

Anna Jędrejek

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

SATELITARNE SYSTEMY OBSERWACJI ZIEMI W SŁUŻBIE ROLNICTWA 4.0*

Słowa kluczowe: dane satelitarne, zdalny monitoring przestrzeni rolniczej, sensory, e-rolnictwo, Sentinel

Wstęp

Źródłem obserwacji kosmicznych są satelity znajdujące się na okołoziemskiej orbicie, które wyposażone są w sensory różnego typu. Dostarczają one informacji, które wykorzystywane są do monitoringu powierzchni i atmosfery Ziemi, z różną rozdzielczością przestrzenną i czasową. Satelity umożliwiają również nawigację poprzez określanie lokalizacji obiektów.

Pierwszym cywilnym sztucznym satelitą zaprojektowanym w celu dostarczania informacji o pokryciu Ziemi był Landsat-1, który został wyniesiony na orbitę w lipcu 1972 r. Wyposażony był w dwa sensory: RBV (ang. *Return Beam Vidicon*) oraz MSS (ang. *Multi-Spectral Scanner*) i dostarczał zdjęć z rozdzielczością odpowiednio: 80 m i 60 m. Za jego pomocą udało się zmapować ok. 75% powierzchni Ziemi (USGS 2023). Zobrazowania te znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, m.in.: rolnictwie, leśnictwie, geologii, hydrologii, geografii, kartografii, oceanografii i meteorologii. Satelita Landsat-1 zapoczątkowała amerykański program cywilnych misji kosmicznych Landsat, który prowadzony jest przez Narodową Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) we współpracy z amerykańską agencją naukowo-badawczą United States Geological Survey (USGS). Na przestrzeni ok. 50 lat funkcjonowania programu konstelacja Landsat składała się z 8 satelitów (Landsat Satellites 2024). Dzięki ciągłemu postępowi technicznemu możliwe jest budowanie urządzeń cechujących się zarówno większą precyzją (wyższą rozdziel-

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

czością fotografowania), jak i większą szybkością przesyłania danych. Dlatego wraz z każdym kolejnym satelitą parametry wykonywanych zobrazowań były coraz lepsze, wzrastała rozdzielczość i liczba kanałów spektralnych. W 2008 r. twórcy projektu podjęli decyzję o bezpłatnym udostępnieniu całego archiwum i nowo powstających zobrazowań Landsat, co przyczyniło się do rozwijania nowych usług, narzędzi i aplikacji w różnych dziedzinach nauki (Zhu i in. 2019). Aktualnie działającymi sensorami, które dostarczają danych są Landsat-8 i Landsat-9. Konfiguracja tych dwóch satelitów pozwala na zobrazowanie całej powierzchni Ziemi co 8 dni.

Do niedawna prowadzenie badań w rolnictwie z zastosowaniem teledetekcji satelitarnej było bardzo kosztowne, ponieważ sceny satelitarne o większej rozdzielczości przestrzennej i czasowej niż te oferowane w programie Landsat były dostępne jedynie komercyjnie. Dopiero realizacja programu Copernicus, zainicjowanego przez Komisję Europejską (KE) we współpracy z Europejską Agencją Kosmiczną (ang. *European Space Agency*, ESA), Europejską Organizacją Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych (ang. *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*, EUMETSAT), Europejskim Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF), agencjami UE oraz instytutem badawczym Mercator Océan – uruchomiła rodzinę misji kosmicznych Sentinel. To diametralnie zmieniło możliwości zastosowania danych satelitarnych w systemach monitoringu Ziemi. Zobrazowania wytworzone w ramach programu są udostępniane nieodpłatnie wszystkim zainteresowanym (20 lat programu Copernicus 2024), a do analizy i przetwarzania zdjęć stworzono darmowe (typu open-source) oprogramowanie SNAP (ang. *ESA's Sentinel Applications Platform*), przez co wszyscy chętni mają możliwość eksplorowania danych dostarczanych przez satelity teledetekcyjne. Aby jeszcze bardziej ułatwić korzystanie z danych, Komisja Europejska sfinansowała powstanie pięciu platform DIAS (ang. *Copernicus Data and Information Access Services*), których zadaniem jest dostarczanie użytkownikom stałego dostępu do danych i produktów programu Copernicus oraz skalowalnej chmury obliczeniowej z usługami i narzędziami do ich przetwarzania (DIAS comparison 2024). O ile dostęp do danych jest bezpłatny, to korzystanie z bardziej zaawansowanych usług jest już płatne, przez co używanie platform DIAS jest stosunkowo mało popularnym rozwiązaniem. Misje Sentinel-1 i Sentinel-2 dostarczają zobrazowań z największą rozdzielczością. Satelity radarowe misji Sentinel-1 są wyposażone w radar z syntetyzowaną aperturą rejestrującą w paśmie C (SAR-C), pozwalają na obserwację naszego globu niezależnie od pogody zarówno w dzień, jak i w nocy, w rozdzielczości od 5 do 25 m. Satelity wielospektralne Sentinel-2 dostarczają wysoko rozdzielczych zobrazowań optycznych wykonanych przy użyciu 13-kanałowego czujnika MSI (ang. *MultiSpectral Instrument*), umożliwiających obserwację powierzchni Ziemi z rozdzielczością zaczynającą się od 10 m. Pary tych satelitów pozwalają na obserwację Ziemi z rewizytą ok. 5–6 dni (na terenie Europy).

