

Adam Kleofas Berbec

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

ROLNICTWO EKOLOGICZNE – MIEJSCE WDRAŻANIA INNOWACJI ROLNICZYCH I BUDOWANIA ODPORNOŚCI AGROEKOSYSTEMÓW*

Słowa kluczowe: rolnictwo ekologiczne, innowacje, odporność agroekosystemów

Wstęp

Rolnictwo ekologiczne stanowi kluczowy obszar wdrażania innowacji rolniczych. W niniejszym rozdziale opisano, w jaki sposób jest możliwa integracja zaawansowanych technologii rolnictwa 4.0 z praktykami ekologicznymi, a także podkreślono jej konieczność, jeśli chcemy budować odporne agroekosystemy zdolne sprostać wyzwaniom XXI w. Opiswane innowacje techniczne wspierają budowanie odporności gospodarstw i całych agroekosystemów. W kontekście rolnictwa 4.0 wykorzystanie zaawansowanych technologii, takich jak sztuczna inteligencja, robotyka i precyzyjne rolnictwo, umożliwia optymalizację procesów produkcyjnych przy jednoczesnym poszanowaniu zasad zrównoważonego rozwoju i dbałości o naturalne środowisko i bioróżnorodność. W tym rozdziale omówiono, jak innowacje technologiczne mogą wspierać rolnictwo ekologiczne, zwiększając jego efektywność i odporność na zmiany klimatu oraz zakłócenia rynkowe.

Odporność (ang. *resilience*) ekosystemów i gospodarstw definiuje się jako zdolność systemów do adaptacji i regeneracji w obliczu zakłóceń. Zakłócenia te obejmują zmiany klimatyczne, choroby roślin, szkodniki czy ekstremalne warunki pogodowe, ale także są związane z niestabilnością rynków. W kontekście gospodarstw ekologicznych większa odporność manifestuje się poprzez zmniejszone ryzyko ekonomiczne, poprawę jakości gleby, zwiększoną bioróżnorodność, redukcję zależności od zewnętrznych środków produkcji oraz poprawę gospodarki wodnej. Wdrażanie innowacji rolniczych, takich jak precyzyjne rolnictwo, robotyka czy systemy wspomagania decyzji oparte na sztucznej inteligencji, może znacząco zwiększyć odporność

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

gospodarstw ekologicznych, umożliwiając im lepsze zarządzanie zasobami i adaptację do zmieniających się warunków.

Praktyki wzmacniające agroekosystemy

Rolnictwo ekologiczne w swoich założeniach opiera się na naturalnych środkach produkcji, takich jak kompost, nawozy organiczne i naturalne. To także wykorzystanie międzyplonów, zielonych nawozów i przede wszystkim szerokiego, przyrodniczo poprawnego płodozmianu. W systemie tym nie stosuje się syntetycznych nawozów i środków ochrony roślin pochodzących ze sztucznej syntezy chemicznej. Strategia prowadzenia gospodarstwa ekologicznego, oparta na odnawialnych zasobach środowiska i środkach produkcji dostępnych w gospodarstwie, często wspiera odporność tych gospodarstw w większym stopniu niż strategia zarządzania wdrażana w intensywnych gospodarstwach konwencjonalnych, oparta na masowym wykorzystaniu syntetycznych środków produkcji. Agrotechnika stosowana w gospodarstwach ekologicznych nastawiona jest na wzmacnianie struktury gleby, zwiększanie bioróżnorodności, poprawę retencji wody i zmniejszanie erozji. Długoterminowe badania wykazały, że systemy ekologiczne są w stanie dorównać wydajnością systemom konwencjonalnym w warunkach stresu, takich jak susza lub inne niekorzystne zjawiska pogodowe.

Synergie między technologią a rolnictwem ekologicznym

Precyzyjne rolnictwo wydaje się być szczególnie interesujące dla gospodarstw ekologicznych, które mogą wykorzystywać zaawansowane technologie, aby zwiększać efektywność zabiegów agrotechnicznych, a także aby móc wykorzystać innowacyjne, ekologiczne środki produkcji (np. nieselektywne bioherbicydy), których rolnicze wykorzystanie jest bardzo ograniczone bez zastosowania technik precyzyjnych. Integracja tych innowacji z praktykami ekologicznymi może prowadzić do jeszcze większej odporności i zrównoważonego rozwoju gospodarstw, co jest kluczowe w obliczu globalnych wyzwań środowiskowych i ekonomicznych.

Potrzeba takich synergii staje się szczególnie widoczna w kontekście współczesnych wyzwań rolnictwa. Polska, z ponad 14 mln ha użytków rolnych i zróżnicowanymi strefami agroekologicznymi, jest jednym z czołowych producentów zbóż, roślin okopowych i warzyw w Europie (EC 2021, FAOSTAT 2022). Jednak ta produktywność w dużej mierze zależy od syntetycznych agrochemikaliów. Nadmierne stosowanie nawozów i środków ochrony roślin przyczyniło się do zakwaszenia gleby, wymywania składników odżywczych, utraty różnorodności mikrobiologicznej i spadku liczebności zapylaczy (Rusco i in. 2018, Europejska Agencja Środowiska 2020). Ponad 30% próbek wód gruntowych na obszarach wiejskich przekracza bezpieczne poziomy azotanów lub pozostałości środków ochrony roślin (WHO Europe 2021). Niedawne globalne zakłócenia, w tym pandemia COVID-19 i wojna na Ukrainie, dodatkowo ujawniły słabości systemów rolniczych uzależnionych

od dostaw syntetycznych środków produkcji. Te kryzysy zakłóciły łańcuchy dostaw i spowodowały gwałtowny wzrost cen środków produkcji, zmniejszając rentowność konwencjonalnej produkcji rolniczej (OECD–FAO 2023). Wydarzenia ostatnich lat uwidoczniły wyzwania, przed jakimi obecnie stoi rolnictwo, w tym pilną potrzebę wdrożenia niskonakładowych i cyrkularnych strategii zarządzania w rolnictwie. Rolnictwo precyzyjne oraz narzędzia wykorzystujące sztuczną inteligencję zapewniają wsparcie dla takiej gospodarki.

