УДК 633.105:581.132:631.524 *https://doi.org/10.31861/biosystems2026.02.298*

ПРОТОКОЛ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ СВІТЛОВОГО РЕЖИМУ ПОЛОГУ ТА ДЕЯКИХ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОСЛИН СОЇ В ПОЛЬОВИХ УМОВАХ

В.А. НІКОРИЧ, І.Е. ДЕМИД, О.В. ВІДРАШКУ, В.Л. ВІДРАШКУ

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012
v.nikorych@chnu.edu.ua

Оцінювання просторової неоднорідності рослинного пологу сої потребує узгодженого використання показників, які характеризують світлове середовище, оптичні властивості листків і температуру їхньої поверхні. За обмеженого приладового забезпечення ці характеристики можна вимірювати портативними засобами, проте різна фізична природа їхніх показів ускладнює безпосереднє зіставлення та фізіологічну інтерпретацію результатів.

Мета роботи – розробити й описати відтворюваний протокол польового моніторингу посівів сої (Glycine max (L.) Merr.), який поєднує вимірювання освітленості люксметром, оптичного індексу листків за допомогою atLEAF CHL PLUS і температури поверхні листків інфрачервоним пірометром. Методичну основу становив польовий дослід, проведений у 2026 році на біобазі «Жучка» Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Протокол охоплює ідентифікацію облікових ділянок, формування постійної панелі маркованих рослин і додаткової вибірки, реєстрацію фенологічних фаз, просторовий розподіл вимірювань за ярусами пологу, контроль первинних записів і розрахунок похідних показників. Окремо визначено принципи організації набору даних та статистичного аналізу з урахуванням блокової структури досліду, вкладеності спостережень і повторних вимірювань у часі. Розглянуто обмеження використання люксометричної освітленості як характеристики світлового режиму, оптичного індексу як показника стану листка та температури його поверхні для діагностики фізіологічного стресу.

Запропонований протокол є методичною інтеграцією доступних інструментальних процедур, а не новим фізичним методом вимірювання чи валідованою системою фізіологічної діагностики.

Ключові слова: Glycine max, рослинний полог, освітленість, atLEAF CHL PLUS, оптичний індекс листка, температура листка, польовий моніторинг, повторні вимірювання

Вступ. Просторова організація посіву сої визначає розміщення листків, ступінь змикання рослинного пологу та вертикальну неоднорідність світлового середовища. Ці характеристики змінюються протягом вегетації внаслідок росту рослин, формування листкової поверхні й перерозподілу асиміляційного апарату між ярусами. Традиційні фенологічні спостереження, морфометричні обліки та визначення кінцевої продуктивності характеризують окремі аспекти розвитку культури, але не забезпечують безпосереднього опису динаміки світлових умов усередині пологу (Zhu J. et al., 2020; Sreekanta S., et al., 2024).

Портативні світлові сенсори, хлорофілометри й інфрачервоні термометри дають змогу проводити недеструктивні вимірювання в польових умовах. Водночас результати, отримані за допомогою цих приладів, належать до різних фізичних величин. Люксометр реєструє освітленість у люксах із фотометричним зважуванням за спектральною чутливістю людського ока. На відміну від нього, квантовий сенсор фотосинтетично активної радіації реєструє щільність потоку фотосинтетично активних фотонів. AtLEAF CHL PLUS формує відносний оптичний індекс на основі пропускання випромінювання у визначених спектральних діапазонах, тоді як інфрачервоний пірометр визначає температуру поверхні в межах свого поля зору (Uddling, J. et al., 2007; Ohno Y. et al., 2019; Walter, A., Schöbel, H., 2023; atLEAF CHL PLUS, 2026).

Використання цих приладів у межах одного досліду потребує не лише стандартизації окремих вимірювань, а й узгодження просторової схеми обліку, фенологічних строків, принципів відбору рослин та структури первинних даних. Без такого узгодження різниця між показниками може відображати не тільки біологічні відмінності між варіантами, а й неоднакові умови вимірювання. Додаткове методичне обмеження виникає тоді, коли повторні спостереження за тими самими рослинами аналізують разом із результатами

одноразового відбору інших рослин без урахування відмінностей між цими типами вибірки (Pagliari P. et al., 2022).

Мета роботи – розробити й описати протокол інструментального моніторингу посівів сої, який забезпечує узгоджене вимірювання освітленості на різних рівнях пологу, оптичного індексу листків і температури їхньої поверхні, а також стандартизовану організацію первинних даних для подальшого статистичного аналізу.

Стаття має методичний характер. Польовий експеримент використано як основу для формування та конкретизації процедур спостереження; кількісні результати порівняння варіантів тут не аналізуються. Відповідно, предметом роботи є структура протоколу, правила виконання вимірювань і межі інтерпретації отриманих показників, а не встановлення ефекту певної ширини міжряддя на фізіологічний стан чи продуктивність сої.

Матеріали та методичні засади розробки протоколу.

Експериментальна основа. Протокол сформовано на основі польового досліду, проведеного протягом 2026 року на біобазі «Жучка» Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Початковий план передбачав порівняння посівів сої за ширини міжрядь 15, 30, 45 і 70 см із використанням схеми рандомізованих повних блоків (RCBD). У плані досліду передбачено чотири повторення варіантів (Hoshmand R., 2018). Ширина захвату сівалки становила 3,6 м, довжина проходу – 28 м, геометрична площа одного проходу – приблизно 100 м². Між проходами залишали буферні смуги завширшки 0,5 м, між варіантами – 1 м. Геометрична площа проходу не тотожна площі, безпосередньо охопленій вимірюваннями окремих показників.