Innym ważnym źródłem danych wykorzystywanych w badaniach środowiskowych są satelity meteorologiczne używane głównie do monitorowania pogody. Historia eksploatacji tego typu sensorów sięga lat 60. Na przestrzeni lat podlegały one ciągłej modyfikacji – zwiększano ich rozdzielczość przestrzenną, czasową, spektralną i radiometryczną. Stanowią istotną część systemu obserwacyjno-pomiarowego, m.in. w meteorologii i hydrologii, dostarczając informacji o atmosferze (np. zachmurzeniu, opadach, temperaturze powietrza) i powierzchni ziemi (np. temperaturze powierzchni ziemi, pokrywie śnieżnej, wilgotności gleby). Do rejestracji założonych parametrów wykorzystuje się, w zależności od sensora, różne długości promieniowania elektromagnetycznego, od nadfioletu poprzez podczerwień do mikrofalowego. Dane pochodzące z satelitów meteorologicznych odgrywają bardzo istotną rolę w nowoczesnym rolnictwie. Z ich wykorzystaniem wykonywane są prognozy krótkoterminowe, a dane historyczne służą do analizy trendów zmian klimatycznych i zagrożeń.

Również prywatny sektor dostarczający komercyjnych zobrazowań satelitarnych rozwija się bardzo dynamicznie. Postęp techniczny pozwolił na zminiaturyzowanie sensorów, tym samym obniżył się koszt ich produkcji, dając początek nowej erze obserwacji Ziemi za pomocą tzw. nanosatelitów. Dostarczają one zdjęcia wykonane z bardzo dużą szczegółowością i krótkim czasem rewizyty obserwowanego miejsca.

Zastosowanie danych satelitarnych w rolnictwie

Teledetekcja i nawigacja satelitarna dały w latach 90. ubiegłego wieku możliwość szybkiego rozwoju rolnictwa 3.0. Technologie te były wykorzystywane w nowoczesnych maszynach rolniczych do optymalizacji procesów produkcji roślinnej i zwierzęcej. Połączenie danych pochodzących z czujników zamontowanych na sprzętach rolniczych, systemu pozycjonowania oraz satelitów pozwoliły na stworzenie nowej koncepcji rolnictwa precyzyjnego (Samborski i in. 2018), którego celem było obniżenie kosztów produkcji, zwiększenie produkcji żywności przy równoczesnym zmniejszeniu wpływu na środowisko. Pole produkcyjne/uprawne przestało być homogeniczną strukturą, a techniki rolnictwa precyzyjnego umożliwiły jego podział na strefy o zróżnicowanej produktywności, które zależą od wielu czynników (np. uziarnienia gleby, zawartości próchnicy, pH).

Kolejnym etapem rozwoju rolnictwa jest rolnictwo 4.0, zwane też inteligentnym rolnictwem/e-rolnictwem, w którym rozwijane są cyfrowe narzędzia teleinformatyczne do gromadzenia, przechowywania, analizy, udostępniania danych wytwarzanych w gospodarstwie oraz pochodzących z zewnętrznych źródeł (np. dane pogodowe) (Kobus-Cisowska i Dziedziński 2023, Kordowska i in. 2023). Postępująca automatyzacja procesów pomiarowych z zamontowanych czujników w gospodarstwie z wyznaczoną geolokalizacją powoduje powstawanie bardzo dużej liczby danych, które przesyłane są do chmur obliczeniowych/serwerów z wykorzystaniem internetu

rzeczy (IoT) lub sieci GSM. Następnie dane poddawane są obróbce przy użyciu dedykowanych programów komputerowych, w tym z zastosowaniem sztucznej inteligencji. Połączenie uzyskanych wyników z danymi pochodzącymi ze źródeł zewnętrznych (np. zobrażenia satelitarne, ostrzeżenia o agrofagach, dane pogodowe) daje rolnikowi pełną informację o gospodarstwie, szanse optymalizacji procesów produkcyjnych oraz umożliwia oszczędność zasobów.

