

PAWEŁ SOWIŃSKI 

e-mail: pm.sowinski@uw.edu.pl

Zakład Ekofizjologii Molekularnej Roślin, Instytut Biologii Eksperymentalnej i Biotechnologii Roślin,
Wydział Biologii, Uniwersytet Warszawski, Miecznikowa 1, 02-096 Warszawa

Department of Plant Molecular Ecophysiology, Institute of Plant Experimental Biology and Biotechnology,
Faculty of Biology, University of Warsaw, Miecznikowa 1, 02-096 Warszawa

Fenomika – nowoczesne podejście do starych pytań

Phenomics: a modern approach to old questions

DOI: <https://doi.org/10.12775/KOSMOS.2025.017>

Abstrakt

Wśród dziedzin współczesnej biologii eksperymentalnej stosujących techniki wielkoprzepustowe coraz większego tempa nabiera rozwój fenomiki zajmującej się badaniami cech składających się na fenotyp. Obecnie, ocena ilościowa takich cech, fenotypowanie roślin, obejmuje wiele technik, w dużej części niszczących, opartych na analizie obrazów z kamer różnego typu, w tym 3D, termowizyjnych, multi- i hiperspektralnych. Umożliwia to śledzenie na osi czasu przebiegu procesów wzrostu i rozwoju roślin, ocenę ich stanu fizjologicznego czy pojawianie się wczesnych oznak chorób lub nieprawidłowości rozwojowych. Obecnie, fenotypowanie roślin jest ukierunkowane głównie na aspekt praktyczny, a więc na wykrywanie cech warunkujących tolerancję stresów abiotycznych oraz biotycznych (fenotypowanie z użyciem mierników przenośnych i/lub automatycznych platform fenotypujących), a także na zdalną (z użyciem dronów i satelitów) ocenę stanu fizjologicznego upraw rolnych oraz wskazanie obszarów o niskiej wilgotności. Niemniej znane są również zastosowania technik fenotypowania wielkoprzepustowego w badaniach podstawowych, m.in. odnoszące się do strategii adaptacyjnych roślin w różnych środowiskach.

Słowa kluczowe: analiza barw, fenomika, fenotypowanie wielkoprzepustowe, teledetekcja

Abstract

Plant phenomics deals with the study of the traits that make up the phenotype. The quantitative assessment of such traits, phenotyping of plants, involves a number of techniques, largely non-destructive, based on the analysis of images from cameras of various types, including 3D, thermal, multi- and hyperspectral. This makes it possible to track on a timeline the course of plant growth and development processes, assess their physiological state or the appearance of early signs of diseases or developmental abnormalities. Nowadays, plant phenotyping is mainly focused on the practical aspect, *i.e.* the detection of traits determining abiotic and biotic stress tolerance (handheld instruments and/or automated phenotyping platforms), as well as the remote assessment (drones and satellites) of the physiological state of agricultural crops and the identification of drying areas. However, there are also known applications of high-throughput phenotyping techniques in basic research, including those related to plant adaptation strategies in different environments.

Key words: color analysis, phenomics, plant phenotyping, teledetection

WSTĘP

Kilka ostatnich dekad przyniosło w naukach biologicznych ogromny rozwój podejść i technik eksperymentalnych, zbiorczo określanych jako wielkoprzepustowe. Pozwalają one badać jednocześnie całe populacje pod kątem różnic w genomie (genomika), poziomie transkrypcji genów (transkryptomika), zestawie białek (proteomika) czy składzie ważnych metabolitów (metabolomika). Od przełomu wieków XX i XXI rozwija się też intensywnie nowe eksperymentalne podejście do cech anatomicznych i fizjologicznych zwane fenomiką. Podobnie jak inne „omiki” (genomika, transkryptomika, proteomika i metabolomika), fenomika, do badania cech odnoszących się do pokroju i/lub stanu fizjologicznego roślin lub zwierząt (fenomu), wykorzystuje techniki wielkoprzepustowe. Podejście to różni się jednak od pozostałych bardzo istotnie. Po pierwsze, techniki stosowane w fenomice są nieniszczące, a nawet nie ingerują zbyt wiele w życie badanych organizmów. A więc pozwalają one śledzić na osi czasu procesy wzrostu i rozwoju obiektów żywych, zgłębiać ich stan fizjologiczny czy pojawianie się wczesnych oznak chorób lub innych nieprawidłowości rozwojowych. Po drugie, techniki fenomiczne można stosować na różnych poziomach organizacji życia, od pojedynczych organizmów (skanery 3D/hiperspektralne), grup takich organizmów (drony z kamerami hiperspektralnymi), po całe zbiorowiska (satelity z kamerami hiperspek-

tralnymi). I po trzecie metody wielkoprzepustowe stosowane w genomice i transkryptomice są oparte o głęboką wiedzę w zakresie biologii molekularnej, a używane w proteomice i metabolomice o biochemię, a więc nauki powstałe i rozwinięte w XX i w XXI wieku. Natomiast do badań fenomicznych wystarczą niekiedy bardzo proste podejścia i narzędzia, takie jak linijka i waga, z których pomocą można otrzymywać dane liczbowe dotyczące świeżej i suchej masy, długości pędów i korzeni czy powierzchni liści, i dopiero do ich analizy potrzebna jest wiedza biologiczna lub agronomiczna. Takie narzędzia były stosowane przez lata w analizie wzrostu roślin. np. w analizie wzrostu pędu szczególnie często stosowano takie parametry jak względna intensywność wzrostu (Relative Growth Rate, RGR) (Hunt, 1990), zdefiniowana jako przyrost suchej masy w przeliczeniu na jednostkę już istniejącej i jednostkę czasu (Hunt, 1990) oraz wskaźnik asymilacji netto (Net Assimilation Rate, NAR) (Vernon i Allison, 1963), tj. przyrost suchej masy na jednostkę już istniejącej powierzchni liściowej w jednostce czasu. W przypadku korzeni często używano metody przecięć (Tennant, 1975), polegającej na określaniu liczby przecięć z siatką o określonej wielkości kratki. Iloczyn tej liczby i współczynnika zależnego od długości boku kratki, odpowiadał długości korzenia.

Analiza wzrostu roślin była wykorzystywana głównie w badaniach rolniczych, ukierunkowanych na tworzenie podstaw selekcji roślin

uprawnych pod względem plonowania. Wadą tych metod była ogromna praco- i czasochłonność, co przekładało się na konieczność zatrudniania liczego personelu technicznego. Ponadto były to metody niszczące, więc badania obejmujące kilka punktów czasowych wymagały odpowiednio dużej liczby roślin. Koniec XX w. przyniósł rozwój przenośnych, w tym polowych, urządzeń do nieniszczących badań fizjologicznych, np. pomiarów wymiany gazowej liści, aktywności i stanu aparatu fotosyntetycznego czy oddychania korzeni. Mimo znacznego zwiększenia możliwości badania roślin, stosowanie tych urządzeń wciąż wymagało dużej obsady technicznej, w tym personelu przeszkolonego w używaniu urządzeń przenośnych. Obecne instalacje fenotypujące są już w zasadzie bezobsługowe, a często w pełni automatyczne. Artykuł ma na celu przybliżenie Czytelnikowi rozwiązań i dziedzin, w jakich mają zastosowanie.

