

БОТАНІКА

УДК: 581.4:582.542.1+535.822

doi: 10.25128/2078-2357.24.3–4.1

Н. В. ГЕРЦ, А. І. ГЕРЦ, Л. С. БАРНА

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027
e-mail: herts_nv@chem-bio.com.ua

ВИВЧЕННЯ АНАТОМІЧНОЇ БУДОВИ ЛИСТКІВ *MISCANTHUS* × *GIGANTEUS* J.M.GREEF & DEUTER EX HODKINSON & RENVOIZE ЗАСОБАМИ СВІТЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ *OPENFLEXURE MICROSCOPE*

Показано можливість дослідження та аналізу анатомічної будови листків *Miscanthus* × *giganteus* (міскантус гігантський) з використанням світлової мікроскопії за допомогою пристрою Openflexure Microscope. Вивчення міскантуса є важливим для розуміння морфологічних та фізіологічних особливостей цієї культури, які впливають на продуктивність та адаптацію до різних умов вирощування. Використання Openflexure Microscope дозволяє отримати високу роздільну здатність зображень і здійснити детальне дослідження клітинних структур листка, таких як епідерміс, мезофіл, жилки та їх взаємозв'язки. У статті наведено особливості анатомічної будови листків, що можуть мати важливе значення для подальших селекційних робіт та агрономічних досліджень. Наведено переваги використання Openflexure Microscope в ботанічних дослідженнях, зокрема для аналізу анатомічної будови рослин. Методика використання згаданого пристрою дозволяє детально вивчати як мікроскопічні, так і макроскопічні характеристики листків. Визначено, що особливості будови листків *M. × giganteus* відображають їх адаптацію до різних кліматичних умов і можуть впливати на стійкість рослин до стресових факторів. Зроблено висновки про важливість вивчення анатомії листків *M. × giganteus* із застосуванням Openflexure Microscope для покращення розуміння механізмів росту та розвитку цієї культури.

Ключові слова: *Miscanthus* × *giganteus*, світлова мікроскопія, анатомія листків, буліформні клітини, крапц-анатомія, адаптація, Openflexure Microscope.

Сучасні виклики в енергетиці та екології вимагають розробки інноваційних підходів для забезпечення стійкого розвитку економіки, суспільства та довкілля. Одним із потенційно успішних рішень є вирощування енергетичних культур, таких як *M. × giganteus*, що поєднує високу продуктивність біомаси із здатністю до очищення забруднених ґрунтів. Завдяки своїм властивостям, ця рослина може ефективно рости на маргінальних та забруднених територіях, що підкреслює її значення не лише для біоенергетики, але й для екологічної фіторе mediaції [1, 4, 5, 8, 14].

Дослідження анатомічної будови міскантуса є ключовим для розуміння його адаптаційних механізмів до несприятливих умов середовища, таких як посуха, забруднення чи низька родючість ґрунтів. Структура листків, епідерми та продихового апарату відіграє ключову роль у регулюванні фотосинтезу, транспірації та взаємодії рослин із навколишнім середовищем. Дослідження показують, що розподіл та щільність продихів на поверхні листка

суттєво впливають на газообмін та ефективність використання води [9]. Це має вирішальне значення для підвищення продуктивності цієї культури та оптимізації її використання в екологічних проєктах із застосуванням рослин.

Для анатомічного аналізу представників флори надзвичайно важливими є доступні, функціональні та точні інструменти. У цьому контексті OpenFlexure Microscope є відкритим технічним рішенням, що побудоване за ліцензією CERN Open Hardware Licence (CERN-OHL). Ця ліцензія дозволяє вільне використання, модифікацію та розповсюдження апаратного забезпечення, гарантуючи доступність та сприяючи спільноті розробників у всьому світі [16]. Цей портативний світловий мікроскоп з відкритим дизайном дозволяє проводити високоякісні дослідження з мінімальними фінансовими витратами. Завдяки можливості виготовлення за допомогою 3D-друку та інтеграції з цифровими технологіями, OpenFlexure Microscope забезпечує широкий доступ до мікроскопії навіть у лабораторіях із лімітованим бюджетом або у польових умовах [16].