Wykorzystanie zdjęć satelitarnych w rolnictwie pozwala na obserwację i monitorowanie różnych zjawisk w czasie rzeczywistym, takich jak: susza, wymarzenie, stan przezimowania, wykrywanie chorób roślin i szkodników, precyzyjne nawożenie, prognoza plonów oraz identyfikacja upraw. W zależności od rozdzielczości obrazu satelitarnego można to robić od skali globalnej do skali pola. Skuteczność monitoringu upraw rolniczych metodami teledetekcyjnymi opisano w bardzo wielu pracach naukowych i zademonstrowano w licznych projektach wdrożeniowych. Do tej pory powstało wiele naukowych opracowań i aplikacji wykorzystujących dane dostarczane przez różne satelity, w tym Sentinel-1 i Sentinel-2, ponadto ciągle prowadzone są badania analizujące potencjalne możliwości ich zastosowania. Realizowane eksperymenty dotyczą m.in. monitoringu wzrostu i rozwoju roślin uprawnych (Arslan i in. 2022, Zamani-Noor i Feistkorn 2022), klasyfikacji upraw (Asam i in. 2022, Snevajs i in. 2022), prognozy plonów (Hunt i in. 2019), możliwości oceny wpływu suszy na rośliny (Shorachi i in. 2022), wykrywania faz rozwojowych roślin (Lobert i in. 2023), możliwości określania właściwości i wilgotności gleby (Datta i in. 2021, Mirzaeitalarposhti i in. 2022), szacowania i prognozowania plonów (Řežník i in. 2020) oraz precyzyjnego nawożenia (Rokhafrouz i in. 2021, Michalski i in. b.d.). Pod względem zasięgów przestrzennych zobrażenia i analizy obejmują swymi granicami powierzchnie od całego kontynentu (Fendrich i in. 2023), przez poszczególne państwa (Htitiou i in. 2021) i regiony (Mimić i in. 2022, Jędrejek i Pudęłko 2023), aż do pojedynczych działek rolnych (Jędrejek i in. 2023). W naukach rolniczych informacje uzyskane z interpretacji zdjęć mogą również zapewnić wsparcie w zarządzaniu tym sektorem organom administracji publicznej.

e-rolnictwo

Paradygmat rolnictwo 4.0 to nowoczesne podejście do rolnictwa, które łączy tradycyjną wiedzę agronomiczną z zaawansowanymi technologiami cyfrowymi. Fundamentem e-rolnictwa są dane satelitarne, systemy pozycjonowania GNSS, sztuczna inteligencja, internet rzeczy oraz automatyzacja procesów.

Rolnictwo precyzyjne/inteligentne bez informacji satelitarnych nie mogłoby istnieć (tab. 1). Technologie te wykorzystywane są do nawigacji, ustalania lokalizacji, kartowania zróżnicowania przestrzennego działek rolnych. Aplikacje rolnictwa precyzyjnego w produkcji roślinnej różnicują pole uprawne na strefy w zależności od właściwości fizykochemicznych gleby i uzyskiwanego plonu. Aby wyznaczyć

jednolite obszary na działce rolnej, konieczne jest wykonanie wieloaspektowych analiz z wykorzystaniem danych pochodzących z różnych źródeł, tj. badania in-situ (próby glebowe, urządzenia do skanowania gleby z rejestracją współrzędnych geograficznych przy użyciu odbiornika GPS), badania zdalne (zobrazowania UAV, lotnicze, satelitarne). Na podstawie uzyskanych wyników, przy użyciu specjalistycznego oprogramowania GIS, przygotowywana jest mapa zmienności pola uprawnego, która przesyłana jest do kontrolera z odbiornikiem GPS zamontowanego na ciągnikach i maszynach rolniczych. Pozwala to rolnikowi w sposób precyzyjny wykonywać zabiegi agrotechniczne i aplikować w odpowiedniej ilości materiał siewny, nawozy i środki ochrony roślin.

W rolnictwie precyzyjnym oprócz danych z globalnych systemów nawigacji (GNSS) używanych do ustalania dokładnych aktualnych współrzędnych geograficznych, prowadzenia równoległego, wykorzystywane są również dane teledetekcyjne pochodzące z sensorów umieszczonych na satelitach, samolotach, dronach lub innych obiektach. Poprzez analizę promieniowania elektromagnetycznego emitowanego lub odbitego od łąnu badanych roślin możemy prowadzić monitoring stanu kondycji i warunków wzrostu upraw w czasie całego sezonu wegetacyjnego. Bardzo ważnymi zakresami długości fal wykorzystywanymi do oceny vitalności uprawianych roślin jest czerwień i bliska podczerwień (NIR), ponieważ zdrowe rośliny silnie pochłaniają światło czerwone w procesie fotosyntezy oraz jednocześnie intensywnie odbijają promieniowanie w zakresie NIR. Stanowią one podstawę do obliczenia najlepiej opisanego w literaturze i powszechnie wykorzystywanego wskaźnika wegetacji NDVI (Tucker 1979), który pozwala monitorować kondycję upraw, gęstość i aktywność fotosyntetyczną. Wskaźniki wegetacji to bezwymiarowe miary radiometryczne, które przedstawiają matematyczne zależności między wartościami promieniowania elektromagnetycznego odbijanego przez roślinność w różnych zakresach długości fal. W bazach naukowych można znaleźć bardzo dużo opisanych i dostosowanych do różnych zastosowań wskaźników wegetacji oraz ciągle powstają nowe modyfikacje (IDB 2023). W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wybranych platform cyfrowych, narzędzi i usług wykorzystujących dane satelitarne, wspomagających rolnictwo precyzyjne.

