

¹ Katedra Chemii Rolnej i Środowiskowej, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, al. Adama Mickiewicza 21, 31-120 Kraków, e-mail: rrantonk@cyf-kr.edu.pl

² Katedra Nauk o Środowisku Glebowym, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: jan_labetowicz@sggw.pl

JACEK ANTONKIEWICZ¹, JAN ŁABĘTOWICZ²

Innowacje chemiczne w odżywianiu roślin od starożytnej Grecji i Rzymu po czasy najnowsze. Praca przeglądowa

Chemical innovation in plant nutrition in a historical continuum from ancient Greece and Rome until modern times. A review

Streszczenie. W opracowaniu ukazano, jak kształtowały się poglądy dotyczące odżywiania roślin i jak powstawał fundament tej dziedziny wiedzy przyrodniczej. Przedstawiono także współczesne problemy i kierunki badań dotyczące odżywiania roślin, ukazując ich nowy wymiar, z jednej strony motywowany potrzebą żywienia zwiększającej się populacji, z drugiej narastającymi problemami środowiskowymi wywołanymi intensyfikacją produkcji rolniczej.

Słowa kluczowe: innowacje chemiczne, odżywianie roślin, aspekty historyczne

WSTĘP

Odżywianie roślin początkowo znajdowało się w kręgu zainteresowań filozofów, a następnie badaczy. Historia odkryć przyrodniczych dotyczących sposobu odżywiania się roślin obfituje w wiele błędnych poglądów i teorii. Poznanie wielopokoleniowego trudu w dociekanii wyjaśnienia tego fundamentalnego dla rolnictwa procesu ukazuje wytrwałość i pomysłowość wielu wybitnych osobowości i uczonych. Pozwala także na refleksję natury ogólnej, jak wielki, zbiorowy wysiłek nauki stoi za współczesną wiedzą, która często wydaje się nam oczywista.

Niniejsze opracowanie stawia sobie za cel ukazanie, jak mozolnie na przestrzeni wieków kształtowały się poglądy dotyczące odżywiania roślin i powstawał fundament wiedzy przyrodniczej dotyczący tej problematyki. W publikacji przedstawiono także współczesne problemy i kierunki badań dotyczące odżywiania roślin, ukazując ich nowy wymiar, zdeterminowany z jednej strony potrzebą żywienia zwiększającej się w postępie geometrycznym populacji Ziemi, z drugiej narastającymi problemami środowiskowymi z tytułu intensyfikacji produkcji rolniczej.

Starożytność

Już w starożytnej Grecji interesowano się procesami życiowymi roślin, sposobem ich odżywiania i warunkami umożliwiającymi lub hamującymi wzrost. Homer (VIII w. p.n.e.) w „Odysei” wymienia obornik jako materiał polepszający wzrost roślin. Obok obornika do użyźniania gleb zalecano stosowanie kompostu, słomy, odpadków zwierzęcych, szlamu z rzek i stawów, nawozów zielonych, a niekiedy również popiołu, kości, marglu, wapna i gipsu [Clarkson i Hanson 1980, Czuba 1996, Gorlach i Mazur 2001, Fageria 2009]. W V w. p.n.e. Anaksagoras (500–428 r. p.n.e.) w dziele pt. „Peri physeon” („O przyrodzie”) oraz inni filozofowie uważali rośliny za organizmy uduchowione, obdarzone zdolnością reagowania na warunki środowiska, na przykład poprzez smutek czy radość. Arystoteles (384–322 p.n.e.) nauczał, że rośliny za pośrednictwem korzeni pobierają z gleby pokarm w stanie gotowym, tj. w postaci substancji organicznych, jakie występują w roślinie. Przypuszczał także, że rośliny posiadają życie wewnętrzne, przejawiające się zdolnością myślenia i pamięcią [Starck i Pietkiewicz 2016]. Teofrast z Eresos (ok. 370–287 p.n.e.) najwybitniejszy uczeń Arystotelesa, dzięki głębokim studiom nad systematyką, morfologią, geografiami i fizjologią roślin wniósł epokowy wkład do biologii – sformułował różnice między światem zwierzęcym i roślinnym oraz wprowadził podział świata roślinnego na 4 grupy (utrzymany do XVI w.). Opisał około 500 gatunków roślin – sposoby ich rozmnażania, użytkowanie w różnych dziedzinach życia, pobudliwość oraz wyodrębnił z budowy roślin korzeń, łodygę i liście [Zemanek i in. 2008, Zemanek i Zemanek 2016]. Na podstawie przekazu Columelli wiadomo, że na gruncie rzymskim pierwszy zainteresował się rolnictwem Marek Porcjusz Katon (234–149 p.n.e.), autor napisanego po łacinie traktatu poświęconego rolnictwu pt. „De agri cultura” („O gospodarstwie wiejskim”). Do jego napisania przyczyniły się teksty greckie – prace botaniczne Teofrasta. Katon tworzy serię instrukcji i zaleceń, jak administrować gospodarstwem rolnym w celu osiągnięcia lepszej wydajności ekonomicznej. Podaje rady związane z siewem, użyźnianiem ziemi, uprawą winorośli i oliwki. Główna dewiza dzieła sprowadza się do osiągnięcia maksymalnego zysku z uprawy ziemi przy niskich nakładach. Traktat zawiera też m.in. przepisy kucharskie, medyczne, religijne, porady dotyczące zaopatrzenia i zbytu [Katon 2009]. W starożytnym Rzymie pod koniec republiki (koniec I w. p.n.e.) wojsko liczyło ok. 500 000 żołnierzy, a w późnym okresie cesarstwa rzymskiego (V w. n.e.) blisko 750 000 żołnierzy, co wymagało ogromnych dostaw żywności. W tym okresie dziennie na przeciętną armię potrzeba było ok. 7,5 t zboża, a w ciągu roku jeden żołnierz zjadał 1/3 t pszenicy. Inne źródła podają, że w Bretanii żołnierze zjadali 33,5 t pszenicy dziennie. Z powyższych danych wynika, że produkcja żywności, w tym zbóż, obejmowała duże arealy i musiała być wspomagana poprzez nawożenie wymienionymi przez Homera materiałami organicznymi, takimi jak odchody zwierząt, osady rzeczne, szlam ze stawów oraz materiały mineralne, w tym popiół z wypalania lasów, kości, margiel, wapno, gips. Dzięki ekspansjonistycznym wojnom, dużemu zapotrzebowaniu na żywność dla wojska i posiadaniu dostatecznej liczby niewolników Rzymianie inwestowali w uprawę ziemi. Powierzchnia gospodarstwa stawała się znacznie większa niż w okresach poprzednich i wynosiła od 100 do 240 jugerów, to jest od 25 do 60 ha. Zaczęła się tworzyć wówczas w rolnictwie specjalizacja, prowadząca przede wszystkim do uprawy na szeroką skalę winorośli, oliwek, a także zbóż [Katon 2009].

Średniowiecze

Upadek Rzymu w wyniku najazdu barbarzyńców doprowadził do upadku całej cywilizacji grecko-łacińskiej. Osiągnięcia tego okresu poszły czasowo w zapomnienie. W znacznym stopniu wiedzę świata starożytnego przejęli Arabowie, a została na nowo odkryta w okresie odrodzenia i zetknięcia Europy z kulturą wschodnią. Efektem tego było dokonanie przekładu wielu dzieł starożytnych filozofów, co nie było bez znaczenia dla poglądów w naukach przyrodniczych w ówczesnej Europie [Strebejko 1974]. Koniec XI i początek XII w. w zachodniej Europie był okresem rozwoju szkół katedralnych, co oznaczało przeniesienie centrum życia intelektualnego z klasztorów do miast. Z kolei szkoły katedralne wkrótce straciły na znaczeniu na rzecz uniwersytetów powstających w głównych miastach europejskich. W odróżnieniu od szkół kościelnych dostęp do nauki na uniwersytecie był otwarty, program kształcenia został rozszerzony o świeckie dziedziny, w tym nauki przyrodnicze. Do najstarszych zachodnioeuropejskich uniwersytetów należą uczelnie w Bolonii, Paryżu, Oxfordzie, Cambridge, Padwie, Tuluzie, Rzymie, Orleanie, Florencji, Pizie, Coimbrze, zaś do wschodnioeuropejskich – w Pradze i Krakowie. W XVI w. na Uniwersytecie Bolońskim wprowadzono nauki przyrodnicze, rozbudowując pracownie, laboratoria i instytuty. Paradygmat nauki średniowiecznej opierał się na wykorzystaniu wiedzy starożytnych filozofów i autorów. W pewnym sensie właśnie z ówczesnych analiz starożytnych dzieł filozofów zrodziła się nauka współczesna. W tamtym czasie opisywaniem przyrody zajmowali się lekarze, filozofowie, botanicy, duchowni. Badali oni rośliny w ich siedlisku, obserwowali miejsce występowania poszczególnych gatunków [Zemanek i Zemanek 2005, 2016]. Wiele odkryć dokonanych w tym okresie związanych było głównie z chemią i botaniką, a nie fizjologią i odżywianiem roślin. Już w średniowieczu zwracano uwagę na zależność plonu roślin, ich wzrostu i rozwoju od jakości gleb. Jak podaje Fink [1982] w XII–XV w. plon z 1 kg materiału siewnego (ziarna) dawał na przeciętnych glebach 3–4 kg ziarna zbóż, natomiast obecnie wynosi ok. 50–60 kg. Wiedza na temat odżywiania roślin była wówczas bardzo skromna, a rolnictwo prowadziło gospodarkę rabunkową, ponieważ nie przywiązywano większej wagi do nawożenia oraz do zwrotu składników pokarmowych wyniesionych z gleby wraz z plonem.