Експериментальною одиницею для порівняння варіантів є облікова ділянка, якій призначено певний варіант досліду. Окремі рослини, листки та точки вимірювання в межах ділянки становлять підвибірки або вкладені спостереження, а не незалежні повторення експериментального чинника. Цей принцип визначає організацію первинних записів і подальшу статистичну обробку (Hoshmand R., 2018).

Формування вибірки та фенологічні строки. На кожній обліковій ділянці під час кожного етапу дослідження оцінювали 20 рослин: 15 рослин постійної панелі, попередньо відібраних і маркованих для повторних спостережень, та 5 додаткових рослин, які відбирали випадковим способом безпосередньо під час відповідного обліку. Рослини постійної панелі відбирали з інтервалом приблизно 1,5 м і маркували червоною поліетиленовою стрічкою, що забезпечувало їх візуальне розпізнавання під час наступних обліків. Постійна панель давала змогу простежувати динаміку показників на тих самих рослинах упродовж вегетації, тоді як додаткова випадкова вибірка характеризувала внутрішньоділянкову мінливість на відповідному етапі розвитку. Під час повторних обліків вимірювання проводили на сформованих листках відповідних ярусів; не передбачалося, що в усіх випадках це будуть ті самі листки, які оцінювали на попередніх етапах. Дані маркованих рослин і додаткової вибірки ідентифікували окремо з урахуванням відмінностей у схемі спостережень.

Початковий план фенологічних спостережень охоплював фази R2, R4, R5, R6 і R7: повне цвітіння, повне формування бобів, початок наливу насіння, повний налив насіння та початок достигання відповідно (Fehr, W., Caviness, C., 1977; Naeve S.L., 2018). Фактичну фазу визначали за морфологічними ознаками та реєстрували для кожної ділянки. Коли вимірювання всіх варіантів проводили в одну календарну дату, але рослини перебували на різних етапах розвитку, у первинних записах зазначали фактичну фазу кожної ділянки. Календарну дату не використовували як заміну фенологічної оцінки.

Обліки було організовано за принципом досягнення кожним варіантом визначеної фази, а не за спільною календарною датою, це правило фіксували у плані спостережень. Такий підхід дає змогу розрізняти порівняння варіантів за однакової фенологічної фази та порівняння їхнього стану в один календарний момент. Ці два типи зіставлення відповідають різним дослідницьким питанням і не повинні змішуватися під час інтерпретації.

Прилади та загальні умови вимірювання. Для оцінювання світлового середовища використовували цифровий люксометр із виносним фотодатчиком; результат реєстрували в люксах (Yang, S et al, 2026). Оптичний індекс листків визначали портативним хлорофілометром atLEAF CHL PLUS (FT Green LLC, США), покази якого зберігали в індексних одиницях приладу. Принцип роботи цього типу хлорофілометрів ґрунтується на аналізі пропускання випромінювання у визначених спектральних діапазонах; співвідношення між показами приладу й концентрацією хлорофілу залежить від культури та потребує належного калібрування (Zhu et al., 2012; Novichonok et al., 2016). Температуру поверхні листків вимірювали інфрачервоним пірометром (Mohamed, N. E.,

2024).

Для кожного вимірювання реєстрували дату, час, блок, ділянку, варіант, фактичну фенологічну фазу, ідентифікатор рослини або точки, ярус пологу за потреби, показ приладу та примітки щодо умов спостереження. Оптичні вимірювання планували за стабільного природного освітлення, переважно в інтервалі 09:00–11:00. Альтернативне вікно 16:00–18:00 допускали за умови однакового застосування до порівнюваних варіантів і реєстрації часу вимірювання.

Вимірювання не проводили під час опадів, за наявності роси, різкої зміни хмарності або за умов, коли оператор затінював фотодатчик. Якщо покази отримували під час помітної зміни освітлення, їх повторювали після стабілізації умов і фіксували відповідну примітку. Ці правила не усувають усіх джерел мінливості польових вимірювань, але дають змогу виявляти ситуації, коли відмінності між показами можуть бути зумовлені процедурою, а не властивостями рослинного пологу.

Польовий протокол вимірювань. Польовий моніторинг організовано як послідовність взаємопов'язаних процедур: ідентифікація облікових ділянок і реєстрація фенологічної фази, формування вибірки рослин, виконання інструментальних і морфометричних вимірювань, контроль первинних даних та розрахунок похідних показників. Загальну послідовність процедур, які лягли в основу створеного протоколу, наведено на рисунку 1.

Вимірювання освітленості в різних ярусах пологу. Світловий профіль визначають на трьох рівнях: над верхньою поверхнею рослинного пологу, у його середній частині та в нижньому ярусі. Вимірювання над пологом використовують як опорний рівень для розрахунку відносної освітленості всередині посіву. Просторове положення датчика в кожному ярусі має відповідати прийнятій схемі обліку, а порядок вимірювань і часовий інтервал між рівнями слід максимально уніфікувати.



Рис. 1. Загальна схема організації польового інструментального моніторингу посівів сої

Fig. 1. General framework of field instrumental monitoring in soybean crops

Для оцінювання просторового розподілу освітленості в межах кожної облікової ділянки використовували п’ять рівновіддалених точок вимірювання. Така кількість точок була прийнята як практичний компроміс між деталізацією просторового профілю освітленості та тривалістю польових вимірювань. Збільшення кількості точок потребує додаткових витрат часу, тому в межах запропонованого протоколу застосовано уніфіковану схему з п’ятьма точками на кожній обліковій ділянці в кожному повторенні досліду. У кожній точці вимірювали освітленість над пологом і всередині нього відповідно до передбачених рівнів обліку.