Dane pozyskiwane z satelitów pozwalają na monitorowanie wzrostu i rozwoju roślin (rys. 1) oraz warunków pogodowych wpływających niekorzystnie na plonowanie poprzez zbieranie i analizowanie szczegółowych statystyk z obrazów satelitarnych w ciągu całego sezonu wegetacyjnego (Jędrejek i Pudełko 2023). Dzięki danym teledetekcyjnym można określić, w jakiej fazie rozwoju znajduje się obserwowana uprawa. Wiedza o kondycji badanych roślin oparta na wskaźnikach wegetacji i innych danych pomocniczych pozwalają prognozować plony oraz wykrywać i szacować straty/szkody spowodowane niekorzystnymi warunkami atmosferycznymi.

Tabela 1

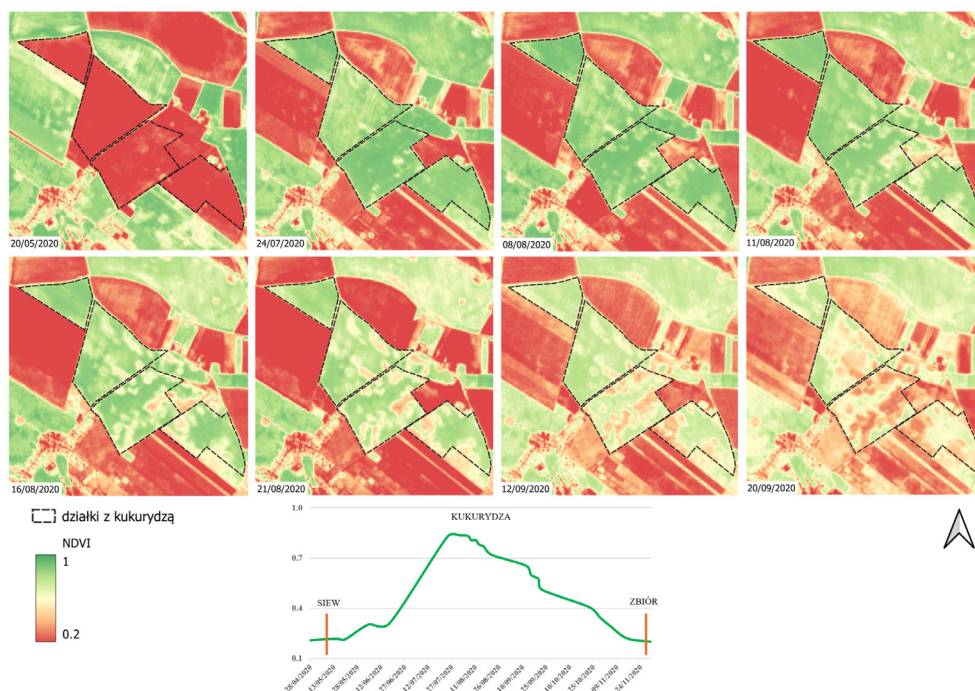
Zestawienie wybranych platform cyfrowych, narzędzi i usług wykorzystujących dane satelitarne

Nazwa serwisu	Krótki opis	Twórca/Dostawca	Słowa kluczowe
eDwin	bezpłatna internetowa platforma doradztwa i wspomagania decyzji w integrowanej ochronie roślin; w ramach platformy uruchomiono 4 e-usługi: wirtualne gospodarstwo, śledzenie pochodzenia produktów, raportowanie zagrożeń, udostępnianie danych meteorologicznych	Wielkopolski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Poznaniu oraz partnerzy z całej Polski	doradztwo rolnicze; rolnictwo precyzyjne
EO4I (Earth Observation for Agro-Insurance)	projekt finansowany przez Europejską Agencję Kosmiczną, którego celem była identyfikacja aktualnych i przyszłych potrzeb branży agroubezpieczeń oraz zbudowanie narzędzi do detekcji anomalii we wzroście roślin, szacowanie wielkości biomasy, klasyfikacji upraw	VITO Remote Sensing, GeoVille GmbH	ubezpieczenia rolnicze
System Monitorowania Obszaru	wewnętrzny system ARiMR do weryfikacji deklaracji rolników o uprawach	Agencja Modernizacji i Restrukturyzacji Rolnictwa	kontrola zasiewów
SATMIROL	zakończony projekt naukowy, którego celem było zbudowanie algorytmu do szacowania na podstawie zdjęć satelitarnych głównych upraw rolnych i ogrodnich w Polsce w latach 2019–2021	Główny Urząd Statystyczny, Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Instytut Geodezji i Kartografii	klasyfikacja upraw
FARMPORTAL	komercyjna aplikacja oferuje: kalkulator nawożenia, mapy nawożenia, stały monitoring stanu uprawianych roślin, integrację ze stacjami pogodowymi i czujnikami, alarmy pogodowe, prowadzenie i gromadzenie dokumentacji działek rolnych, rejestr zabiegów i kosztów produkcji, integracja z monitoringiem GPS	Agri Solutions Sp. z o. o.	kompleksowe zarządzanie gospodarstwem