Nowożytność (XVI–XIX w.)

Na przełomie XVI–XVII w. nauka o odżywianiu roślin zaczyna się rozwijać, poczynając od filozofii przyrody, aż do nauk eksperymentalnych, opartych na podstawach chemicznych. Przyniosło to wkrótce zaskakujące wyniki badań. W tym okresie zaczęto przeprowadzać przemyślane prace eksperymentalne z zakresu odżywiania roślin. Jako przykład prób wyciągania wniosków z doświadczeń można przytoczyć precyzyjnie zaplanowane badanie ilościowe belgijskiego medyka Jeana Baptiste van Helmonta (1579–1644) dotyczące sposobu odżywiania się roślin. Posadził on gałązkę wierzby ważącą 5 funtów (1 funt wynosi 0,454 kg) w pojemniku wypełnionym 300 funtami gleby wysuszonej w piecu. Ukorzenione drzewo rosło przez 5 lat. Było podlewane wodą deszczową, pozbawioną składników mineralnych. O staranności tych badań świadczy fakt, że wierzba rosła w ceramicznym wazonie, a dla uniknięcia „kurzu” z powietrza wazon był zabezpieczony od góry perforowaną pokrywą. Wytworzona po tym czasie masa wierzby wynosiła 164 funty przy jednoczesnym zmniejszeniu masy gleby tylko o 2 uncje (1 uncja

wynosi 28,35 g). Z tego bardzo pracochłonnego doświadczenia Jean Baptiste van Helmont wyciągnął wniosek, że „cała masa wierzby wytworzona została wyłącznie z wody”, czyli że woda była jedynym dostępnym pokarmem dla rosnącego drzewa [Fotyma 2010, Starck 2014, Starck i Pietkiewicz 2016]. To pozornie bardzo przekonujące doświadczenie powtórzyło wielu wybitnych uczonych tego okresu w Anglii, Francji, Niemczech i Rosji, którzy przyczynili się do utrwalenia na długi czas tej błędnej teorii odżywiania roślin. W efekcie przez prawie dwa wieki, XVII i XVIII, dominował pogląd, że biomasa roślin powstaje z wody [Strebejko 1974]. Było to w znacznym stopniu zrozumiałe, bowiem w owych czasach nie znano jeszcze zjawiska fotosyntezy oraz nie wiadano, że pokarm dla roślin, czyli dwutlenek węgla, może znajdować się w powietrzu [Starck 2014]. Van Helmont odrzucił dominującą w tych czasach koncepcję czterech żywiołów (ziemia, ogień, powietrze i woda), uważając, że „rzeczywistymi pierwiastkami” są tylko woda i powietrze. Odrzucenie koncepcji czterech żywiołów dało impuls do dalszych badań nad odżywianiem roślin.

Jedne z pierwszych doświadczeń z zakresu mineralnego odżywiania roślin opisał w swojej rozprawie pt. „*Sylva Sylvarum*” Francis Bacon (1561–1626). W doświadczeniach dotyczących kiełkowania nasion i wzrostu siewek pszenicy dodawał do kultur wodnych odchody zwierzęce, popiół, sól, wapno, piasek morski i sadzę, po czym analizował uzyskane efekty [Strebejko 1974]. Bacon, uprawiając rośliny w kulturach wodnych, obserwował także wzrost roślin lądowych i nie uniknął błędnych interpretacji. Przedstawił tezę, że gleba jest konieczna jedynie do utrzymania roślin w pozycji pionowej [Starck 2014]. Wielką intuicję badawczą, przepowiadając niejako znaczenie gleby w odżywianiu roślin, wykazał badacz angielski John Woodward (1655–1728). W prostym eksperymencie, w którym umieścił gałązkę mięty w trzech środowiskach – wodzie destylowanej, wodzie wziętej z Hyde Parku oraz tej samej wodzie z dodatkiem gleby – wykazał, że to gleba, a nie woda, jak twierdził Van Helmont, jest tworzywem, z którego powstaje biomasa roślin [Strebejko 1974]. W XVII w. Marcello Malpighi (1628–1694) zaczął zwracać uwagę na zielone liście jako ważny organ odżywiania roślin. Malpighi, włoski biolog i lekarz, syn rolnika prowadził gospodarstwo rolnicze i dlatego interesował się nawożeniem i odżywianiem roślin. Jego poglądy dały impuls do rozpoczęcia badań nad fotosyntezą roślin [Starck 2014].

W połowie XVIII w. obserwowano ogromne zainteresowanie roślinami uprawnymi z punktu widzenia ich wartości odżywczych – jako pokarm dla ludzi, pasza dla zwierząt i leków naturalnych. Stanowiło to znaczący impuls do badań nad odżywianiem roślin. Francuski fizyk i chemik Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) udowodnił m.in., że tlen odgrywa kluczową rolę w oddychaniu zwierząt i roślin oraz we wszelkich procesach utleniania. Odkrycia Lavoisiera pozwoliły odrzucić teorię flogistonu, która postulowała, że materiały podczas spalania uwalniają substancję zwaną flogistonem, a także pozwoliły stworzyć podstawy rozwoju nowoczesnej chemii [Guerlac 1976, Lavoisier 2001]. Kolejny uczony, Joseph Priestley (1733–1804) – angielski chemik, odkrywca tlenu – wykazał, że rośliny, odwrotnie niż zwierzęta, oczyszczają powietrze, gdyż wydzielają tlen. Jego doświadczenia nie w każdych jednak warunkach pozwalały na wyciągnięcie takiego wniosku. Dopiero Jan Ingen-Housz (1730–1799), holenderski biolog, fizjolog, chemik, stwierdził, że rośliny wydzielają tlen, czyli „oczyszczają” powietrze, tylko na świetle, w ciemności zaś wydzielają dwutlenek węgla. Jego wyniki badań były istotnym etapem prowadzącym do wyjaśnienia, na czym polega odżywianie roślin poprzez asymilację

dwutlenku węgla [Starck i Niemyska 1998, Starck 2014]. Dalszym istotnym postępowaniem w badaniach nad odżywianiem roślin były prace Jeana Senebiera (1742–1809), w których wykazał, że objętość tlenu wydalonego podczas procesów życiowych roślin równa jest objętości pochłoniętego dwutlenku węgla, co doprowadziło go do wniosku, że wydany podczas fotosyntezy tlen pochodzi z rozkładu pobranego dwutlenku węgla [Strebecko 1974].

Pierwszym uczonym, który wykorzystał zasady nowoczesnej chemii Lavoisiera i wyniki wcześniejszych badań nad żywieniem roślin był Nicolas-Théodore de Saussure (1767–1845), szwajcarski chemik i botanik, pionier w zakresie badań nad fitochemią i fizjologią roślin. Zajmował się m.in. fotosyntezą oraz bilansem produkowanych przez rośliny zielne związków chemicznych, w tym dwutlenku węgla i wody. W pracy pt. „Badania chemiczne nad roślinami” pisze „[...] atmosfera jest głównym źródłem węgla w roślinie, a gleba jest tylko dostawcą składników popielnych i wody.” [Saussure 1804]. A zatem na podstawie ścisłych eksperymentów połączonych z analizą chemiczną dochodzi on do wniosku, że roślina buduje substancje organiczne z dwutlenku węgla pobranego z powietrza i z wody pobranej z gleby. Obok wyjaśnienia roli tlenu i dwutlenku węgla w tych procesach autor zwraca uwagę na rolę składników pobieranych z gleby, z której pochodzi zarówno azot, jak i składniki popielne [Clarkson i Hanson 1980, Czuba 1996, Fotyma 2010]. Badania nad rolą składników nieorganicznych w żywieniu roślin kontynuowali niemieccy badacze, tacy jak Carl Sprengel (1787–1859) i Arend Fredrich Wiegmann (1770–1853), a uzyskane przez nich wyniki potwierdzały obserwacje de Saussure’a [Fageria 2009, Gorlach i Mazur 2001].