Odporność gospodarstw ekologicznych

Opisane powyżej wyzwania współczesnego rolnictwa szczególnie wpływają na gospodarstwa prowadzące certyfikowaną produkcję ekologiczną. Gospodarstwa te muszą równoważyć ograniczenia w stosowaniu syntetycznych środków produkcji z koniecznością utrzymania opłacalności produkcji. Rolnictwo ekologiczne jest często w większym stopniu zależne od pracy ludzi niż wielkoobszarowe, wysoce zmechanizowane rolnictwo konwencjonalne. Technologie autonomiczne przyczyniają się do zwiększenia efektywności produkcji rolnej, ale także do minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko. Wyniki badań naukowych (np.: Pretto i in. 2019, Moraru i in. 2023) wskazują, że precyzyjne autonomiczne nośniki narzędzi umożliwiają realizację tych celów poprzez następujące działania:

- **redukcję zużycia chemicznych środków ochrony roślin:** precyzyjne usuwanie chwastów za pomocą mechanicznych narzędzi eliminuje potrzebę stosowania herbicydów, co jest zgodne z zasadami rolnictwa ekologicznego;
- **ochronę gleby i zwiększenie dokładności operacji:** lekkie maszyny minimalizują ugniatanie gleby, sprzyjając zachowaniu jej struktury i żyzności. Jednocześnie wykorzystanie zaawansowanych czujników i systemów nawigacji pozwala na precyzyjne wykonywanie zabiegów, co jest kluczowe w uprawach ekologicznych bazujących na metodach niechemicznych;
- **zwiększenie efektywności czasowej:** autonomiczne systemy mogą pracować przez dłuższy czas bez przerw, w tym w nocy oraz w okresach weekendowych, co zwiększa wydajność operacji polowych i pozwala na terminowe wykonywanie zabiegów agrotechnicznych;
- **zmniejszenie nakładu pracy:** automatyzacja rutynowych zadań odciąża rolników, pozwalając im skupić się na bardziej złożonych aspektach zarządzania gospodarstwem.

Technologie dla wsparcia rolnictwa ekologicznego

Europejski Zielony Ład i strategia „od pola do stołu” mają na celu zmniejszenie zużycia środków ochrony roślin pochodzących ze sztucznej syntezy chemicznej i ryzyka związanego z ich stosowaniem o 50% do 2030 r. (EC 2020). Gospodarstwa ekologiczne, które stanowią ok. 4% gruntów rolnych w Polsce (Eurostat 2023),

w dużej mierze opierają się na mechanicznym lub ręcznym odchwaszczaniu. Presja chwastów i zwalczanie szkodników stanowią stałe ograniczenia dla rozwoju rolnictwa ekologicznego (Marques da Silva i in. 2023). Dostępne ekologiczne herbicydy – pochodzące z kwasu pelargonowego, octu lub olejków eterycznych – są zazwyczaj nieselektywne, fitotoksyczne i mają niejednolite działanie (Dayan i in. 2009).

Precyzyjne systemy opryskiwania

Ograniczenie stosowania chemicznych środków ochrony roślin w rolnictwie ekologicznym jest możliwe dzięki skutecznemu wykorzystaniu metod mechanicznego zwalczania chwastów. Badania polowe przeprowadzone przez Gawędę i in. (2014) wykazały, że różne metody regulacji chwastów – w tym mechaniczne – wpływają na liczebność chwastów w uprawach zbożowych, a ich skuteczność zależy od stosowanej metody i warunków uprawy. Dodatkowo zastosowanie lekkich maszyn sprzyja ochronie gleby, minimalizując jej zagęszczenie i zachowując jej strukturę, co jest szczególnie istotne na glebach ciężkich (Berbec i in. 2018).

Wykorzystanie środków biologicznych wymaga zastosowania precyzyjnego systemu aplikacji, aby maksymalizować ich skuteczność (Kumar i in. 2019, Xiang 2024). Konwencjonalne rozwiązania koncentrują się głównie na środkach syntetycznych stosowanych na dużych powierzchniach bez elastyczności (i oszczędności) wymaganej w rolnictwie ekologicznym (Gupta i Kumar 2025). Narzędzie precyzyjne, np. Platforma Ecorobotix, do prowadzenia ultraprecyzyjnego opryskiwacza z dokładnością do 2 cm, może być przykładem rozwiązania szczególnie cennego dla upraw ekologicznych (van Steenberg i in. 2024). Systemy ultraprecyzyjne zdolne rozpoznawać roślinę uprawną i chwasty udostępniają techniczną możliwość zastosowania nieselektywnych herbicydów pochodzenia naturalnego (np. kwasów organicznych) w uprawie roślin. Obecnie nie ma możliwości prawnych stosowania bioherbicydów w certyfikowanym rolnictwie ekologicznym, natomiast pojawiające się możliwości techniczne ultraprecyzyjnego nawożenia mogłyby zaoferować rozwiązanie jednego z najważniejszych wyzwań w rolnictwie ekologicznym – skutecznego zwalczania chwastów. Co więcej, ultraprecyzyjne systemy oprysku mogą także wspierać zwiększanie produktywności ekologicznej poprzez precyzyjne dostarczanie nawożenia dolistnego dla rośliny uprawnej. W zastosowaniach praktycznych, systemy precyzyjnego opryskiwania wykorzystują sztuczną inteligencję i wizję komputerową do wykrywania roślin w czasie rzeczywistym, umożliwiając identyfikację obiektów o wielkości poniżej 1 cm. Takie rozwiązania umożliwiają redukcję zużycia środków ochrony roślin nawet o 95% (Ghaly i Ibrahim 2022), co otwiera nowe możliwości dla precyzyjnego stosowania biologicznej ochrony roślin w rolnictwie ekologicznym. Kluczowym wyzwaniem pozostaje adaptacja tych technologii do lokalnych warunków uprawowych.