Поєднання біоенергетичного потенціалу міскантуса, його здатності до фіторемедіації та використання інноваційного інструменту для анатомічного аналізу створює багатофункціональну платформу для вирішення глобальних проблем [1, 4, 5, 8, 14]. Аналіз мікроструктур тканин дозволяє оцінити, як ця культура реагує на забруднення та інші стресові умови. Отримані результати можуть сприяти покращенню селекційних програм та розробці ефективних стратегій вирощування міскантуса на екологічно проблемних територіях. Таким чином, дослідження анатомічної будови *M. × giganteus* із застосуванням OpenFlexure Microscope є важливим кроком до оптимізації його використання як енергетичної культури та інструменту фітоочищення. Цей підхід, що поєднує економічну вигоду, екологічну стійкість та наукову інноваційність, сприяє вирішенню енергетичних і екологічних проблем сучасності.

Матеріали та методи досліджень

Для дослідження анатомічної будови листків *M. × giganteus* було використано стандартні методи анатомічного аналізу із застосуванням світлової мікроскопії OpenFlexure Microscope (рис. 1). Дослідження проводили у кілька етапів. Листки міскантуса були зібрані у фазу активного росту з середньої частини рослини для забезпечення репрезентативності даних. Поперечні зрізи листків товщиною 15–20 мікрометрів виготовляли за допомогою санного мікротома MC-2. Отримані зрізи переносили на предметне скло та занурювали у гліцерин для забезпечення тривалої прозорості та збереження структури тканин. Для запобігання висихання зразка краї покривного скла фіксували прозорим манікюрним лаком. Відбитки верхньої та нижньої епідерми виконували методом Молотковського-Полаччі [3].

OpenFlexure Microscope забезпечив якісну візуалізацію анатомічних мікроструктур тканин листка (об'єктив SIGETA Semi-Plan 60x/0.65), таких як епідермальні клітини, провідні пучки та хлоренхіма. Зображення отримували за допомогою інтегрованої камери мікроскопа (Raspberry Pi Camera Module V2), після чого проводили їх аналіз із використанням спеціалізованого програмного забезпечення OpenFlexure Connect [16].

Результати досліджень та їх обговорення

Наразі відсутні дані про дослідження анатомічної будови міскантуса із застосуванням методів світлової мікроскопії OpenFlexure в Україні. OpenFlexure Microscope широко застосовується у світі для біологічних досліджень, особливо, коли важлива невисока вартість обладнання. Його використовують для вивчення рослинних тканин, клітинної структури та мікроорганізмів [16]. В Україні дослідження міскантуса здебільшого виконують за допомогою класичних методів. Залучення OpenFlexure Microscope могло б значно розширити можливості аналізу особливостей анатомії рослинних організмів. Це також сприяло б підвищенню доступності сучасних дослідницьких інструментів.

У наукових публікаціях описано його застосування для автоматизованого аналізу в лабораторіях, зокрема для виявлення паразитів у зразках крові [11]. Дослідження демонструють здатність цього мікроскопа до візуалізації інфікованих *Plasmodium* червоних кров'яних клітин і колоїдних частинок у різних режимах освітлення [11]. Інші літературні джерела особливу увагу

приділяють методам автоматичного фокусування, які є ключовими для точного визначення різних видів водоростей, що підтверджує доцільність застосування OpenFlexure Microscope [10].



Рис. 1. Загальний вигляд OpenFlexure Microscope [16].

Актуальність дослідження анатомії міскантуса за допомогою OpenFlexure Microscope зумовлена потребою в доступних і точних методах аналізу рослинних структур. На сьогодні *M. × giganteus* в Україні та світі є ефективною енергетичною культурою, яка, завдяки своїй високій урожайності та швидкому росту, є сировиною для виробництва біопалива, що вимагає детального вивчення механізмів її культивування. Біомасу міскантуса можна використовувати для створення біоетанолу, біодизеля, а також для виробництва твердого біопалива, такого як гранули та брикети. Це забезпечує екологічно чисте джерело енергії, що може стати гідною альтернативою викопним видам палива [2, 5]. Також міскантус гігантський може бути використаний як високопоживна кормова культура для тваринництва. Рослина містить до 25 % протеїну та значний вміст клітковини, що робить її корисною для забезпечення тварин необхідними поживними речовинами. Крім того, міскантус стійкий до посухи й хвороб, що мінімізує витрати на догляд і забезпечує стабільну продуктивність навіть у складних кліматичних умовах, тому є економічно вигідним для фермерських господарств [5].