ZARANIE FENOMIKI: FENOTYPOWANIE NA PODSTAWIE OBSERWACJI JAKOŚCIOWYCH JAKO BAZA DLA UDOMOWIENIA ROŚLIN I ZWIERZĄT

Fenomika to analiza zestawu mierzalnych cech fizycznych, chemicznych i ilościowych w pojedynczych organizmach lub populacjach determinowanych przez interakcje między genomem a środowiskiem. Elementem fenomiki jest fenotypowanie, a więc ocena ilościowa wyrażanych cech. Jak wspomniano wyżej, fenotypowanie nie wymaga specjalistycznego sprzętu ani specjalistycznej wiedzy o mechanizmach molekularnych czy procesach biochemicznych determinujących wzrost i rozwój roślin. W gruncie rzeczy, ocena fenotypu może być oparta wyłącznie na obserwacji, dotyczyć występowania cech jakościowych i stosowana jest też we współczesnych badaniach. Takie ujęcie tematu może doprowadzić do konkluzji, że fenotypowanie roślin czy zwierząt zawsze towarzyszyło ludzkości.

Wczesne etapy rozwoju cywilizacji wiąże się często z udomowieniem szeregu gatunków roślin i zwierząt. Gatunki te były później doskonalone pod kątem wymagań człowieka. Osiągano to przez tysiące lat na podstawie obserwacji

zróżnicowania pojawiających się sporadycznie fenotypów, a pomocą w selekcji było praktyczne doświadczenie wczesnych rolników. Dopiero na przełomie XIX i XX w. selekcja przybrała charakter naukowy oparty o wiedzę teoretyczną. Świetnego przykładu dostarcza udomowienie kukurydzy (Sobkowiak i in., 2013). Doszło do niego ok. 9000 lat temu na terenach obecnego Meksyku, w dolinie rzeki Balsas. Kukurydza najprawdopodobniej pochodzi od *Teosinte*. Oba gatunki mają podobne genomy i łatwo się krzyżują. Mają też podobną biologię (rośliny jednopienne), jednak bardzo się różnią pod względem budowy pędu i kolby. W przeciwieństwie do kukurydzy, *Teosinte* jest silnie rozgałęziona. Kolba tej rośliny zawiera kilka-kilkanaście bardzo małych ziarniaków ustawionych na osadce w pojedynczym rzędzie, a odpadające ziarniaki są osłonięte grubymi plewkami. Jak się uważa, udomowienie kukurydzy wiązało się ze zmianami ekspresji zaledwie kilku genów, w tym kontrolującego powstawanie twardej okrywy owocowo-nasiennej ziarniaków (gen *tga1*, *teosinte glume architecture1*), silne rozgałęzienie pędu (gen *tb1*, *teosinte branched1*), morfologię kolby (gen *ra1*, *ramosa1*), oraz pokrój rośliny (gen *bs1*, *barren stalk1*). Możliwy był udział jeszcze jednego, niezidentyfikowanego dotąd loci. Cały proces udomowienia mógł zająć poniżej tysiąca lat i był związany z przekształceniem drobnych kłosów *Teosinte* w większe kolby zawierające jadalne, nieodpadające ziarniaki. Było to zapewne zapoczątkowane rzadkimi mutacjami, które przejawiały się znaczącym powiększeniem kłosów. Pierwotni rolnicy nie dysponowali oczywiście żadną wiedzą o mechanizmach genetycznych, ale na podstawie charakterystycznego fenotypu potrafili takie mutanty wyselekcjonować, a później doprowadzić do ich rozpowszechnienia. Dalsze etapy doskonalenia roślin o oczekiwanym fenotypie zapewne również były oparte na obserwacji popartej doświadczeniem przekazywanym przez rdzennych Amerykanów z pokolenia na pokolenie.

Powyższy przykład ilustruje potencjał, jaki tkwi w fenotypowaniu cech jakościowych. Podobne procesy dotyczyły również innych gatunków roślin uprawnych, a także zwierząt hodowlanych.

Niemniej procesy udomowienia i późniejszego doskonalenia trwały tysiące lat, a potencjał tkwiący w poprawie cech jakościowych już się wyczerpał. Obecnie nowe cechy jakościowe (np. odporność na szkodniki) uzyskujemy drogą mutacji lub przez transformację genetyczną dzięki postępowi biologii molekularnej. Natomiast poprawa cech ilościowych, w tym szczególnie plonu roślin uprawnych, uzyskiwana jest w oparciu o zaawansowaną wiedzę o genetyce i zasadach współczesnej hodowli. Aktualnie coraz większego znaczenia nabiera też selekcja oparta o fenotyp (Carabus, 2025).

Możliwość dalszego postępu w produkcji żywności potrzebnej do zaspokojenia potrzeb rosnącej populacji ludzkości upatruje się w ciągłym uzyskiwaniu nowych odmian roślin. Powinny być jeszcze bardziej wydajne i odporne na stresy abiotyczne (m.in. susza, zbyt niskie lub zbyt wysokie temperatury) i biotyczne (m.in. zagęszczenie, choroby powodowane przez wirusy, bakterie, grzyby czy nicienie). Powinny też wysoko plonować przy jak najmniejszym obciążeniu środowiska nawozami i przy jak najoszczędniejszym nawadnianiu. Uważa się, że uzyskanie nowych odmian spełniających powyższe – po części sprzeczne – wymagania będzie możliwe przede wszystkim dzięki fenomice, w szczególności dzięki zastosowaniu nowoczesnych metod automatycznego fenotypowania wielkoprzestawowego (Araus i Cairns, 2014).

ZASTOSOWANIE FENOMIKI W OCENIE POJEDYNCZYCH ROŚLIN

Przystosowanie roślin do środowiska przyrodniczego, w tym rolniczego, zależy głównie od ich stanu fizjologicznego. Wśród sposobów badania tego stanu od dawna poczesne miejsce zajmowały dwa podejścia: analiza aktywności aparatu fotosyntetycznego oraz ocena zawartości chlorofilu w liściach. W pierwszym przypadku, szczególnie rozwinęły się techniki oparte na pomiarach fluorescencji wzbudzonego chlorofilu w centrach fotosyntetycznych, a w drugim na analizie barwy liści.

