складається з двох модулів – листкової камери та основного блоку. Самокалібруюча система IRGA мінімізує помилки вимірювання та помилки дрейфу, забезпечуючи при цьому найпростішу у використанні систему фотосинтезу. Потужні світлодіоди RGB дозволяють дослідникам отримувати сонячні спектри в різний час доби або інші спектри актинічного світла, забезпечуючи більш надійні криві. Інфрачервоний газоаналізатор з автоматичним зануленням, оброблені лазером датчики H ₂ O, контроль вологості в камері.	CO ₂ , H ₂ O, ФАР, температура листка, температура в камері, швидкість потоків у камері
Флуорометр РАМ – 2500	WALZ, Німеччина	Конструктивно розділений на виносний затискач листка та оптоелектронний вузол, які з'єднані оптоволоконним кабелем. Затискач листка має сіdle для підключення оптоволоконного кабелю та світлоізолюючу металеву шторку на одній з двох пластин, між якими розміщують листок рослини. Оптоелектронний вузол сенсорного модуля забезпечує різні режими опромінення (ML, AL, SP та режим модуляції). Крім того, використовуються імпульси далекого червоного світла на хвилі 735 нм.	
Вимірювач вмісту хлорофілів	FORCE-A, Франція	Конструктивно виконаний у формі моноблоку. Джерело світла п'ять світлодіодів: UV-A, 1 зелений, 1 червоний і 2 NIR (ближній інфрачервоний), а вимірювальним пристроєм є кремнієвий фотодіод.	Індекс вмісту хлорофілів, антоціанів, флаваноїдів, баланс азоту NBI
Флуорометр rMultiplex	FORCE-A, Франція	MULTIPLEX – це портативний флуорометр, виконаний у формі моноблоку. Датчик має чотири канали збудження (УФ, синій, зелений та червоний) та три детектори (435, 685 та 735 нм), тому він може вимірювати дев'ять різних сигналів флуоресценції.	Індекс вмісту хлорофілів, антоціанів, флаваноїдів, баланс азоту NBI

Прилади на основі сенсорів характеризуються такими спільними ознаками:

- безпосередній нерухоми́й контакт із листком рослини під час вимірювань, тривалість якого становить від 1 до 10 хв;
- діаметр плями опромінення фрагмента листка – від 1 до 10 мм;
- наявність системи виділення необхідних довжин хвиль для опромінення та реєстрації сигналу;
- передбачений програмований режим опромінення;
- використання фотодіодного світлоприймача з інтегрованим вимірювальним підсилювачем;
- зовнішнє джерело керування та живлення;
- призначення для експлуатації в польових умовах.

Окремої уваги потребує питання визначення активності фотосистем у рослин із дрібними листками, листками складної форми або видозміненими органами, зокрема вусами, як у безлисточкових форм гороху.

Для дослідження флуоресценції хлорофілу в таких листках та інших органах рослин у 1999 р. Гітельсон, Ліхтенталер і Бушманн розробили методику, яка забезпечує використання найбільш надійного діапазону вимірювань (рис. 1).

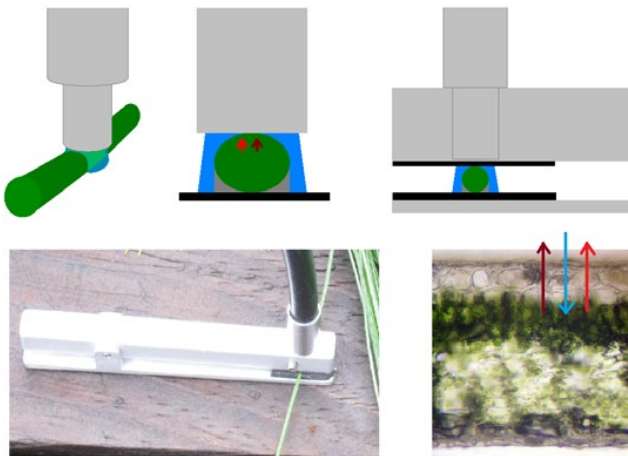


Рис. 1. Аналіз стану рослин, що мають дрібні листки або вуса

За аналогічного опромінення синім світлом методика визначення флуоресценції фотосистеми за Гітельсоном передбачає звуження діагностичного спектра флуоресценції до діапазону 700–735 нм (рис. 2). Урахування саме червоного складника спектра випромінювання дає

змогу підвищити точність визначення вмісту хлорофілу більш ніж удвічі порівняно з методиками, що традиційно застосовуються для оцінювання стресового стану рослин.

При цьому у разі використання аналогових датчиків у приладах для визначення флуоресценції фотосистеми виникає потреба заміни сенсорної частини приладу (оптичного датчика). Натомість у разі застосування цифрових спектрофотометрів достатньо обмежитися налаштуванням мікропроцесорного програмного забезпечення приладу.

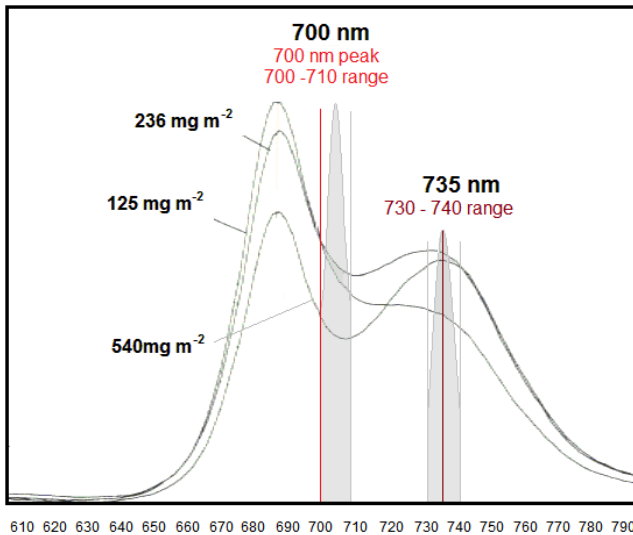


Рис. 2. Діапазон вимірювання флуоресценції хлорофілу за методикою Гітельсона, Ліхтенталера та Бушманна

Запропонований метод ідентифікації флуоресценції фотосистеми за Гітельсоном, Ліхтенталером і Бушманном має низку суттєвих переваг. Зокрема, його можна застосовувати для аналізу дуже дрібних листків, вусиків бобових культур, хвої, трав'янистих рослин, плодів, стебел, черешків, а також недавно сформованих листків. Крім того, використання цієї методики забезпечує високу точність визначення вмісту хлорофілу в перерахунку на одиницю площі листової поверхні.

Альтернативним підходом до застосування цього методу на рослинах із дрібними листками є використання стандартного датчика приладу із заміною синього світлодіода на галогенну лампу відповідного спектра та фіксацією вимірювального пристрою і фотосинтезуючої частини рослини у спеціальному штативі (рис. 3).



Рис. 3. Визначення флуоресценції фотосистеми на дрібних листках рослин із заміною синього світлодіода на галогенну лампу

Водночас одним із основних недоліків методу з виносним галогенним освітлювачем є складність виконання вимірювань. Для їх проведення необхідно не лише зафіксувати рослину або її частину у штативі, а й здійснювати вимірювання у нічний час за повної відсутності засвічування фотосинтетичного апарату сонячним світлом. У разі використання світлонепроникного датчика темнова адаптація рослин відбувається незалежно від часу доби, тоді як при застосуванні відкритих систем слід використовувати методи вимірювання, що не потребують темної адаптації, або ж виконувати визначення у нічний період.