Wiek XVIII, a zwłaszcza druga jego połowa, okazał się bardzo twórczy dla nauk przyrodniczych. Została w ten sposób otwarta droga do zrozumienia mechanizmów odżywiania roślin, choć upłynie jeszcze wiele lat zanim nowe odkrycia dotrą do świadomości ogółu badaczy zajmujących się tą problematyką.

Przełomem w zakresie wyjaśnienia natury odżywiania roślin był wiek XIX. Pojawiły się wtedy dwie hipotezy uczonych niemieckich: próchnicowa teoria odżywiania roślin Albrechta Daniela von Thaera (1752–1828) i teoria mineralnego odżywiania roślin Justusa von Liebiga (1803–1873).

Albrecht Daniel von Thaeer w cyklu prac pt. „Grundsätze der rationellen Landwirtschaft” („Poradnik gospodarski” 1809–1812) ugruntował wcześniejsze poglądy Johana Gottschalk Walleriusa (1709–1785) o próchnicowym odżywianiu roślin. Zgodnie z tą teorią podstawowym źródłem składników pokarmowych dla roślin jest próchnica, obok uznanej wcześniej wody. Składniki mineralne odgrywały według Thaera wyłącznie rolę pomocniczą w udostępnianiu roślinom związków próchnicowych. Zatem cała żyzność gleby zależy wyłącznie od zawartej w niej próchnicy. Thaeer z wykształcenia był lekarzem i agronomek, swoje poglądy wygłaszał w założonej przez siebie w 1806 r. pierwszej w Europie uczelni rolniczej w Möglin nad Odrą w Niemczech. Był także propagatorem płodozmianu oraz uprawy ziemniaków. Pełnił funkcję profesora uniwersytetu w Berlinie. W czasach Thaera badania nad odżywianiem roślin prowadził także Humphry Davy (1778–1829), angielski chemik i fizyk, który wydał w Londynie książkę pt. „Elements of Agricultural Chemistry”, w której zwracał uwagę na próchnicę jako podstawowy pokarm dla roślin [Davy 1813]. Prace i badania naukowe Albrechta Thaera wywarły szczególnie silny wpływ na Michała Oczapowskiego (1788–1854), polskiego agronoma, profesora Uniwersytetu Wileńskiego, późniejszego dyrektora Instytutu Agro-

nomicznego w Warszawie na Marymoncie. Oczapowski stał się gorącym zwolennikiem teorii humusowej. Zainspirowany literaturą zagraniczną, studiami, m.in. u Thaera w Möglin w Niemczech, oraz opierając się na własnym doświadczeniu, ogłosił drukiem „Zasady chemii rolnej” (1818), a następnie „Zasady agronomii” (1819). Niewiele osób wie, że właśnie Oczapowski jest autorem funkcjonującego do dziś terminu „próchnica” [Malicki 1989]. Zarówno Davy, jak i Oczapowski byli zwolennikami teorii próchnicowego odżywiania roślin oraz oparli na niej swoje dzieła.

Próchnicowa teoria odżywiania roślin przez kilkadziesiąt lat stanowiła dominującą teorię tłumaczącą istotę odżywiania roślin. Dopiero prace eksperymentalne chemika Justusa von Liebiga (1803–1873) wyjaśniły podstawy mineralnego odżywiania roślin. W 1841 r. pojawiła się publikacja „Die Organische Chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie” („Chemia w zastosowaniu do rolnictwa i fizjologii”) ze sformułowaną nową teorią mineralnego odżywiania roślin [Liebig 1841, Ploeg i in. 1999]. Otworzyła ona nowy etap w rozwoju nauki w zakresie odżywiania roślin oraz wzbudziła ogromne zainteresowanie zarówno w świecie naukowym, jak i wśród rolników. Liebig pisał, że bezpośrednim pokarmem roślin nie jest próchnica, ale sole mineralne pobierane z wodą z gleby za pomocą korzeni i dwutlenek węgla asymilowany z powietrza w procesie fotosyntezy. Dla stabilnego plonowania roślin gleba powinna być zasilana nawozami mineralnymi w celu uzupełnienia niedoboru składników pokarmowych, który powstaje m.in. przez ich odprowadzenie z pola wraz z plonem roślin oraz przez wymywanie. Do sformułowania teorii o mineralnym odżywianiu roślin Liebig doszedł na podstawie badań innych naukowców, a także w drodze dedukcji, wychodząc z analizy chemicznej roślin. Jako chemik analityk wykonał wiele badań nad składem chemicznym roślin, stwierdzając, że podczas spalania roślin zawarty w nich węgiel, wodór, tlen i azot uchodzą w powietrze, a w skład powstałego popiołu wchodzi zawsze fosfor, siarka, wapń, potas, magnez, krzem, a nieraz sód. Jednakże Liebig, podobnie jak wielu jego poprzedników, nie uniknął sformułowań błędnych, na przykład dotyczących azotu jako składnika pokarmowego dla roślin. Liebig w początkowym okresie swojej działalności naukowej nie przypisywał azotowi większego znaczenia w nawożeniu. Uważał, że występuje w atmosferze zarówno w formie amoniaku, powstającego m.in. z azotu pierwiastkowego i wody, jak i w postaci utlenionej w wyniku wyładowań elektrycznych i wraz z opadami dostaje się do gleby w ilości wystarczającej, aby zaspokoić wymagania pokarmowe roślin. Dlatego z punktu widzenia Liebiga w oborniku cenna jest przede wszystkim popielna jego część, zawierająca potas, fosfor i inne składniki mineralne niezbędne dla roślin [Gorlach i Mazur 2001, Fageria 2009, Fotyma 2010,]. Liebig w swej teorii zmarginalizował zagadnienie nawożenia azotem, przyjmując błędnie, że rośliny zaopatrują się w azot, podobnie jak w dwutlenek węgla, na drodze zamkniętego cyklu krążenia w przyrodzie. W 1842 r. niemiecki uczoney Carl Sprengel (1787–1859) sformułował teorię minimum chemii agrarnej, która dzisiaj znana jest jako prawo minimum Liebiga. Teoria ta mówi, że wzrost roślin jest ograniczony przez te ilości niezbędnych substancji odżywczych, które występują w najniższym stężeniu w danej glebie. Liebig jako znany badacz spopularyzował tę teorię i dlatego jemu mylnie przypisuje się jej autorstwo. Upowszechnione przez Liebiga prawo minimum zrewolucjonizowało ówczesne poglądy na temat nawożenia, zdominowane przez teorię próchnicową, zarówno wśród naukowców, jak i rolników. Prawo to zachowuje swą aktualność do dziś i jest

podstawą współczesnych systemów diagnostyki nawożenia mineralnego [Strebejko 1974, Gorlach i Mazur 2001, Fageria 2009].

Jednak przekonanie Liebiga, że tylko składniki popielne decydują o wartości obornika, a azot nie odgrywa w niej większej roli, spotkało się z ostrą krytyką francuskiego chemika i agronoma Jeana Baptiste'a Boussingaulta (1802–1887). Na podstawie badań przeprowadzonych w założonej we własnej posiadłości w 1834 r. pierwszej na świecie rolniczej stacji doświadczalnej przypisywał azotowi największe znaczenie – niedobór tego pierwiastka spowodowany wyczerpywaniem go z gleby w największym stopniu przyczynia się do zmniejszenia plonowania roślin. Uważał także, że obecność azotu w nawozach naturalnych (dawniej zwanych organicznymi) jest głównym czynnikiem plonotwórczym. Francuski uczyony, oprócz obserwacji wpływu azotu na rośliny i ich plonowanie, badał także proces asymilacji węgla przez rośliny. Sformułował przed Justusem von Liebigiem (przed 1840 r.) teorię mineralnego odżywiania roślin, która jednak nie została opublikowana. Boussingault jako pierwszy zwrócił uwagę na krążenie w przyrodzie pierwiastków, które mają znaczenie w odżywianiu roślin. Także prace eksperymentalne przeprowadzone w jednej z pierwszych na świecie stacji rolniczej Rothamsted w Harpenden w Anglii w 1843 r. przez Johna Benneta Lawesa (1814–1900) oraz Josepha Henry'ego Gilberta (1817–1901) potwierdziły znaczenie azotu jako podstawowego składnika nawozowego. Wykazano, że działanie plonotwórcze obornika jest znacząco lepsze niż działanie popiołu uzyskanego z jego spalania [Fotyma 2010].