W przypadku fluorescencji chlorofilu możliwe są dwa podejścia: analiza szybkiej bądź wol-

nej fazy wzbudzenia chlorofilu po przyjęciu fotonu w centrum fotosyntetycznym (Sulkiewicz i Ciereszko, 2016). Techniki te dostarczają różnych parametrów liczbowych określających stan funkcjonalny aparatu fotosyntetycznego. Wspólnym parametrem dla obu podejść jest wskaźnik odpowiadający maksymalnej wydajności kwantowej aparatu fotosyntetycznego próbki (liść bądź zawiesina chloroplastów lub glonów) wstępnie przetrzymanej w ciemności określany symbolem F_v/F_m (F_m – maksymalna fluorescencja próby wstępnie przetrzymanej w ciemności, F_v – fluorescencja maksymalna pomniejszona o wartość fluorescencji podstawowej, F_o). Szybka faza wzbudzenia fluorescencji trwa poniżej 1 sekundy i jej krzywa w logarytmicznej funkcji czasu ma charakterystyczne punkty przegięcia zwane O, J, I oraz P odpowiadające kolejnym etapom przepływu wzbudzonych elektronów przez aparat fotosyntetyczny. Wg szeregu autorów analiza fluorescencji chlorofilu we wspomnianych wyżej punktach (test OJIP) niesie informacje o stanie aparatu fotosyntetycznego, co może być przydatne przy ocenie reakcji na stresy abiotyczne (Cetner i in., 2016).

Wolna faza indukcji chlorofilu a może trwać od sekund do nawet kilkudziesięciu minut. Stosując technikę fluorescencji modulowanej (Sulkiewicz i Ciereszko, 2016) mierzy się poziom fluorescencji liścia wzbudzanej światłem o dużej częstotliwości, dzięki czemu eliminuje się wpływ światła pochodzącego ze środowiska, np. silnego światła słonecznego. W efekcie możliwy jest ciągły pomiar wydajności kwantowej fotosystemu II (Φ_{PSII}) w warunkach naturalnych. Analiza wolnej fazy indukcji chlorofilu a dostarcza wielu innych ważnych parametrów stanowiących podstawę do wnioskowania o stanie aparatu fotosyntetycznego, w tym wskaźników rozpraszania fotochemicznego (qP) i niefotochemicznego (NPQ). Z tego względu opisana metoda jest szczególnie często wykorzystywana w badaniach podstawowych (Ntakos i in., 2025).

Inny rodzaj analizy stosowanej do fenotypowania roślin opiera się na ocenie barwy liści. Jednym ze wskaźników znanym od dekad jest indeks zieloności liścia SPAD (Soil-Plant Analysis Development). Parametr ten jest oparty

o stosunek transmitancji światła czerwonego (650 nm) i dalekiej czerwieni (940 nm), który bardzo dobrze koreluje z poziomem chlorofilu w badanym liściu (współczynnik determinacji R^2 wynosi między 83 a 97%) (Machul, 2001). I chociaż zależność między wartością SPAD, a bezwzględną zawartością chlorofilu jest specyficzna gatunkowo, metoda znalazła szerokie zastosowanie w fenotypowaniu roślin z użyciem urządzeń przenośnych, w tym w badaniach polowych (Kubar i in., 2022).

Dalszy rozwój technik cyfrowych wprowadził nową jakość w analizie koloru roślin i ich organów, co pozwala na szybką i stosunkowo łatwą ocenę ich stanu fizjologicznego, choćby na podstawie udziału zieleni i czerwieni. Na podstawie zmian koloru badano wpływ na rośliny różnych stresów środowiskowych, zarówno abiotycznych takich jak stres wodny (Ahmad and Reid, 1996), czy stres niskiej temperatury (Bacci i in., 1998; Enders i in., 2018; Sowiński i in., 2025), jak i biotycznych (Price i in., 1993; Kampmann i Hansen, 1994; Martin i Rybicki, 1998; Olmstead i in., 2001). Różnice w kolorze pozwalały też identyfikować chwasty wśród upraw (Woebbecke i in. 1995; Zhang i Chaisatapagon 1995; Perez i in. 2000), a także badać tempo starzenia pszenicy jarej (Adamsen i in. 1999). Od strony czysto praktycznej, analiza koloru była też wykorzystywana do oceny wartości owoców (Schrevens and Raeymaeckers, 1992; Nguyen i in., 2021), a także zmian jakości warzyw i owoców podczas przechowywania (Vervaeke i in. 1994; Zhang i in. 2003).

Analiza koloru liścia lub innego organu rośliny wymaga przyjęcia któregoś z modeli barw. W badaniach roślin najczęściej używane są dwa modele: RGB oraz HSV. Nazwa pierwszego pochodzi od trzech głównych kolorów, które ten model uwzględnia: Red (czerwony), Green (zielony) i Blue (niebieski), natomiast drugiego od wyrazów Hue (kolor/odcień wyrażony kątem na kole skali barw 0–360°), Saturation (wysycenie) oraz Value (wartość). Model RGB jest szczególnie dostosowany do monitorów i innych urządzeń wyświetlających obrazy, natomiast model HSV lepiej odpowiada ludzkiemu sposobowi postrzegania kolorów.

W odniesieniu do oceny stanu fizjologicznego roślin, model RGB był wykorzystywany m.in. do oceny reakcji na chłód ostry u kukurydzy (Enders i in., 2018). Wskaźniki wegetacji roślin oparte o analizę koloru w modelu RGB posłużyły też ocenie zakażenia oliwki europejskiej grzybem *Verticillium dahliae* (Sancho-Adamson i in., 2019). Ponadto, obrazy kolorowe w modelu RGB wykorzystano przy opracowaniu metody oceny wzrostu systemu korzeniowego (Bodner i in., 2019). Znalazły też zastosowanie do badania zagęszczenia łąn zbóż (Stefański i in., 2024). Z kolei badania z użyciem modelu HUE wykazały liniową zależność tego parametru od poziomu chlorofilu w liściu i od wydajności kwantowej fotosystemu II (Majer i in., 2020). Parametr HUE okazał się też szczególnie przydatny dla oceny stanu fizjologicznego siewek kukurydzy w warunkach chłodu umiarkowanego oraz podczas odrostu (Sowiński i in., 2025). Ponadto, analiza koloru na podstawie pomiarów HUE okazała się przydatna dla oceny wartości produktów roślinnych takich jak owoce i kwiaty. W najprostszym przypadku, analiza koloru może być wykonywana na podstawie skanów liści, a więc nie wymaga zaawansowanego sprzętu, a jedynie specjalizowanego oprogramowania, również dostępnego w domenie publicznej, m.in. Scion Image lub NIH Image.

Współcześnie, najczęściej używane przenośne urządzenia do badania stanu fizjologicznego roślin uwzględniają jednocześnie transmitancję, absorbancję i reflektancję liści. Intensywne badania ostatnich lat pozwoliły na opracowanie na ich podstawie szeregu wskaźników odnoszących się m.in. do ogólnego wigoru roślin (m.in. NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), poziomu barwników w liściach (m.in. CRI1 – Caroten Reflectance Index i ARI1 – Anthocyanin Reflectance Index), aktywności fotosyntetycznej (m.in. PRI – Photochemical Reflectance Index) czy poziomu stresu (PSRI – Plant Senescence Reflectance Index), itp. (bogaty zestaw wskaźników wegetacji można znaleźć pod adresem <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>). Wiele z tych wskaźników może być uzyskiwana zarówno w urządzeniach przenośnych, jak i w platformach fenotypujących, bądź na podsta-

wie obserwacji zdalnych z dronów czy satelitów, oczywiście przy różnej skali i rozdzielczości pomiarowej.