Таким чином, застосування фотометрів для оцінювання активності фотосинтезу сільськогосподарських культур у критичні фази їх росту й розвитку є ефективним методом оперативного контролю фізіологічного стану рослин. Для проведення таких вимірювань можуть використовуватися як наукові, так і серійні прилади, що базуються на аналізі спектра світла, відбитого листовою пластинкою рослин.

2. Вивчення параметрів стресових станів рослин за допомогою спектрофотометрів в умовах *in vitro*

У сучасній науковій практиці широко застосовують методи оцінювання стійкості генотипів до абіотичних стресорів на основі польових досліджень. Вони враховують особливості росту та розвитку рослин, а також їхню продуктивність за умов водного дефіциту. Однак цей підхід ускладнюється просторовою гетерогенністю фізико-хімічних властивостей ґрунтів та сезонними коливаннями кількості атмосферних опадів. Тому для практичного застосування часто використовують вегетаційні приміщення з контрольованими умовами вирощування, де основним критерієм стійкості рослин є накопичення більшої біомаси порівняно з контролем. Проте для визначення реальної стійкості сортів сільськогосподарських культур потрібні тривалі експерименти – від двох тижнів до кількох місяців, що ускладнює широкомасштабний відбір великої кількості генотипів [1].

Одним із методів оцінювання стійкості рослин до посухи та засолення є визначення відсотка пророслого насіння на розчинах речовин, що знижують водний потенціал клітин. Недоліком цього підходу є слабка кореляція між схожістю насіння та ростовими параметрами рослин за тривалого вирощування в умовах стресу [2].

Це пов'язано з істотною різницею між процесами, що регулюють розтягнення клітин під час проростання та подальшого росту. Поглинання води насінням і його набухання – фізико-хімічні процеси, тоді як поділ і розтягнення клітин під час росту контролюються біохімічними механізмами. Крім того, швидкість проростання та схожість насіння в стресових умовах залежать не лише від стійкості, а й від стану зародка та оболонки насіння. Таким чином, відбір генотипів за схожістю насіння в умовах водного дефіциту чи засолення не завжди є об'єктивним і може бути неефективним [3].

Є низка методів тестування перспективних зразків сільськогосподарських культур, кожен із яких має свої переваги та обмеження. Вибір методу значною мірою залежить від його достовірності, трудомісткості, тривалості та пропускнуої здатності. Деякі методи чітко розділяють рослини за стійкістю, але не завжди дають змогу відрізнити сорти однієї культури, що обмежує їхню придатність у селекційній практиці. Крім того, деякі підходи передбачають завдання шкоди рослинам, що ускладнює або робить неможливим оцінку за іншими ознаками та отримання нащадків [4].

Наразі широке застосування знаходять біотехнологічні методи, які поряд із традиційними морфолого-анатомічними та фізіолого-біохімічними підходами використовують для оцінки стресостійкості рослин. Особливо актуальна культура тканин і органів *in vitro*, де відсутні механізми регуляції, що дає змогу тестувати стійкість рослин до різних негативних факторів навколишнього середовища. Використання цього методу, зокрема на калюсах, ефективно вирішує завдання селекції для різних культур [5].

Проте біотехнологічні методи обмежені роботою з невеликою кількістю зразків рослинного матеріалу. Для визначення наявності стресу часто потрібно частково знищувати матеріал, вирощений на селективному середовищі. Тому перевага віддається неруйнівним методам аналізу [6, 7].

Застосування неруйнівних методів у поєднанні з перевагами культури *in vitro* дозволяє значно прискорити створення нових сортів сільськогосподарських культур і підвищити ефективність селекційного процесу з урахуванням стійкості до негативних факторів навколишнього середовища. Крім того, це сприяє ефективному тестуванню та добору вже створених сортів для їх подальшого поширення з огляду на посухостійкість [8–10].

У 2023 році проводили дослідження параметрів стресових станів рослин за допомогою фотометрів видимого спектру в умовах *in vitro*. Підготовчий етап включав введення насіння буряків цукрових гібрида ‘Ольжич’ у культуру *in vitro* та подальше вирощування отриманих рослин на селективних середовищах із додаванням різних концентрацій маніту, який моделював дію посухи на рослинні організми в лабораторних умовах.

Для введення насіння в культуру *in vitro* його промивали мильною водою протягом 2 хв, а потім на кілька секунд занурювали у 90–95 % спирт. Після цього насіння обробляли стерилізувальним розчином «Білизна» у співвідношенні 1:3 протягом 30 хв. Після стерилізації проводили 4-разове промивання дистильованою водою по 10 хв. Стерильним пінцетом насіння перенесли на безгормональне середовище MS із дворазово зменшеним мінеральним складом для пророщування.

Подальшу роботу з матеріалом виконували відповідно до методичних рекомендацій із клонального розмноження буряків цукрових. Пророщування здійснювали в кліматичній кімнаті, а на 4–6-ту добу, коли проростки досягали довжини 4–5 см, рослини пересаджували на стерильні поживні середовища для подальшого культивування.

Для вивчення життєздатності рослин за умов осмотичного стресу використовували клони 2-го пасажу, а як селективне середовище обирали класичне середовище MS з додаванням маніту в різних концентраціях: від 0,01 M (MS1) до 0,10 M (MS10). Оскільки метою досліджень

було визначення наявності стресу в рослинах, а не добір стійких до тривалого осмотичного стресу селекційних номерів, аналіз матеріалу виконували через тиждень після введення в середовище з манітом.

Вміст вільного проліну визначали за допомогою колориметричного аналізу з використанням нінгідрину. Рослинний матеріал гомогенізували, проводили екстракцію розчином етанолу та води у співвідношенні 70:30, після чого додавали реакційну суміш (1 % нінгідрин у оцтовій кислоті з етанолом) і інкубували на водяній бані при 95 °С протягом 30 хв. Потім пробірки охолоджували, центрифугували і визначали оптичну щільність розчину нінгідрин-проліну на спектрофотометрі за довжини хвилі 520 нм. Калібрувальний графік будували за L-проліном.

Дослідження реакції рослин на стрес в умовах контрольованої лабораторної посухи проводили за допомогою фотометра FLS 10s, розробленого Інститутом кібернетики НАН України (автор – Олександр Вороненко). На відміну від попередніх моделей, створених і вироблених Інститутом кібернетики, ця система забезпечує високу потужність опромінення фотосинтезуючих частин рослин, що підвищує точність вимірювань, а також пропонує гнучкий інтерфейс для оцінки стану рослин і робить прилад науково привабливим для використання (рис. 4). Загальний вигляд отриманих точок даних наведено на рисунку 5.



Рис. 4. Загальний вигляд фотометра FLS 10s

Точність фотометрів безпосередньо залежить від якості компонентів, що використовуються при їх виготовленні. Технологія вимірювання ефекту Каутського та пов'язані з нею процедури не потребують додаткової сертифікації або валідації, оскільки протокол корекції похибок закладено безпосередньо в саму методику вимірювань.

