

Tytus Berbeć

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

RYS HISTORYCZNY I WPROWADZENIE DO ROLNICTWA 4.0*

Słowa kluczowe: rolnictwo odporne na zmiany klimatu, innowacje technologiczne, rolnictwo 4.0, rolnictwo precyzyjne, historia rolnictwa precyzyjnego, Internet Rzeczy (IoT)

Wstęp

Współczesne rolnictwo stoi przed dylematem nie tylko w skali europejskiej, ale i skali globalnej, a mianowicie, jak wyżywić nieustannie rosnącą populację świata, która do 2050 r. może osiągnąć blisko 10 mld ludzi (FAO 2017), jednocześnie mierząc się z postępującymi niekorzystnymi dla rolnictwa zmianami klimatu i koniecznością ochrony zasobów naturalnych. Nasilające się susze, gwałtowne zjawiska o charakterze burzowym z towarzyszącymi im silnymi porywami wiatru i ulewnymi opadami, fale upałów oraz zmiany w rozkładzie opadów w sezonach wegetacyjnych bezpośrednio zagrażają stabilności produkcji rolnej (IPCC 2022). Tradycyjne modele agrotechniczne, często oparte na intensywnym wykorzystaniu wody, nawozów czy środków ochrony roślin, okazują się niewystarczająco elastyczne i w dłuższej perspektywie niezrównoważone.

Odpowiedzią na te wyzwania jest konieczność budowy rolnictwa odpornego na zmiany klimatu (ang. *climate-resilient agriculture*), czyli systemu zdolnego do adaptacji oraz transformacji w obliczu presji klimatycznej, przy jednoczesnym zachowaniu lub nawet zwiększeniu produktywności. Wykorzystanie innowacji technologicznych odgrywa kluczową rolę w tej transformacji.

Ogólnodostępna literatura naukowa oraz publikacje popularnonaukowe na temat technologii wykorzystywanych na różnych etapach w rolnictwie charakteryzują się znacznym rozdrobnieniem. Dostępne wyniki doświadczeń prowadzonych przez na-

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

ukowców na całym świecie skupiają się najczęściej na wąskich, wyspecjalizowanych dziedzinach, takich jak: analiza danych teledetekcyjnych z podziałem na wysoką i niską teledetekcję, zastosowanie robotyki z podziałem na gospodarstwa rolne i przetwórstwo czy finalne wyniki ekonomiczne gospodarstwa, rzadko łącząc je w spójny system. Niniejszy artykuł analizuje ewolucyjną rolę innowacji technologicznych w zwiększaniu produktywności i odporności rolnictwa na przestrzeni ostatnich 50 lat. Przedstawiono rys historyczny, począwszy od rewolucji neolitycznej, przez rewolucje agrarne czy zieloną rewolucję, aż po narodziny rolnictwa precyzyjnego. W artykule skupiono się na koncepcji rolnictwa 4.0, które wykorzystując takie technologie, jak internet rzeczy (IoT), sztuczną inteligencję (AI), duże zbiory danych, tzw. big data czy robotykę, oferuje bezprecedensowe możliwości budowania systemów rolnych dostosowanych do szybko podążających zmian klimatycznych czy nawet odpornych na zmiany klimatu. W artykule omówiono kluczowe narzędzia rolnictwa 4.0 i ich praktyczne zastosowanie pod kątem optymalizacji zużycia zasobów, monitorowania stanu upraw i minimalizowania negatywnego wpływu na środowisko. Wskazano również na bariery w implementacji tych rozwiązań oraz zarysowano perspektywy dalszego rozwoju rolnictwa w kontekście globalnych wyzwań. Niniejsza praca oferuje panoramiczne spojrzenie na transformację od początków rolnictwa poprzez jego ewolucję do rolnictwa 4.0, wskazując na synergie, bariery i realny potencjał tych technologii w budowaniu wydajnego sektora rolnego zapewniającego bezpieczeństwo żywności.

Zmiany klimatu stanowią jedno z największych wyzwań dla globalnego bezpieczeństwa żywnościowego, wymuszając na sektorze rolnym fundamentalną transformację.