Отже, *M. × giganteus* – універсальна культура, яка має величезний потенціал для вирішення ряду екологічних, економічних та енергетичних завдань. Використання цієї рослини не лише знижує навантаження на екосистеми, а й створює нові можливості для сталого розвитку сільського господарства та енергетики. Впровадження міскантуса в аграрний сектор може стати важливим кроком до екологічної безпеки, енергетичної незалежності та підтримки біорізноманіття.

Міскантус – це однодомна рослина з коротким вегетаційним періодом, яка цвіте з кінця серпня до початку жовтня. Усі види міскантуса є світлолюбними, а їхні листки демонструють анатомо-морфологічну пластичність до умов середовища. Пагони *M. × giganteus* можуть вирости від 1,5 до 5,0 м заввишки [5], причому в дослідних умовах їхня максимальна висота становила 3,9–4,3 м (рис. 2). Рослини характеризуються безперервним ростом протягом життєвого циклу, прикореневі листки часто засихають у липні-серпні, тоді як молоді листки мають більшу площу. Розмір листків залежить від віку рослини, густоти насаджень та умов

виращування і в середньому становить 120–140–160 см² із можливими варіаціями залежно від екологічних факторів.



Рис. 2. Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*).

Кожен пагін міскантуса несе від 16 до 20 лінійних листків, розташованих спіралью (почергово) на стеблі. Листки мають зазубрені краї, паралельне жилкування, а їхні кінчики звужуються, утворюючи волосоподібний відросток. Довжина становить у середньому 0,5–1,0 м, а ширина – 1,0–2,1 см. Вони залишаються на рослині тривалий час, причому верхні можуть зберігатися до середини зими. Листова пластинка *M. × giganteus* має ланцетоподібну форму, вузьку витягнуту структуру та ізолатеральну будову, при якій мезофіл однаковий під верхньою та нижньою епідермою. Така структура сприяє симетричному розподілу тканин і оптимальному куту нахилу листків, забезпечуючи рівномірне освітлення обох боків.

Використання OpenFlexure Microscope дало можливість проаналізувати конструктивні характеристики епідерми та продихів *M. × giganteus*. Встановлено, що продихи у досліджених особин мають специфічні анатомо-фізіологічні характеристики, які дозволяють рослині адаптуватися до різноманітних стресових умов середовища зростання. Продихи розташовані на обох поверхнях листка (амфістоматичний тип), проте більша їх кількість знаходиться на нижній поверхні, оточена специфічними допоміжними клітинами. Продиховий апарат у листках має парацитний тип, де поздовжні стінки сусідніх клітин орієнтовані паралельно до продихової щілини. Така структура дозволяє ефективно контролювати відкриття та закриття продихів залежно від змін навколишнього середовища (рис. 3). Щільність продихів змінюється, але загалом вона досить висока: на 1 мм² листка їх кількість варіюється від 180 до 400.

У перспективі це дасть можливість точніше оцінити здатність рослини до регуляції водного балансу та фотосинтетичної активності в умовах стресу, таких як дефіцит вологи чи інтенсивне освітлення.

Епідерма листків міскантуса гігантського, як і в більшості злакових рослин, має ряд характерних рис, які сприяють пристосуванню до змінних умов середовища. Базисні епідермальні клітини живі, щільно зімкнені та мають товсті зовнішні стінки, покриті потужним шаром кутикули. Нашарування кутикули є нерівномірним та утворює специфічний рельєф на поверхні листка. У складі епідерми міскантуса виявлено силікатні клітини (фітоліти), що додають міцності та захищають рослину. Нерівномірність кутикулярного шару та наявність фітолітів спричиняють гребінчастий або сосочкуватий рельєф дорсальної (адаксіальної) епідерми листків міскантуса (рис. 5. Б). Отже, за допомогою OpenFlexure Microscope можна детально візуально оцінити ці клітини та їх взаємодію з іншими структурами.