cd. tab. 1

Nazwa serwisu	Krótki opis	Twórca/Dostawca	Słowa kluczowe
FARMTECH	komercyjny system do zarządzania działkami rolnymi w gospodarstwie; oferuje dostosowanie ilości materiału siewnego, nawozów i środków ochrony roślin do warunków panujących na polu uprawnym; firma ponadto wykonuje różnego rodzaju analizy gleby oraz oferuje doradztwo rolnicze	FarmTech Spółka z o.o.	rolnictwo precyzyjne
FERTISAT	komercyjny system do zarządzania działkami rolnymi w gospodarstwie; oferuje dostosowanie ilości materiału siewnego, nawozów i środków ochrony roślin do warunków panujących na polu uprawnym; możliwość integracji z maszynami rolniczymi wiodących marek	Wasat Sp. z o.o.	rolnictwo precyzyjne
InterSUCHO	bezpłatny system monitorujący suszę i stan wilgotności gleby w czasie rzeczywistym dla Europy Środkowej z prognozami krótkoterminowymi	Global Change Research Institute CAS, Mendel University w Brnie	susza rolnicza
IRRIGET	komercyjny system umożliwia odpowiedni dobór dawek i terminów nawadniania niezbędnych do optymalnego wzrostu uprawianych roślin	Wasat Sp. z o.o.	nawadnianie
RolnikON	komercyjny system do efektywnego zarządzania uprawą, gospodarką magazynową, hodowlą, finansami, energią i czasem użytkowników	Polski Instytut Rolnictwa sp. z o.o.	kompleksowe zarządzanie gospodarstwem
SatAgro	komercyjna platforma monitoringu satelitarnego i narzędzi rolnictwa precyzyjnego	SatAgro Sp. z o.o.	kompleksowe zarządzanie gospodarstwem
SoilEO	komercyjny system wykorzystuje zdjęciaach hiperspektralne i algorytmy sztucznej inteligencji do określania pH, zasobności gleby w magnez, potas i fosfor	QZ Solutions Sp. z o.o.	zdalne badanie gleby

Źródło: opracowanie własne



Rys. 1. Przykład serii czasowej zmian wartości wskaźnika NDVI w pełnym okresie wegetacji dla działek rolnych z kukurydzą w RZD Baborówko

Źródło: opracowanie własne

Uważa się, że na plonowanie roślin wpływa nawet kilkaset różnych, wzajemnie oddziałujących na siebie czynników. Są wśród nich m.in. czynniki agrotechniczne, siedliskowe oraz pogodowe (Kosaki i in. 1989, Hua i in. 2022). Czyli na obniżenie plonów wpływają nie tylko niekorzystne warunki meteorologiczne. Rolnik nie ma wpływu na warunki pogodowe, ale może w znacznym stopniu ograniczyć ich negatywny wpływ, stosując elementy rolnictwa 4.0, na przykład odpowiednie techniki uprawowe prowadzące do zwiększania zdolności gleby do retencji wody, a co za tym idzie polepszania plonowania. Natomiast w celu uniknięcia błędów podczas przygotowania gleby, nawożenia, siewu, doboru odmiany oraz ochrony roślin rolnik może skorzystać z wytycznych, szkoleń oraz doradztwa przygotowanego przez różne instytucje państwowe (m.in. IUNG-PIB, COBORU, ODR, IHAR-PIB), które mają za zadanie pomóc mu w codziennej pracy. Zdobyta w ten sposób wiedza wspiera rolników w identyfikacji czynników wpływających na plonowanie roślin, podnosi umiejętność szacowania szkód powstałych w wyniku różnych zjawisk atmosferycznych i korzystania z informacji dostarczanej przez zobrazowania satelitarne.