Biologiczne środki ochrony roślin, w tym także biopestycydy, charakteryzują się mniejszą toksycznością i trwałością, ale często mają ograniczoną stabilność, skuteczność i kompatybilność z tradycyjnymi technologiami opryskiwania (Gupta i Dikshit

2010, Roy i in. 2023). Biopestycydy dolistne mogą poprawić odporność roślin, ale tylko wtedy, gdy są stosowane precyzyjnie. Obecne systemy opryskiwania są zaprojektowane do równomiernego stosowania dużych ilości środków syntetycznych i często nie nadają się do stosowania tych wrażliwych materiałów (Bhullar i in. 2021). Jednocześnie rolnicy są otwarci na innowacyjne, zrównoważone środki produkcji, ale ich stosowanie jest ograniczone przez nieodpowiednie systemy dostarczania, które nie spełniają wymogów agronomicznych lub ekonomicznych (Riar i in. 2017, Bhullar i in. 2021). Powoduje to utrzymujące się „niedopasowanie dostaw” między ekologicznymi środkami produkcji a konwencjonalnymi maszynami.

Robotyzacja zabiegów polowych

W ostatniej dekadzie rozwój robotów polowych umożliwił wprowadzenie alternatywy dla chemicznego odchwaszczania w rolnictwie ekologicznym, zestawiając efektywność technologii z minimalnym wpływem na środowisko. Na przykład Bakker i in. (2006) opisują wykorzystanie autonomicznego robota do usuwania chwastów, wykorzystującego precyzyjną wizję maszynową, który w warunkach szklarniowych osiągnął średni błąd wykrywania ≤ 25 mm, co stanowiło istotny krok w kierunku eliminacji ręcznej pracy. Ręczne pilenie i stosowanie herbicydów są coraz częściej postrzegane jako nieefektywne, kosztowne, czasochłonne i szkodliwe dla środowiska.

Technologie robotycznego odchwaszczania są przykładem innowacji oferującej zautomatyzowane rozwiązania w trzech kluczowych fazach: wykrywanie, podejmowanie decyzji i działanie. Wśród nich kluczową rolę odgrywa wykrywanie prowadzące do rozwoju systemów opartych na obrazowaniu (kamery pracujące w różnych pasmach (RGB, NIR, termiczne) oraz systemów nieopartych na obrazowaniu (LIDAR, ToF i ultradźwięki) (Shamshiri i in. 2024). Korzyści zastosowania tych technologii w postaci zmniejszenia kosztów oraz eliminacji zanieczyszczenia wody i gleby mają szczególne znaczenie dla rolnictwa ekologicznego, które zakazuje stosowania syntetycznych herbicydów i kładzie nacisk na zrównoważony rozwój. Nadal jednak istnieją wyzwania, takie jak wysokie koszty początkowe, błędy w precyzji działania, wrażliwość na zmienne warunki środowiska, a także brak wykwalifikowanego (przeszkolonego) personelu do obsługi zaawansowanych technicznie rozwiązań (Shamshiri i in. 2024).

Możliwe jest także wykorzystanie technologii autonomicznego zwalczania chwastów za pomocą lasera, co Krupańek i in. (2024) zaprezentowali na przykładzie projektu WeLASER. W projekcie tym autonomiczny robot z laserowym systemem likwidacji chwastów osiągnął poziom dojrzałości TRL 7 oraz znaczną przewagę środowiskową w analizie życia cyklu (LCA), choć autorzy ci wskazują na konieczność optymalizacji zużycia energii w fazie produkcji i eksploatacji.

Możliwe jest także wykorzystanie robotów zarówno naziemnych, jak i UAV, wykorzystujących głębokie uczenie do wykrywania chwastów w czasie rzeczywistym, co umożliwia późniejsze mechaniczne lub chemiczne precyzyjne usuwanie chwastów bez ingerencji człowieka. Metody głębokiego uczenia maszynowego dzięki wykorzy-

staniu dużych zbiorów danych treningowych oraz modeli wstępnie wytrenowanych wykazują wysoką skuteczność w wykrywaniu chwastów i szkodników upraw. Istotnymi wyzwaniami technicznymi pozostają zmienność warunków oświetleniowych czy trudności w transferze danych. Rakhmatulin i in. (2021) oraz Shahi i in. (2023) wskazują, że algorytmy głębokiego uczenia są szczególnie dobrze przystosowane do złożonych problemów rozpoznawania obiektów i klasyfikacji, gdyż potrafią automatycznie wydobywać istotne cechy z dużej liczby danych.

Internet rzeczy (IoT) w rolnictwie ekologicznym

Zastosowanie internetu rzeczy (IoT) w rolnictwie ekologicznym umożliwia precyzyjny monitoring parametrów środowiskowych i biologicznych w czasie rzeczywistym, co znacząco zwiększa efektywność działań agrotechnicznych oraz odporność agroekosystemów. System rolnictwa ekologicznego, w którym ograniczone są metody interwencyjne ochrony roślin, a preferowane metody zapobiegania, jest szczególnie wrażliwy na wczesne wykrycie problemu w uprawie. Pozwala to na szybką interwencję i zapobieganie stratom plonu. Systemy oparte na sieciach czujników rozmieszczonych w glebie i na powierzchni roślin pozwalają na stałą rejestrację parametrów środowiska, takich jak temperatura, wilgotność, pierwsze symptomy (lub warunki do wystąpienia) chorób lub niedoborów pokarmowych. Dane gromadzone przez czujniki są analizowane przez algorytmy sztucznej inteligencji (AI), które umożliwiają dynamiczne podejmowanie decyzji dotyczących nawadniania, nawożenia czy zabiegów ochronnych.