Po wielu latach badań połączono nowe, sformułowane przez Boussingaulta, poglądy na rolę azotu w odżywianiu roślin z rolą składników popielnych propagowaną przez Liebiga, formułując spójną, wciąż aktualną koncepcję, tworzącą podstawy mineralnego odżywiania roślin.

Kolejne odkrycia potwierdzające istotną rolę mineralnych składników w odżywianiu roślin wnieśli niemieccy badacze Hermann Hellriegel (1831–1895) oraz Hermann Wilfarth (1853–1904). Zajmowali się zagadnieniami korzystania przez rośliny bezpośrednio z azotu pierwiastkowego. W 1886 r. wykazali, że rośliny bobowate (dawniej motylkowe) zdolne są korzystać z niego przy pomocy brodawek korzeniowych i udziału bytujących w nich mikroorganizmów [Hellriegel i Wilfarth 1891, Burris 1998].

Zarówno zwolennicy, jak i przeciwnicy nowej teorii odżywiania roślin starali się zdobyć jak najwięcej dowodów rzeczowych na poparcie swoich stanowisk. Rozwinęła się wtedy specjalna metodyka prowadzenia eksperymentów vegetacyjnych w kulturach piaskowych, a następnie wprowadzona przez Wilhelma Knopa (1817–1891) i Juliusa Sachsa (1832–1897) w kulturach wodnych. Umożliwiała ona wyłączenie ze sztucznej pożywki kolejnych składników mineralnych i określanie, czy włączony składnik jest konieczny, czy też zbyteczny dla wzrostu i rozwoju rośliny [Hoagland i Arnon 1950, Gorlach i Mazur 2001, Fageria 2009]. Ponadto Sachs udowodnił, że tylko na świetle w chloroplastach powstaje skrobia. Zdaniem Sachsa jest to pierwszy dostrzegalny produkt fotosyntezy [Starck 2014].

Opublikowana przez Justusa von Liebiga teoria mineralnego odżywiania roślin, jedno z najważniejszych odkryć naukowych w rolnictwie, stanowi modelowy przykład wdrażania innowacji w systemie technology demand, który polega na podejmowaniu działań innowacyjnych w wyniku odkryć naukowych w innej branży [Górecki i in. 2012]. W tym przypadku sformułowanie teorii mineralnego odżywiania roślin oraz prawa minimum nie tylko dało początek nawożeniu mineralnemu roślin, ale również przyczyniło się

do powstania i dynamicznego rozwoju przemysłu nawozowego. Tak jak odkrycia Liebiga były podstawą nowoczesnej chemii rolnej, tak przyznany w 1842 r. patent Johna Lawesa, chroniący sposób otrzymywania superfosfatu pojedynczego i uruchomienie pierwszej fabryki tego nawozu w 1848 r. w Liverpoolu uznać należy za początek technologii wytwarzania nawozów mineralnych [Górecki i in. 2012].

Justus von Liebig, twórca teorii mineralnego odżywiania roślin, w pierwszym wydaniu swojej książki całkowicie odrzucił teorię próchnicowego odżywiania roślin sformułowaną przez Thaera. Natomiast w późniejszym okresie, po kolejnych doniesieniach naukowych zaczął doceniać znaczenie próchnicy dla żyzności gleby, uważając, że nawozy mineralne są tylko wtedy efektywne, gdy gleba jest w dobrym stanie, do czego przyczyniają się związki humusowe. Obecnie powszechnie przyjmuje się, że oprócz stosowania nawozów mineralnych w celu utrzymania i zwiększenia żyzności gleby konieczne są także nawozy naturalne i organiczne, spełniające rolę substratu do wytworzenia próchnicy [Gorlach i Mazur 2001, Fageria 2009, Gonddek 2012].

Liebig razem z Boussingaultem zaliczani są do ojców współczesnej chemii rolnej. Globalne znaczenie dla rolnictwa sformułowanych przez nich podstaw nawożenia mineralnego dobrze oddaje zdanie z wykładu Liebiga wygłoszonego na jednym z uniwersytetów: „Rzym wrzucił do swych rynsztoków całą urodzajność Sycylii”. Chciał w ten obrazowy sposób powiedzieć, że każdy statek przywożący do Rzymu sycylijskie zboże przywoził również składniki mineralne, które zamiast powracać do gleby z odchodami, ginęły w ściekach miejskich. Wskutek tego urodzajne ziemie Sycylii, niegdyś spichlerz Rzymu, uległy wyjałowieniu i stały się jednymi z najuboższych na świecie [Voisin 1967]. Upowszechnienie przemysłowej produkcji nawozów mineralnych, stanowiącej praktyczne zastosowanie teorii naukowej, stało się w dłuższej perspektywie podstawą nowoczesnego rolnictwa i umożliwiło koncentrację skupisk ludzkich w formie wielkich, kilkudziesięciomilionowych aglomeracji miejskich. Dotychczas żadna z minionych cywilizacji nie potrafiła przywrócić glebie pobranych składników mineralnych. W tym kontekście widać, jak wielką barierą rozwoju dla dawnych cywilizacji był brak wiedzy rolniczej w zakresie żywienia roślin i nawożenia.

Współczesność (XX w.)

Odkrycia naukowe dotyczące mineralnego odżywiania roślin, import drogich nawozów guano z Ameryki Południowej i saletry sodowej z Chile, a także wizja głodu w wyniku wyczerpywania się złóż saletry chilijskiej były motorem innowacji chemicznych, w tym dynamicznego rozwoju przemysłu nawozowego w XX w.

Jednym z największych dokonań w tym zakresie było wdrożenie na skalę przemysłową katalitycznego procesu wytwarzania amoniaku z azotu atmosferycznego. Otrzymany tą drogą amoniak stał się podstawowym półproduktem w rozwijającym się przemyśle nawozowym. Ów sukces technologiczny Fritza Habera (1868–1934) miał miejsce w Oppau w Niemczech w 1911 r. i był możliwy dzięki współpracy z chemikiem i technologiem Carlem Boschem (1874–1940). Większość nowoczesnych technologii nawozowych została wdrożona w pierwszych trzech dekadach XX w. (amoniak, kwas azotowy, superfosfat potrójny). Dokonania obu wybitnych uczonych, Habera i Boscha, zostały uhonorowane dwoma nagrodami Nobla: Fritz Haber w 1918 r. i Carl Bosch z Fridrichem Bergiusem w 1931 r. [Lindström i Pettersson 2003]. Ponadto w tym okresie zaczęto

wykorzystywać herbicydowe właściwości kilku nawozów, takich jak azotniak, kainit, saletra sodowa, siarczan amonu, a także innych związków nieorganicznych, takich jak siarczan żelazowy, arsenin sodowy, związki arsenu i boru [Górecki i in. 2012].

Dzięki niezwyklej efektywności chemizacji produkcji rolniczej i wykorzystaniu osiągnięć zielonej rewolucji w latach osiemdziesiątych XX w. uzyskano technologiczną zdolność wyżywienia globu ziemskiego [Rutkowski 1989]. Twórcą zielonej rewolucji był Norman Ernst Borlaug (1914–2009), który otrzymał za swoją działalność Pokojową Nagrodę Nobla w 1970 r. Dynamiczny rozwój przemysłu nawozowego oraz hodowla bardzo plennych odmian pszenicy i kukurydzy o wysokiej zawartości białka przyczyniły się do wzrostu produkcji żywności, aż do pokrycia zapotrzebowania światowego, co jednak nie rozwiązało problemu wyżywienia ludności [Ortiz i in. 2007].