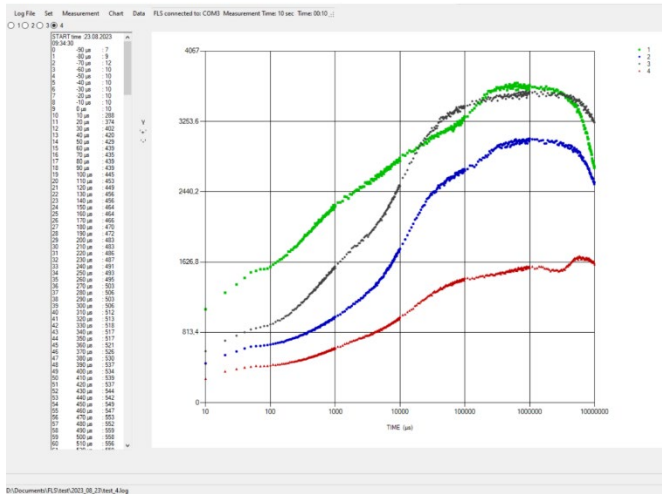


Рис. 5. Криві точок даних, отримані за допомогою приладу FLS 10s

Водночас для проведення експериментів із культурою *in vitro* буряків цукрових важливо забезпечити потужне та спектрально рівномірне джерело синього світла. У цьому дослідженні додатково оцінювали ефективність роботи джерела опромінення фотометра FLS 10s, результати якої представлені на рисунку 6.



Рис. 6. Спектр опромінення синім світлодіодом рослин буряків цукрових приладом FLS 10s

Зазвичай джерелом світла для сучасних фотометрів є світлодіод із шириною спектру від 435 до 530 нм. Чим більша потужність опромінення, тим точнішими є вимірювання стану рослини.

Осмотичний або посуховий стрес у рослин типу С₃, до яких належать буряки цукрові, визначають за протоколом Templar et al. (2017) з використанням показника Fv/Fm за температури повітря 26 °С і вище. Цей підхід дає змогу проводити раннє виявлення стресового стану рослин – вже через добу після закінчення запасів доступної вологи. Значення Fv/Fm також можна використовувати для оцінювання сильного посухового стресу, коли рослини перебувають без доступної вологи приблизно сім діб.

Показники співвідношення змінної до максимальної флуоресценції (Fv/Fm) змінювалися залежно від концентрації селективного агенту – маніту. Рослини буряків цукрових на контролі (MS₀) не піддавалися стресу, спричиненому посухою, і значення Fv/Fm становило 0,56.

Введення маніту в середовище та поступове підвищення його концентрації істотно погіршувало фізіологічний стан фотосистем рослин: у максимальній концентрації маніту (MS₁₀) показник Fv/Fm знижувався до 0,38 (табл. 2).

Таблиця 2

Показники Fv/Fm та вміст проліну за різної концентрації селективного агенту маніту

Варіант	Fv/Fm	Вміст проліну, мкг/г тканини
MS ₁₀	0,38	4,76
MS ₉	0,40	4,65
MS ₈	0,41	4,60
MS ₇	0,42	4,54
MS ₆	0,43	4,50
MS ₅	0,45	4,44
MS ₄	0,46	4,41
MS ₃	0,49	4,30
MS ₂	0,52	4,20
MS ₁	0,55	3,90
MS ₀	0,56	3,53
НІР _{0,05}	0,02	0,10

Пролін належить до так званих стресових амінокислот, тому його синтез активується не лише під час старіння рослини, а й у процесі роз-

витку стресової реакції. Накопичення проліну в органах рослин є адаптивною відповіддю на дію стресу, особливо зумовленого нестачею вологи. Дані досліджень свідчать про значне підвищення концентрації проліну зі збільшенням впливу маніту на рослини (рис. 7).

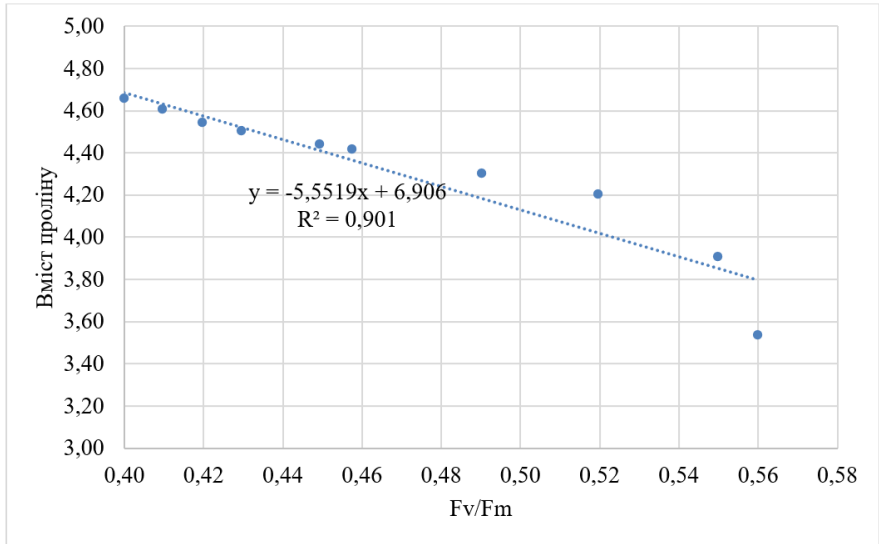


Рис. 7. Залежність між вмістом проліну та показником Fv/Fm

За результатами аналізу спостерігалася дуже сильна кореляція між вмістом вільного проліну в тканинах буряків цукрових та показниками фотосистеми ($r = 0,90$). Отже, найбільш ефективним методом визначення стресового стану рослин буряків цукрових за вирощування на селективних осмотичних середовищах є оцінювання співвідношення змінної до максимальної флуоресценції (Fv/Fm).

3. Дослідження стресових станів рослин за допомогою фотометрів видимого спектру в польових умовах

Серед усіх потреб сільськогосподарських культур вологозабезпечення, необхідне для формування високого рівня продуктивності, є одним із найкритичніших чинників сучасного сільськогосподарського виробництва. Передусім унаслідок змін клімату спостерігається недоотримання значної кількості опадів, однак негативні наслідки можуть бути зумовлені й підходами до формування агротехніки. До них належать несвоєчасне закриття вологи, а також надмірне пересушування ґрунту внаслідок необґрунтованої кількості або недоцільності проведення окремих агротехнічних операцій.

Кукурудза характеризується диференційованою вимогливістю до вмісту доступної вологи в ґрунті на різних етапах росту й розвитку. У першій половині вегетації культура відзначається відносно низькими показниками водоспоживання та зменшенням середньодобовим випаровуванням. Зокрема, до формування 7–8-го листка випадки нестачі вологи для росту кукурудзи практично не спостерігаються. Найбільша потреба у волозі припадає на період за 10 днів до викидання волоті, коли відбувається інтенсивний ріст стебла та нагромадження сухої речовини. На цей критичний етап припадає 40–50 % загального водоспоживання. Через 20 днів після викидання волоті потреба у волозі знову зменшується [11, 12].