Inteligentne systemy nawadniania

W warunkach rosnącego deficytu wody obserwowanego w wielu rejonach świata oraz ograniczonej możliwości stosowania regulatorów wzrostu w rolnictwie ekologicznym, inteligentne systemy nawadniania (ang. *smart irrigation systems*) stanowią istotne narzędzie wspierające odporność środowiskową i efektywność wodną gospodarstw. Systemy te wykorzystują czujniki wilgotności gleby, temperatury, intensywności promieniowania słonecznego oraz prognozy meteorologiczne i na tej podstawie budują możliwe scenariusze. Mogą one być dodatkowo zintegrowane z logiką rozmytą lub innymi metodami uczenia maszynowego (ang. *machine learning*), umożliwiając im automatyczne, adaptacyjne dostosowywanie nawodnienia do bieżących potrzeb roślin. W scenariuszach tych często jest brane pod uwagę także ryzyko wystąpienia chorób grzybowych; nawadnianie dostosowywane jest w ten sposób, aby ryzyko to zminimalizować (nawet kosztem nieoptymalnego nawadniania). Richard i in. (2022) podkreślają, że nawadnianie może stanowić drogę do rozprzestrzeniania się patogenów, na przykład nawadnianie naziemne może sprzyjać rozpylaniu lub splukiwaniu patogenów liściowych, podczas gdy nawadnianie zalewowe może sprzyjać patogenom glebowym. Możliwość zapobiegania rozwojowi chorób jest szczególnie istotna z punktu widzenia rolnictwa ekologicznego – w którym interwencyjne zwalczanie

chorób i szkodników jest o wiele trudniejsze niż zapobieganie wystąpieniu porażenia. Jak wskazują badania Hosack i Miller (2017), ograniczanie nawadniania naziemnego, a tym samym skracanie czasu wilgotności liści, stanowi skuteczną praktykę kulturową minimalizującą występowanie chorób plamistości liści. Według Café-Filho i in. (2019) zarządzanie epidemiami chorób roślin poprzez praktyki nawadniania jest jednym z najważniejszych zabiegów kulturowych w zintegrowanym zarządzaniu chorobami roślin, szczególnie w systemach rolnictwa ekologicznego, gdzie opcje kontroli chemicznej są ograniczone. Navarro-Hellín i in. (2016) opracowali automatyczny inteligentny system wspomagania decyzji w nawadnianiu (SIDSS), który wykorzystuje system neuro-rozmyty ANFIS do przewidywania tygodniowych potrzeb nawadniania na podstawie pomiarów glebowych i zmiennych klimatycznych. Badania kontrolowane wykazały, że zaawansowane systemy kontroli nawadniania mogą przynieść średnio 30% oszczędności wody w zastosowaniach komercyjnych przy jednoczesnym zachowaniu stabilności plonowania (Lunstadt i Sowby 2024). Integracja wielu metod, w tym zastosowanie systemów IoT oraz modeli predykcyjnych opartych na danych z sensorów może skutecznie wspomagać zarządzanie ryzykiem suszy i minimalizować negatywne skutki zmian klimatycznych w uprawach ekologicznych. Kushwaha i in. (2024) wykazali, że bezprzewodowe sieci sensorów w inteligentnych systemach nawadniania znacznie poprawiają efektywność zarządzania zasobami wodnymi w rolnictwie. Integracja IoT z narzędziami bezzałogowymi (np. UAV) dodatkowo rozszerza możliwości detekcji przestrzennej, co pozwala na lokalne, precyzyjne interwencje i redukcję strat produkcyjnych. Morchid i in. (2025) przedstawili system IoT umożliwiający inteligentne kontrolowanie nawadniania poprzez wbudowane systemy i technologie Server-Sent Events. Systemy nawadniania oparte na logice rozmytej wykazują wysoką efektywność w optymalizacji zużycia wody (Togneri i in. 2022). Efektywność takich systemów dodatkowo wzrasta w połączeniu z odnawialnymi źródłami energii, co może zmniejszyć zużycie energii nawet o 30%, umożliwiając niezależne energetycznie działanie systemów w warunkach braku zasilania sieciowego.

Odnawialne źródła energii i niezależność energetyczna

Możliwe jest zintegrowanie zastosowania odnawialnych źródeł energii (OZE) w gospodarstwach ekologicznych, jako kluczowego elementu budowania zdywersyfikowanego systemu rolniczego, o wielu niezależnych źródłach energii. Strategia taka może pomóc budować niezależność operacyjną gospodarstwa, ale także wspierać odporność systemów rolniczych na zakłócenia zewnętrzne, w tym przerwy w dostawach energii czy wzrost cen nośników. Wdrażanie odnawialnych źródeł energii (instalacje fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe czy mikrobiogazownie rolnicze) jako integralnej części gospodarstw ekologicznych może mieć kluczowe znaczenie dla zapewnienia niezależności energetycznej gospodarstwa, ale także obniżyć koszty pracy systemów autonomicznych (np. korzystających z elektryczności jako źródła zasilania). To także sposób na redukcję emisji gazów cieplarnianych, a więc zmniejszenie śladu węglowego

produkcji rolniczej, co w gospodarstwach ekologicznych ma szczególne znaczenie.

Strategia ta wydaje się być wyjątkowo korzystna w połączeniu z wykorzystaniem robotów rolniczych zasilanych elektrycznie. Zdywersyfikowane źródła energii dla gospodarstw ekologicznych mogą obejmować systemy fotowoltaiczne, mikroturbiny wiatrowe i biogazownie oparte na fermentacji odpadów rolniczych. Instalacje te mogą zaspokajać potrzeby energetyczne zarówno w zakresie zasilania maszyn autonomicznych, jak i czujników IoT czy systemów nawadniających. Wdrożenie agrowoltaiki (ang. *agrivoltaics*) pozwala na zwiększenie produktywności ziemi nawet o 70% poprzez równoczesną produkcję energii elektrycznej i upraw (Anusuya i in. 2024). W kontekście rolnictwa ekologicznego OZE wpisują się w strategię minimalizacji śladu węglowego, promując zrównoważony rozwój i wsparcie dla gospodarki obiegu zamkniętego. Szczególne miejsce zajmują tutaj biogazownie rolnicze, które mogą utylizować odpady rolnicze w procesie produkcji biogazu (i energii), a odpad z tej produkcji (poferement) może stanowić gotowy produkt rolniczy lub surowiec do produkcji tzw. polepszaczy glebowych. Co ważne, przejście na alternatywne źródła energii w zarządzaniu energetycznym w rolnictwie ma duży potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych, poprawy efektywności energetycznej i promowania zrównoważonej produkcji żywności (Majeed i in. 2023).