W połowie XX w., gdy wydawało się, że nawozy mineralne stanowią panaceum na problemy z wyżywieniem ludzkości, uzmysłowiono sobie negatywne skutki wzrastającej chemizacji rolnictwa. Jest rzeczą niezaprzeczalną, że zastosowanie nawozów mineralnych jest jednym z największych odkryć naszych czasów, bowiem wpływając na równowagę chemiczną środowiska glebowego, oddziałuje pośrednio na zdrowie ludzi. Używanie nawozów pozwala zapobiec wyjałowieniu gleby, co tak znacząco odczuły minione cywilizacje. Nawożenie doprowadziło do ogromnego zwiększenia plonów z jednostki powierzchni i tym samym do obniżki cen żywności. Przyczyniło się więc w znaczący sposób do wzrostu stopy życiowej współczesnych społeczeństw. To odkrycie, tak ważne dla współczesności, ma także swe ciemne strony [Voisin 1967]. Uzmysłowiono sobie, że wraz ze wzrostem wprowadzanych do gleby dawek nawozów jednostkowy przyrost plonów jest nie tylko coraz mniejszy, ale po przekroczeniu górnej granicy produktywności następuje zmniejszenie plonów, tym większe, im większa jest dawka nawozów. Dalsze badania wykazały, że nadmierne lub niezrównoważone nawożenie pogarsza wartość biologiczną i jakość plonów. Rozpoczęto na szeroką skalę badania nad wpływem nawożenia na zawartość składników mineralnych oraz głównych substancji organicznych (białka, aminokwasy, witaminy, hormony, enzymy itp.). Te badania doprowadziły do sformułowania przez francuskiego badacza André Voisina (1903–1964) w latach 60-tych ubiegłego wieku dwóch nowych praw nawozowych znanych jako prawo maksimum i prawo pierwszeństwa wartości biologicznej.

Pierwsze z nich mówi, że „nadmiar substancji przyswajalnej w glebie ogranicza skuteczność działania innych substancji i w następstwie powoduje obniżkę plonów”. Drugie prawo odnoszące się do związku między nawożeniem a jakością plonu stwierdza, że „stosowanie nawozów musi mieć na celu przede wszystkim poprawę wartości biologicznej¹, która ma większe znaczenie aniżeli wysokość plonów” [Voisin 1967]. Prawa te, obok teorii mineralnego odżywiania roślin i prawa minimum Liebiga, stanowią podstawę współczesnych systemów diagnostyki nawozowej w rolnictwie.

W połowie XX w., oprócz dynamicznego rozwoju przemysłu nawozowego, zaczęły się rozwijać techniki izotopowe, które służyły do badań nad mineralnym odżywianiem roślin. Powszechnie wykorzystywano też szereg radioaktywnych makro- i mikroelemen-

¹ Wartość biologiczna rozumiana jako suma poszczególnych składników rośliny decydujących o utrzymaniu prawidłowej przemiany w organizmie żywym – zwierzęcym czy człowieka, któremu roślina ta służy za pokarm [Voisin 1967].

tów do badania procesów pobierania i kumulacji składników w roślinie. Techniki te pomimo swojej inwazyjności potwierdzały istotę pobierania i niezbędności składników pokarmowych w roślinach [Kozhakhhanow i in. 2014].

Czasy najnowsze (XXI w.)

W czasach najnowszych rolnictwo jest przykładem współdziałania w zakresie praktycznego wykorzystania badań naukowych z obszaru chemii, technologii chemicznej, chemii rolnej, biologii, fizjologii mineralnego odżywiania i innych pokrewnych nauk. Współcześnie w rolnictwie, obejmującym m.in. gospodarkę roślinną, nawozy mineralne i agrochemikalia, badania naukowe pełnią nadal bardzo istotną rolę, jednak zmianie uległa hierarchia czynników postępu. W XX w. siłą napędową w rolnictwie był szeroko rozumiany postęp chemiczny, którego dominującym elementem były nawozy mineralne, to XXI w. jest erą biologii. Beneficjentami olbrzymiego postępu biologicznego są przede wszystkim medycyna i rolnictwo. W odniesieniu do rolnictwa postęp ten wyraża się przede wszystkim wytworzeniem nowych odmian roślin uprawnych, dostosowanych coraz bardziej precyzyjnie do wymogów przemysłu rolno-spożywczego i konsumenta. Rola nawożenia mineralnego nadal pozostaje bardzo istotna, ale ukierunkowana na technologie nawozowe dostosowane do sposobu użytkowania roślin i ich wymagań odmianowych. Postęp biologiczny, w wyniku którego powstają nowe genotypy roślin, wyznacza ramy nawożenia, które muszą być precyzyjnie dostosowane do nowych, zmiennych uwarunkowań.

Efektem tych zmian jest zasadnicze zwiększenie asortymentu nawozów, które rozpoczęło się już w końcu XX w. Pojawiły się nowe nawozy wieloskładnikowe i nawozy mikroelementowe, pozwalające precyzyjnie dostosować nawożenie do warunków glebowych (odczyn gleby i jej zasobność w składniki pokarmowe), wymogów odmian roślin uprawnych i agrotechniki. Obecnie szacuje się, że rynek nawozowy obejmuje blisko tysiąc różnego rodzaju nawozów [Clarkson i Hanson 1980, Czuba 1996, Filipek-Mazur i in. 2011].

Konkretne zapotrzebowania na produkty chemiczne potrzebne gospodarce rolnej inicjują rozwój wielu branż, w tym technologii chemicznej. Rozwój nauk rolniczych, a także nowe osiągnięcia technologii chemicznych uzasadniają wprowadzanie innowacji chemicznych w odżywianiu roślin i zwiększaniu plonów. Innowacje chemiczne dotyczące odżywiania roślin obejmują różne strategie, stosowane oddzielnie lub łącznie. Wykorzystuje się np. inżynierię genetyczną do większego pobierania przez rośliny makro- i mikroskładników. Jeden z większych sukcesów w tym zakresie osiągnięto poprzez ekspresję ferrytyny – białka magazynującego żelazo, które wiąże je w formie biodostępnej. Rekombinowaną ferrytynę sojową wprowadzono do wielu ziaren, a ferrytynę grochu ekspresjonowano w ryżu. Obecnie przy opracowywaniu nowych technologii w zakresie mineralnego odżywiania roślin wykorzystuje się także procesy biosorpcji (w odniesieniu do nieżywej biomasy) i bioakumulacji (wiązanie składników mineralnych przez organizmy żywe) w wytwarzaniu komponentów nawozowych z mikroelementami [Górecki i in. 2012, Ditta i in. 2015].

Prowadzone są badania nad pogłębianiem poznania procesów fizjologicznych roślin, przemian biochemicznych i nad metodami projektowania nowych związków służących do dokarmiania i ochrony roślin. Kolejne badania dotyczą zwiększenia efektywności pobierania składników odżywczych z gleby i wykorzystania bionawozów do biologicznego wiązania azotu.

Według opinii International Fertilizer Association (IFA): „Without fertilizers, human life is unsustainable” („Bez nawozów życie ludzkie jest niezrównoważone”), dlatego uzasadnione jest wprowadzenie różnych innowacji w produktach chemicznych, w tym w nawozach do dokarmiania roślin konsumpcyjnych [IFA, Annual Report 2009]. Badania obejmują modernizację produkcji nawozów i agrochemikaliów mimo spełniania przez nie wymogów dyrektywy IPPC (Integrated Pollution Prevention Control) i standardów BAT (Best Available Technique). Współcześnie wytwarzane nawozy dostosowuje się do potrzeb określonych gatunków roślin oraz warunków lokalnego rolnictwa. Opracowuje się i wdraża na dużą skalę produkcję mieszanek nawozowych w systemie bulk blending – kompozycje nawozów na zamówienie. Uzasadniona jest konieczność wdrażania i upowszechniania nowych nawozów zawieszinowych (suspension fertilizers), nawozów mikroelementowych chelatowanych polifosforanami, nawozów mikroelementowych na bazie aminokwasów, nawozów ciekłych ze stymulatorami wzrostu (hormony roślinne), a także substancjami wywołującymi określone efekty w trakcie wegetacji, takie jak sterowanie pączkowaniem, kwitnieniem, skracaniem łodygi. Nowym kierunkiem są innowacyjne produkty chemiczne powstałe w wyniku multidyscyplinarnych badań technologicznych, obejmujących nawozy otoczkowane różnymi polimerami w celu powolnego i kontrolowanego uwalniania składników pokarmowych w trakcie wegetacji roślin. Wiele możliwości, dotychczas niewykorzystanych, znajduje zastosowanie w technologiach nawozowych jako nośniki adsorpcyjne składników pokarmowych krajowych minerałów ilastych z grupy bentonitów. Preparaty te mogą być wykorzystane do poprawy struktury gleby, zwiększenia jej pojemności wodnej, a także jako nośniki mikroelementowe. Kolejną innowacją chemiczną stosowaną w rolnictwie jest system fertygacji (nawadnianie połączone z nawożeniem). W sadownictwie i warzywnictwie z pewnością będzie się rozwijał system nawożenia kropelkowego (drip fertigation), polegający na dostarczaniu korzeniom roślin składników odżywczych poprzez układ rurek polietylenowych. System ten wymaga produktów nawozowych o założonych właściwościach, bez tendencji wysalania na powierzchniach rurek, a więc powinien być dostosowany do jakości wody. Tego typu systemy nawożenia, coraz częściej sterowane są precyzyjnie z wykorzystaniem technik komputerowych. Wielkie nadzieje wiąże się również z rozwojem upraw roślinnych w systemach hydroponicznych, wodnych, aeroponicznych bez udziału gleby lub z zastosowaniem sztucznej gleby, podłoża z wełny mineralnej i innych materiałów [Hershey 1994, Komosa 2004, Ghaly i in. 2005, Baran i in. 2011, Górecki i in. 2012, Baran i in. 2015, Antonkiewicz i in. 2016a]. W systemach tych również niezbędne jest odżywanie roślin nawozami o składzie projektowanym pod konkretne wymagania gatunków, a nawet odmian roślin. W rolnictwie wielkoobszarowym rozwijają się techniki głębokiej aplikacji nawozów z zastosowaniem specjalistycznych agregatów uprawowo-nawozowych pozwalających na lepsze wykorzystanie składników nawozowych przez rośliny i tym samym ograniczenie ich strat do środowiska. Twórcą koncepcji głębokiej aplikacji nawozów jest Carl Zommer, profesor uniwersytetu w Bonn, który w drugiej połowie XX w. wykazał, że granulowane nawozy umieszczone na pewnej głębokości (10–30 cm) sprzyjają głębszemu ukorzenieniu roślin, wykazując swoisty chemotropizm, co zwiększa odporność roślin na stres wodny i w efekcie zwiększa wykorzystanie nawozów.