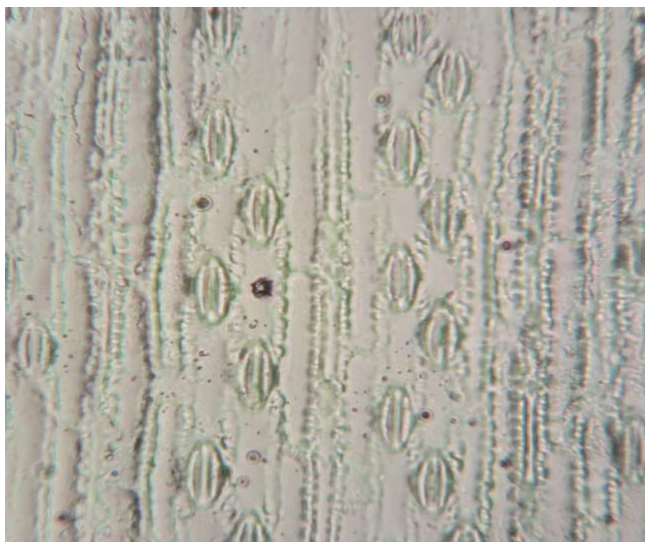


Рис. 3. Продихи на відбитку нижньої епідерми листків *M. x giganteus* (за методом Г. Х. Молотковського-Полаччі).



Рис. 4. Групове розташування буліформних клітин на поперечному перерізі листка *M. x giganteus* (відзначені стрілками) (зб. об'єktiv 60x).

Нами виявлено наявність в епідермі міскантуса буліформних клітин [13, 15]. Це великі тонкостінні клітини, що розташовані в рядках між звичайними клітинами епідерми (рис. 4). Буліформні клітини (або моторні клітини) у міскантуса гігантського мають низку анатомічних та функціональних особливостей, які відіграють важливу роль у регулюванні водного балансу та адаптації до стресових умов середовища [6].

Буліформні клітини у міскантуса гігантського розташовані групами по 4–5 у верхньому епідермальному шарі листка, вздовж центральної жилки та паралельно основним жилкам (рис. 4), що є особливістю рослини. Залежно від віку листка, його оводненості буліформні клітини можуть рельєфно виступати поміж клітин епідерми або, навпаки, бути на одному з ними рівні у молодих лисках. Вони мають збільшений розмір, порівнюючи з іншими клітинами епідерми, та тонкі стінки, що дозволяє їм змінювати об'єм залежно від водного статусу рослини. Серед 4–5 клітин 2 виділяються найбільшим розміром, інші оточуючі менші (рис. 5, А). Цікавим є

чергування великих груп по 4–5 клітин з групами із 2–3 клітин по всій довжині листка (рис. 4). Найбільші клітини мають округлу або еліптичну форму, з великими вакуолями, які зберігають воду. Згідно з літературними даними, їх цитоплазма менш насичена, що зменшує витрати енергії на підтримку життєдіяльності, але дозволяє швидко реагувати на зміни оводненості [13, 15].



Рис. 5. Відмінність у розмірах буліформних клітин (позначено стрілками) на поперечних перерізах листка *M. x giganteus*: А – великі, об'ємні, оводнені, листок розправлений; Б – меншого об'єму, листок скручений (зб. об'єктив 60х).

Внутрішні стінки крайніх буліформних клітин контактують із продиховою порожниною. Зовнішні їх сторони, які прилягають до клітин епідермісу, є звуженими і розширені у зоні контакту із мезофілом. Це часто обумовлює їх грушоподібну форму. Довга вісь центральної буліформної клітини має в середньому 100 ± 11 мкм, а коротка (на внутрішньому полюсі, що прилягає до мезофілу) має розміри 70 ± 8 мкм. Довга вісь бічних буліформних клітин була меншою, вона становила в середньому 51 ± 7 мкм, коротка вісь – 20 ± 3 мкм відповідно.

Функціональне значення цих клітин полягає у механізмі згортання листка: за достатньої кількості води клітини наповнюються, листок залишається розправленим, що максимізує фотосинтетичну активність. А за дефіциту води буліформні клітини втрачають тургор, листок скручується вздовж центральної жилки, що зменшує випаровування (рис. 5, Б) [13, 15]. Завдяки цьому механізму міскантус гігантський ефективно економить воду в умовах нестачі вологи.

Буліформні клітини сприяють адаптації до середовища з високими температурами та низькою вологістю, що є важливим для вирощування міскантуса в регіонах з ризиком посухи. У рослин, які вирощують у сприятливих умовах, розмір та кількість буліформних клітин можуть бути меншими, оскільки механізм згортання листка активується рідше. Кількість таких буліформних клітин є однією з діагностичних ознак для рослин родини *Poaceae*, що узгоджується з літературними даними [13, 15]. Дослідження буліформних клітин дозволяє оцінити посухостійкість *M. x giganteus* і сприяти селекції рослин, які можна вирощувати у несприятливих кліматичних умовах.