PLATFORMY FENOTYPUJĄCE

Ocena różnych cech roślin z użyciem urządzeń przenośnych jest często dość prosta i wymaga jedynie zachowania powtarzalności warunków i techniki pomiarów. Jednakże przy dużej liczbie roślin poddawanych fenotypowaniu, jak na przykład w przypadku badań asocjacyjnych w skali genomu, taka powtarzalność jest trudna do utrzymania, tym bardziej, jeśli pomiary ma wykonywać kilka czy więcej osób. Rozwiązaniem jest zastosowanie automatycznych platform fenotypujących, w których system sensorów i kamer w powtarzalny i zaprogramowany z góry sposób dokonuje skanowania dużej liczby roślin. Jest to bardzo nowoczesne podejście niewymagające ingerencji człowieka podczas pomiarów. Dzięki temu mogą być one prowadzone przez cały sezon wegetacyjny, bowiem automatyka systemu może uwzględniać też podlewanie roślin zgodnie z ich zapotrzebowaniem (ocenianym na podstawie wagi) lub zadanym schematem (np. w przypadku badań stresu suszy wywołanego zaniechaniem podlewania). Popularność systemów automatycznego fenotypowania roślin stale się zwiększa, również w Europie (Rybka, 2017; 2023).

Platformy fenotypujące mogą być instalowane w fitotronach, szklarniach, a także w warunkach polowych. Wadą jest bardzo wysoka cena systemu fenotypującego, jeśli ma on być zakupiony w jednej z wyspecjalizowanych firm. Należy tu jednak mieć na uwadze, że takie firmy wraz z systemem dostarczają też wyspecjalizowane oprogramowanie, w tym wspomagające projektowanie eksperymentu, analizę wyników, a nawet uczenie maszynowe. Standardem jest też stałe doradztwo techniczne świadczone często bez dodatkowych opłat. Innym rozwiązaniem jest tworzenie systemów fenotypujących przez jednostki naukowe zainteresowane tą tematyką. Takie rozwiązania powstają na bazie obecnych na rynku kamer, sensorów i elementów automatyki. Z reguły są dużo tańsze od plat-

form komercyjnych, ale wymagają dodatkowo stworzenia dedykowanego oprogramowania. W literaturze tematu pojawiły się już interesujące próby mające na celu powiązanie powyższych dwóch rozwiązań (Minervini i in., 2017).

Automatyczne fenotypowanie roślin może być realizowane na dwa sposoby: na zasadzie „roślina do sensora” bądź „sensor do rośliny”. W pierwszym przypadku zestaw sensorów i kamer jest zainstalowany na stałe w osobnym pomieszczeniu lub komorze, gdzie rośliny wraz z donicami są dostarczane za pomocą systemu transportowego. Natomiast w drugim podejściu rośliny są nieruchome, a system sensorów/kamer jest przemieszczany nad nimi na szynie. Oba rozwiązania mają swoje zalety i wady. W pierwszym systemie rośliny przemieszczane na przenośniku taśmowym podlegają wstrząsom i innym stresom mechanicznym, na które wiele gatunków roślin jest wrażliwych (sejsmonastia). W drugim, trudno jest badać przy świetle dziennym cechy, których pomiary wymagają pewnego okresu zaciemnienia roślin. Przykładem takiego wskaźnika jest maksymalna wydajność kwantowa fotosystemu II (Fv/Fm), ważny parametr oceny aktywności aparatu fotosyntetycznego, przed pomiarem którego konieczne jest ok. 20-to minutowe zaciemnienie liści.

Fenotypowanie roślin z użyciem platform automatycznych może uwzględniać różne cechy. Niektóre systemy są wyposażone w optyczne skanery laserowe 3D, które pozwalają na uzyskiwanie trójwymiarowych obrazów roślin. Ten sposób obrazowania 3D roślin określa się jako triangulację laserową (Laser triangulation, LT). Obrazowanie 3D można również uzyskać składając kilka obrazów 2D tworzonych wokół rośliny (technika Structure from motion, SfM) (Paulus, 2019). Po przetworzeniu obrazów 3D można otrzymać szereg różnych parametrów morfologicznych takich jak Digital biomass, Leaf area, Leaf angle, Plant height i ich pochodne (np. Leaf area index, Leaf inclination czy Leaf penetration depth). Z kolei kamery multispektralne (kilka–kilkadziesiąt kanałów) lub hiperpsktralne (100 i więcej kanałów) mogą dostarczać nie tylko map kolorów, ale także licznych parametrów fizjologicznych takich jak Green-

ness, NDVI, NPCI, PSRI, itp. Ponadto, niektóre platformy są wyposażone w kamery do badania fluorescencji chlorofilu a w liściach. Przykład wykorzystania skanera 3D w połączeniu z kamerą multispektralną przedstawiono na Fig. 1 i 2. Na obrazach pokazano dwuwymiarowe rzuty obrazu 3D roślin wraz z opisem ich barwy przedstawionej w modelu HUE oraz rozkładem parametru NDVI typowe dla siewek w stadium V1 (rozwinięty 1-szy liść) z warunków kontrolnych (Fig. 1) i chłodu (Fig. 2). Obrazy reprezentują skany wybrane z serii czasowych dla kilkudziesięciu linii wsobnych (po 10 roślin) analizowanych jednocześnie przez kilka tygodni (Sowiński i in., 2025).

Warto zaznaczyć, że automatyczne platformy fenotypujące są systemami otwartymi i oprócz wstępnie zdefiniowanych parametrów mogą dostarczać informacji z pełnego zakresu hiperspektralnego do wykorzystania przez użytkowników. Przykładem jest użycie przez Liang'a i in. (2018) indeksu wyprowadzonego z różnicy wartości refleksyjności między 1056 i 1151 nm zakresu hiperspektralnego (hyperspectral bands) do odróżnienia obrazu łodygi od liści u kukurydzy. Cechy łodygi u kukurydzy mają bardzo duże znaczenie dla hodowli tego gatunku choćby pod kątem odporności na wyleganie łodygowe czy biomasy dla produkcji biopaliw.