Спостереження за показниками середньодобового випаровування рослин пшениці озимої в умовах природного та штучного зволоження свідчать, що його динаміка має параболічний характер. Максимальні значення припадають на міжфазний період колосіння – початок молочної стиглості зерна і становлять у середньому $59,3 \text{ м}^3/\text{га}$ за оптимального режиму зрошення та $35,2 \text{ м}^3/\text{га}$ – у неполивних умовах [13, 14].

За даними, уточненими П. В. Писаренком зі співавторами, середньодобове випаровування буряків цукрових із шару ґрунту 0–50 см у вологі та середні за зволоженням роки досягає максимуму на 7–8-й декаді вегетаційного періоду і в середньому за роки досліджень становить відповідно $53,7$ та $57,3 \text{ м}^3/\text{га}$. У посушливі роки найбільше значення цього показника – $58,2 \text{ м}^3/\text{га}$ – відмічено в проміжку між 70-ю та 80-ю добою росту й розвитку культури [15]. Фактично це відповідає періоду від змикання листків у міжряддях до повного змикання міжрядь, коли площа листового апарату є максимальною [16].

Щодо сої [17, 18], то від сходів до цвітіння культура характеризується відносно меншою потребою у воді. Найінтенсивніше водоспоживання спостерігається у фазі цвітіння та формування бобів, коли соя використовує 60–70 % сумарної кількості води за весь період вегетації. У цей самий період рослини негативно реагують на повітряну посуху.

Із початку розвитку до утворення кошиків соняшник витрачає 20–25 % вологи від загальної потреби, засвоюючи її переважно з верхніх шарів ґрунту. Найбільшу кількість вологи (близько 60 %) культура споживає в міжфазний період утворення кошиків – цвітіння. За дефіциту вологи в цей час кошики та насіння можуть формуватися недостатньо розвиненими [19–22].

Отже, проведений аналіз критичних періодів росту й розвитку досліджуваних культур дав змогу визначити обов'язкові етапи, у які доцільно здійснювати моніторинг стресового стану рослин. Саме в періоди максимальної потреби у волозі будь-який її дефіцит потенційно здатний індукувати розвиток стресу.

З метою підвищення ефективності планування досліджень їх виконували в кількох зонах, що відрізнялися рівнем дефіциту вологи для сільськогосподарських культур.

Дослідження проводили (табл. 3):

– у зоні достатнього зволоження – в умовах ПП «Фортуна» (Тернопільська обл., Чортківський р-н, с. Свидова);

– у зоні нестійкого зволоження – на базі ДПДГ «Саливонківське» Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (Київська обл., Білоцерківський р-н, с. Ксаверівка Друга);

– у зоні недостатнього зволоження – у господарстві групи «Агро-Рось-Інвест» (Черкаська обл., Смілянський р-н);

– у зоні посушливих умов – у ТОВ «Імені Чкалова» (Кіровоградська обл., Новоукраїнський р-н).

Таблиця 3

Показники Fv/Fm та вміст проліну за вирощування культур у регіонах з різним рівнем вологозабезпечення

Умови вологозабезпечення	Культура (фаза визначення)	Fv/Fm	Вміст проліну, мкг/г тканини
1	2	3	4
Достатнього зволоження	Буряки цукрові (змикання міжрядь)	0,59	3,25
	Пшениця озима (молочна стиглість)	0,53	3,40
	Кукурудза (викидання волоті)	0,55	3,31
	Соя (формування бобів)	0,58	3,28
	Соняшник (цвітіння)	0,56	3,14

<i>Продовження таблиці 3</i>			
1	2	3	4
Нестійкого зволоження	Буряки цукрові (змикання міжрядь)	0,52	3,43
	Пшениця озима (молочна стиглість)	0,54	3,55
	Кукурудза (викидання волоті)	0,50	3,46
	Соя (формування бобів)	0,51	3,68
	Соняшник (цвітіння)	0,50	3,70
Недостатнього зволоження	Буряки цукрові (змикання міжрядь)	0,48	4,22
	Пшениця озима (молочна стиглість)	0,50	4,11
	Кукурудза (викидання волоті)	0,49	4,19
	Соя (формування бобів)	0,51	4,23
	Соняшник (цвітіння)	0,47	4,32
Посушливі умови	Буряки цукрові (змикання міжрядь)	0,42	4,56
	Пшениця озима (молочна стиглість)	0,40	4,70
	Кукурудза (викидання волоті)	0,37	4,62
	Соя (формування бобів)	0,40	4,63
	Соняшник (цвітіння)	0,38	4,59

У міру зростання дефіциту вологи, тобто під час переходу від регіонів із достатнім зволоженням до посушливих умов, зафіксовано підвищення загального вмісту проліну в рослинах та зниження показників Fv/Fm фотосистеми II у досліджуваних культурах. Це потенційно свідчить про формування стресових умов у рослин, зокрема в критичні періоди їх росту й розвитку, пов'язані з водоспоживанням.

Як видно з наведених даних, урожайність досліджуваних сільськогосподарських культур змінювалася відповідно до формування специфічних ґрунтово-кліматичних умов у зонах проведення досліджень (табл. 4).

Цілком закономірно, що врожайність досліджуваних культур відрізнялася між сезонами вирощування та регіонами проведення досліджень. Особливо цікавою є ситуація в регіонах із нестійким і недостатнім зволоженням, які фактично можуть демонструвати близькі показники врожайності завдяки формуванню специфічних ґрунтово-кліматичних умов у кожному вегетаційному періоді.

Водночас у господарствах регіонів із недостатнім зволоженням урожайність досліджуваних культур іноді перевищує очікувану, що, ймовірно, пов'язано з меншим впровадженням заходів щодо економії ґрунтової вологи порівняно з регіонами, де її більше. За умов достат-

нього зволоження та посушливих умов спостерігаються чітко виражені максимуми та мінімуми врожайності досліджуваних культур.

Таблиця 4

Урожайність досліджуваних культур у регіонах з різним рівнем вологозабезпечення, т/га

Умови вологозабезпечення	Культура (фаза визначення)	2022	2024	Сер.
Достатнього зволоження	Буряки цукрові (змикання міжрядь)	58,0	77,0	67,50
	Пшениця озима (молочна стиглість)	6,3	6,8	6,56
	Кукурудза (викидання волоті)	12,0	11,3	11,65
	Соя (формування бобів)	3,2	3,5	3,35
	Соняшник (цвітіння)	3,0	3,2	3,10
Нестійкого зволоження	Буряки цукрові (змикання міжрядь)	60,0	65,0	62,50
	Пшениця озима (молочна стиглість)	5,6	5,2	5,40
	Кукурудза (викидання волоті)	9,5	8,5	9,00
	Соя (формування бобів)	2,6	2,4	2,50
	Соняшник (цвітіння)	2,9	2,2	2,55
Недостатнього зволоження	Буряки цукрові (змикання міжрядь)	63,0	52,0	57,50
	Пшениця озима (молочна стиглість)	5,8	5,0	5,40
	Кукурудза (викидання волоті)	9,9	7,6	8,75
	Соя (формування бобів)	2,6	2,2	2,40
	Соняшник (цвітіння)	2,7	2,0	2,35
Посушливі умови	Буряки цукрові (змикання міжрядь)	45,0	40,0	42,50
	Пшениця озима (молочна стиглість)	5,0	4,6	4,80
	Кукурудза (викидання волоті)	6,7	6,5	6,60
	Соя (формування бобів)	2,0	1,8	1,90
	Соняшник (цвітіння)	2,6	2,2	2,40

Крім того, виявлено дуже сильну кореляційну залежність між вмістом проліну та показником Fv/Fm ($r = -0,91$), що підтверджується також рівнянням регресії (рис. 8).