Kolejnym wyzwaniem współczesności jest problem odpadów i możliwości odzysku zawartych w nich składników poprzez wykorzystanie nawozowe. Składniki mineralne i substancje organiczne zawarte w odpadach bytowych po produktach żywnościowych

wykorzystanych w aglomeracjach miejskich trafiają w formie ścieków do oczyszczalni, a następnie, po oczyszczeniu, w postaci osadu ściekowego na składowiska, co jest wielkim problemem środowiskowym i wymaga ponoszenia wysokich kosztów ich utylizacji [Antonkiewicz i in. 2016b]. Współcześnie opracowano nowe, innowacyjne metody przetwarzania tych odpadów na nawozy organiczne i organiczno-mineralne. Dotyczy to także odpadów rolniczych, jakie powstają we współczesnych specjalistycznych fermach o dużej koncentracji zwierząt (głównie trzody chlewnej i drobiu), a także w pieczarkarniach czy biogazowniach rolniczych [Baran i in. 2011, Gondek i Mierzwa-Hersztek 2016].

Wyzwaniem dla nauki jest detoksykacja tych produktów, a także poprzez odpowiednie formułacje nadanie im składu optymalnego dla potrzeb pokarmowych uprawianych roślin. Prowadzone są także badania nad przetwarzaniem odpadów poubojowych na bezpieczne pod względem sanitarnym nawozy mineralno-organiczne [Kopeć i in. 2016]. Innym przykładem innowacji chemicznych jest nowa generacja nawozów wytworzonych na bazie odpadów przemysłu rybnego, a także wodorostów morskich, szkieletów skorupiaków i muszli małż. Nawozy te zawierają prawie wszystkie mikroelementy, a także dużo fosforu, magnezu, wapnia i potasu oraz związki z grupy auksyn – hormony wzrostu [Górecki i in. 2012].

Kolejną innowacją chemiczną jest biofortyfikacja (wzbogacanie) roślin. Pod tym pojęciem rozumiemy procesy lub zabiegi mające na celu zwiększenie zawartości niektórych pierwiastków, związków odżywczych i witamin w plonie roślin w celu poprawy jego jakości biologicznej, a w konsekwencji stanu zdrowotnego konsumentów żywności. Jak wiadomo nowe odmiany roślin z jednej strony dają możliwość wysokich plonów, ale z drugiej zawierają mniej niektórych pierwiastków, ponadto na wielu obszarach rolniczych obserwuje się długofalowy trend zmniejszania zawartości pewnych składników w glebach. Badania prowadzone w tym kierunku uzasadniają celowość tworzenia nowych, specjalistycznych nawozów mikroelementowych umożliwiających bezpieczne wzbogacanie roślin w substancje niedoborowe. Dotyczy to m.in. jodu, cynku, molibdenu i selenu [Smoleń i in. 2011, Zeigler 2014].

Osiągnięcie celów innowacyjnych w odżywianiu roślin wymaga kompleksowych, interdyscyplinarnych badań nie tylko nad produktami chemicznymi i procesami ich wytwarzania, ale również nad użytkowymi właściwościami tych produktów.

Obecnie najbardziej aktualną innowacją chemiczną w odżywianiu roślin jest rolnictwo precyzyjne – precision farming lub precision agriculture [Robert i in. 1995, Heermann i in. 2002]. Jest to zespół technologii tworzący system rolniczy, obejmujący także nawożenie, który dostosowuje wszystkie elementy agrotechniki do zmiennych warunków na poszczególnych polach uprawnych [Auernhammer 2001]. Można go również określić jako gospodarowanie z zastosowaniem technologii informatycznych w celu uzyskania większych plonów o lepszej jakości przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji i ograniczeniu zanieczyszczenia środowiska [Gozdowski i in. 2007, Dominik 2010, Thorp i in. 2015, Ribeiro i in. 2016].

MIŁOWE KROKI W ROZWOJU NAUK POŚWIĘCONYCH ODŻYWIANIU ROŚLIN

Wielu naukowców podkreśla, że nie można zrozumieć obecnego stanu wiedzy bez znajomości historii jej rozwoju. Uzasadnione wydaje się przedstawienie niektórych faktów z historii odżywiania roślin (tab. 1). Różne opracowania, traktaty, podręczniki

i publikacje naukowe są skarbnicą twórczych myśli i hipotez naukowców, którzy mimo niesłychanie prymitywnych warunków i narzędzi wykonywali głęboko przemyślane eksperymenty. Niektóre wnioski świadczą o geniuszu ludzkiego umysłu. W innych przypadkach wnioski nie są prawdziwe, ale często wynika to z braku wiedzy z innych działów nauki, np. chemii, fizyki, biologii, fizjologii.

Tabela 1. Najważniejsze osiągnięcia w rozwoju odżywiania roślin
Table 1. The most important achievements in the development of plant nutrition

Rok Year	Autor Author	Problematyka Issues
1600	Jean Baptiste van Helmont	Co jest pokarmem dla roślin
1772	Joseph Priestley	Rośliny wydzielają z liści tlen do atmosfery
1804	Nicolas-Théodore de Saussure	Udział wody (oprócz CO ₂) w procesie fotosyntezy
1806	Albrecht Daniel von Thaer	Pierwsza wyższa szkoła rolnicza w Möglin w Niemczech
1752–1828	Albrecht Daniel von Thaer	Próchnicowa teoria odżywiania roślin
1834	Jean Baptiste Boussingault	Rola azotu w żywieniu roślin
1841	Justus von Liebig	Teoria mineralnego odżywiania roślin
1842	Carl Sprengel, Justus von Liebig	Teoria minimum chemii agrarnej. Prawo minimum Liebiga
1842	John Bennet Lawes	Patent na sposób otrzymywania superfosfatu pojedynczego
1848	John Bennet Lawes	Pierwsza fabryka superfosfatu w Liverpoolu
1886	Hermann Hellriegel i Hermann Wilfarth	Odkrycie zjawiska przyswajania azotu przez bakterie brodawkowe
1911	Fritz Haber i Carl Bosch	Synteza amoniaku
1970	Norman Ernst Borlaug	Zielona rewolucja – technologiczna zdolność wyżywienia globu
1994	P.C. Robert	Rolnictwo precyzyjne
Po 2000 r.	naukowcy	Innowacyjne nawozy

Jak wynika z tego krótkiego przeglądu, najważniejsze innowacje chemiczne w odżywianiu roślin przypadają na przełom XIX i XX w.