Відносне проникнення світла до середнього та нижнього ярусів розраховують як відношення освітленості відповідного ярусу до опорної освітленості над пологом, виражене у відсотках. Розрахунок виконують за узгодженими первинними значеннями; нульові або явно некоректні опорні покази не використовують для обчислення відношення. У первинній таблиці зберігають покази люксметра, а розраховані відносні величини записують в окремі поля.

Показники освітленості інтерпретують як фотометричну характеристику світлового середовища за конкретних умов спостереження. Вони дають змогу порівнювати вертикальний розподіл освітленості за стандартизованої процедури, але не замінюють вимірювання щільності потоку фотосинтетично активних фотонів (PPFD) і не є прямою оцінкою частки поглинутої фотосинтетично активної радіації.

Вимірювання оптичного індексу листків. Оптичний індекс листків визначають портативним хлорофілометром (наприклад atLEAF CHL PLUS) на центральному листочку складного трійчастого листка верхнього, середнього та нижнього ярусів рослини. Для верхнього ярусу обирають наймолодший повністю сформований, розкритий листок. В інших ярусах вимірюють сформовані листки, що відповідають положенню ярусу. Апертурний отвір приладу розміщують в середній частині листкової пластинки між головною жилкою та краєм листка, уникаючи потрапляння великих жилок у зону зчитування. На одній рослині оцінювали по одному листку кожного з трьох ярусів. Такий підхід обмежував тривалість обліку та ризик зміни умов освітлення протягом вимірювання всієї ділянки.

Для кожного листка виконують серію з трьох технічних зчитувань. Підсумкове значення для листка формують шляхом усереднення цих зчитувань. У використаному режимі серійного вимірювання atLEAF CHL PLUS середнє значення формував сам прилад в автоматичному режимі. Отримані показники пов’язують з ідентифікатором ділянки, рослини, датою та ярусом пологу. Після контролю первинних записів обчислюються середні значення оптичного індексу окремо для верхнього, середнього та нижнього ярусів у межах вибірки рослин відповідної ділянки. За потреби додатково визначають середнє значення трьох ярусів для окремої рослини та середнє таких рослинних значень у межах ділянки. Первинні дані й результати усереднення зберігають окремо, щоб не втрачати можливості аналізувати вертикальну неоднорідність оптичного індексу.

Покази atLEAF CHL PLUS трактують як відносний оптичний індекс, пов'язаний з відповідними властивостями листка. Без калібрування для відповідного рослинного матеріалу їх не подають як абсолютну концентрацію хлорофілу, прямий показник інтенсивності фотосинтезу або самостійний діагностичний критерій дефіциту азоту. Відмінності між ярусами можуть бути описані через середні значення індексу та їхні контрасти, однак фізіологічне пояснення цих відмінностей потребує врахування віку листків, їхнього положення, освітленості та інших чинників.

Вимірювання температури поверхні листків. Температуру поверхні листків вимірюють інфрачервоним пірометром, спрямовуючи його на центральний листочок складного трійчастого листка верхнього, середнього або нижнього ярусу відповідно до схеми обліку. Для верхнього ярусу обирають наймолодший повністю сформований листок, а в інших ярусах — сформовані листки, що відповідають їхньому положенню в полозі. Вимірювальну ділянку спрямовують на листкову пластинку, уникаючи потрапляння до поля зору ґрунту та інших сторонніх поверхонь. Для повторних обліків на маркованих рослинах використовують сформовані листки відповідного ярусу; тотожність листків між датами не вважається обов’язковою умовою. Покази реєструють разом із датою, часом, ідентифікатором ділянки та рослини, а також ярусом пологу. Відстань і кут вимірювання встановлюється відповідно до технічних характеристик застосованого приладу. Якщо до поля зору потрапляють сторонні поверхні або вимірювання не відповідають прийнятій процедурі, це фіксують в польовому журналі.

Для подальшої інтерпретації доцільно також реєструвати температуру повітря в часовій близькості до вимірювання листків. Якщо температуру повітря не вимірювали, різницю між температурою листка й повітря не розраховують

за припущенням або за значенням з іншого часу.

Різницю температур листка й повітря можна використовувати як описову характеристику температурного стану листка в конкретних умовах вимірювання. Її не слід ототожнювати з індексом водного стресу культури без відповідної методики, необхідних метеорологічних вимірювань і валідації. Температура поверхні залежить не лише від фізіологічного стану рослини, а й від радіаційного навантаження, вітру, вологості повітря, кута вимірювання та властивостей поверхні.

Супутня морфометрія та верифікація первинних даних. Паралельно з інструментальними вимірюваннями реєструють необхідні морфометричні показники (висоту рослин, кількість міжвузлів тощо) за єдиними правилами. Для маркованих рослин показники записують під постійними ідентифікаторами, що дає змогу аналізувати їхню динаміку. Результати додаткової вибірки п'яти немаркованих рослин зберігають як окремі спостереження відповідної дати.

У польовому журналі фіксують пошкодження листків, механічні ушкодження рослин, затінення вимірюваної поверхні та інші обставини, здатні вплинути на покази приладів. Якщо листок мокрий, пошкоджений або затінений і через це непридатний для вимірювання, спочатку оцінюють можливість усунути відповідну перешкоду без зміни об’єкта спостереження: за наявності поверхневої вологи вимірювання відкладають до висихання листка, а за тимчасового затінення – до відновлення стабільного освітлення. Якщо листок непридатний для вимірювання, його можна замінити найближчим типовим сформованим листком того самого ярусу на цій самій рослині. Факт заміни та її причину обов’язково зазначають у польовому журналі. Якщо придатний листок відібрати неможливо, значення реєструють як пропущене, не замінюючи його довільним числом. Ці правила є процедурою контролю якості для подальшого застосування протоколу; у проведеному польовому досліді випадків, що вимагали такої заміни, не спостерігали.