Narzędzia do wspomagania decyzji w rolnictwie

Dane satelitarne w połączeniu z danymi meteorologicznymi i glebowymi oraz modelami deterministycznymi i sztucznej inteligencji mogą posłużyć do zbudowania zestawu narzędzi do wsparcia decyzji w rolnictwie dla administracji publicznej. Program ESA Copernicus, a szczególnie bezpłatne zobrażenia Sentinel-1 i Sentinel-2 umożliwiają prowadzenie zdalnej obserwacji Polski z dużą rozdzielczością przestrzenną i czasową. Dokładając do tego wiedzę rolniczą zgromadzoną w instytutach rolniczych i ośrodkach doradztwa rolniczego, unikalne bazy danych in-situ – istnieje możliwość zbudowania obiektywnych narzędzi, które będą wspomagać organy administracji w prowadzeniu i monitorowaniu wspólnej polityki rolnej, szacowaniu i monitoringu wielkości produkcji roślinnej i zwierzęcej, ocenie szkód w uprawach rolnych powstałych na skutek niekorzystnych zjawisk atmosferycznych (Jędrejek i in. 2022). Dzięki połączeniu technik satelitarnych i obliczeniowych, zgromadzonych baz danych i wiedzy agronomicznej można utworzyć centralny, nieodpłatny system przestrzennej informacji i monitoringu działek rolnych dostępny dla producentów rolnych oraz administracji publicznej. Metody teledetekcji mogą być wykorzystywane jako system wspomagania decyzji administracyjnej w celu określenia bezpośredniego wpływu niekorzystnych warunków pogodowych na pola producentów, a także jako narzędzie do oceny efektów wprowadzanych zabiegów agrotechnicznych (Michalski i in. b.d.).

W Agencji Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa (ARiMR) były prowadzone pilotażowe prace nad wykorzystaniem danych satelitarnych do prowadzenia tzw. kontroli na miejscu, czyli sprawdzania deklaracji rolnika o uprawach na działkach rolnych z faktycznym stanem. Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/2116 z dnia 2 grudnia 2021 r. w sprawie finansowania wspólnej polityki rolnej, zarządzania nią i monitorowania jej oraz uchylenia rozporządzenia (UE) nr 1306/2013 (Dz.Urz. UE L 435 z 06.12.2021, z późn. zm) zobowiązało od początku 2023 r. wszystkie rolnicze agencje płatnicze, w tym ARiMR, do wdrożenia Systemu Monitorowania Obszaru (AMS, ang. *Area Monitoring System*) (tab. 1). Ma to usprawnić kontrolę administracyjną płatności obszarowych oraz zapobiec wyłudzeniom unijnych dopłat (AMS 2025).

Podsumowanie

Technologie cyfrowe umożliwiają rolnikom na całym świecie lepsze poznanie współzależności czynników wpływających na plonowanie roślin, tym samym poprawienie wydajności prowadzonych gospodarstw. Pełnią ważną rolę w racjonalnym wykorzystaniu materiału siewnego, środków ochrony roślin, nawozów oraz nawodnienia, wspierają tym samym bardziej zrównoważone zarządzanie zasobami. Cyfrowe rolnictwo bazuje na integracji danych pozyskiwanych z obserwacji satelitar-

nych, danych pogodowych, danych glebowych i danych pochodzących z czujników naziemnych (np. sondy wilgotności gleby), szybkim przetwarzaniu i udostępnianiu rolnikowi powstałej informacji. Na jej podstawie producent rolny może zdecydować o wykonaniu odpowiednich zabiegów agrotechnicznych. Teledetekcja satelitarna, systemy GNSS, IoT i AI stanowią cztery wzajemnie powiązane filary rolnictwa 4.0. Teledetekcja satelitarna dostarcza danych przestrzennych, czujniki IoT generują szczegółowe dane punktowe, systemy GNSS zapewniają dokładną geolokalizację prowadzonych obserwacji i zabiegów agrotechnicznych, a algorytmy AI wspomagają integrację oraz interpretację wszystkich źródeł danych oraz tworzenie różnego rodzaju modeli. Synergia tych czterech elementów buduje spójny, cyfrowy ekosystem umożliwiający precyzyjne, inteligentne i zrównoważone zarządzanie produkcją rolną.

Wdrożenie rozwiązań technologii satelitarnych wykorzystywanych w rolnictwie 4.0 do zarządzania gospodarstwem staje się coraz bardziej powszechne, jednak duża konkurencja wśród dostawców systemów/aplikacji nie sprawia, że te rozwiązania stają się tańsze. W większości są to systemy komercyjne z podobną funkcjonalnością różniące się często jedynie interfejsem użytkownika. Dają możliwość łączenia danych satelitarnych, meteorologicznych oraz dodatkowych danych o gospodarstwie na potrzeby e-rolnictwa. Pozwalają monitorować zabiegi agrotechniczne oraz rozwój uprawianych roślin w całym sezonie wegetacyjnym, a także budować historię uprawianych działek, w tym monitorować uzyskiwane zbiory. Korzystanie z cyfrowych technologii rolnictwa 4.0 pozwala na racjonalne/zrównoważone wykorzystanie zasobów oraz zmniejszenie wpływu rolnictwa na środowisko i zmiany klimatu.