FENOTYPOWANIE Z DYSTANSU – DRONY I SATELITY

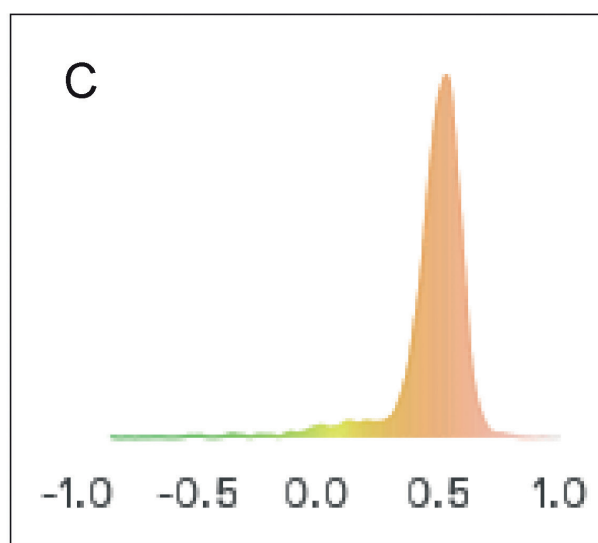
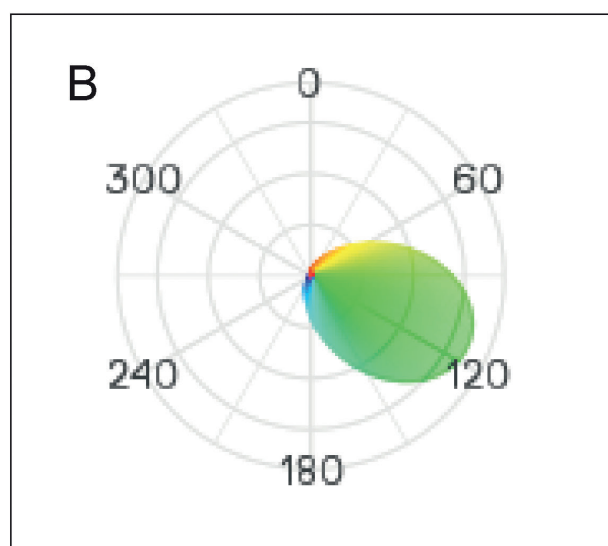
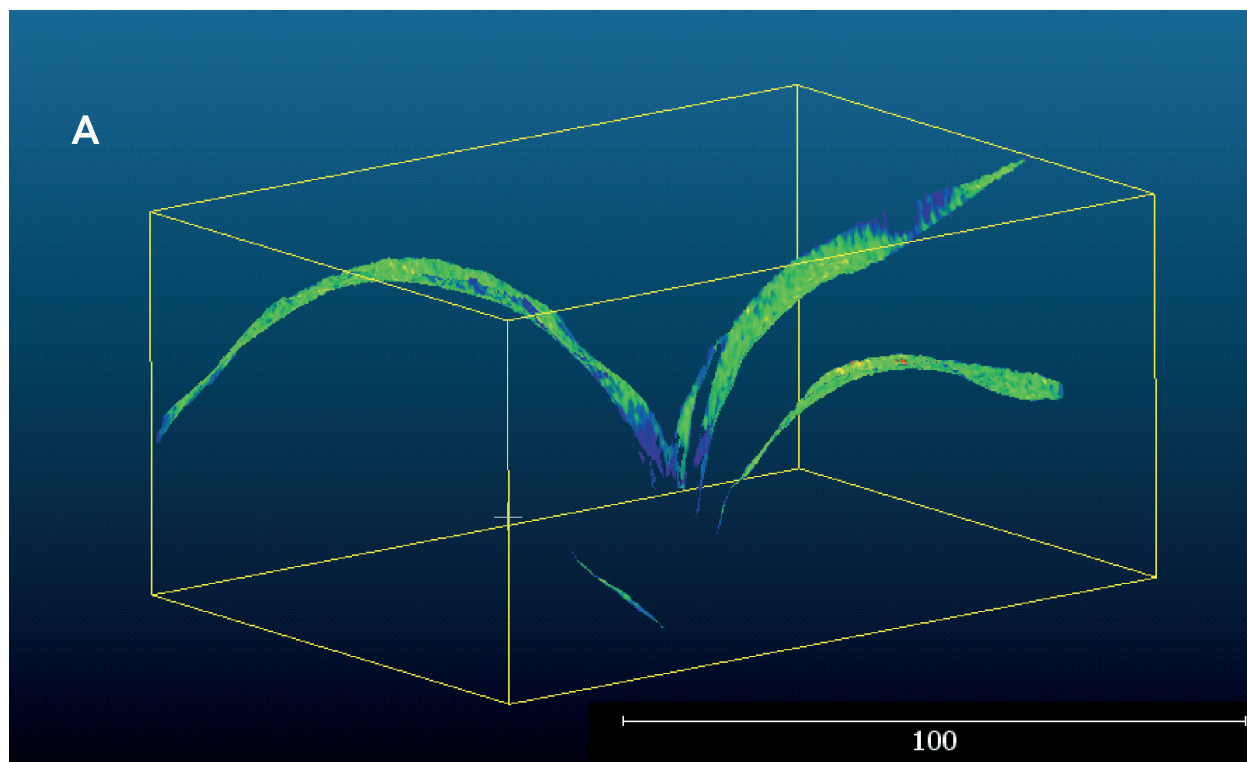
W ciągu ostatnich kilkunastu lat pojawiła się bardzo duża liczba prac eksperymentalnych prezentujących wyniki fenotypowania automatycznego oparte o mapowanie w świetle widzialnym i w zakresie hiperspektralnym z użyciem platform. W znakomitej większości dotyczyły rozwijania technik pomiarowych w kontekście zastosowania ich dla oceny materiałów hodowlanych pod kątem plonu, a także tolerancji stresów środowiskowych, głównie suszy. Trzeba jednak pamiętać, że badania takie prowadzono głównie w kontrolowanych lub quasi-kontrolowanych warunkach, a prac wiążących fenotypowanie w szklarni czy fitotronie z wynikami uzyskanymi w terenie było niewiele (Liang i in. 2018). Dla

tego ten ostatni aspekt nabrał ostatnio dużego znaczenia.