Епідерма міскантуса є одношаровою, з тонкостінними клітинами, ефективно пропускає світло до мезофілу листка, що важливо для процесів С4-фотосинтезу, характерного для цієї рослини [13].

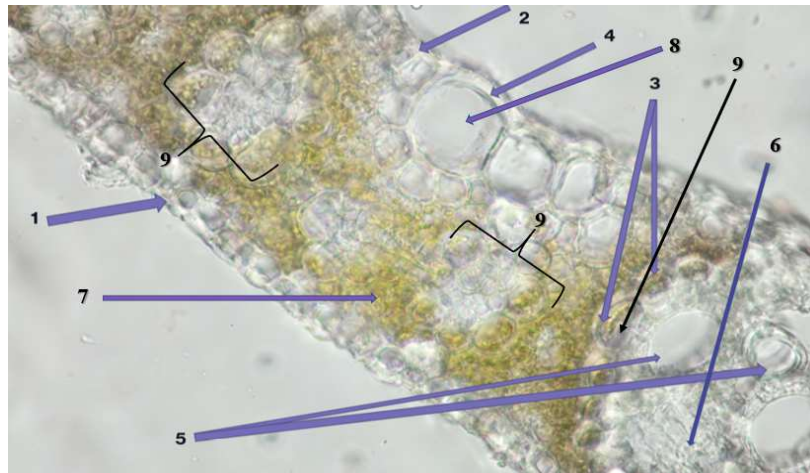


Рис. 6. Поперечний переріз листка *Miscanthus x giganteus*: 1 – нижня епідерма; 2 – верхня епідерма; 3 – клітини обкладки з відцентровим розташуванням хлоропластів; 4 – кутикула; 5 – ксилема; 6 – флоема; 7 – хлоренхіма; 8 – буліформна клітина; 9 – кранц-клітини обкладки провідного пучка.

Для глибшого розуміння адаптивних механізмів цього виду необхідно звернути увагу на внутрішню будову листка. За допомогою OpenFlexure Microscope ми можемо досліджувати тканини, що знаходяться під епідермою, зокрема мезофіл, у якому відбуваються процеси фотосинтезу (рис. 6). Використання цього мікроскопа дозволяє детально аналізувати організацію клітин хлоренхіми, а також їх взаємозв'язок з епідермою. У *M. x giganteus* клітини хлоренхіми, які оточують провідні пучки, мають більші розміри, на відміну від інших клітин мезофілу, і містять більш помітні хлоропласти (рис. 6). Ці клітини утворюють навколо кожного пучка своєрідну фотосинтезуючу обкладку, яка на поперечному зрізі нагадує квітку з зеленими пелюстками або корону (вони отримали назву «кранц-клітини» від німецького «Kranz» – корона, вінок). Інші клітини мезофілу листка у міскантуса прозорі, або є певна кількість забарвлених клітин з невеликими хлоропластами звичної форми, невеликих розмірів. Цей тип анатомічної будови листка злаків отримав назву «панікоїдний» (від *Panicum*). Назва «кранц-клітини» дана клітинам обкладки провідних пучків Хаберландтом (Haberlandt) у 1924 році під час вивчення анатомічної будови окремих представників родини *Cyperaceae* [7, 12, 13, 15]. Самі клітини обкладки провідного пучка є великі, щільно упаковані клітини розташовані кільцем навколо судинно-волоконистих пучків. Кількість обгорткових клітин залежить від величини провідного пучка і становила у досліджених особин від 10 до 17 одиниць. Форма таких клітин округла, злегка овальна. У них спостерігався високий вміст хлоропластів, які адаптовані для роботи в умовах низького рівня кисню. Стінки клітин мають суберинове ущільнення, що зменшує дифузію газів. Кільце клітин обкладки пучка добре помітне при мікроскопічному дослідженні поперечного зрізу листка. У зрізах видно чіткий поділ між двома типами клітин (рис. 5).