Cyfrowa transformacja rolnictwa została już rozpoczęta i jest nieunikniona, ale ciągle jest brak regulacji zarówno krajowych, jak i unijnych, które jasno określałyby statut łańcuchów wartości dużych zbiorów danych rejestrowanych w gospodarstwach przez różnego rodzaju zainstalowane czujniki i przetwarzanych w chmurach obliczeniowych (Kosior 2020). Producenci maszyn rolniczych i środków produkcji sprzedają swoje produkty w pakiecie z narzędziami informatycznymi, które mają na celu wspierać rolników w podejmowaniu decyzji dotyczących prowadzonego gospodarstwa. Powstające informacje rolnicze w sposób niejasny są udostępniane, gromadzone, przetwarzane przez dostawców technologii rolniczych i cyfrowych, tworząc wspólne bazy danych wykorzystywane do różnych celów, m.in. do budowania dedykowanych, kompleksowych usług serwisowych i cyfrowych, które uzależniają rolnika od jednego dostawcy. Rolnicy obawiają się, że dane, które powstają w ich gospodarstwach mogą być użyte w niewłaściwy sposób, w tym wykorzystane przez konkurencję.

Literatura

1. AMS – System Monitorowania Obszaru – nowe narzędzie cyfrowe ARiMR – Agencja Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa – Portal Gov.pl Available; <https://www.gov.pl/web/arimr/ams---systemu-monitorowania-obszaru--nowe-narzedzie-internetowe-arimr> (accessed on 12 June 2025).

2. Asam S., Gessner U., Almengor González R., Wenzl M., Kriese J., Kuenzer C.: Mapping crop types of Germany by combining temporal statistical metrics of Sentinel-1 and Sentinel-2 time series with LPIS Data. *Remote Sensing*, 2022, **14**, 2981; DOI:10.3390/rs14132981.
3. Arslan İ., Topakcı M., Demir N.: Monitoring maize growth and calculating plant heights with Synthetic Aperture Radar (SAR) and Optical Satellite Images. *Agriculture*, 2022, **12**, 800; DOI:10.3390/agriculture12060800.
4. Datta S., Das P., Dutta D., Giri R.K.: Estimation of surface moisture content using Sentinel-1 C-Band SAR Data Through Machine Learning Models. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, **49**: 887-896, DOI: 10.1007/s12524-020-01261-x.
5. DIAS Comparison Available; <https://earsc.org/dias-comparison/> (accessed on 13 June 2024).
6. Fendrich A.N., Matthews F., Van Eynde E., Carozzi M., Li Z., d'Andrimont R., Lugato E., Martin P., Ciais P., Panagos P.: From regional to parcel scale: A high-resolution map of cover crops across Europe combining satellite data with statistical surveys. *Science of The Total Environment*, 2023, **873**, 162300; DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.162300.
7. Htatio A., Boudhar A., Chehbouni A., Benabdelouahab T.: National-scale cropland mapping based on phenological metrics, environmental covariates, and machine learning on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 2021, **13**, 4378; DOI:10.3390/rs13214378.
8. Hua S., Dal-Bianco M., Chen Z.H.: Editorial: Crop yield and quality response to the interaction between environment and genetic factors. *Frontiers in Genetics*, 2022, **13**.
9. Hunt M.L., Blackburn G.A., Carrasco L., Redhead J.W., Rowland C.S.: High resolution wheat yield mapping using Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **233**, 111410; DOI: 10.1016/j.rse.2019.111410.
10. IDB – Index DataBase; <https://www.indexdatabase.de/> (accessed on 22 December 2023).
11. Jędrejek A., Pudełko R.: Exploring the potential use of Sentinel-1 and 2 Satellite imagery for monitoring winter wheat growth under agricultural drought conditions in North-Western Poland. *Agriculture* 2023, **13**, 1798; DOI: 10.3390/agriculture13091798.
12. Jędrejek A., Jadczyśzyn J., Pudełko R.: Increasing accuracy of the soil-agricultural map by Sentinel-2 images analysis – case study of maize cultivation under drought conditions. *Remote Sensing*, 2023, **15**, 1281; DOI: 10.3390/rs15051281.
13. Jędrejek A., Koza P., Doroszewski A., Pudełko R.: Agricultural drought monitoring system in Poland–Farmers' assessments vs. monitoring results (2021). *Agriculture*, 2022, **12**, 536; DOI: 10.3390/agriculture12040536.
14. Kobus-Cisowska J., Dziedziński M.: Możliwości i wyzwania zastosowania cyfryzacji w rozwoju zrównoważonego, inteligentnego rolnictwa na przykładzie produkcji roślinnej. *Zagadnienia Doradztwa Rolniczego*, 2023, **112**: 28-41.
15. Kordowska M., Baranowski M., Pisarek J., Ziemacki Z., Wawer R., Czech T.: *Rolnictwo 4.0. Identyfikacja trendów technologicznych*. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Warszawa 2023, ss. 91.
16. Kosaki T., Wasano K., Juo A.S.R.: Multivariate statistical analysis of yield-determining factors. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1989, **35**: 597-607; DOI: 10.1080/00380768.1989.10434795.
17. Kosior K.: Łącuch wartości dużych zbiorów danych (big data) w rolnictwie – problemy i wyzwania regulacyjne. *Studia BAS*, 2020, s. 101-125.
18. Landsat Satellites; <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/> (accessed on 13 June 2024).
19. Lobert F., Löw J., Schwieder M., Gocht A., Schlund M., Hostert P., Erasmí S.: A deep learning approach for deriving winter wheat phenology from optical and SAR time series at field level. *Remote Sensing of Environment*, 2023, **298**, 113800; DOI: 10.1016/j.rse.2023.113800.
20. Michalski M., Turos P., Buszke B., Rybicki M., Stankiewicz M.: Wykorzystanie syntezy danych satelitarnych Sentinel-1 i Sentinel-2 do opracowania map zmiennego nawożenia azotem rzepaku ozimego. *Roczniki Geomatyki*, 2023, t. 21, **1(100)**: 31-47.