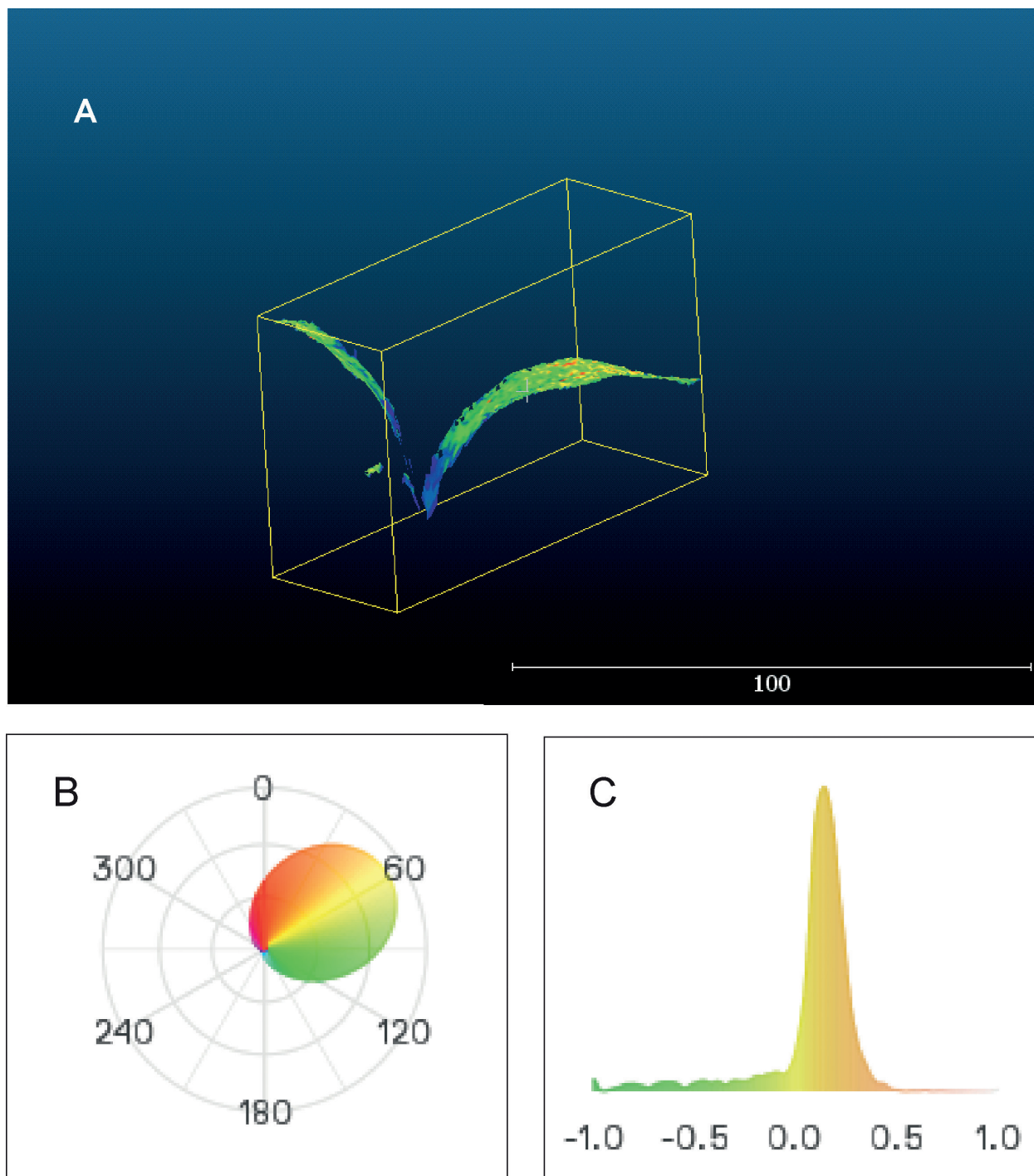
Fenotypowanie roślin w warunkach polowych może być realizowane na kilka sposobów. Pierwszy, to skanowanie roślin z użyciem podobnych (lub takich samych) kamer, jak w przypadku fenotypowania z użyciem platform automatycznych, które są zamontowane na szynach lub prowadnicach linowych rozmieszczonych między masztami. Ograniczeniem dla takiego rozwiązania jest stosunkowo niewielki (choć większy, niż w przypadku szklarni) obszar skanowania oraz bardzo wysoki koszt instalacji. Alternatywnym podejściem do platform fenotypujących jest wykorzystanie pojedynczych sensorów. Mogą to być automatyczne detektory wyspecjalizowane w pomiarze parametrów takich jak NDVI i PRI (Gamon i in., 2014). Rozwiązania takie obejmują raczej nieduże obszary, ale charakteryzują się stosunkowo niską ceną, a ponadto mogą być stosowane do badań terenowych naturalnych skupisk roślin.

Najbardziej rozpowszechnione podejście zakłada montaż kamer, sensorów lub detektorów na ruchomych urządzeniach: bezpilotowych dronach latających (unmanned air vehicles, UAV) lub jeżdżących (unmanned ground vehicles, UGV). Urządzenia te skanują rośliny poruszając się po wytyczonych trasach. Wadą UAV jest wrażliwość na warunki pogodowe, takie jak silny i/lub porywisty wiatr czy deszcz, a także prawne ograniczenia w ich stosowaniu w pobliżu różnych obiektów, np. nad liniami energetycznymi. Natomiast użycie UGV może być ograniczone przez przeszkody terenowe, np. rowy. Niemniej wykorzystanie dronów do fenotypowania roślin stało się na tyle powszechną metodą, że istnieją już firmy prywatne, również w Polsce, specjalizujące się w zdalnym skanowaniu roślin, głównie z użyciem UAV. Niewątpliwie przyczynił się do tego rozwój rolnictwa precyzyjnego wykorzystującego obrazowanie roślin do oceny ich stanu fizjologicznego w celu odpowiedniego nawożenia i ochrony przed szkodnikami.

W kontekście rolnictwa precyzyjnego szczególnego znaczenia nabrały mapy satelitarne upraw. Pozwalają one nie tylko określić stan fizjologiczny roślin, ale także wskazać obszary



Ryc. 1. Obraz (A) i dwa parametry spektralne, HUE (B) i NDVI (C) siewki kukurydzy z optymalnej temperatury wzrostu w stadium V1 (w pełni rozwinięty 1-szy liść) uzyskane z użyciem skanera 3D/multispektralnego PlanEye F500 (Phenospex, Holandia). Siewka rosła w glebie przy oświetleniu $400 \mu\text{mol kwantów} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$, w warunkach fotoperiodu (dzień/noc): 14/10 h, termoperiodu: $24^{\circ}\text{C}/21^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej 60/80%. Obraz jest dwuwymiarowym rzutem pojedynczego skanu 3D wybranego z serii czasowej. Średnia wartość HUE dla całego pędu wynosi ok. 120o, co barwę liścia lokuje w centrum zakresu barwy zielonej, natomiast średnia wartość NDVI wynosząca ok. 0,6 jest typowa dla zdrowych siewek kukurydzy na wczesnym etapie rozwoju



Ryc. 2. Obraz (A) i dwa parametry spektralne, HUE (B) i NDVI (C) siewki kukurydzy z chłodu umiarkowanego w stadium V1 (w pełni rozwinięty 1-szy liść) uzyskane z użyciem skanera 3D/multispektralnego PlanEye F500 (Phenospex, Holandia). Siewka rosła w glebie przy oświetleniu $400 \mu\text{mol kwantów} \times \text{m}^{-2} \times \text{s}^{-1}$, w warunkach fotoperiodu (dzień/noc): 14h/10h, termoperiodu: 16oC/12oC i wilgotności względnej 60/80%. Obraz jest dwuwymiarowym rzutem pojedynczego skanu 3D wybranego z serii czasowej. Średnia wartość HUE dla całego pędu wynosi ok. 60o, co barwę liścia lokuje w centrum zakresu barwy żółtej, natomiast średnia wartość NDVI wynosząca ok. 0,2 wskazuje na zły stan fizjologiczny siewek

o niskiej wilgotności i inne właściwości terenu. Mapy satelitarne są wykonywane w kolorze (model RGB, por. wyżej) i wraz z nimi mogą być dostarczane informacje wizualne o podstawowych parametrach fizjologicznych, np. współczynnika NDVI. Współczynnik ten ma uniwersalne zastosowanie od poziomu pojedynczych roślin badanych miernikami przenośnymi, przez większe zbiory analizowane użyciem automatycznych platform fenotypujących czy lany fotografowane przez drony, aż po poziom satelitarny. Niemniej obraz z większych odległości, szczególnie satelitarny, może być do pewnego stopnia fałszowany przez charakter podłoża roślin ewentualnie przez gęstość pokrywy roślinnej. Z tego względu w przypadku małego zagęszczenia roślin zamiast wskaźnika NDVI stosuje się niekiedy parametr SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index, Huete, 1988), natomiast przy dużym zagęszczeniu parametr SR (Simple Ratio, Jordan 1969).