ROLNICZE STACJE DOŚWIADCZALNE

Zasługi Liebiga, jako twórcy teorii mineralnego odżywiania roślin zainspirowały wielu naukowców do założenia doświadczeń nawozowych, niekiedy prowadzonych do dzisiaj. W tabeli 2 przedstawiono chronologicznie najstarsze i najsłynniejsze rolnicze stacje doświadczalne. Stacje te zostały założone w Europie, włączając europejską część Rosji oraz w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Odegrały one olbrzymią rolę w ocenie nowych nawozów i technologii rolniczych, a także pozwoliły ocenić ich skutki środowiskowe, co współcześnie jest szczególnie istotne [Mazur i Mazur 1972,

Tabela 2. Najstarsze i najslawniejsze rolnicze stacje doświadczalne
Table 2. The oldest and the most famous agricultural experimental stations

Rok założenia Established in	Założyciel Founder	Nazwa, miejsce powołania Name, place of creation
1834	Jean Baptiste Boussingault	Pechelbronn, Alzacja, Francja
1843	John Bennet Lawes	Rothamsted w Harpenden, Anglia
1972	rząd Walonii	Gembloux, Belgia
1875	rząd Francji	Grignon, Francja
1876	George Espy Morrow	Morrow Plots, Illinois, USA
1878	Julius Kühn	Halle, Niemcy
1888	J.W. Sanborn	Sanborn Field, Missouri, USA
1894	rząd Danii	Ascov, Dania
1902	Wilhelm Schneidewind, Willi Gröbler	Bad Lauchstädt, Niemcy
1912	Dmitrij Nikolaewich Prianisznikow	Moskwa, Rosja
1923	Józef Mikułowski-Pomorski, Marian Górski	Skierniewice, Polska
1968	Kazimierz Mazur	Czarny Potok, Polska

Mądry i in. 2005, Kopec 2005, Łabętowicz i in. 2008, Fotyma 2010, Mądry i in. 2015]. Poznanie działania nawozów mineralnych na roślinę i glebę wymaga monitorowania zmian zachodzących na różnych poziomach organizacji systemów rolniczych i ekologicznych w czasie i przestrzeni. Ze względu na zachodzące na przestrzeni lat zmiany żyzności gleby oraz pozostające w ścisłej z nią zależności zmiany plonowania i składu jakościowego roślin, wieloletnie statyczne doświadczenia polowe okazały się bardzo przydatnym narzędziem badawczym [Kopec 2000, Kopec 2005, Kopec i in. 2015].

PODSUMOWANIE

Innowacje chemiczne w odżywianiu roślin przedstawiono w ujęciu historycznym, prezentując najważniejsze, ale subiektywnie wybrane osiągnięcia. Ogromny postęp w zakresie odżywiania roślin obserwowany w ostatnich latach jest wynikiem osiągnięć m.in. w naukach, takich jak: chemia, technologia chemiczna, chemia rolna, fizyka, biologia, fizjologia mineralnego odżywiania roślin oraz odżywiania z wykorzystaniem nowoczesnych technik analitycznych i przy zastosowaniu precyzyjnej aparatury badawczej. Nowe, innowacyjne metody badawcze zrewolucjonizowały sposoby pomiarów procesów odżywiania roślin, z których można wyciągnąć poprawne wnioski, eliminując błędy. Rozwój badań z zakresu mineralnego odżywiania roślin wynika m.in. z konieczności zwiększenia produkcji żywności w celu wyżywienia w połowie bieżącego wieku ok. 9 mld ludności. Jest to zobowiązanie wobec społeczeństwa, spoczywające m.in. na rolnikach, biologach i chemikach.

Należy się zgodzić z opinią wybitnego niemieckiego chemika rolnego Arnolda Fincka, że „Naukowe teorie i hipotezy są rolniczo przydatne na tyle, na ile znajdują potwierdzenie w konfrontacji z naturą.”.

PIŚMIENNICTWO

- Auernhammer H., 2001. Precision farming – the environmental challenge. *Comput. Electron. Agric.* 30 (1–3), 31–43. DOI: 10.1016/S0168-1699(00)00153-8.
- Antonkiewicz J., Jasiewicz C., Koncewicz-Baran M., Sendor R., 2016a. Nickel bioaccumulation by the chosen plant species. *Acta Physiol. Plant.* 38(40). DOI: 10.1007/s11738-016-2062-5.
- Antonkiewicz J., Kołodziej B., Bielińska E., 2016b. The use of reed canary grass and giant miscanthus in the phytoremediation of municipal sewage sludge. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23(10), 9505–9517. DOI: 10.1007/s11356-016-6175-6.
- Baran S., Łabętowicz J., Krzywy E. (red.), 2011. *Przyrodnicze wykorzystanie odpadów. Podstawy teoretyczne i praktyczne.* Powszechny Wyd. Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Baran S., Wójcikowska-Kapusta A., Żukowska G., Bik-Małodzińska M., Wesołowska-Dobruk S., 2015. Influence of sludge-ash composts on some properties of reclaimed land. *Arch. Environ. Prot.* 41 (2), 82–88. DOI: 10.1515/aep-2015-0022.
- Burris R.H., 1998. Biological nitrogen fixation: A scientific perspective. *Plant and Soil* 108, 1, 7–14. DOI: 10.1007/BF02370094.
- Clarkson D.T., Hanson J.B. 1980. The mineral nutrition of higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31, 239–298. DOI: 10.1146/annurev.pp.31.060180.001323.
- Czuba R. (red.), 1996. *Nawożenie mineralne roślin uprawnych.* ZCH Police.
- Davy H., 1813. *Elements of Agricultural Chemistry. In a Course of Lectures for The Board Agriculture.* Longman, London.
- Dominik A., 2010. *System rolnictwa precyzyjnego.* Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, Oddział w Radomiu.
- Ditta A., Arshad M., Ibrahim M., 2015. Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: applications and perspectives. In: M.H. Siddiqui, M.H. Al-Whaibi, F. Mohammad (eds), *Nanotechnology and plant sciences*, 55–75. DOI: 10.1007/978-3-319-14502-0_4.
- Fageria N.K., 2009. *The use of nutrients in crop plants.* Taylor & Francis Group. Boca Raton–London–New York. <https://www.crcpress.com>.
- Filipek-Mazur B. (red.), 2011. *Środowiskowe aspekty stosowania nawozów i środków ochrony roślin w rolnictwie.* Wyd. UR W Krakowie, Kraków.
- Finck A., 1982. *Fertilizers and Fertilization: introduction and practical guide to crop fertilization.* Verlag Chemie, Weinheim–Deerfield Beach (Fla)–Basel.
- Fotyma M., 2010. Chemia zażegnała widmo głodu na świecie. *Żywność – Nawozy. Chemik* 64 (7–8), 499–510.
- Ghaly A.E., Kamal M., Mahmoud N.S., 2005. Phytoremediation of aquaculture wastewater for water recycling and production of fish feed. *Environ. Int.* 31, 1–13. DOI: 10.1016/j.envint.2004.05.011.
- Gondek K., 2012. Effect of fertilization with farmyard manure, municipal sewage sludge and compost from biodegradable waste on yield and mineral composition of spring wheat grain. *J. Elementol.* 2, 231–245. DOI: 10.5601/jelem.2012.17.2.06.
- Gondek K., Mierzwa-Hersztek M., 2016. Effect of low-temperature biochar derived from pig manure and poultry litter on mobile and organic matter-bound forms of Cu, Cd, Pb and Zn in sandy soil. *Soil Use Manage.* 32, 357–367. DOI: 10.1111/sum.12285.
- Gorlach E., Mazur T., 2001. *Chemia rolna. Podstawy żywienia i zasady nawożenia roślin.* Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Gozdowski D., Samborski S., Sioma S., 2007. *Rolnictwo precyzyjne.* Wyd. SGGW, Warszawa.