Technologia blockchain

Technologia blockchain, bazująca na zdecentralizowanych, niezmiennych rejestrach danych, znajduje coraz szersze zastosowanie w rolnictwie ekologicznym jako narzędzie zapewniające przejrzystość, identyfikowalność oraz ułatwiające proces certyfikacji. Każdy etap procesu produkcyjnego – od siewu, przez nawożenie, aż po zbiór i transport – może być zapisywany w systemie blockchain, umożliwiając audyt i weryfikację zgodności z wymogami rolnictwa ekologicznego. Van Hilten i in. (2020) w swoich badaniach nad zastosowaniem blockchain w produkcji żywności ekologicznej wykazali, że technologia ta znacząco poprawia przejrzystość łańcucha dostaw „od pola do stołu” oraz umożliwia konsumentom dokładną weryfikację pochodzenia produktów ekologicznych. Blockchain umożliwia także integrację z IoT, co pozwala na automatyczne rejestrowanie danych z sensorów bezpośrednio do rejestru, bez udziału człowieka, eliminując błędy i podnosząc wiarygodność danych produkcyjnych. Zastosowanie tej technologii w rolnictwie ekologicznym może skutecznie wspierać małych producentów w dostępie do rynków premium, jednocześnie ograniczając ryzyko oszustw żywnościowych.

Nowoczesne technologie oferują szerokie spektrum możliwości wspierania rozwoju rolnictwa ekologicznego. Każda z przedstawionych technologii wnosi specyficzne korzyści, które są szczególnie wartościowe w kontekście ograniczeń charakterystycznych dla systemów ekologicznych. Tabela 1 przedstawia syntetyczne zestawienie omawianych technologii wraz z ich głównymi zastosowaniami i korzyściami dla rolnictwa ekologicznego.

Tabela 1

Przegląd kluczowych technologii wspierających rolnictwo ekologiczne

Technologia	Zastosowanie	Korzyści dla rolnictwa ekologicznego
IoT i czujniki	pomiar wilgotności, temperatury, nasłonecznienia, patogenów	precyzyjne decyzje, oszczędność wody i nawozów
AI/ML/DSS	wspomaganie decyzji agrotechnicznych	zwiększenie efektywności bez chemii
Robotyka/UAV	odchwaszczanie, monitorowanie upraw, zabiegi międzyrzędowe	obniżenie nakładów pracy i precyzja zabiegów
Precyzyjne opryski	ultraprecyzyjna aplikacja nawozów (i ŚOR)	skuteczność i minimalne straty biologicznych środków
OZE i magazyny energii	zasilanie urządzeń autonomicznych, niezależność energetyczna	redukcja emisji i kosztów operacyjnych
Blockchain	identyfikowalność, certyfikacja, śledzenie produktu	zaufanie konsumentów, eksport, przejrzystość łańcucha dostaw

Źródło: Kushwaha i in. 2024; Gupta i Pal 2025; Xiang 2024; Marques da Silva i in. 2023; van Sneebergen i in. 2024; Anusuya i in. 2024; van Hiltten i in. 2020

Przyszłe możliwości badań i rozwoju

W systemie ekologicznym zrównoważony rozwój, ochrona środowiska i dostarczanie żywności wysokiej jakości jest w centrum zainteresowania praktyki, ale także nauki rolniczej. Rolnictwo 4.0 to nowoczesny model produkcji rolnej wykorzystujący zaawansowane technologie, takie jak autonomiczne maszyny, drony i analizy danych, aby zwiększyć wydajność, precyzję i zrównoważony rozwój gospodarstw. Jego celem jest optymalizacja procesów rolniczych poprzez automatyzację, monitorowanie w czasie rzeczywistym oraz minimalizację zużycia zasobów, takich jak woda, nawozy czy energia. Wdrożenie elementów rolnictwa 4.0 umożliwia efektywne zarządzanie uprawami przy jednoczesnym poszanowaniu zasad ekologii i ochrony środowiska.

W literaturze naukowej podkreśla się znaczenie robotyzacji w rozwoju rolnictwa, wskazując na jej wpływ na efektywność produkcji oraz poszanowanie środowiska naturalnego (Pawlak 2010, Botta i in. 2022). Ponadto raport Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR 2023) zwraca uwagę na rosnącą rolę automatyzacji w rolnictwie, podkreślając jej potencjał w kontekście zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. W raporcie tym wskazano, że istnieje potrzeba zwiększenia świadomości i wiedzy rolników na temat korzyści płynących z wdrażania nowych technologii oraz zapewnienia odpowiedniego wsparcia edukacyjnego. Globalny ruch ekologiczny uznaje obecnie potrzebę innowacji technicznych. Ramy Organic 3.0 IFOAM wzywają do integracji narzędzi cyfrowych i robotyki w celu zwiększenia zrównoważonego

rozwoju. Rolnictwo ekologiczne 3.0 IFOAM to strategia rozwoju rolnictwa ekologicznego trzeciej generacji, którego integralną częścią są innowacje społeczne, ekonomiczne i technologiczne. Innowacje te muszą iść w parze z poszanowaniem podstawowych zasad rolnictwa ekologicznego, a więc troski o środowisko naturalne i zdrowie ludzi, ale także muszą uwzględniać dobrostan zwierząt i szeroko pojętą sprawiedliwość społeczną. Koncepcja ta promuje otwartość na nowe technologie – w tym cyfryzację, robotykę i sztuczną inteligencję – pod warunkiem, że wspierają one zrównoważony rozwój i odporność agroekosystemów (ang. *resilience*) (Arbenz i in. 2016). Tymczasem rolnictwo precyzyjne – zwłaszcza narzędzia oparte na sztucznej inteligencji – wykazuje duży potencjał w zakresie redukcji nakładów chemicznych (Serrano in. 2020).