Розрахунок показників та організація даних. Первинні значення приладів зберігають окремо від розрахованих змінних. Для кожного похідного показника визначають формулу, одиницю вимірювання та перелік первинних значень, використаних у розрахунку. Такий принцип дає змогу повторно перевірити обчислення й уникнути втрати інформації внаслідок передчасного усереднення.

Повний перелік вимірюваних і похідних індикаторів, відповідні інструментальні процедури, а також межі та обмеження їхньої аналітичної інтерпретації систематизовано в таблиці 1.

Для показників освітленості спочатку зберігають значення на рівні точки вимірювання. Якщо п'ять точок використовують для отримання середнього значення на ділянку, усереднення виконують за однаковим правилом для кожного ярусу. У разі розрахунку відносного проникнення світла необхідно заздалегідь визначити, чи відношення обчислюють для кожної просторової точки з подальшим усередненням, чи як відношення середніх показів ярусу й опорного рівня. Ці операції загалом не є тотожними, тому вибране правило має бути зазначене в протоколі.

Для оптичного індексу середнє значення можна розраховувати лише після визначення набору показів, які об'єднують: повторні покази одного листка, різні листки однієї рослини або листки різних рослин не слід без пояснення зводити в одну сукупність. Вертикальний контраст (VG) обчислюють за узгодженими показами верхнього й нижнього ярусів. Відношення (VU) використовують лише тоді, коли його знаменник відмінний від нуля, а спосіб формування пар значень визначений заздалегідь.

Структура електронного набору даних має забезпечувати однозначну ідентифікацію кожного запису. Мінімальний набір полів включає ідентифікатори блоку та ділянки, ширину міжряддя, дату, фенологічну фазу, тип вибірки, ідентифікатор рослини або точки, ярус пологу за потреби, назву показника, первинне значення, одиницю вимірювання та примітку. Розраховані показники зберігають в окремих полях або пов'язаній таблиці (табл. 2).

Перед статистичним аналізом перевіряють повноту ідентифікаційних полів, відповідність одиниць вимірювання, наявність пропущених значень і коректність розрахунків. Пропущені або сумнівні спостереження не замінюють автоматично середніми значеннями. Причину пропуску, повторного вимірювання або вилучення запису фіксують у журналі контролю якості. Доповнення інструментального моніторингу вимірюванням структурних параметрів та елементів насіннєвої продуктивності дає змогу встановити безпосередній зв’язок між оптико-тепловими властивостями намету й підсумковою біологічною ефективністю сої.

Таблиця 1.

Показники, процедури вимірювання та обмеження їх інтерпретації в протоколі моніторингу посівів сої

Table 1.

Indicators, measurement procedures, and interpretation limitations in the soybean canopy monitoring protocol

Показник	Об'єкт вимірювання	Кількість повторів	Одиниця вимірю-вання	Спосіб обчислення	Інтерпретація та обмеження
Освітленість над пологом L0	Відкрита ділянка над верхнім рівнем рослинного пологу	5 точок на ділянку для профілю освітленості	лк	Безпосередні покази люксметра	Опорний рівень освітленості для розрахунку відносного проникнення світла. Залежить від погодних умов, часу доби та орієнтації датчика
Освітленість у середній частині пологу Lm	Середній ярус рослинного пологу	5 точок на ділянку	лк	Безпосередні покази люксметра	Характеризує освітленість середнього ярусу. Не є прямим вимірюванням фотосинтетично активної радіації (ФАР)
Освітленість у нижній частині пологу Lb	Нижній ярус рослинного пологу	5 точок на ділянку	лк	Безпосередні покази люксметра	Характеризує освітленість нижнього ярусу; залежить від структури пологу та умов вимірювання
Відносне проникнення світла до середнього ярусу Tm	Розрахунковий показник за вимірюваннями Lm та L0	На основі відповідних вимірювань освітленості	%	Tm=(Lm/L0)·100	Частка освітленості середнього ярусу відносно рівня над пологом. Не є безпосередньою оцінкою частки поглинутої фотосинтетично активної радіації (ФАР)
Відносне проникнення світла до нижнього ярусу Tb	Розрахунковий показник за вимірюваннями Lb та L0	На основі відповідних вимірювань освітленості	%	Tb=(Lb/L0)·100	Характеризує відносну освітленість нижнього ярусу; не тотожний показнику поглинання світла пологом
Зниження освітленості в середньому ярусі Rm	Розрахунковий показник	Відповідає кількості розрахованих значень (Tm)	%	Rm=100-Tm	Відносне зниження освітленості порівняно з опорним рівнем над пологом. Не слід ототожнювати з фізично виміряним поглинанням енергії