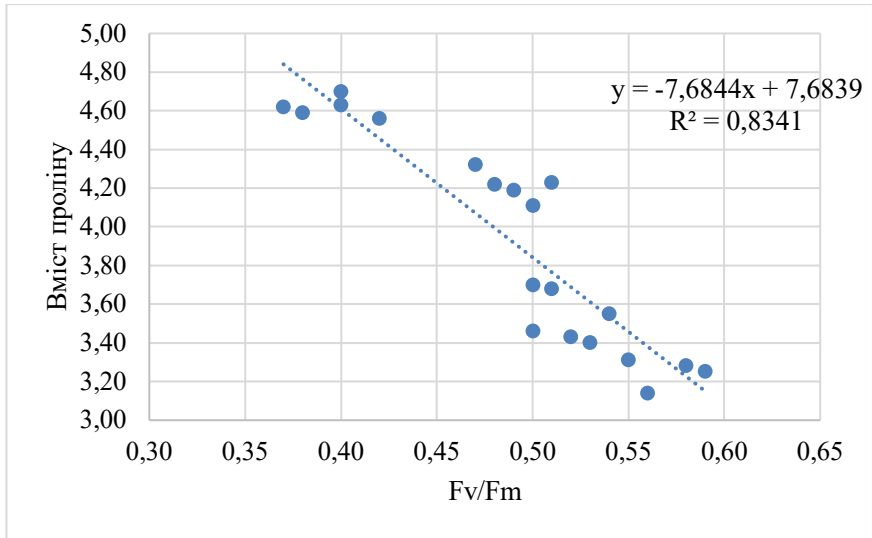


Рис. 8. Залежність між вмістом проліну та показником Fv/Fm

На відміну від зазначених показників, рівняння регресії між вмістом проліну та урожайністю культур (рис. 9) та між показником Fv/Fm і врожайністю культур (рис. 10) характеризуються меншою тісністю зв'язку, що зумовлено значним розривом у показниках урожайності.

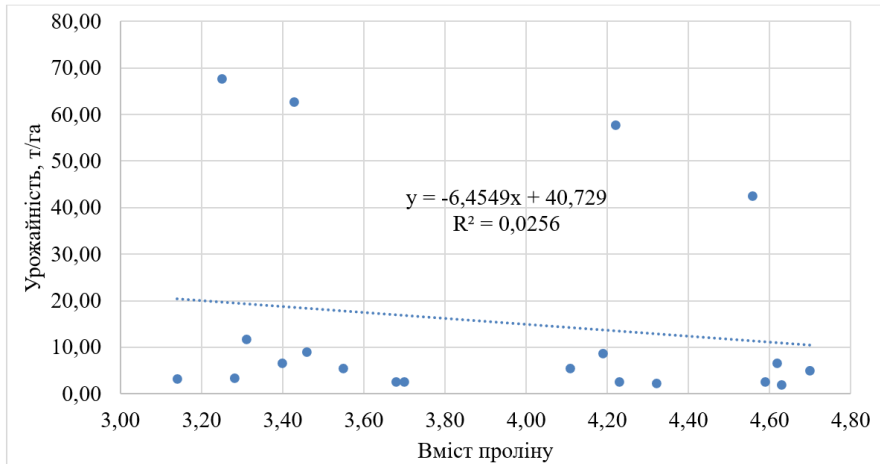


Рис. 9. Залежність між урожайністю та вмістом проліну

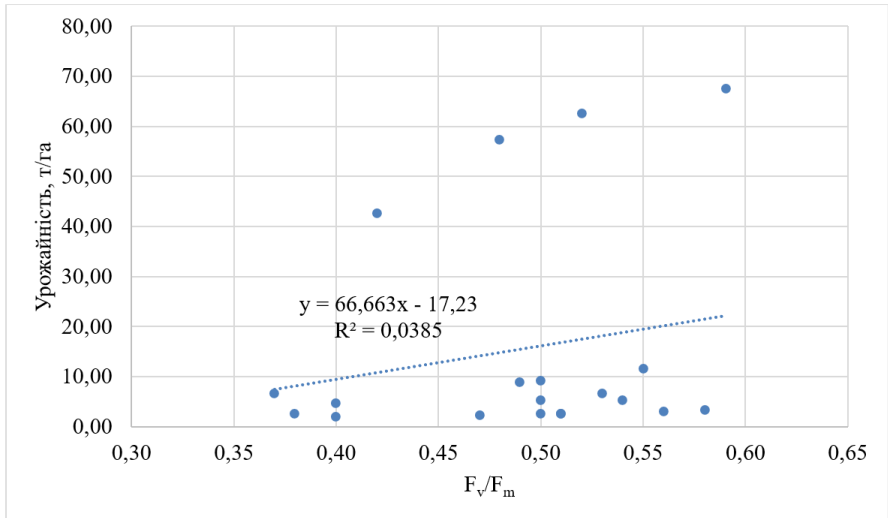


Рис. 10. Залежність між урожайністю та показником F_v/F_m

Отже, у польових умовах підтверджено вплив рівня вологозабезпечення на більшість сільськогосподарських культур у критичні періоди їх росту й розвитку. Відповідно, застосування методу фотометричного аналізу стану фотосинтетичного апарату дає змогу оцінити рівень стресу в рослин. Це, своєю чергою, дає змогу своєчасно впроваджувати агротехнічні заходи, які сприятимуть покращенню стану рослин і прискоренню їх виходу зі стресу в міру відновлення запасів води в ґрунті.

4. Алгоритм діагностування стресу рослин у польових умовах

Найважливішим елементом досліджень є максимальна адаптація експериментальних підходів до реальних польових умов. Зокрема, у дослідженнях *in vitro* для моделювання посухи застосовували маніт, що забезпечує лише спрощену модель абіотичного стресу. За таких умов не враховуються комплексні чинники природного середовища, зокрема дія вітру, добові та сезонні коливання температури, просторова неоднорідність ґрунтового профілю, а також взаємодія рослин із ґрунтовим мікробіомом та іншими організмами.

Водночас у польових умовах за результатами досліджень виявлено значну варіабельність показників F_v/F_m навіть у межах однієї агроєкологічної зони. Зокрема, за умов нестійкого зволоження значення F_v/F_m становили 0,50–0,54, а за недостатнього – 0,47–0,51. Такий рівень варіабельності принципово неможливо відтворити в лабораторних умовах.

Загалом втрати врожаю при переході культур від режиму достатнього зволоження до посушливих умов за агрокліматичними зонами можуть становити для буряків цукрових близько 25 т/га (37 %), кукурудзи – 5,05 т/га (43 %) та пшениці озимої – 1,76 т/га (27 %). Водночас своєчасне виявлення проявів стресу дає змогу застосувати коригувальні агротехнічні заходи та зменшити втрати врожаю на 15–20 %.