Rozwiązania rolnictwa precyzyjnego (rolnictwa 4.0, rolnictwa cyfrowego) wykorzystujące robotykę, drony (UAV) monitorujące oraz prowadzące zabiegi agrotechniczne, a także autonomiczne roboty rolnicze, mogą znaleźć zastosowanie w precyzyjnych i ekologicznych praktykach rolniczych, odpowiadając na rosnące zapotrzebowanie na nowoczesne systemy automatyzacji rolnictwa. Shinde i in. (2024) wskazują na możliwości wykorzystania robotyki w przygotowaniu ziemi, siewie, operacjach międzyrzędowych (np. usuwanie chwastów, opryski, zbiory) oraz działaniach poźniowych, realizowanych za pomocą robotów polowych, dronów UAV agrotechnicznych i dronów UAV wykonujących monitoring upraw.

Technologie oparte na czujnikach, sztucznej inteligencji (AI), uczeniu maszynowym (ML), głębokim uczeniu (DL) oraz analizie dużych zbiorów danych wspierają rozwój systemu wspomagania decyzji (DSS). Autorzy tacy jak Gupta i Kumar (2025), Kushwaha i in. (2024), Morchid i in. (2025) oraz Navarro-Hellin i in. (2016) wskazują na to, że integracja technologii hybrydowych i cyfrowych otwiera nowe możliwości automatyzacji prac polowych i zwiększania plonów w systemach ekologicznej produkcji rolnej, co stanowi dynamicznie rozwijającą się dziedzinę badań w rolnictwie. Zastosowanie licznych czujników, wykorzystanie komercyjnych rozwiązań umożliwia tworzenie niedrogich urządzeń technologicznych dla rolników i naukowców pracujących nad rozwiązaniami rolnictwa precyzyjnego. Technologie autonomiczne, takie jak nowoczesne nośniki narzędzi rolniczych, odgrywają istotną rolę w zwiększaniu efektywności operacyjnej w rolnictwie. Systemy te umożliwiają ciągłą pracę bez konieczności interwencji człowieka, co pozwala na terminowe wykonywanie zabiegów agrotechnicznych nawet w nocy i w dni wolne od pracy. Dzięki temu zmniejszają zapotrzebowanie na pracę fizyczną, przyczyniając się do lepszego zarządzania czasem i zasobami (Shang i Xie 2024). Precyzja oferowana przez zaawansowane czujniki i systemy nawigacji jest szczególnie ważna w rolnictwie ekologicznym, gdzie ograniczone stosowanie chemikaliów wymaga dokładności w siewie oraz czynnościach pielęgnacyjnych (Naik i in. 2023). Automatyzacja w rolnictwie nie tylko redukuje obciążenie pracą, ale również umożliwia rolnikom skoncentrowanie się na bardziej złożonych aspektach zarządzania gospodarstwem, co przekłada się na wzrost ogólnej produktywności i efektywności (Rööß i in. 2018).

Podsumowanie

Rolnictwo ekologiczne stanowi dziś nie tylko alternatywę dla intensywnych systemów konwencjonalnych, ale coraz częściej staje się polem testowym dla najbardziej zaawansowanych innowacji rolniczych. Zasady produkcji rolnej narzucane przez systemy certyfikacji ekologicznej – w tym zakaz stosowania syntetycznych nawozów, środków ochrony roślin i regulatorów wzrostu – wymuszają poszukiwanie alternatywnych metod utrzymania produktywności i zdrowotności upraw. W rezultacie gospodarstwa ekologiczne, szczególnie te nastawione na osiąganie wysokiej jakości plonu i produktywności agroekosystemów, stają się naturalnym środowiskiem testowania innowacji technologicznych, które muszą łączyć skuteczność z pełnym poszanowaniem zasad ekologii. Technologie precyzyjnych oprysków opartych na teledetekcji, robotyce polowej, systemach IoT czy algorytmach sztucznej inteligencji, pozwalają weryfikować skuteczność nowych technologii zabiegów agrotechnicznych i zarządzania zasobami. W ten sposób rolnictwo ekologiczne staje się swego rodzaju poligonem doświadczalnym, w którym innowacje są testowane w warunkach najwyższych wymagań środowiskowych i etycznych. Co więcej, rozwiązania dedykowane rolnictwu ekologicznemu (precyzyjne zwalczanie chwastów, biologiczna ochrona roślin) coraz częściej przenikają do rolnictwa konwencjonalnego jako rozwiązania bardziej zrównoważone. Integracja technologii rolnictwa 4.0 z praktykami ekologicznymi tworzy unikalne możliwości budowania odpornych agroekosystemów, które mogą sprostać wyzwaniom XXI w.

Kluczowe technologie omówione w niniejszym rozdziale – od precyzyjnych systemów opryskiwania, przez robotykę polową, po inteligentne systemy nawadniania i blockchain – nie zastępują fundamentalnych zasad rolnictwa ekologicznego, lecz je wzmacniają. Pozwalają one na realizację celów ekologicznych z większą precyzją i efektywnością, jednocześnie redukując nakłady pracy i zwiększając stabilność produkcji.

Szczególne znaczenie ma możliwość precyzyjnego stosowania biologicznych środków ochrony roślin, które dotychczas były ograniczone przez niedoskonałość tradycyjnych metod aplikacji. Ultranowoczesne, precyzyjne systemy opryskiwania, połączone ze sztuczną inteligencją, otwierają nowe perspektywy dla biopreparatów i naturalnych regulatorów wzrostu.