Ewolucja technologiczna w rolnictwie: od mechanizacji do cyfryzacji

Historia rolnictwa jest nierozdzielnie związana z historią ewolucji technologicznej. Każdy przełom cywilizacyjny był napędzany lub wspierany przez innowacje, które pozwalały na efektywniejsze pozyskiwanie żywności. Pierwszą wielką rewolucją było przejście od zbieractwa i łowiectwa do osiadłego trybu życia i uprawy roli ok. 10 000 lat p.n.e. Udomowienie zwierząt i uprawa roślin oraz wynalezienie prostych narzędzi, takich jak motyka czy sierp, stanowiło krok milowy rozwoju cywilizacyjnego. Przez całe tysiąclecia postęp w rolnictwie był powolny, oparty zarówno na lokalnych udoskonaleniach sprzętowych, jak i w sposobie gospodarowania (np. wprowadzenie płodozmianu w średniowieczu). Prawdziwy przełom rozwoju technologicznego nastąpił wraz z rewolucją przemysłową. Zastosowanie maszyny parowej i urządzeń napędzanych wodą, a następnie silnika spalinowego doprowadziło do zwiększenia produktywności gospodarstw rolnych poprzez mechanizację rolnictwa. Zwierzęta stanowiące siłę pociągową w rolnictwie zostały zastąpione przez maszyny spalinową – popularny do dzisiaj ciągnik, czy mówiąc potocznie traktor, natomiast

maszyny rolnicze zrewolucjonizowały siew, zbiory i przetwarzanie produktów rolnych. Ten etap, nazywany jest często **rolnictwem 1.0**, czyli etapem, który skupiał się na drastycznym zwiększeniu wydajności pracy ludzkiej (Zambon i in. 2019). Wydajność pracy ludzkiej w dużym stopniu zwiększono poprzez wprowadzenie linii produkcyjnych zasilanych energią elektryczną, co było dużą, aczkolwiek często niedocenianą rewolucją. Na początku XX w. przełomem w rolnictwie było rozpoczęcie stosowania na dużą skalę nawozów sztucznych, które były pokłosiem opracowania przez Fritza Habera podstawy syntezy amoniaku, a następnie udoskonalenia procesu i wdrożenia go na skalę przemysłową przez Carla Boscha. Kolejnym krokiem milowym w rozwoju rolnictwa były przemiany jakie dokonały się po II Wojnie Światowej. W odpowiedzi na groźbę globalnego głodu rozpoczęto tzw. zieloną rewolucję, której filarami były trzy główne elementy, takie jak: wyhodowanie nowych, wysokoplennych odmian zbóż (pszenicy, ryżu, kukurydzy), masowe zastosowanie nawozów syntetycznych i upowszechnienie chemicznych środków ochrony roślin (pestycydów). Innowacje te, określane mianem **rolnictwa 2.0**, doprowadziły do znacznego wzrostu plonów i uratowały setki milionów ludzi przed niedożywieniem (Pingali 2012). Niestety wprowadzona rewolucja miała swoje wady w postaci wysokiej zależności mechanizacji od zasobów naturalnych, w tym paliw kopalnych, ale również przyczyniła się do znaczącej degradacji gleb, zanieczyszczenia wód oraz utraty bioróżnorodności. Wyzwania klimatyczne dodatkowo obnażyły słabości zielonej rewolucji, silnie uzależnionej od stabilnych dostaw wody i przewidywalnych warunków pogodowych. Pod koniec XX w., wraz z udostępnieniem ówczesnie dostępnej tylko dla wojska technologii satelitarnych (GPS) i systemów informacji geograficznej (GIS), narodziła się koncepcja rolnictwa precyzyjnego. Rewolucją w rolnictwie było wprowadzenie elektroniki, robotów oraz elementów IT do automatyzacji produkcji. Stanowiła ona fundamentalną zmianę paradygmatu: od zarządzania całym polem jako jednorodną całością, do zarządzania zmiennością w obrębie pola. Rolnicy, tworząc i wykorzystując mapy plonów, badając i analizując gleby oraz instalując różnego rodzaju sensory na polach uprawnych, mogli precyzyjnie aplikować nawozy i środki ochrony tylko tam, gdzie było to konieczne i w odpowiedniej dawce czy o odpowiednim stężeniu substancji czynnej. **Rolnictwo 3.0** to era optymalizacji i początek cyfryzacji, która położyła podwaliny pod kolejną, trwającą obecnie rewolucję (Schrijver i in. 2016).