Wadą zdjęć satelitarnych jest nieduża częstota ich wykonywania sięgająca kilku – kilkunastu dni, a także zależność od zachmurzenia. Zaletą jest natomiast ich powszechna dostępność na zamówienie za pośrednictwem kilku płatnych portali łatwych do ustalenia w sieci. W Polsce, instytucjonalnie tematem zajmuje się Polska Agencja Kosmiczna, która wydała podręcznik „Dane satelitarne dla administracji publicznej” dostępny w sieci (<https://nsisplatforma.polsa.gov.pl/baza-wiedzy/wiedza-ogolna/podrecznik-polsa>).

Oprócz utylitarne aspektu użycia map satelitarnych, ważny jest też aspekt poznawczy. Dysponując danymi satelitarnymi z kanałów hiperspektralnych próbuje się m.in. tworzyć modele przewidujące biomasę upraw pod koniec sezonu wegetacyjnego (Schucknecht i in., 2017; Kubiak i Kotlarz, 2019, Apricio i in., 2000). Poszukuje się też najlepszych wskaźników dla głównych parametrów wzrostowych i fizjologicznych upraw, takich jak LAI (leaf area index) oraz zawartości chlorofilu i azotu w liściach (Hunt i in., 2013). Badana jest też zmienność wskaźników fizjologicznych roślin w zmiennych środowiskach (Chen i in., 2007; Al-Gaadi i in., 2019).

PODSUMOWANIE

Jak wynika z powyższego przeglądu, współcześnie fenomika jest ukierunkowana głównie na dostarczanie wiedzy pozwalającej uzyskać odmiany bardziej wydajne, a jednocześnie odporne na stresy abiotyczne (niska i wysoka temperatura, susza) i biotyczne (choroby wirusowe, bakteryjne i grzybowe oraz owady roślinożerne). Zagadnienia te wpisują się w pojęcie problemów nieliniowych, które powstają, gdy cele lub ograniczenia nie mogą być wyrażone w postaci funkcji liniowych. Nowoczesnym narzędziem, które jest dedykowane rozwiązywaniu takich problemów, są modele oparte o sztuczne sieci neuronowe (Castillo-Girones i in., 2025). W przypadku analiz opartych o dane fenomiczne modele takie wykorzystują dane z obrazowania wszystkich rodzajów: RGB, hiperspektralnego i multispektralnego, termalnego, spektroskopię, czy promieniowania rentgenowskiego. Obecnie, sieci typu CNN (Convolutional Neural Networks), które są dedykowane rozwiązaniu problemów związanych z obrazami, umożliwiają wczesne wykrywanie szkodników i chorób na podstawie drobnych zmian w obrazach RGB lub hiperspektralnych. Natomiast na bazie danych niemających charakteru obrazu, inne typy sieci (np. MLP, Multilayer Perceptron) mogą przewidywać poziom określonych metabolitów ważnych dla jakości plonu. Duży potencjał w rolnictwie, szczególnie precyzyjnym, mają sieci zwane Transformers, które są wykorzystywane do analizy obrazów wielkoskalowych i rozpoznawania chwastów wśród roślin uprawnych. To tylko kilka przykładów wykorzystywania sieci neuralnych w rolnictwie. Należy oczekiwać dalszego rozwoju w ich zastosowaniach, choć trzeba też pamiętać o ograniczeniach w ich użyciu związanych choćby ze zmiennością środowiska naturalnego, trudnościami w zdobyciu danych do trenowania modeli, a także kosztami zastosowania takich rozwiązań, często nie do uniesienia dla małych czy nawet średnich gospodarstw rolnych.

OŚWIADCZENIA AUTORA

Deklaruję brak konfliktu interesów.

Artykuł powstał dzięki finansowaniu z projektu 2020/39/B/NZ9/00801 Narodowego Centrum Nauki (NCN).

BIBLIOGRAFIA

- Adamsen F.J., Pinter Jr P.J., Barnes E.M., LaMorte R.L., Wall S.W. i in., 1999. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science* 39, 719–724. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X003900030019x>
- Ahmad I.S., Reid J.F. 1996. Evaluation of colour representations for maize images. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63, 185–196. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0020>
- Appricio N., Villegas D., Casadesus J., Araus J.L., Royo C. 2020. Spectral vegetation indices as non-destructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal* 92, 83–91. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.92183x>
- Al-Gaadi K.A., Hassaballa A.A., Tola E., Kayad A.G., Madugundu R. i in., 2019. Impact of center pivot irrigation system uniformity on growth of potato crop and residual soil nitrogen. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 12, 126–131. <https://doi.org/0.25165/j.ijabe.20191201.3684>
- Araus J.L., Cairns J.E. 2014. Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in Plant Sciences* 18, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008>
- Bacci, L.; De Vincenzi, M.; Rapi, B., Arca B., Bebinca F. 1998. Two methods for the analysis of colorimetric components applied to plant stress monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture* 19, 167–186. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(97\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(97)00042-2)
- Bodner G., Alsalem M., Nakhforoosh A., Arnold T., Leitner D. 2017. RGB and spectral root imaging for plant phenotyping and physiological research: experimental setup and imaging protocols. *Journal of Visualized Experiments* 126, e56251. <https://doi.org/10.3791/56251>
- Caradus J.R. 2023. Perceptions of plant breeding methods—from ‘phenotypic selection’ to ‘genetic modification’ and ‘new breeding technologies’ *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 67, 621–669. <https://doi.org/10.1080/00288233.2023.2187425>
- Castillo-Girones S., Munera S., Martinez-Sober M., Blasco J., Cuberro S., Gomez-Sanchis J. 2025. Artificial Neural Networks in Agriculture, the core of artificial intelligence: What, When, and Why. *Computers and Electronics in Agriculture* 230, 109938. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.109938>
- Cetner D., Dąbrowski P., Samborska I.A., Łukasik I., Swoczyna T. i in., 2016. Zastosowanie pomiarów fluorescencji chlorofilu w badaniach środowiskowych. *Kosmos* 65, 197–205.
- Chen J.-C., Yang C.-M., Wu S.-T., Chung Y.-L., Charles A.L., Chen C.-T. 2007. Leaf chlorophyll content and surface spectral reflectance of tree species along a terrain gradient in Taiwan’s Kenting National Park. *Botanical Studies* 48, 71–77.
- Collins G.N. 1914. Pueblo Indian maize breeding. *Journal of Heredity* 5, 255–268. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jhered.a107868>
- Enders T.A., Dennis S.St., Oakland J., Calen S.T., Gehan M.A. i in., 2018. Classifying cold-stress responses of inbred maize seedlings using RGB imaging. *Plant Direct* 3, 1–11. <https://doi.org/10.1002/pld3.104>
- Gamon J.A., Kovalchuck O., Wong C.Y.S., Harris A., Garrity S.R. 2015. Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences* 12, 4149–4159. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4149-2015>
- Huete A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Hunt, R. 1990. Relative growth rates. In: *Basic Growth Analysis*. Springer, Dordrecht.
- Hunt Jr., E.R., Doraiswamy P.C., McMurtrey J.E., Daughtry C.S.T., Perry E.M. i in., 2013. A visible band index for remote sensing