Wdrażanie nowoczesnych technologii wiąże się często z wysokimi kosztami. Może być to istotna, jeśli nie najistotniejsza bariera we wdrażaniu nowoczesnych technologii autonomicznych w rolnictwie ekologicznym. Małe i średnie gospodarstwa ekologiczne, które dominują w strukturze rolnictwa w Polsce, często dysponują ograniczonym kapitałem inwestycyjnym i niższym poziomem mechanizacji, co utrudnia im dostęp do zaawansowanych, drogich technologii. Wydaje się więc konieczne opracowanie instrumentów wsparcia finansowego, które umożliwią tym gospodarstwom udział w procesie wdrażania cyfryzacji i innowacji autonomicznych w gospodarstwach rolnych. Wyzwania związane z wdrażaniem tych technologii – wysokie koszty

początkowe, potrzeba kształcenia rolników, konieczność adaptacji rozwiązań do lokalnych warunków – nie powinny przesłaniać ogromnego potencjału, jaki niosą dla przyszłości zrównoważonej produkcji żywności. Rolnictwo ekologiczne wspierane nowoczesnymi technologiami może stać się modelem dla całego sektora rolniczego, łącząc produktywność z odpowiedzialnością środowiskową.

Literatura

1. Anusuya K., Vijayakumar K., Martin M.L.J., Manikandan S.: Agrophotovoltaics: enhancing solar land use efficiency for energy food water nexus. *Renewable Energy Focus*, 2024, **50**, 100600; <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100600>
2. Arbenz M., Gould D., Stopes C.: *Organic 3.0 for truly sustainable farming and consumption*. IFOAM – Organics International. Bonn, Germany, 2016.
3. Bakker T., van Asselt C.J., Bontsema J., Müller J., van Straten G.: An Autonomous Weeding Robot for Organic Farming. W: Corke P., Sukkarieh S. (red.), *Field and Service Robotics. Results of the 5th International Conference FSR 2005*, Port Douglas, Australia, 29–31 July 2005. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 25. Springer, Berlin–Heidelberg, 2006, p. 579–590; https://doi.org/10.1007/11736592_48
4. Berbé A.K., Feledyn-Szewczyk B., Thalmann C., Wyss R., Grenz J., Kopiński J., Stalenga J., Radzikowski P.: Assessing the sustainability performance of organic and low-input conventional farms from Eastern Poland with the RISE Indicator System. *Sustainability*, 2018, **10**(6), 1792; <https://doi.org/10.3390/su10061792>
5. Bhullar G.S., Bautze D., Adamtey N., Ammann L., Cicek H., Goldmann E., Riar A., Rüegg J., Schneider M., Huber B.: What is the contribution of organic agriculture to sustainable development? A synthesis of twelve years (2007–2019) of the long-term farming systems comparisons in the tropics (SysCom). Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), 2021.
6. Botta A., Cavallone P., Baglieri L., Colucci G., Tagliavini L., Quaglia G.: A Review of robots, perception, and tasks in precision agriculture. *Applied Mechanics*, 2022, **3**(3): 830–854; <https://doi.org/10.3390/applmech3030049>
7. Café-Filho A.C., Lopes C.A., Rossato M.: Management of plant disease epidemics with irrigation practices. *Irrigation in agroecosystems*, 2019, pp. 123–140; <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78253>
8. Dayan F.E., Cantrell C.L., Duke S.O.: Natural products in crop protection. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2009, **17**(12): 4022–4034; <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2009.01.046>
9. European Commission 2021. EU agricultural outlook 2021–2031. Directorate-General for Agriculture and Rural Development. <https://agriculture.ec.europa.eu>
10. European Commission 2020. A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf
11. Eurostat 2023. Organic farming statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Organic_farming_statistics
12. European Environment Agency 2020. Pesticides in Europe: Overview of environmental and health impacts. <https://www.eea.europa.eu>
13. FAOSTAT 2022. Crops and livestock products: Poland. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat>
14. Gawęda D., Wesołowski M., Kwiatkowski C.A.: Weed infestation of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) depending on the cover crop and weed control method. *Acta Agrobotica*, 2014, **67**(1): 77–84; <https://doi.org/10.5586/aa.2012.015>
15. Ghaly A.E., Ibrahim M.M.: Mechanization of weed management in sugar beet. In: *Sugar beet cultivation, management and processing*, V. Misra i in. (eds). Springer Nature Singapore, 2022, pp. 327–367; https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_17
16. Gupta S., Dikshit A.K.: Biopesticides: An ecofriendly approach for pest control. *Journal of Biopesticides*, 2010, **3**(1): 186–188; <https://www.jbiopest.com/index.php/ojs/article/view/115>