Особливість розташування клітин хлоренхіми у злаків з C4 типом фотосинтезу, з одного боку, зменшує ефективність використання сонячних променів. З іншого боку, розташування фотосинтезуючих клітин безпосередньо на провідних пучках істотно зменшує затрати води на транспорт синтезованих речовин. Тому, завдяки зменшенню необхідної транспірації, такі рослини легко витримують посуху і задовольняються для росту невеликою кількістю води [7, 12, 13]. Клітини мезофілу листка міскантуса рівномірно розташовані між клітинами обкладки пучка і епідермою (рис. 5). Згідно літературних даних, завдяки кранц-анатомії в міскантуса гігантського знижуються втрати CO₂ через фотодихання, підвищується ефективність використання води [12]. Рослина демонструє високу продуктивність навіть за несприятливих кліматичних умов. Встановлено, що на поперечних перерізах листків міскантуса розташування хлоропластів є своєрідним, вони займають відцентрове положення у клітинах обкладки провідного пучка, тобто на максимальному віддаленні від провідного пучка та ближче до мезофілу (рис. 6).

Висновки

Отже, міскантус гігантський демонструє здатність до адаптації на рівні анатомо-морфологічної будови листків, що робить цю рослину перспективною для вирощування в умовах зміни клімату та подальшого використання в біоенергетиці.

OpenFlexure Microscope дозволяє проводити якісний аналіз анатомічних структур листків міскантуса гігантського: епідермальні структури, продиховий апарат, кутикулярний шар, а також внутрішні тканини рослини, зокрема мезофіл.

Залучення OpenFlexure Microscope до досліджень в Україні може значно розширити можливості локальної науки, підвищити доступність сучасних інструментів для аналізу рослин і забезпечити отримання якісних даних для подальших біологічних досліджень. Завдяки відкритому апаратному забезпеченню, низькій вартості виробництва та широкому спектру застосувань цей мікроскоп може стати доступним інструментом для розвитку наукових ініціатив в Україні, особливо в умовах недостатнього фінансування.

1. Герц А. І., Конончук О. Б., Герц Н. В., Підліснюк В. В., Хоменчук В. О., Пида С. В. Активність фотосинтетичного апарату *Miscanthus x giganteus* за умов забруднення ґрунту дизельним паливом і внесення біочару. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. Т. 54, № 2. С. 161–176. doi: <https://doi.org/10.15407/frg2022.02.161>.
2. Гументик М. Я., Гайда Ю. І., Фучило Я. Д., Гнап І. В. Економічна ефективність інвестицій у вирощування біоенергетичних культур в зоні Лісостепу України. *Економічний аналіз*. 2018. Т. 28, № 2. С. 21–29.
3. Ковалишин І. Б., Ліханов А. Ф., Пінчук А. П., Вахновська Н. Г. Епідерма листків дрібноквіткових представників роду *Clematis* L. *Лісове і садово-паркове господарство*. 2016. № 9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgos_2016_9_6.
4. Марченко В. Енергетичні культури в Україні. *Agroexpert*. 2012. № 9. С. 114–117.
5. Міскантус в Україні: монографія / Роїк М. В. та ін. Київ : ФОП Ямчинський О. В., 2019. 256 с.
6. Моргун І. А. Біологічні особливості рослин міскантуса за умов оптимального зволоження. *Новітні технології вирощування сільськогосподарських культур: тези доповідей 5 Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених* (м. Київ, 29–30 вересня 2016 р.). Вінниця, Нілан-ЛТД. 2016. С. 111.
7. Briske D. D. Developmental Morphology and Physiology of Grasses. *Grazing Management: An Ecological Perspective*. Portland: Timber Press; 1991. pp. 85–108.
8. Barbosa B., Boléo S., Sidella S., Costa J., Duarte M. P., Mendes B., Salvatore L. Cosentino & A. L. Fernando Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *Bioenergy Res.* 2015; Vol. 8, P.1500–1511. doi:10.1007/s12155-015-9688-9.
9. Foster J. R., Smith W. K. Influence of stomatal distribution on transpiration in low-wind environments. *Plant Cell Environ.* 1986; Vol. 9: P. 751–759. doi:10.1111/j.1365-3040.1986.tb02108.x.
10. Grant S. D., Richford K., Burdett H. L., McKee D., Patton B. R. Low-cost, open-access quantitative phase imaging of algal cells using the transport of intensity equation. *R Soc Open Sci.* 2020;7: 191921. doi:10.1098/rsos.191921.
11. Knapper J., Collins J. T., Stirling J., McDermott S., Wadsworth W., Bowman R. Fast, high precision autofocus on a motorised microscope: automating blood sample imaging on the OpenFlexure Microscope. arXiv [physics.ins-det]. 2021. doi:10.48550/ARXIV.2109.06842.
12. Lundgren M. R., Osborne C. P., Christin P.-A. Deconstructing Kranz anatomy to understand C4 evolution. *J Exp Bot.* 2014;65: 3357–3369. doi:10.1093/jxb/eru186.
13. Nedukha O. Effects of moderate drought on leaf bulliform cells of aquatic and coastal population of *Phragmites australis*. *Turk J Botany.* 2022;46: 459–472. doi:10.55730/1300-008x.2722.
14. Nurzhanova A., Pidlisnyuk V., Abit K., Nurzhanov C., Kenessov B., Stefanovska T., et al. Comparative assessment of using *Miscanthus x giganteus* for remediation of soils contaminated by heavy metals: a case of military and mining sites. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019; Vol. 26: P. 13320–13333. doi:10.1007/s11356-019-04707-z.
15. Pauková Ž., Jureková Z. Stomatal density in *Miscanthus* leaves. *Acta Horti Regiotech.* 2015; Vol. 18: Pp. 45–48. doi:10.1515/ahr-2015-0009.
16. Open Flexure microscope. URL: <https://openflexure.org/projects/microscope/> (дата звернення: 26.01.2025).