Проведені дослідження переконливо засвідчили, що кожна сільськогосподарська культура має специфічні критичні періоди максимальної чутливості до дії стресових чинників. Зокрема, кукурудза споживає 40–50 % загальної кількості води за 10 днів до викидання волоті, соя – 60–70 % у період цвітіння та формування бобів, тоді як у буряків цукрових пік водоспоживання припадає на 70–80-ту добу вегетації. Саме в ці критичні фази росту й розвитку культур доцільно забезпечувати максимально інтенсивний моніторинг стану вологозабезпечення рослин та впроваджувати заходи, спрямовані на пом'якшення негативного впливу посухи.

Польові умови істотно відрізняються від модельних експериментів передусім нерівномірністю зволоження ґрунту та елементів живлення, наявністю мікрорельєфу, варіабельністю густоти посівів, а також локальними пошкодженнями рослин шкідниками і хворобами. У природних умовах рослини зазнають одночасної дії кількох стресорів, зокрема комбінацій посухи з високими температурами, дефіциту елемен-

тів живлення з водним стресом, а також поєднання патогенного ураження з абіотичними чинниками.

Часові параметри розвитку стресових реакцій є чітко окресленими: первинні ознаки стресу виявляються через 1–7 діб після початку дефіциту вологи; критичне «вікно» для ефективного втручання становить 24–72 години за зниження показника Fv/Fm нижче 0,50; формування незворотних змін у рослин відбувається після понад 7 діб дії сильного стресу.

Дослідження засвідчили істотну диференціацію реакцій показників Fv/Fm залежно від поєднання стресорів, що принципово неможливо адекватно змоделювати в лабораторних умовах. Для отримання достовірної оцінки стану посівів необхідно проводити 10–15 точок вимірювання на 1 га, що є реалізованим виключно в польових умовах.

Хоча лабораторний скринінг дає змогу оперативно оцінити потенційну стійкість генотипів, результати досліджень вказують на слабку кореляцію між показниками стійкості *in vitro* та фактичною продуктивністю в полі, а також на необхідність обов'язкової перевірки в реальних агрокліматичних умовах і в різних зонах вологозабезпечення.

З огляду на те, що 65–70 % втрат у сільському господарстві зумовлені погодними чинниками, системний польовий моніторинг набуває критичного значення для адаптації агровиробництва до змін клімату, прогнозування врожайності, страхування посівів і розроблення ефективних стратегій управління ризиками.

Польова діагностика стресу є незамінною складовою сучасних агротехнологій, оскільки лише вона дозволяє врахувати реальну складність агроєкосистем, забезпечити оперативне реагування на негативні чинники та інтегрувати отримані дані в сучасні системи управління врожаєм. Лабораторні дослідження зберігають важливу роль у формуванні базового розуміння фізіологічних механізмів стійкості, однак практичні управлінські рішення мають ґрунтуватися передусім на результатах польових спостережень.

4.1. Визначення параметрів стресових станів рослин

Фізіологічна основа діагностики

Ключовим інструментом ідентифікації стресових станів рослин у проведених дослідженнях є вимірювання параметрів індукованої флуоресценції хлорофілу (ІФХ), відомої як ефект Каутського. Метод ґрунтується на реєстрації змін інтенсивності флуоресценції під час переходу листка з темно-адаптованого стану до світлового. Стан фотосистеми II (PS II) слугує надійним індикатором наявності та типу стресу,

оскільки будь-які порушення фотохімічного транспорту електронів або процесів газообміну (водного, теплового, поживного) відображаються у зміні характерних флуоресцентних показників.

Основні вимірювані параметри:

- F_0 – мінімальна фонова флуоресценція за умови, що всі реакційні центри PS II відкриті;
- F_m – максимальна флуоресценція за повного закриття реакційних центрів PS II;
- $F_v = F_m - F_0$ – варіабельна флуоресценція;
- F_v/F_m – максимальна квантова ефективність PS II; для фізіологічно здорових рослин становить 0,79–0,83;
- $Y(II)$ або ФПС II – ефективність фотохімічних реакцій PS II у стаціонарному світловому стані;
- ETR – відносна швидкість транспорту електронів у фотосинтетичному ланцюгу;
- ОЖР-крива – індукційна крива флуоресценції високої роздільної здатності з фіксацією фаз O–J–I–P, що дає змогу детально оцінювати окремі етапи функціонування PS II;
- PIABS – інтегральний показник загальної ефективності фотосистеми, розрахований на основі параметрів ОЖР-аналізу.

Такий комплекс показників забезпечує фізіологічно обґрунтовану, чутливу та оперативну діагностику стресових реакцій рослин у польових умовах.

Біохімічні маркери стресу

Вміст проліну – стресова амінокислота, що накопичується при водному дефіциті:

- норма: 3,25–3,53 мкг/г тканини;
- у разі стресу: підвищується до 4,56–4,76 мкг/г.

4.2. Ідентифікування основних видів стресу

Для чіткого розуміння та розроблення алгоритмів виявлення їх згруповано за основними видами стресу рослин (табл. 5).

Таким чином, поєднання швидких тестів F_v/F_m , $Y(II)$, ОЖР та $CCI/SPAD$ дає змогу виявляти більшість типів стресу на ранніх стадіях за умови належної адаптації листка та контролю освітлення і температури.

Таблиця 5

Основні види стресу рослин

Вид стресу	Основні індикатори	Особливості / чутливість
Посуховий (C3)	Fv/Fm за $t \geq 26$ °C; FS/Fo; газообмін (gs, E, A)	Раннє виявлення – протокол Темплера через добу після припинення зволоження
Посуховий (C4)	Y(II), ETR/A (J/A), тест Берка	Висока чутливість до дефіциту вологи, особливо при нагріванні зразків
Перезволоження	Fv/Fm, OJIP, F735/F700	F735/F700 – без адаптації до темряви
Світловий стрес	$\Delta F/Fm$, Y(II), PIABS, RLC-криві	RLC – інформативні за змінного освітлення
Тепловий стрес	Y(II) ≥ 35 °C; Fv/Fm ≥ 45 °C; F735/F700; NPQ	Y(II) – найчутливіший швидкий тест
Дефіцит азоту	CCI/SPAD, F735/F700, K Step, Y(II) за високої освітленості	Потребує нестандартних протоколів
Дефіцит P, K, B, Ca, Cl, Co, Cu, Fe	Y(II), Fv/Fm, ETR, PIABS, CCI	Для кожного елемента визначені свої чутливі параметри
Хімічні стреси (гербіциди)	Зміни FM, FO на пізніх етапах	Діурон – блокує транспорт електронів PS II
CO ₂ -стрес, біотичні фактори	Неоднорідність флуоресценції по листку	Виявляється через повторні вимірювання та усереднення

4.3. Моделювання стресових станів рослин*Моделювання in vitro*

У лабораторних умовах стресові чинники відтворюють шляхом штучного регулювання освітлення, температури та вологості, а також застосування поліетиленгліколю (ПЕГ-6000) для індукції водного стресу. Для вивчення реакції фотосистеми II проводиться адаптація листків до темряви (15–35 хв) і вимірюються показники за стандартними протоколами Strasser OJIP, Templer, Burke тощо.