Rolnictwo 4.0 – definicja i kluczowe technologie

Obecnie **rolnictwo 4.0**, które często określane jest mianem rolnictwa cyfrowego, rolnictwa inteligentnego (ang. *smart farming*), jest cyfrową odpowiedzią na wyzwania klimatyczne. Stanowi ono ewolucyjne rozwinięcie rolnictwa 3.0 (rolnictwa precyzyjnego), które skupiało się na optymalizacji dzięki wykorzystaniu danych pochodzących z satelitów (informacje GPS, GIS), przechodząc rewolucję do rol-

nictwa 4.0, które polega na głębokiej integracji, interoperacyjności i automatyzacji procesów na podstawie stałych przepływów danych otrzymywanych i wykorzystywanych w czasie rzeczywistym. Zatem rewolucją było wprowadzenie systemów IoT napędzanych przez rozszerzoną rzeczywistość i sztuczną inteligencję w czasie rzeczywistym. Nie polega ono jedynie na stosowaniu pojedynczych technologii, ale na ich głębokiej integracji w jeden, spójny system oparty na analizie danych. Jest to koncepcja holistycznego zarządzania gospodarstwem rolnym wykorzystująca synergii zaawansowanych technologii do monitorowania, analizy i automatyzacji procesów, oparta na gromadzeniu, przetwarzaniu i wykorzystywaniu dużych zbiorów danych w czasie rzeczywistym w celu optymalizacji produkcji, zwiększania efektywności, redukcji kosztów i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko produkcyjne (Saiz-Rubio i Rovira-Más 2020).

Fundamentem rolnictwa 4.0 są dane pochodzące z sieci połączonych ze sobą czujników glebowych, roślinnych, stacji agrometeorologicznych czy sensorów monitorujących funkcje życiowe zwierząt, zwane jako internet rzeczy (IoT). Zbiór wszystkich czujników generuje, wraz z danymi pochodzącymi z teledetekcji satelitarnej i nisko-łopapowej (drony mapujące), ogromne zbiory danych. Ta koncepcja zwana jako big data wymaga zaawansowanej analizy, która często bez użycia sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego nie ma racji bytu. Ogromne zbiory danych przetwarzane są w chmurach obliczeniowych i integrowane w ramach zintegrowanych systemów zarządzania gospodarstwem (FMIS, ang. *Fuel Management Information System*), do których rolnik ma dostęp przez technologie mobilne. W zarządzaniu gospodarstwem rolnym kluczowe stają się również systemy oparte na systemach informacji przestrzennej (GIS, ang. *Geographic Information Systems*), które pozwalają na tworzenie map aplikacyjnych dla nawozów czy ŚOR. Tak zintegrowany system pozwala rolnikowi na lepszą koordynację zarządzania gospodarstwem i wejście na nowy poziom automatyzacji i robotyzacji, gdzie autonomiczne maszyny i drony wykonują precyzyjne zadania na podstawie cyfrowych map i analizy ogromnych zbiorów danych.