Зниження освітленості в нижньому ярусі Rb	Розрахунковий показник	Відповідає кількості розрахованих значень (Tb)	%	Rb=100-Tb	Описує вертикальний градієнт освітленості, але сам по собі не встановлює причину його формування
Оптичний індекс верхнього ярусу CHLu	Відібрані листки верхнього ярусу	Визначається кількістю листків і серій вимірювань, передбачених робочим протоколом	Індексні одиниці приладу atLEAF CHL PLUS	Безпосередні покази приладу; спосіб усереднення — за протоколом вимірювання	Відносний оптичний індекс, пов’язаний з оптичними властивостями листка. Не слід без окремої калібровки подавати як абсолютну концентрацію хлорофілу
Оптичний індекс середнього ярусу CHLm	Відібрані листки середнього ярусу	За робочим протоколом	Індексні одиниці приладу	Безпосередні покази приладу	Дає змогу оцінити вертикальну неоднорідність оптичного індексу; значення залежать також від характеристик листка та умов вимірювання
Оптичний індекс нижнього ярусу CHLl	Відібрані листки нижнього ярусу	За робочим протоколом	Індексні одиниці приладу	Безпосередні покази приладу	Характеризує оптичний стан відібраних листків нижнього ярусу; не є самостійним доказом дефіциту азоту
Середній оптичний індекс CHLmean	Значення для трьох ярусів або інша заздалегідь визначена група вимірювань	За кількістю включених вимірювань	Індексні одиниці приладу	CHLmean=Σ CHLi/n, якщо використовується арифметичне середнє	Узагальнює оптичні показники вибраних листків. У статті потрібно чітко визначити, які саме значення входять до розрахунку
Вертикальний контраст оптичного індексу VG	Верхній і нижній яруси	За кількістю пар порівнюваних значень	Індексні одиниці приладу	VG=CHLu-CHLl	Описує різницю між ярусами. Не є безпосередньою оцінкою швидкості фотосинтезу або транспорту азоту
Відносне співвідношення оптичних індексів VU	Верхній і нижній яруси	За кількістю пар порівнюваних значень	Безрозмірний коефіцієнт	VU=CHLl/CHLu	Дає змогу порівнювати відносну вираженість вертикального контрасту. Розрахунок неможливий за нульового знаменника; індекс не є прямим фізіологічним діагнозом
Температура поверхні листка Tl	Поверхня листка, на яку спрямовано інфрачервоний пірометр	Кількість вимірювань необхідно зафіксувати в робочому протоколі	°C	Безпосередні покази приладу	Відображає температуру поверхні в полі зору приладу. Залежить від радіаційних умов, вітру, вологості, кута та відстані вимірювання

Різниця температур листка й повітря ΔT	Температура листка та температура повітря	За відповідними вимірюваннями	°C	ΔT=Tl-Ta	Описовий температурний показник. Без додаткових вимірювань і валідації не є індексом водного стресу CWSI
Висота рослини	Рослини сої	15 маркованих рослин на ділянку; додатково 5 випадково відібраних рослин у дату обліку	см	Безпосереднє вимірювання; статистичний показник обчислюють за визначеною одиницею аналізу	Характеризує морфометричний розвиток. Потрібно розрізняти повторні вимірювання маркованих рослин і незалежні вибірки нових рослин
Кількість міжвузлів	Рослини сої	15 маркованих рослин на ділянку; додатково 5 випадково відібраних рослин у дату обліку	шт. на рослину	Підрахунок міжвузлів за єдиним правилом	Відображає морфологічний розвиток; порівняння має враховувати фазу розвитку та особливості генотипу
Густота стояння рослин	Облікова площа посіву	4 повторення на варіант за описом протоколу	рослин/м² або тис. рослин/га	Кількість рослин / облікова площа; перерахунок на гектар	Потрібно вказати фактичну довжину й площу облікового відрізка. Цей показник не слід плутати з кількістю рослин, відібраних для індивідуальних вимірювань
Кількість бобів і насінин	Рослини, відібрані для обліку біологічної продуктивності	За схемою відбору на R8; кількість необхідно остаточно узгодити з первинним протоколом	шт. на рослину	Підрахунок окремо для кожної облікової рослини	Показники структури продуктивності. Потрібно зазначити, чи рослини відібрано з маркованої когорти, чи випадково
Маса насіння	Насіння з облікових рослин	За схемою відбору на R8	г на рослину або г на пробу	Зважування з обов’язковим зазначенням того, до якої проби належить маса	Для коректного порівняння необхідно стандартизувати вологість насіння або перераховувати масу до визначеної вологості

Маса 1000 насінин	Репрезентативна проба насіння	Кількість повторів визначається планом лабораторного обліку	г	Маса проби перераховується на 1000 насінин	Характеризує крупність насіння; необхідно зазначити вологість, за якої визначено масу
Суха надземна біомаса	Рослини або проби рослинної маси	За схемою відбору на R8	г на рослину або г/м²	Сушіння до сталої маси; для показника на площу потрібна відома облікова площа	Умова «до сталої маси» потребує повторного зважування. Температурний режим сушіння слід описати окремо
Індекс урожайності (harvest index)	Зернова продукція та загальна біомаса	За відповідними обліковими пробами	частка або %	HI=Mseed/Mtotal) або HI=(Mseed/Mtotal)·100)	Перед розрахунком потрібно визначити, що саме входить до загальної біомаси та чи всі компоненти приведені до однакової основи за вологістю

Примітка: *Кількість повторів у таблиці означає кількість облікових одиниць або точок вимірювання, а не кількість незалежних експериментальних повторень. Експериментальною одиницею під час порівняння варіантів є ділянка, а не окрема рослина, листок або точка вимірювання. Формули для відносного проникнення світла застосовують лише за наявності коректного опорного показу. Правила усереднення первинних показів визначають до аналізу й однаково застосовують до всіх порівнюваних варіантів.*

Таблиця 2.

Приклад структури запису первинних даних

Table 2.