References

1. Herts A. I., Kononchuk O. B., Herts N. V., Pidlisniuk V. V., Khomenchuk V. O., Pyda S. V. Aktyvnist fotosyntetychnoho aparatu *Miscanthus* × *giganteus* za umov zabrudnennia gruntu dyzelnym palnym i vnesennia biocharu. *Fiziolohiia roslyn i henetyka*. 2022. T. 54, No 2. S. 161–176. doi: <https://doi.org/10.15407/frg2022.02.161>. [in Ukrainian]
2. Humentyk M. Ya., Hayda Yu. I., Fuchylo Ya. D., Hnap I. V. Ekonomichna efektyvnist investytsii u vyroshchuvannya bioenerhetychnykh kultur v zoni Lisostepu Ukrainy. *Ekonomichnyii analiz*. 2018. T. 28, No 2. S. 21–29. [in Ukrainian]
3. Kovalyshyn I. B., Likhanov A. F., Pinchuk A. P., Vakhnovska N. H. Epiderma lystkiv dribnokvitkovykh predstavnykiv rodu *Clematis* L. *Lisove i sadovo-parkove hospodarstvo*. 2016. No 9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2016_9_6. [in Ukrainian]
4. Marchenko V. Enerhetychni kultury v Ukraini. *Agroexpert*. 2012. No 9. S. 114–117. [in Ukrainian]
5. Miskantus v Ukraini: monohrafiia / Roik M. V. ta in. Kyiv : FOP Yamchynskiy O. V., 2019. 256 s. [in Ukrainian]
6. Morhun I. A. Biolohichni osoblyvosti roslyn miskantusa za umov optimal'noho zvolozhennia. Novitni tekhnologii vyroshchuvannya sil'skohospodars'kykh kul'tur: tezy dopovidey 5 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh (m. Kyiv, 29–30 veresnia 2016 r.). Vinnytsia, Nilan-LTD. 2016. S. 111. [in Ukrainian]
7. Briske D. D. Developmental Morphology and Physiology of Grasses. *Grazing Management: An Ecological Perspective*. Portland: Timber Press; 1991. pp. 85–108.
8. Barbosa B., Boléo S., Sidella S., Costa J., Duarte M. P., Mendes B., Salvatore L., Cosentino & A. L. Fernando Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *Bioenergy Res.* 2015; Vol. 8, P.1500–1511. doi:10.1007/s12155-015-9688-9.
9. Foster J. R., Smith W. K. Influence of stomatal distribution on transpiration in low-wind environments. *Plant Cell Environ.* 1986; Vol. 9: P. 751–759. doi:10.1111/j.1365-3040.1986.tb02108.x.
10. Grant S. D., Richford K., Burdett H. L., McKee D., Patton B. R. Low-cost, open-access quantitative phase imaging of algal cells using the transport of intensity equation. *R Soc Open Sci.* 2020;7: 191921. doi:10.1098/rsos.191921.
11. Knapper J., Collins J. T., Stirling J., McDermott S., Wadsworth W., Bowman R. Fast, high precision autofocus on a motorised microscope: automating blood sample imaging on the OpenFlexure Microscope. arXiv [physics.ins-det]. 2021. doi:10.48550/ARXIV.2109.06842.
12. Lundgren M. R., Osborne C. P., Christin P.-A. Deconstructing Kranz anatomy to understand C4 evolution. *J Exp Bot.* 2014;65: 3357–3369. doi:10.1093/jxb/eru186.
13. Nedukha O. Effects of moderate drought on leaf bulliform cells of aquatic and coastal population of *Phragmites australis*. *Turk J Botany*. 2022;46: 459–472. doi:10.55730/1300-008x.2722.
14. Nurzhanova A., Pidlisnyuk V., Abit K., Nurzhanov C., Kenessov B., Stefanovska T., et al. Comparative assessment of using *Miscanthus* × *giganteus* for remediation of soils contaminated by heavy metals: a case of military and mining sites. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019; Vol. 26: P. 13320–13333. doi:10.1007/s11356-019-04707-z.
15. Pauková Ž., Jureková Z. Stomatal density in *Miscanthus* leaves. *Acta Horti Regiotech.* 2015; Vol. 18: Pp. 45–48. doi:10.1515/ahr-2015-0009.
16. Open Flexure microscope. URL: <https://openflexure.org/projects/microscope/> (дата звернення: 26.01.2025).