- Górecki H., Chojnacka K., Dobrzański K., 2012. Innowacje chemiczne w rozwoju zrównoważonego rolnictwa. W: B. Marciniak (red.), *Misja nauk chemicznych*. Wyd. Nauka i Innowacje, Poznań, 169–192.
- Guerlac H., 1976. Chemistry as a Branch of Physics: Laplace's Collaboration with Lavoisier. *His. Stud. Phys. Sci.* 7, 193–276. DOI: 10.2307/27757357.
- Hellriegel H., Wilfarth H., 1891. *Recherches sur l'alimentation azotée des graminées et des légumineuses*. Nancy, Berger-Levrault.
- Heermann D.F., Hoesting J., Thompson S.E., Duke H.R., Westfall D.G., Buchleiter G.W., Westra P., Peairs F.B., Fleming K., 2002. Interdisciplinary irrigated precision farming research. *Precision Agric.* 3, 47–61. DOI: 10.1023/A:1013374120356.
- Hershey D.R., 1994. Solution culture hydroponics: History & Inexpensive Equipment. *Am. Biol. Teach.* 56 (2), 111–118. DOI: 10.2307/4449764.
- Hoagland D.R., Arnon D.I., 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *California Agriculture Experiment Station 347*, 1–32. <https://archive.org/details/watercultureme3450hoag>
- IFA, Annual Report, 2009. Feeding the world on combating climate change, www.fertilizerseurope.com.
- Katon Marek Porcujusz, 2009. *O gospodarstwie rolnym*. Tłum. I. Mikołajczyk. Wyd. Nauk. UMK w Toruniu.
- Komosa A., 2004. Aeroponiczna uprawa roślin rolniczych. X Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe pt. „Efektywność Stosowania Nawozów w Uprawach Ogrodniczych”. Kraków, 17–18 czerwca 2004, Wyd. AR w Poznaniu, 249–254.
- Kopeć M., 2000. Dynamika plonowania i jakości runi łąkowej w okresie trzydziestu lat trwania doświadczenia nawozowego. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie*, ser. Rozprawy 267.
- Kopeć M., 2005. Changes in the zinc content in the meadow sward under conditions of a long-term static fertilizer experiment (Czarny Potok). *Plant Soil Environ.* 51(9), 410–415, <http://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/50988.pdf>.
- Kopeć M., Mierzwa-Hersztek M., Gondek K., 2015. Ways of increasing the magnesium content in sward from a long-term fertilizer experiment. *J. Elementol.* 20(4), 911–920. DOI: 10.5601/jelem.2015.20.1.791.
- Kopeć M., Gondek K., Mierzwa-Hersztek M., Antonkiewicz J., 2016. Factors influencing chemical quality of composted poultry. *Saudi J. Biol. Sci.* DOI: 10.1016/j.sjbs.2016.09.012.
- Kozhakanov T.E., Lukashenko S.N., Larionova N.V., 2014. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests. *J. Environ. Radioac.* 137, 217–226. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.06.026.
- Lavoisier A., 2001. *Traktat podstawowy chemii*. Tłum. R. Mierzecki. *Analecta. Studia i Materiały z Dziejów Nauki* 10, 1(19), 7–122.
- Liebig J., 1841. *Die Organische in ihrer Anwendung auf Agricultur und Physiologie*. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- Lindström B., Pettersson L.J., 2003. A Brief history of catalysis. *Cattech* 7(4), 130–138. DOI: 10.1023/A:1025001809516.
- Łabętowicz J., Mercik S., Barszczak T., Moskal S., Stepień W., 2008. *Historia Chemii Rolnej w SGGW* połączona z monografią prac naukowych. Wyd. SGGW, Warszawa, <http://agrobiol.sggw.pl/srodowisko/pages/strona-glowna/publikacje/2008.php>.
- Malicki L., 1989. Michał Oczapowski – prekursor nauk agrotechnicznych w Polsce. *Post. Nauk Rol.* 36 (41), 13–25.
- Mazur K., Mazur T., 1972. Wpływ nawożenia na plon, skład botaniczny i chemiczny masy roślinnej z łąki górskiej. *Acta Agr. Silv.*, ser. Agraria 12 (1), 85–112.
- Mądry W., Łabętowicz J., Gozdowski D., 2005. Naukowa i aplikacyjna rola długotrwałych doświadczeń polowych. *Fragm. Agron.* 22, 1(85), 171–188.

- Mądry W., Studnicki M., Rozbicki J., Golba J., Gozdowski D., Pecio A., Oleksy A., 2015. Ontogenetic-based sequential path analysis of grain yield and its related traits in several winter wheat cultivars. *Acta Agric. Scand., sec. B, Soil & Plant Sci.* 65, 605–618. DOI 10.1080/09064710.2015.1039053.
- Ortiz R., Trethowan R., Ferrara G.O., Iwanaga M., Dodds J.H., Crouch J.H., Crossa J., Braun H.J., 2007. High yield potential, shuttle breeding, genetic diversity, and a new international wheat improvement strategy. *Euphytica* 157(3), 365–384. DOI 10.1007/s10681-007-9375-9.
- Ploeg R.R., Bo W., Kirkham M.B., 1999. On the origin of the Theory of Mineral Nutrition of plants and the Law of the Minimum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(5), 1055–1062. DOI 10.2136/sssaj1999.6351055x.
- Ribeiro P.F., Santos J.S., Santana J., Reino L., Beja P., Moreira F., 2016. An applied farming systems approach to infer conservation-relevant agricultural practices for agri-environment policy design. *Land Use Policy* 58, 165–172. DOI 10.1016/j.landusepol.2016.07.018.
- Robert P.C., Rust R.H., Larson W.E., 1995. Proceedings of the Second International Conference: Site-specific management for agricultural systems. March 27–30, 1994. American Society of Agronomy Inc., Crop Science Society of America Inc., Soil Science Society of America Inc., ASA, Madison, WI, USA.
- Rutkowski A., 1989. Norman Ernst Borlaug. Laureat Nagrody Nobla. *Post. Nauk Rol.* 36 (41), 87–88.
- Saussure N.T., 1804. *Recherches chimiques sur la végétation*. Chez la Ve. Nyon, Paris.
- Smoleń S., Sady W., Rożek S., Ledwozyw-Smoleń I., Strzetelski P., 2011. Preliminary evaluation of the influence of iodine, and nitrogen fertilization on the effectiveness of iodine biofortification and mineral composition of carrot storage roots. *J. Elementol.* 16 (2), 275–285. DOI 10.5601/jelem.2011.16.2.11.
- Starck Z., 2014. Fizjologia roślin: jak było wczoraj, jak jest dziś, a co przyniesie jutro? *Kosmos. Prob. Nauk Biol.* 63, 4(305), 569–589. <http://kosmos.icm.edu.pl/PDF/2014/569.pdf>.
- Starck Z., Niemyska B., 1998. Fizjologia roślin: wczoraj, dziś i jutro. *Wiad. Bot.* 42(2), 27–36. http://bomax.botany.pl/pubs/data/article_pdf?id=2358.
- Starck Z., Pietkiewicz S., 2016. Rozwój fizjologii roślin na tle 200 lat kształcenia rolniczego na ziemiach polskich. Od Instytutu Agronomicznego na Marymoncie do SGGW na Ursynowie. Materiały SGGW, Warszawa, <http://agrobiol.sggw.pl/fizjologia>.
- Strebejko P., 1974. *Czym żywi się roślina*. PWN, Warszawa.
- Thorp K.R., Hunsaker D.J., French A.N., Bautista E., Bronson K.F., 2015. Integrating geospatial data and cropping system simulation within a geographic information system to analyze spatial seed cotton yield, water use, and irrigation requirements. *Precision Agric.* 16(5), 532–557. DOI 10.1007/s11119-015-9393-x.
- Voisin A., 1967. *Nawożenie a nowe prawa naukowe*. PWRiL, Warszawa.
- Zeigler R.S., 2014. Biofortification: Vitamin A deficiency and the case for golden rice. In: A. Ricroch, S. Chopra, S. Fleischer (eds.), *Plant Biotechnology: Experience and future prospects*, Springer, 245–262. DOI 10.1007/978-3-319-06892-3_19.
- Zemanek A., Zemanek B., 2005. Roślina i sacrum w historii cywilizacji. *Geografia i Sacrum*, t. 2. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, 471, <http://www.geo.uj.edu.pl/publikacje,000080>.
- Zemanek A., Savoian A.U., Zemanek B., 2008. The beginnings of ecological thought in the Renaissance: an account based on the *Libri picturati* A. 18–30 collection of water-colours. *Arch. Nat. Hist.* 34(1), 87–108. DOI 10.3366/anh.2007.34.1.87.
- Zemanek A., Zemanek B., 2016. Pocztywki z Edeu. *Tygodnik Powszechny* 21, Copernicus Festival Katalog, 42–47.

Podziękowania. Niniejszą pracę sfinansowano z dotacji przyznanej przez MNiSW na działalność statutową. Autorzy składają serdeczne podziękowania dr Agnieszce Baran za inspirację do napisania artykułu oraz prof. Michałowi Kopciowi za uwagi dotyczące tematów omawianych w pracy. Składamy również podziękowania Michałowi Antoniewiczowi, studentowi Instytutu Filologii Klasycznej Uniwersytetu Jagiellońskiego, za poszukiwanie w źródłowych tekstach łacińskich informacji o odżywianiu roślin oraz za ich tłumaczenia.

Summary. This monograph aims to present how views on plant nutrition were shaped over centuries and how the foundation of environmental knowledge concerning these issues was created. This publication also presents current problems and trends in studies concerning plant nutrition, showing their new dimension. This new dimension is determined, on the one hand, by the need to feed the world population increasing in geometric progression, and on the other hand by growing environmental problems connected with intensification of agricultural production.

Key words: chemical innovations, plant nutrition, historical aspects