Template for primary data entries

Поле	Приклад	Призначення
block_id	B1	Ідентифікатор блоку
plot_id	P-B1-30	Унікальний ідентифікатор ділянки
row_spacing_cm	30	Ширина міжряддя, см
date	YYYY-MM-DD	Дата обліку
phenophase	R4	Фактична фаза розвитку
plant_id	M07	Ідентифікатор рослини (якщо застосовно)
sample_type	tagged / random	Маркована панель або додаткова вибірка
canopy_layer	upper / middle / lower	Ярус пологу, якщо застосовно
indicator	illuminance	Назва показника
raw_value	числове значення	Первинний показ
unit	lx, °C, atLEAF units	Одиниця вимірювання
derived_value	числове значення або NA	Розрахований показник
note	текст або порожнє поле	Пошкодження, відхилення, інші примітки

У межах цього модуля вимірюють морфометричні показники (висоту рослин, кількість міжвузлів та густоту стояння), а під час збиральної стиглості (фаза R8) визначають елементи продуктивності: кількість бобів і насінин, масу насіння з рослини, масу 1000 насінин, суху надземну біомасу та індекс урожайності (harvest index). Оцінку морфометричних параметрів здійснюють безпосередньо у полі на маркованих і додаткових вибірках рослин, тоді як визначення сухої біомаси проводить шляхом висушування рослинних проб до постійної маси за температури 105 °C з обов'язковим перерахунком маси насіння на стандартну базову вологість 14% (ДСТУ 4828:2007 / ДСТУ 4582:2006) . Усі ці показники, регламент їх фіксації та специфіку інтерпретації інтегровано до загальної системи параметрів протоколу (див. табл. 1), що забезпечує коректність їх подальшого статистичного аналізу.

Статистичний та інтегрований аналіз. Статистичний аналіз виконують послідовно, відповідно до структури польового досліду, типу показників і способу формування вибірок. Експериментальною одиницею під час порівняння ширини міжрядь є облікова ділянка. Окремі рослини, листки та точки вимірювання освітленості становлять внутрішньоділянкові спостереження й не розглядаються як незалежні повторення варіантів досліду (Hoshmand R., 2018; Schielzeth, H., 2020).

Етап 1. Підготовка та контроль первинних даних. Перед статистичним аналізом перевіряють унікальність ідентифікаторів ділянок і рослин, відповідність записів датам та фазам розвитку, одиниці вимірювання, допустимість числових значень і наявність пропущених спостережень. Дані постійно маркованих рослин відокремлюють від даних додаткової випадкової вибірки немаркованих рослин. Виправлення помилок здійснюють лише за наявності підстав у первинних записах. Пропущені значення не замінюють автоматично середніми або іншими розрахунковими величинами; причини пропусків, технічні збої та відхилення від протоколу фіксують окремо.

Етап 2. Описова характеристика показників. Для кожного варіанта ширини міжрядь і кожного етапу обліку визначають кількість доступних спостережень та описові статистики. За відповідного характеру розподілу використовують середнє значення зі стандартним відхиленням, а за асиметричного розподілу або наявності впливових крайніх значень додатково розглядають медіану та міжквартильний інтервал. Первинні дані візуалізують за варіантами й датами, щоб виявити можливі помилки, неоднорідність варіації та індивідуальні траєкторії маркованих рослин. Окремі спостереження не вилучають лише на підставі їхньої статистичної незвичності.

Етап 3. Порівняння варіантів досліду. Основний аналіз спрямовують на оцінювання відмінностей між варіантами ширини міжрядь (15, 30, 45 і 70 см). Для цього використовують показники, агреговані на рівні облікової ділянки для відповідної дати або фази розвитку, якщо таке агрегування відповідає способу вимірювання.

У статистичній моделі враховують варіант ширини міжрядь і блокову структуру

рандомізованого повноблокового досліду. Блок включають до моделі відповідно до обраного підходу до трактування блокового чинника. Кількість незалежних повторень визначають за кількістю облікових ділянок, а не за кількістю виміряних рослин або листків.

Етап 4. Аналіз сезонної динаміки. Для показників, виміряних на кількох етапах розвитку, оцінюють ефекти варіанта, фази розвитку та їхньої взаємодії, якщо це підтримується фактичною схемою спостережень. За достатньої повноти даних і відповідної структури залишків можуть застосовуватися лінійні змішані моделі з урахуванням блоків, ділянок і залежності між повторними вимірюваннями. Для постійно маркованої панелі враховують повторні спостереження тих самих рослин у межах ділянки. Дані додаткової випадкової вибірки аналізують окремо або за моделлю, яка прямо враховує відбір нових рослин на кожному етапі. Їх не трактують як повторні вимірювання тих самих індивідуальних рослин.

Етап 5. Аналіз вертикального профілю пологу. Для освітленості аналізують показники, отримані над пологом, у середньому та нижньому ярусах, зберігаючи інформацію про дату й ділянку. За наявності належно узгоджених вимірювань можна розраховувати відносне проникнення освітленості до відповідного ярусу як відношення освітленості в цьому ярусі до референтного значення над пологом, виражене у відсотках. Якщо розраховують коефіцієнт затінення як доповнення до 100 %, його визначення та використану референтну величину зазначають у методиці. Відносні показники освітленості інтерпретують як характеристики фотометричної освітленості, а не як прямі вимірювання фотосинтетично активної радіації.

Для оптичного індексу atLEAF CHL PLUS окремо оцінюють варіацію значень за ярусами пологу, варіантами досліду та етапами обліку. Вертикальний контраст індексу можна розраховувати як різницю між значеннями верхнього й нижнього ярусів за умови, що спосіб відбору та кількість вимірювань у цих ярусах є порівнюваними. Отриманий контраст характеризує різницю оптичного індексу, але без відповідного калібрування не є кількісною оцінкою різниці абсолютного вмісту хлорофілу.