Такі моделі дають змогу:

- точно дозувати чинники (наприклад, водний потенціал через концентрацію ПЕГ);
- аналізувати часову динаміку флуоресцентних параметрів від початку стресу;
- виключати вплив мікрокліматичних флуктуацій, притаманних польовим умовам.

Польові моделі

У польових дослідках використовують природні варіації кліматичних чинників (ліміт вологи, перегрів, затоплення), а також контрольовані агроприйоми – регулювання поливу, затінення, внесення добрив. Вимірювання виконують за допомогою портативних спектрофотометричних і флуориметричних приладів із фіксацією положення листка, контролем фотосинтетично активної радіації (ФАР) та температури.

Моделювання включає:

- порівняння рослин із різних мікроділянок за однакових протоколів адаптації;
- повторні вимірювання впродовж вегетації для відстеження розвитку стресу;
- інтеграцію результатів у прогностичні моделі врожайності та ефективності агротехнічних заходів.

Також передбачено можливість інтеграції флуоресцентних параметрів в інформаційно-аналітичні системи моніторингу стану посівів. Зокрема, показники Fv/Fm, Y(II) та PIABS можуть використовуватися як вхідні змінні для моделей:

- раннього попередження про стрес (водний, тепловий, поживний);
- прогнозування врожайності через кореляційні зв'язки з фотосинтетичною продуктивністю;
- прийняття рішень щодо агротехнологічних втручань (зрошення, удобрення, захист).

Аналіз процесів моделювання стресових станів

Моделювання в умовах *in vitro*

Дослідження проводили на рослинах буряків цукрових гібрида 'Ольжич' із використанням селективного агента маніту (0,01–0,10 М). Метод детекції – фотометр FLS 10s.

У результаті встановлено сильну кореляцію ($r = -0,90$) між показником Fv/Fm та вмістом проліну.

Моделювання в польових умовах

Дослідження проводили на п'яти культурах у чотирьох зонах вологозабезпечення.

Гradient стресу за зонами:

1. Достатнє зволоження: Fv/Fm = 0,53–0,59.
 2. Нестійке зволоження: Fv/Fm = 0,50–0,54.
 3. Недостатнє зволоження: Fv/Fm = 0,47–0,51.
 4. Посушливі умови: Fv/Fm = 0,37–0,42.
-

Критичні періоди розвитку рослин, у які доцільно здійснювати моніторинг стресу:

- буряки цукрові – змикання міжрядь (70–80-та доба);
- пшениця озима – колосіння – молочна стиглість;
- кукурудза – 10 діб до викидання волоті;
- соя – цвітіння – формування бобів;
- соняшник – утворення кошиків – цвітіння.

Згідно з проведеними дослідженнями встановлено різну діагностичну ефективність щодо виявлення окремих типів стресу. Загалом усі стреси рослин можна поділити на ті, що діагностуються ефективно, та ті, що визначаються обмежено.

Ефективно діагностуються:

- посуховий стрес (за $t > 26$ °C для С3-рослин);
- світловий стрес;
- тепловий стрес (> 35 °C);
- стрес, зумовлений важкими металами;
- гербіцидний стрес.

Обмежено діагностуються:

- дефіцит азоту та сірки (лише за критичних рівнів);
- холодний стрес (потребує багаторазових вимірювань);
- соловий стрес (характеризується різною чутливістю у С3- та С4-рослин).

Алгоритм діагностування стресу рослин у польових умовах

Етап 1: Підготовка до вимірювань

1.1. Визначення критичних періодів моніторингу:

- Буряки цукрові: 70–80-та доба (змикання міжрядь);
- Пшениця озима: колосіння – молочна стиглість;
- Кукурудза: за 10 діб до викидання волоті;
- Соя: цвітіння – формування бобів;
- Соняшник: утворення кошиків – цвітіння.

1.2. Підготовка обладнання:

- Калібрування фотометра;
 - Перевірка заряду батареї;
 - Підготовка затискачів для темної адаптації;
 - Налаштування температурних корекцій.
-

1.3. Вибір часу вимірювань:

- Оптимально: 6:00 – 10:00 або після 16:00;
- Уникати: полуденних годин (11:00 – 15:00);
- Враховувати: хмарність та вітер.

Етап 2: Відбирання зразків

2.1. Схема відбору зразків:

Поле → Діагональний / зигзагоподібний маршрут.
→ 10–15 точок відбору на 1 га.
→ По 3–5 рослин у кожній точці.

2.2. Критерії вибору листків:

- Наймолодший повністю сформований листок.
- Листки одного ярусу.
- Без видимих пошкоджень.
- Однаковий кут розташування до сонця.

Етап 3: Процедура вимірювання

3.1. Для тесту Fv/Fm (основний):

1. Закріпити затискач на листку.
↓
2. Темнова адаптація (5 хв).
↓
3. Вимірювання F₀ (мінімальна флуоресценція).
↓
4. Насичуючий спалах (0,5–1,5 сек.).
↓
5. Вимірювання F_m (максимальна флуоресценція).
↓
6. Розрахунок $Fv/Fm = (Fm - F_0)/Fm$.

3.2. Для тесту Y(II) (додатковий):

1. Вимірювання за сталого освітлення.
↓
 2. Фіксація ФАР на рівні листка.
↓
 3. Визначення $\Delta F/Fm'$.
↓
 4. Розрахунок ETR (за потреби).
-

Етап 4: Інтерпретація результатів**4.1. Шкала оцінювання стресу за Fv/Fm**

За результатами проведених досліджень була сформована шкала оцінки стресу за Fv/Fm та рекомендації щодо його усунення (табл. 6).

Таблиця 6

Шкала оцінки стресу за Fv/Fm та рекомендації щодо його усунення

Значення Fv/Fm	Стан рослин	Рекомендації
0,79–0,83	Оптимальний	Продовжити моніторинг
0,70–0,78	Легкий стрес	Профілактичні заходи
0,50–0,69	Помірний стрес	Коригувальні заходи
0,40–0,49	Сильний стрес	Термінові заходи
< 0,40	Критичний стрес	Екстрені заходи

4.2. Додаткові індикатори:

- Визначення вмісту проліну (за можливості).
- Візуальна оцінка стану посівів.
- Аналіз метеоданих.

Етап 5: Протокол документування**5.1. Обов'язкові дані:**

Дата: _____ Час: _____
 Культура: _____ Фаза розвитку: _____
 GPS координати: _____
 Температура повітря: ____ °C
 Вологість: ____ %
 ФАР: _____ мкмоль/м²/с

5.2. Результати вимірювань:

Точка | Fv/Fm | Y(II) | Примітки

Точка	Fv/Fm	Y(II)	Примітки
1			
2			
...			

Середнє: _____

Етап 6: Прийняття рішень

6.1. Алгоритм реагування:

Пропонований алгоритм прийняття рішень можна змоделювати на прикладі визначення водного стресу рослин.

Якщо $F_v/F_m < 0,50$:

- Термінове зрошення (за наявності).
- Застосування антистресантів.
- Повторне вимірювання через 24 год.