Ewolucja do rolnictwa 4.0 w dużej części przyczynia się do budowania odporności i adaptacji do zmian klimatu. Rolnictwo 4.0 można zdefiniować jako podejście, w którym dane stają się kluczowym zasobem, a technologie cyfrowe narzędziem do ich efektywnego wykorzystania, prowadząc do inteligentniejszej, bardziej zrównoważonej i wydajnej produkcji rolnej. Integracja powyższych technologii w produkcji rolniczej tworzy potężne narzędzia do mitygacji i adaptacji do zmian klimatu. Czujniki wilgotności gleby połączone z precyzyjnymi prognozami pogody i danymi o zapotrzebowaniu roślin pozwalają na uruchamianie systemów nawadniających tylko wtedy, gdy jest to absolutnie konieczne i dostarczanie dokładnie takiej ilości wody, jakiej potrzebuje roślina. To są kluczowe narzędzia w regionach zagrożonych suszą. Drony mogą identyfikować wycieki w systemach irygacyjnych, a analiza danych pozwala na tworzenie map zapotrzebowania wodnego dla poszczególnych części pola. Kolejnym przykładem

może być analiza danych z czujników glebowych i obrazów teledetekcyjnych, która pozwala na stosowanie nawozów w zmiennych dawkach (VRT, ang. *Variable Rate Technology*), co nie tylko obniża koszty i chroni wody gruntowe, ale także zmniejsza emisję podtlenku azotu (N₂O), silnego gazu cieplarnianego powstającego z nadmiaru nawozów azotowych, tym samym prowadząc do zrównoważonej gospodarki rolnej. Ponadto algorytmy AI, analizując dane mikroklimatyczne, wilgotność liści i historyczne dane o występowaniu chorób, mogą z dużym wyprzedzeniem prognozować ryzyko infekcji grzybowych. Pozwala to na prewencyjne, celowane zastosowanie środków ochrony roślin zamiast oprysków kalendarzowych, redukując zużycie środków ochrony roślin i ich negatywnego wpływu na środowisko. Badania prowadzone przez naukowców (w tym biotechnologów, agrometeorologów i gleboznawców) umożliwiają analizę wydajności różnych odmian roślin w konkretnych warunkach glebowo-klimatycznych na przestrzeni lat. Pozwala to na świadomy dobór odmian najlepiej przystosowanych do lokalnych, zmieniających się warunków, np. bardziej odpornych na wysoką temperaturę czy deficyty wody. Automatyzacja i robotyka, poprzez optymalizację tras przejazdu maszyn, zmniejszając zużycie paliwa i emisję CO₂. Rolnictwo precyzyjne, promując techniki uprawy bezorkowej lub uproszczonej (wspierane przez precyzyjny siew i zarządzanie resztkami późniejszymi), przyczynia się do sekwestracji węgla w glebie.

Pomimo ogromnego potencjału szeroka implementacja rolnictwa 4.0 napotyka na liczne bariery, z którymi musi zmierzyć się rolnik. Do barier można zaliczyć wysokie koszty inwestycyjne w zakupie nowoczesnych maszyn, sensorów i oprogramowania stanowiącego podstawę nowoczesnego zarządzania gospodarstwem rolnym. Efektywne wykorzystanie zaawansowanych technologii wymaga pozyskania nowych umiejętności cyfrowych i analitycznych, których często brakuje w środowiskach wiejskich. Brak dostępu do szybkiego i stabilnego Internetu na wielu obszarach wiejskich uniemożliwia korzystanie z rozwiązań opartych na chmurze i przesyłaniu danych w czasie rzeczywistym, co jest konieczne do sprawnego zarządzania gospodarstwem. Kolejną barierą może być brak standaryzacji i interoperacyjności. Maszyny i oprogramowanie dostarczane przez różnych producentów często nie są ze sobą kompatybilne, co utrudnia tworzenie zintegrowanych systemów (Puri i in. 2017, Kamilaris i Prenafeta-Boldú 2018).

Perspektywy rozwoju nowoczesnego sektora rolnego są jednak obiecujące. Zwiększona dostępność i spadające ceny sensorów, czujników, rozwój modeli biznesowych opartych na usługach (np. FaaS, ang. *Farming as a Service*), a także programy wsparcia publicznego mogą przyspieszyć wdrażanie tych technologii do gospodarstw rolnych, zwiększając tym samym konkurencyjność. Kluczowa będzie integracja rolnictwa 4.0 z zasadami agroekologii, aby technologia służyła nie tylko optymalizacji, ale także wspieraniu naturalnych procesów w ekosystemie, takich jak poprawa bioróżnorodności i zdrowia gleby.