Етап 6. Інтегрований аналіз показників. Після окремого аналізу освітленості, оптичного індексу та температури поверхні листків перевіряють їхні можливі статистичні зв'язки. Для цього зіставляють показники, виміряні на одній ділянці та в узгоджені дати або фази розвитку. Як первинний підхід можуть використовуватися діаграми розсіювання та кореляційний аналіз; вибір коефіцієнта кореляції визначають за характером залежності й властивостями даних. Якщо необхідно одночасно врахувати ширину міжрядь, фазу розвитку або інші чинники, застосовують регресійний чи змішаний модельний підхід за умови достатньої кількості незалежних ділянок. Взаємозв'язки, отримані на рівні окремих рослин, не переносять автоматично на рівень ділянок і навпаки.

Етап 7. Перевірка моделей та подання результатів. Вибір остаточної статистичної моделі здійснюють після перевірки повноти даних, розподілу залишків, однорідності дисперсій, впливових спостережень і структури залежності повторних вимірювань. За потреби розглядають перетворення показників або альтернативні моделі, що відповідають характеру даних. Для основних порівнянь подають оцінки ефектів, міри невизначеності та довірчі інтервали; за проведення множинних попарних порівнянь зазначають використаний спосіб контролю множинності. У графіках і таблицях чітко розрізняють кількість незалежних ділянок, кількість рослин і кількість технічних або просторових вимірювань.

Результати інтегрованого аналізу інтерпретують з урахуванням фізичного змісту кожного показника. Освітленість у люксах не є прямим еквівалентом фотосинтетично активної радіації, індекс atLEAF не дорівнює абсолютній концентрації хлорофілу без відповідного калібрування, а різниця температур листка й повітря сама по собі не встановлює наявності або ступеня водного стресу. Виявлені статистичні асоціації розглядають як підставу для подальшої перевірки гіпотез, а не як самостійний доказ фізіологічного механізму або причинного ефекту. Якщо обсяг чи структура даних не забезпечують надійного модельного аналізу, інтерпретацію обмежують описовими статистиками та графічним зіставленням.

Обмеження застосування протоколу. Запропонований протокол стандартизує послідовність і організацію польових вимірювань, але не усуває фізичних обмежень використаних приладів. Люксометр вимірює фотометричну освітленість, а не щільність потоку фотосинтетично активних фотонів. Відносні показники освітленості характеризують співвідношення виміряних значень за конкретних умов і не розділяють поглинання, відбиття, розсіювання та проходження випромінювання крізь полог (Ohno Y. et al., 2019; Walter, A., Schöbel, H., 2023).

AtLEAF CHL PLUS надає відносний

оптичний індекс, значення якого залежить від оптичних властивостей листка. Без калібрування для відповідного рослинного матеріалу його не можна подавати як абсолютну концентрацію хлорофілу або безпосередній показник швидкості фотосинтезу (Uddling, J. et al. 2007, Novichonok, E. V et al. 2016). Пірометр реєструє температуру поверхні в межах поля зору; потрапляння ґрунту або інших об'єктів до цього поля може спотворювати оцінку температури листка. Температурні показники також залежать від умов навколишнього середовища й процедури вимірювання (Jones, H. G., 1999).

Додаткове обмеження стосується перенесення результатів між сортами, групами стиглості, приладами та умовами вирощування. Відтворюваність процедури не означає автоматичної еквівалентності вимірювань, виконаних за різних умов, і не дає підстав установлювати універсальні порогові значення без окремої перевірки.

Нарешті, протокол сформовано на основі конкретного польового досліду. Його практичну відтворюваність, чутливість показників до просторової організації посіву та придатність для виявлення фізіологічних закономірностей потрібно оцінювати за фактичними даними. До завершення такого аналізу методику слід розглядати як стандартизовану схему збирання й організації даних, а не як валідовану систему діагностики стану посівів.

Висновки. Розроблений протокол поєднує вимірювання фотометричної освітленості на різних рівнях пологу сої, оптичного індексу листків за допомогою atLEAF CHL PLUS і температури їхньої поверхні інфрачервоним пірометром. Його методичний зміст полягає в узгодженні просторової схеми обліку, правил відбору рослин, фенологічної реєстрації та структури первинних даних.

Розмежування постійної панелі маркованих рослин і додаткової вибірки, а також урахування вкладеності спостережень дають змогу підготувати дані до статистичного аналізу без ототожнення кількості вимірювань із кількістю незалежних експериментальних повторень. Збереження первинних значень окремо від похідних характеристик забезпечує прозорість обчислень і можливість повторної перевірки.

Інтерпретація результатів має враховувати фізичну природу вимірюваних величин: люксометрична освітленість не замінює вимірювання PPFD, оптичний індекс atLEAF не є абсолютною концентрацією хлорофілу без калібрування, а температура листка сама по собі не встановлює водного стресу. Окремого врахування потребує й обмежена порівнюваність варіантів різних груп стиглості.

Протокол створює методичну основу для узгодженого збирання та подальшого аналізу польових даних. Висновки про ефективність його застосування, закономірності впливу просторової організації посіву та фізіологічні механізми мають ґрунтуватися на результатах статистичного опрацювання й, за потреби, додаткової валідації.