Якщо $0,50 \leq F_v/F_m < 0,70$:

- Планове зрошення.
- Позакореневе підживлення.
- Моніторинг кожні два-три дні.

Якщо $F_v/F_m \geq 0,70$:

- Продовження планового моніторингу.
- Профілактичні заходи.

Етап 7: Контроль ефективності

7.1. Повторні вимірювання:

- Через 24 год після заходів (за критичного стресу в рослин);
- Через 3 дні (за помірного стресу);
- Щотижнево (профілактичний моніторинг).

7.2. Критерії ефективності:

- Підвищення F_v/F_m на 0,05–0,10;
- Зниження вмісту проліну;
- Покращення візуального стану.

Особливі випадки

Для С4 рослин (кукурудза, сорго):

- Використовувати $Y(II)$ як основний показник;
- Застосовувати протокол Burke за $t > 40$ °С.

У разі холодового стресу:

- Множинні вимірювання на одному листку;
 - Використання ETR/CO₂ співвідношення.
-

У разі хімічного стресу:

- Додатково вимірювати ОЛР криві;
- Аналіз специфічних піків (K, J, I).

Цей алгоритм забезпечує систематичний підхід до діагностування стресових станів і дає змогу вчасно приймати коригувальні рішення для оптимізації врожайності.

Список використаних джерел

1. Mwadzingeni L., Shimelis H., Dube E. et al. Breeding wheat for drought tolerance: Progress and technologies. *Journal of Integrative Agriculture*. 2016. Vol. 15, Iss. 5. P. 935–943. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61102-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61102-9)
2. Пикало С. В., Демидов О. А., Юрченко Т. В. та ін. Методи оцінки посухостійкості селекційного матеріалу пшениці. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2020. Вип. 82. С. 63–79. <http://dx.doi.org/10.30970/vlubs.2020.82.05>
3. Haley S. D., Quick J. S., Morgan J. A. Excised-leaf water status evaluation and associations in field-grown winter wheat. *Canadian Journal of Plant Science*. 1993. Vol. 73, No 1. P. 55–63. <https://doi.org/10.4141/cjps93-008>
4. Plaut Z. Plant exposure to water stress during specific growth stages. *Encyclopedia of Water Science*. New York, 2003. P. 673–675.
5. Дубровна О. В., Бавол А. В., Зінченко М. О. та ін. Вплив осмотичних речовин на калюсні лінії м'якої пшениці, стійкі до культурального фільтрату *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. *Вісник Українського товариства генетиків і селекціонерів*. 2011. Т. 9, № 1. С. 10–16.
6. Butt A., Ahmed N., Mubin M. et al. Effect of PEG and mannitol induced water stress on regeneration in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Agricultural Science*. 2015. Vol. 52, No 4. P. 1025–1033.
7. Gawande N. D., Mahurkar D. G., Rathod T. H. et al. *In vitro* screening of wheat genotypes for drought tolerance. *Annual Review of Plant Physiology*. 2005. Vol. 19, No 2. P. 162–168.
8. Pykalo S. V., Demydov O. A., Prokopik N. I. et al. *In vitro* screening of the spring wheat F₂ hybrids for water deficit resistance. *ScienceRise: Biological Science*. 2018. No 3(12). P. 12–18.
9. Dragiiska R., Djilianov D., Denchev P., Atanassov A. *In vitro* selection for osmotic tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Bulgarian Journal of Plant Physiology*. 1996. Vol. 22, No 3–4. P. 30–39.
10. Munns R., James R. A. Screening methods for salinity tolerance: a case study with tetraploid wheat. *Plant and Soil*. 2003. Vol. 253, Iss. 1. P. 201–218. <https://doi.org/10.1023/A:1024553303144>
11. Вожегова Р. А., Лавриненко Ю. О., Коковіхін С. В. та ін. Інноваційні технології вирощування кукурудзи на зрошуваних землях півдня України. Херсон, 2017. 734 с.

12. Літвінов Д. В. Формування водного режиму ґрунту в системі короткоротаційних сівозмін. *Вісник аграрної науки*. 2015. № 11. С. 13–18.
 13. Писаренко П. В., Мишукова Л. С. Водоспоживання пшениці озимої. *Аграрні інновації*. 2020. № 1. С. 63–68.
 14. Камінський В. Ф., Гангур В. В. Динаміка продуктивної вологи в ґрунті за вирощування пшениці озимої в сівозмінах Лівобережного Лісостепу. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. № 3. С. 11–14. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.03.01>
 15. Писаренко П. В., Малярчук М. П., Малярчук А. С. та ін. Сумарне водоспоживання та випаровування буряків цукрових в умовах Півдня України. *Аграрні інновації*. 2022. № 13. С. 108–112. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.13.17>
 16. Танчик С. П., Сальніков С. М. Вплив систем землеробства на вміст доступної вологи в ґрунті в полі буряків цукрових Правобережного Лісостепу України. *Науковий вісник НУБіП України*. 2013. № 183. Ч. 2. С. 123–128. <https://doi.org/10.31210/visnyk2014.03.07>
 17. Likoswe A. A., Lawn R. J. Response to terminal water deficit stress of cowpea, pigeonpea, and soybean in pure stand and in competition. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2008. Vol. 59. P. 27–37. <https://doi.org/10.1071/AR07155>
 18. The Soybean: Botany, Production and Uses / edited by G. Singh. CAB International, 2014. P. 220–222.
 19. Гамаюнова В. В., Кудріна В. С. Водоспоживання соняшнику залежно від застосування біопрепаратів за вирощування в умовах Південного Степу України. *Наукові горизонти*. 2018. № 7/8. С. 27–35.
 20. Гамаюнова В. В., Кудріна В. С. Формування надземної маси і врожайності соняшнику під впливом окремих елементів технологій вирощування. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2020. Вип. 1. С. 50–57. <https://doi.org/10.31521/2313-092X/2020-5/105/-7>
 21. Домарацький Є. О., Добровольський А. В. Особливості водоспоживання соняшника за різних умов мінерального живлення. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2017. № 1. С. 51–56. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/8117>
 22. Кохан А. В. Водоспоживання соняшнику залежно від елементів технології. *Вісник Харківського національного аграрного університету*. 2016. Вип. 2. С. 85–93.
-

Наукове видання

Автори:

**О. І. Присяжнюк, М. О. Черняк, В. В. Мусіч,
Н. О. Кононюк, О. П. Шевченко, О. Ю. Половинчук,
С. М. Шклярчук, Е. Е. Навроцька, О. В. Копитов,
М. В. Марків, Є. В. Боюн, В. В. Слободянюк,
Б. М. Борисенко, О. В. Лук'янчук, В. І. Коваль**

**ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ РОСЛИН
З ВИКОРИСТАННЯМ ПОРТАТИВНИХ
ФОТОМЕТРІВ ВИДИМОГО СПЕКТРУ**

Науково-методичні рекомендації

Електронне видання

Технічне редагування та верстка
О. Ю. Половинчук

Погоджено до опублікування 10.12.2025.
Формат: PDF. Гарнітура Georgia.

Видавець

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН
03110, м. Київ, вул. Клінічна, 25
Тел.: (044) 275-50-00; e-mail: sugarbeet@ukr.net
<https://bio.gov.ua>

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5713 від 19.10.2017