17. Gupta G., Kumar Pal S.: Applications of AI in precision agriculture. *Discover Agriculture*, 2025, **3**, 61; <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00220-9>
18. Hosack P., Miller L.: Preventing and managing plant diseases. Master Gardner, University of Missouri Extension, 2017, **13**, 1-16.
19. Krupańek J., Gonzales de Santos P., Emmi L., Wollweber M., Sandmann H., Scholle K., Tran D.D., Schouteten J.J., Andreasen C.: Environmental performance of an autonomous laser weeding robot – a case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2024; <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02295->
20. Kumar V.V.: Biofertilizers and biopesticides in sustainable agriculture. In: *Role of rhizospheric microbes in soil: Volume 1: Stress management and agricultural sustainability*. 2019, pp. 377-398.
21. Kushwaha Y.K., Joshi A., Panigrahi R.K., Pandey A.: Development of a smart irrigation monitoring system employing the wireless sensor network for agricultural water management. *Journal of Hydroinformatics*, 2024, **26(12)**: 3224-3243; <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.241>
22. Lunsd N.T., Sowby R.B.: Smart irrigation controllers in residential applications and the potential of integrated water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2024, **150(1)**, 03123002; <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5871>
23. Majeed Y., Khan M.U., Waseem M., Zahid U., Mahmood F., Majeed F., ... Raza A.: Renewable energy as an alternative source for energy management in agriculture. *Energy Reports*, 2023, **10**, 344-359; <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.032>
24. Marques da Silva J.R., Esteves M., Silva A.B.: Mechanical weed control in row crops: Challenges for organic agriculture. *Agronomy Research*, 2023, **21(3)**: 234-248; <https://doi.org/10.15159/AR.23.145>
25. Moraru I., Zhivkov T., Coutts S., Li D., Sklar E.I.: A variable autonomy approach for an Automated Weeding Platform. *arXiv*, 2023; https://arxiv.org/abs/2303.05461?utm_source=chatgpt.com
26. Morchid A., Et-taibi B., Oughannou Z., El Alami R., Qjidaa H., Jamil M.O. et al.: IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events. *Scientific African*, 2025, **27**, e02527; <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02527>
27. Naik M.R., Teja R., Ramanjaneyulu A.V., Reddy D., Gopinath K.A., Ramasubramanian V., Sarath Chandran M.A., Ghosh S., Viswanatha Reddy K., Paramesha V., Kumar R., Kumar A.: Global research dynamics in organic farming: Emerging trends and scientometric insights. *Physics and Chemistry of the Earth (Parts A/B/C)*, 2026, **142**, 104223; <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104223>
28. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju: Rolnictwo 4.0. Identyfikacja trendów technologicznych. Warszawa 2023; ISBN 978-83-967832-1-9.
29. Navarro-Hellín H., Martínez-del-Rincon J., Domingo-Miguel R., Soto-Valles F., Torres-Sánchez R.: A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, **124**: 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003>
30. OECD-FAO 2023. OECD-FAO agricultural outlook 2023–2032. OECD Publishing; <https://www.oecd.org/agriculture>
31. Pawlak J.: Rola mechanizacji w rozwoju rolnictwa. *Roczniki Nauk Rolniczych, Seria G*, 2010, **97(2)**: 165-175; <https://doi.org/10.22630/RNR.2010.97.2.26>
32. Polish Ministry of Agriculture and Rural Development 2022. Report on the effects of geopolitical conditions on agricultural input prices in Poland; <https://www.gov.pl/web/agriculture>
33. Pretto A., Aravecchia S., Burgard W., Chebrolu N., Falck T., Fankhauser P., Popović M., Jenő J.: Building an aerial-ground robotics system for precision farming: An adaptable solution. *arXiv*, 2019; https://arxiv.org/abs/1911.03098?utm_source=chatgpt.com
34. Rakhmatulin I., Kamilaris A., Andreasen C.: Deep neural networks to detect weeds from crops in agricultural environments in real-time: A Review. *Remote Sensing*, 2021, **13(21)**, 4486; <https://doi.org/10.3390/rs13214486>
35. Riar A., Mandloi L.S.S., Messmer M., Poswal R.S., Bhullar G.S.: A diagnosis of biophysical and socio-economic factors influencing farmers' choice to adopt organic or conventional farming systems for cotton production. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**, 1289; <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01289>

36. Richard B., Qi A., Fitt B.D.: Control of crop diseases through Integrated Crop Management to deliver climate-smart farming systems for low-and high-input crop production. *Plant Pathology*, 2022, **71(1)**: 187-206; <https://doi.org/10.1111/ppa.13493>
37. Roy R., Sultana A., Ghosh S.: Biopesticides in sustainable agriculture: Current trends and future prospects. *Crop Protection*, 2023, **165**, 106175. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106175>
38. Röss E., Mie A., Wivstad M., Salomon E., Johansson B., Gunnarsson S., Wallenbeck A., Hoffmann R., Nilsson U., Sundberg C., Watson C.A.: Risks and opportunities of increasing yields in organic farming: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018, **38(2)**, 14; <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0489-3>
39. Russo E., Ferretti M., Freppaz M.: Impacts of agricultural chemicals on soil and water in Central Europe. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190(6)**, 347; <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6725-9>
40. Shang M., Xie J.: Agricultural sustainable development: Soil, water resources, biodiversity, climate change, and technological innovation. *Advances in Resources Research*, 2024, **4(2)**: 181-204; https://doi.org/10.50908/arr.4.2_181
41. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J., Paixão L., Carreira E., Pereira A., Carvalho M.: Climate changes challenges to the management of Mediterranean Montado ecosystem: Perspectives for use of precision agriculture technologies. *Agronomy*, 2020, **10(2)**, 218.
42. Shahi T.B., Dahal S., Sitaula C., Neupane A., Guo W.: Deep learning-based weed detection using UAV Images: A Comparative Study. *Drones*, 2023, **7(10)**, 624; <https://doi.org/10.3390/drones7100624>
43. Shamsiri R.R., Rad A.K., Behjati M., Balasundram S.K.: Sensing and Perception in Robotic Weeding: Innovations and Limitations for Digital Agriculture. *Sensors*, 2024, **24(20)**, 6743; <https://doi.org/10.3390/s24206743>
44. Togneri R., Dos Santos D.F., Camponogara G., Nagano H., Custodio G., Prati R. et al.: Soil moisture forecast for smart irrigation: The primetime for machine learning. *Expert Systems with Applications*, 2022, **207**, 117653.
45. WHO Regional Office for Europe 2021. Water safety and nitrate pollution in agricultural areas: A public health perspective; <https://www.who.int/europe>
46. van Sneebergen G., de Jong D., Djouhri-Toumi M., Holterman H.J., van de Zande J.: Spray drift evaluation of the Ecorobotix ARA spot sprayer: A technical performance comparison between the Ecorobotix ARA and the shielded bed sprayer (No. WPR-1276). *Wageningen Plant Research*, 2024.
47. van Hilten M., Ongena G., Ravesteijn P.: Blockchain for organic food traceability: Case studies on drivers and challenges. *Frontiers in Blockchain*, 2020, **3**, 567175; <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.567175>
48. Xiang L.: Artificial Intelligence (AI)-enabled robotic weeders in precision agriculture. *North Carolina State University Cooperative Extension*, 2024; <https://content.ces.ncsu.edu/artificial-intelligence-ai-enabled-robotic-weeders-in-precision-agriculture>

Adres do korespondencji:

dr Adam Kleofas Berbec
Zakład Agroekologii i Ekonomiki
IUNG-PIB
ul. Czarторыskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 824
e-mail: Adam.Berbec@iung.pulawy.pl

AUTOR

Adam Kleofas Berbec

ORCID

000-0002-4609-081X