Конфлікт інтересів. *Автори заявляють, що дослідження проводилося за відсутності будь-яких комерційних або фінансових відносин, які можна було б витлумачити як потенційний конфлікт інтересів.*

Список літератури / References:

1. DSTU 4828:2007. Oilseeds. Methods for determination of moisture content. [Effective from 2009-01-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2008. 16 p.
2. DSTU 4582:2006. Soybean. Specifications. [Effective from 2007-07-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2007. 12 p.
3. atLEAF CHL PLUS: handheld chlorophyll meter description. Офіційний сайт виробника. URL: https://www.atleaf.com/atLEAF_CHL_PLUS (дата звернення: 09.07.2026).
4. Fehr, W., & Caviness, C. (1977). Stages of soybean development.
5. Hoshmand, R. (2018). *Design of experiments for agriculture and the natural sciences*. CRC Press. https://surl.li/kaddfj (дата звернення: 03.05.2026).
6. Jones, H. G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and forest meteorology*, *95*(3), 139-149. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00030-1.
7. Mohamed, N. E., Mustafa, A. R. A., Bedawy, I. M., Ahmed, A. S., Abdelsamie, E. A., Mohamed, E. S., ... & Shokr, M. S. (2024). Utilizing infrared thermometry to assess the crop water stress index of wheat genotypes in arid regions under varying irrigation regimes. *Agronomy*, *14*(8), 1814. https://doi.org/10.3390/agronomy14081814
8. Naeve, S. L. (2018). *Soybean growth stages*. University of Minnesota Extension. https://extension.umn.edu/agriculture/crop-production/soybean/soybean-growth-stages (дата звернення: 03.09.2026).
9. Novichonok, E. V., Novichonok, A. O., Kurbatova, J. A., & Markovskaya, E. F. (2016). Use of the atLEAF+ chlorophyll meter for a nondestructive estimate of chlorophyll content. *Photosynthetica*, *54*(1), 130-137. https://doi.org/10.1007/s11099-015-0172-8
10. Ohno, Y., Goodman, T., Blattner, P., Schanda, J., Shitomi, H., Sperling, A., & Zwinkels, J. (2020). Principles governing photometry. *Metrologia*, *57*(2), 020401 https://www.bipm.org/documents/20126/28126817/bi

pm%20publication-ID-3320/6fd541a7-7d45-b7a4-fda6-0c8c879d4526 (дата звернення: 02.09.2026).
11. Pagliari, P., Galindo, F. S., Strock, J., & Rosen, C. (2022). Use of repeated measures data analysis for field trials with annual and perennial crops. *Plants*, *11*(13), 1783. https://doi.org/10.3390/plants11131783.
12. Schielzeth, H., Dingemanse, N. J., Nakagawa, S., Westneat, D. F., Allegue, H., Teplitsky, C., ... & Araya-Ajoy, Y. G. (2020). Robustness of linear mixed-effects models to violations of distributional assumptions. *Methods in ecology and evolution*, *11*(9), 1141-1152. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13434
13. Sreekanta, S., Haaning, A., Dobbels, A., O'Neill, R., Hofstad, A., Virdi, K., ... & Lorenz, A. J. (2024). Variation in shoot architecture traits and their relationship to canopy coverage and light interception in soybean (Glycine max). *BMC Plant Biology*, *24*(1), 194. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04859-2.
14. Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., & Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis research*, *91*(1), 37-46. https://doi.org/10.1007/s11120-006-9077-5.
15. Walter, A., & Schöbel, H. (2023). Shed light on photosynthetic organisms: a physical perspective to correct light measurements. *Photosynthesis Research*, *156*(3), 325-336. https://doi.org/10.1007/s11120-023-01001-5.
16. Yang, S., Sun, J., Wang, Z., Li, J., Xu, M., & Fan, G. (2026). Research on marginal effects of dry matter accumulation and extinction coefficient in maize–soybean intercropping composite population. *Agriculture*, *16*(3), 371. https://doi.org/10.3390/agriculture16030371
17. Zhu, B., Liu, F., Xie, Z., Guo, Y., Li, B., & Ma, Y. (2020). Quantification of light interception within image-based 3-D reconstruction of sole and intercropped canopies over the entire growth season. *Annals of botany*, *126*(4), 701-712. https://doi.org/10.1093/aob/mcaa046

A PROTOCOL FOR INSTRUMENTAL MONITORING OF THE SOYBEAN CANOPY LIGHT ENVIRONMENT AND SELECTED PLANT PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS UNDER FIELD CONDITIONS

L V.A. Nikorych, I.E. Demyd, O.V. Vidrashku, V.L. Vidrashku

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
Kotsiubynsky 2 Str., Chernivtsi 58012, Ukraine
v.nikorych@chnu.edu.ua

Assessing the spatial heterogeneity of the soybean canopy requires the coordinated use of indicators characterizing the light environment, the optical properties of leaves, and leaf surface temperature. With limited instrument availability, these characteristics can be measured using portable devices. However, the different physical nature of the measurements complicates their direct comparison and physiological interpretation.

The aim of this study was to develop and describe a reproducible field protocol for monitoring soybean (Glycine max (L.) Merr.) crops that integrates illuminance measurements using a lux meter, leaf optical index measurements using the atLEAF CHL PLUS chlorophyll meter, and leaf surface temperature measurements using an infrared pyrometer. The methodological basis was a field experiment conducted in 2026 at the Zhuchka Biological Research Farm of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University.

The protocol covers the identification of experimental plots, the establishment of a permanent panel of tagged plants and an additional sample, the recording of phenological stages, the allocation of measurements across canopy layers, quality control of primary records, and the calculation of derived indicators. The principles governing dataset organization and statistical analysis are also specified, taking into account the block structure of the experiment, the hierarchical nesting of observations, and repeated measurements over time. The limitations of using lux-meter illuminance to characterize the light environment, the leaf optical index to assess leaf status, and leaf surface temperature to diagnose physiological stress are discussed.

The proposed protocol represents a methodological integration of accessible instrumental procedures rather than a new physical measurement method or a validated system for physiological diagnosis.

Keywords: Glycine max, soybean canopy, illuminance, atLEAF CHL PLUS, leaf optical index, leaf temperature, field monitoring, repeated measurements

Отримано редколегією 17.08.2026 р.
Підписано до друку 15.10.2026 р.
Дата публікації 31.10.2026 р.

ORCID ID
Володимир Нікорич: https://orcid.org/0000-0001-5006-4027