21. Mimić G., Živaljević B., Blagojević D., Pejak B., Brdar S.: Quantifying the effects of drought using the crop moisture stress as an indicator of maize and sunflower yield reduction in Serbia. *Atmosphere*, 2022, **13**, 1880; DOI: 10.3390/atmos13111880.
22. Mirzaei Talarposhti R., Shafizadeh-Moghadam H., Taghizadeh-Mehrjardi R., Demyan M.S.: Digital soil texture mapping and spatial transferability of machine learning models using Sentinel-1, Sentinel-2, and terrain-derived covariates. *Remote Sensing*, 2022, **14**, 5909; DOI: 10.3390/rs14235909.
23. Rokhafrouz M., Latifi H., Abkar A.A., Wojciechowski T., Czechowski M., Naieni A.S., Maghsoudi Y., Niedbała G.: Simplified and hybrid remote sensing-based delineation of management zones for nitrogen variable rate application in wheat. *Agriculture*, 2021, **11**, 1104; DOI: 10.3390/agriculture11111104.
24. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/2116 z dnia 2 grudnia 2021 r. w sprawie finansowania wspólnej polityki rolnej, zarządzania nią i monitorowania jej oraz uchylecia rozporządzenia (UE) nr 1306/2013 (Dz.Urz. UE L 435 z 06.12.2021, z późn. zm.).
25. Řezník T., Pavelka T., Herman L., Lukas V., Širůček P., Leitgeb Š., Leitner F.: Prediction of yield productivity zones from Landsat 8 and Sentinel-2A/B and their evaluation using farm machinery measurements. *Remote Sensing*, 2020, **12**, 1917; DOI:10.3390/rs12121917.
26. Samborski S., Dobers E., Gnatowski T., Gozdowski D., Jerzy K., Elliot S., Nieróbca A., Rafał P., Stępień M., Szatyłowicz J.: *Rolnictwo Precyzyjne*. Wyd. PWN, 2018, ss. 522.
27. Shorachi M., Kumar V., Steele-Dunne S.C.: Sentinel-1 SAR backscatter response to agricultural drought in the Netherlands. *Remote Sensing*, 2022, **14**, 2435; DOI:10.3390/rs14102435.
28. Snevajs H., Charvat K., Onckelet V., Kvapil J., Zadrazil F., Kubickova H., Seidllova J., Batrlova I.: Crop detection using time series of Sentinel-2 and Sentinel-1 and existing land parcel information systems. *Remote Sensing*, 2022, **14**, 1095; DOI:10.3390/rs14051095.
29. Tucker C.J.: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, **8**: 127-150; DOI:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
30. USGS Landsat 1; <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-1> (accessed on 4 August 2023).
31. Zamani-Noor N., Feistkorn D.: Monitoring growth status of winter oilseed rape by NDVI and NDYI derived from UAV-Based Red-Green-Blue Imagery. *Agronomy*, 2022, **12**, 2212; DOI: 10.3390/agronomy12092212.
32. Zhu Z., Wulder M.A., Roy D.P., Woodcock C.E., Hansen M.C., Radeloff V.C., Healey S.P., Schaaf C., Hostert P., Strobl P. et al.: Benefits of the free and open landsat Data Policy. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **224**: 382-385; DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.016.
33. 20 Lat Programu Copernicus; https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Poland/20_lat_programu_Copernicus (accessed on 12 June 2024).

Adres do korespondencji:

dr inż. Anna Jędrejek
Zakład Geomatyki
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Pulawy
tel. 81 47 86 899

e-mail: Anna.Jedrejek@iung.pulawy.pl