N. V. Herts, A. I. Herts, L. S. Barna

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

STUDY OF THE ANATOMICAL STRUCTURE OF *MISCANTHUS* × *GIGANTEUS* J.M.GREEF & DEUTER EX HODKINSON & RENVOIZE LEAVES USING THE OPENFLEXURE MICROSCOPE

This study demonstrates the potential of investigating and analyzing the anatomical structure of *Miscanthus* × *giganteus* (Giant Miscanthus) leaves using light microscopy with the OpenFlexure Microscope. Research on this crop is crucial for understanding its morphological and physiological characteristics, which influence productivity and adaptation to diverse growing conditions. Key features of leaf structure, including the epidermis, stomatal apparatus, and vascular system, determine the efficiency of photosynthesis, transpiration, and the accumulation of pollutants. These factors are

essential for enhancing the productivity of this crop and optimizing its use in ecological projects, particularly in phytoremediation.

Accessible, functional, and high-precision tools are essential for the anatomical analysis of plants. The OpenFlexure Microscope facilitates high-resolution imaging and detailed examination of cellular structures in leaves, such as the epidermis, mesophyll, and veins, as well as their interactions. With its 3D-printed design and integration with digital imaging technologies, the OpenFlexure Microscope enhances access to microscopy, even in laboratories with limited resources or in field-based studies.

This article presents the anatomical features of *Miscanthus × giganteus* leaves, which are critical for further breeding and agronomic research. The advantages of using the OpenFlexure Microscope in botanical studies are highlighted, particularly in the examination of plants with complex morphological structures. The method allows for a comprehensive analysis of both microscopic and macroscopic leaf characteristics.

The findings indicate that the leaf structure of *Miscanthus × giganteus* is well-adapted to various climatic conditions, contributing to the plant's resilience to stress factors. The study concludes that analyzing leaf anatomy is essential for advancing knowledge of the growth and development mechanisms of this crop. The results could contribute to the improvement of breeding programs and the development of effective cultivation strategies for *Miscanthus* in environmentally challenging sites.

Thus, the anatomical study of *Miscanthus × giganteus* using the OpenFlexure Microscope represents an important step toward optimizing its use as an energy crop and a phytoremediation tool. This approach combines economic benefits, ecological sustainability, and scientific innovation, addressing contemporary challenges in energy and environmental science. Integrating the OpenFlexure Microscope into research in Ukraine could significantly enhance local scientific capacity, improve the accessibility of modern tools for plant analysis, and provide higher-quality data for bioenergy and agricultural research.

Key words: *Miscanthus × giganteus*, light microscopy, leaf anatomy, bulliform cells, Kranz anatomy, adaptation, OpenFlexure Microscope.

Надійшла 12.11.2024.