- leaf chlorophyll content at the canopy scale. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 21, 103–112.
- Jordan C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50, 663–666.
- Kampmann H.H., Hansen O.B. 1994. Using colour image analysis for quantitative assessment of powdery mildew on cucumber. *Euphytica* 79, 19–27. <https://doi.org/10.1007/BF00023572>
- Kubar M.S., Wang C., Noor R.S., Feng M., Yang W. i in., 2022. Nitrogen fertilizer application rates and ratios promote the biochemical and physiological attributes of winter wheat. *Frontiers in Plant Sciences* 13, 1011515. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1011515>
- Kubiak K., Kotlarz J. 2019. Zastosowanie satelitarnych wskaźników teledetekcyjnych do monitorowania uwilgocenia biomasy w uprawach miskanta olbrzymiego (*Miscanthus x giganteus*). *Technika Rolnicza Ogrodnictwa Leśna* 3, 16–18.
- Liang Z., Pandey P., Stoerger V., Xu Y., Qiu Y. i in., 2018. Conventional and hyperspectral time-series imaging of maize lines widely used in field trials. *Gigascience* 7, 1–11. <https://doi.org/10.1093/gigascience/gix117>
- Machul M. 2001. Ocena stanu odżywienia roślin azotem z zastosowaniem testów roślinnych. *Postępy Nauk Rolniczych* 3/2001.
- Majer P., Sass L., Horvath G.V., Hideg E. 2010. Leaf hue measurements offer a fast, high-throughput initial screening of photosynthesis in leaves. *Journal of Plant Physiology* 167, 74–76. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.06.015>
- Martin, D.P., Rybicki E.P. 1998. Microcomputer-based quantification of maize streak virus symptoms in *Zea mays*. *Phytopathology* 88, 422–427. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1998.88.5.422>
- Minervini M., Giuffrida M.V., Perata P., Tsafaris S.A. 2017. Phenotiki: an open software and hardware platform for affordable and easy image-based phenotyping of rosette-shaped plants. *The Plant Journal* 90, 204–216. <https://doi.org/10.1111/tpj.13472>
- Olmstead J.W., Lang, G.A. 2001. Assessment of severity of powdery mildew infection of sweet cherry leaves by digital image analysis. *HortScience* 36, 107–111.
- Nguyen L.L.P., Baranyai L., Nagy D., Mahajan P.V., Zsom-Mucha V., Zsom T. 2021. Color analysis of horticultural produces using hue spectra fingerprints. *MethodsX* 8, 101594. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101594>
- Ntakos G., Prikaziuk E., Vilfan N., van der Wal T., van der Tol. 2025. From fluorescence to biomass: A comprehensive analysis via crop modeling and sensing techniques. *Smart Agricultural Technology* 10, 100807. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100807>
- Paulus S. 2019. Measuring crops in 3D: using geometry for plant phenotyping. *Plant methods* 15, 103. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0490-0>
- Perez, A.J. Lopez F., Benlloch, J.V. Christensen S. 2000. Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Computers and Electronics in Agriculture*. 25, 197–212. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(99\)00068-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(99)00068-X)
- Price T.V., Gross R., Ho Wey J., Osborne C.F. 1993. A comparison of visual and digital image-processing methods in quantifying the severity of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). *Australian Journal of Experimental Agriculture* 33, 97–101. <https://doi.org/10.1071/EA9930097>
- Rybka K. 2017. Fenotypowanie roślin. Konferencja EPPN 2020 w Tartu/ Estonia. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 282, 161–174. <https://doi.org/10.37317/biul-2017-0022>
- Rybka K. 2023. Najnowsze doniesienia z zakresu biotechnologii i hodowli zbóż: CBB7 siódma konferencja Cereal Biotechnology and Breeding w Wernigerode, Niemcy. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 300, 77–89. <https://doi.org/10.37317/biul-2023-0014>
- Sancho-Adamson M., Trillas I.M., Bort J., Fernandez-Gallego J.A., Romanyà J. 2019. Use

- of RGB vegetation indexes in assessing early effects of *verticillium* wilt of olive in symptomatic plants in high and low fertility scenarios. *Remote Sensing* 11, 607. <https://doi.org/10.3390/rs11060607>
- Schrevens E., Raeymaeckers L. 1992. Colour characterization of golden delicious apples using digital image processing. *Acta Horticulturae* 304, 159–166. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.304.17>
- Schucknecht A., Meroni M., Kayitakire F., Boureima A. 2017. Phenology-based biomass estimation to support rangeland management in semi-arid environments. *Remote Sensing* 9, 463. <https://doi.org/10.3390/rs9050463>
- Sobkowiak A., Szczepanik J., Sowiński P. 2013. Molekularne podłoże udomowienia kukurydzy. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 267, 41–55. <https://doi.org/10.37317/biul-2013-0049>
- Sowiński P., Wieliczko-Manowska K., Grzybowski M., Jończyk M., Sowiński J. 2025. Diverse coping modes of maize in cool environment at early growth. *BMC Plant Biology* 25, 191. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06198-2>
- Stefański P., Rybka K., Matysik P. 2024. Fenotypowanie zagęszczenia łanu pszenżyta ozimego w warunkach polowych przy użyciu kamery RGB. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 301, 3–11. <https://doi.org/10.37317/biul-2024-0001>
- Sulkiewicz M., Ciereszko I. 2016. Fluorescencja chlorofilu a – historia odkrycia i zastosowanie w badaniach roślin. *Kosmos* 65, 103–115.
- Tennant D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology* 63, 996–1001. <http://dx.doi.org/10.2307/2258617>
- Vernon A., Allison, J. 1963. A Method of Calculating Net Assimilation Rate. *Nature* 200, 814. <https://doi.org/10.1038/200814a0>
- Vervaeke F., Schrevens E., Verreydt J., Portier K., De Baerdemaeker J. 1994. The use of digitized video images for monitoring color and color evolution of Jonagold apples during shelf life. [W] Yano, T.; Matsuno, R.; Nakamura, K., (red.). *Proceedings of the sixth international congress on engineering and food*; 1993 May 23–27, Blackie Academic and Professional., Chiba, Japan. London, UK, 200–202. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2674-2_59
- Woebbecke D.M., Meyer G.E., Von Bargen K., Mortensen D.A. 1995. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*. 38, 259–269.
- Zhang N., Chaisattapagon C. 1995. Effective criteria for weed identification in wheat fields using machine vision. *Transactions of the ASA* 38, 965–974. <https://doi.org/10.13031/2013.27914>
- Zhang M., De Baerdemaeker J., Schrevens E. 2003. Effects of different varieties and shelf storage conditions of chicory on deteriorative color changes using digital image processing and analysis. *Food Research International* 36, 669–676. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(03\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(03)00015-2)