Patrząc w przyszłość, na horyzoncie innowacji wyłania się już koncepcja **rolnictwa 5.0**, która stanowi kolejny krok po digitalizacji. Wyraźnym znakiem rozpoznawczym, czyli rewolucją pomiędzy rolnictwem 4.0 a rolnictwem 5.0 będzie wykorzystanie generatywnej sztucznej inteligencji do świadomego podejmowania decyzji skupiona na pojedynczych roślinach. Ten nadchodzący paradygmat kładzie jeszcze silniejszy nacisk na zrównoważony rozwój, dobrostan człowieka i pełną synergię z ekosystemem. To właśnie potencjał rolnictwa 5.0 może okazać się kluczowy w adaptacji do najpilniejszych wyzwań klimatycznych, zwłaszcza w kontekście efektywnego zarządzania zasobami wodnymi i zwiększania retencji wody w glebie dla roślin uprawnych. Zatem przyszłość, która nas czeka można zdefiniować jako: rolnictwo 5.0 to rzetelna informacja i świadome jej wykorzystanie przez generatywną sztuczną inteligencję na poziomie pojedynczej rośliny.

Podsumowanie

Historia rolnictwa pokazuje, że innowacje technologiczne zawsze były kluczowym czynnikiem pozwalającym sprostać rosnącym wyzwaniom. Od prostych narzędzi, przez mechanizację i chemię rolną, dotarliśmy do progu czwartej rewolucji rolniczej. Rolnictwo 4.0 oparte na danych, łączności i inteligentnej automatyzacji, oferuje zestaw narzędzi, który może fundamentalnie zmienić sposób, w jaki produkujemy żywność i zwiększyć świadomość konsumenta poprzez jej paszportyzację.

W kontekście zmian klimatu nie jest to już tylko opcja, ale konieczność. Zdolność do precyzyjnego zarządzania zasobami, adaptacji w czasie rzeczywistym i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko czyni z rolnictwa 4.0 główną ścieżkę w kierunku budowy systemów rolnych, które będą jednocześnie produktywne, zrównoważone i odporne na zmiany klimatu, w tym na elementy niosące te zmiany, takie jak zwiększona presja szkodników, patogenów itp. Pokonanie barier wdrożeniowych i zapewnienie sprawiedliwego dostępu do tych technologii będzie jednym z najważniejszych zadań dla naukowców, decydentów i samego sektora rolnego w nadchodzących dekadach.

Literatura

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): The future of food and agriculture: trends and challenges. Rome: FAO, 2017.
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2022.
3. Puri V., Nayyar A., Raja L.: Agriculture drones: A modern era of breakthrough in precision agriculture. Journal of Statistics and Management Systems, 2017, **20(4)**: 507-518; DOI:10.1080/09720510.2017.1395171

4. K a m i l a r i s A., Prenafeta-Boldú F.X.: Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, **147**: 70-90; <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
 5. P i n g a l i P.L.: Green Revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(31): 12302-12308; DOI:10.1073/pnas.0912953109
 6. S a i z-Rubio V., Rovira-Más F.: From smart farming towards Agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, 2020, **10(2)**, 207; DOI:10.3390/agronomy10020207
 7. S c h r i j v e r R., Poppe K.J., Daheim C.: Precision agriculture and the future of farming in Europe Scientific Foresight Study IP/G/STOA/FWC/2013-1/Lot7/SC5. European Parliament, 2016, pp. 42; DOI: 10.2861/020809
 8. Z a m b o n I., Cecchini M., Egidi G., Saporito M.G., Colantoni A.: Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. *Processes MDPI*, 2019, **7(1)**, 36; <https://doi.org/10.3390/pr7010036>
-

Adres do korespondencji:

mgr inż. Tytus Berbec
Zakład Biogospodarki i Agrometeorologii
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 758
e-mail: tberbec@iung.pulawy.pl

AUTOR
Tytus Berbec

ORCID
0000-0001-5183-5807