



TELEDETEKCJA SATELITARNA W ROLNICTWIE

SZANSE I MOŻLIWOŚCI

Opracowanie:

Orbitale sp. z o.o., październik 2019

Autorzy:

dr hab. inż. Przemysław Kupidura, prof. PW

dr hab. inż. Katarzyna Osińska-Skotak, prof. PW

dr hab. Andrzej Wójtowicz

Opracowanie graficzne:

Tomasz Gieysztor, Projekt 79

Szanowni Państwo,

Oddajemy w Państwa ręce broszurę przedstawiającą podstawowe zagadnienia związane z teledetekcją satelitarną, czyli z pozyskiwaniem, przetwarzaniem i interpretowaniem obrazów powierzchni ziemi z pułapu satelitarnego. Przybliżenie tej technologii wydaje się ważne, szczególnie w kontekście jej zastosowań w obszarze rolnictwa i rozwoju wsi, zarówno na poziomie indywidualnych gospodarstw, jak i powiązanych z nimi instytucji. Warto chociażby wspomnieć, że w niedalekiej przyszłości dopłaty bezpośrednie będą rozliczane na podstawie informacji ze zdjęć satelitarnych, a technologię tę starają się wykorzystywać towarzystwa ubezpieczeniowe obsługujące rolników.

Teledetekcja satelitarna jest znacznie łatwiejsza do zrozumienia, niż mogłoby się wydawać. Wystarczy opanować opisane na kolejnych stronach informacje, aby móc na podstawowym poziomie interpretować dane satelitarne, na przykład o stanie własnych upraw. Stosunkowo łatwo jest też nauczyć się porównywania kondycji roślinności na swoich polach, z roślinnością na innych nam znanych obszarach oraz samodzielnie oceniać skuteczność poszczególnych zabiegów agronomicznych czy przewag oferowanych na rynku odmian zbóż.

Dane przestrzenne powstałe na bazie analiz zdjęć satelitarnych mogą doskonale posłużyć w rolnictwie precyzyjnym, w tym w celu optymalizacji nawożenia lub nawodnień. Precyzyjna aplikacja nawozów i wody przynosi nie tylko znaczące oszczędności dla portfela, ale także pomaga chronić środowisko naturalne w Polsce.

Mam nadzieję, że przedstawiona w broszurze wiedza będzie dla Państwa zrozumiała i przydatna oraz zachęci Państwa do korzystania z rozwiązań z wykorzystaniem teledetekcji satelitarnej.

Wierzę, że warto poświęcić czas na zapoznanie się z technologią, która znacząco wpłynie na rolnictwo w nadchodzącej dekadzie.



Z poważaniem,

Grzegorz Pięta

p.o. Dyrektor generalny Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	5
2. Teledetekcja dla rolnictwa – przegląd zastosowań	6
2.1 Analiza stanu uprawy.....	6
2.2 Rolnictwo precyzyjne	6
2.2.1 Mapa aplikacji.....	8
2.2.2 Prognoza plonów.....	9
2.3 Analiza szkód.....	10
2.4 Analiza zagospodarowania działek.....	10
2.5 Identyfikacja upraw.....	12
2.6 Podsumowanie zastosowań dla rolnictwa.....	13
3. Podstawy teledetekcji satelitarnej.....	14
3.1 Sposób pozyskiwania zdjęć satelitarnych.....	14
3.2 Cechy zdjęć satelitarnych	17
3.2.1 Rozdzielczość przestrzenna	19
3.2.2 Rozdzielczość spektralna	20
3.2.3 Rozdzielczość czasowa	20
3.2.4 Koszty pozyskania zdjęć satelitarnych	21
3.2.5 Zdjęcia satelitarne a zdjęcia lotnicze (w tym z dronów)	22
4. Wybrane satelitarne systemy teledetekcyjne	24
4.1 Program Copernicus – satelity Sentinel	24
4.2 Program Landsat.....	26
4.3 Inne satelitarne systemy teledetekcyjne (w tym komercyjne)	28
4.4 Gdzie znaleźć i oglądać zdjęcia satelitarne?	28
4.4.1 Przyjazna aplikacja do przeglądania zdjęć satelitarnych – EO Browser	29
4.4.2 Oficjalne aplikacje programów Copernicus i Landsat.....	30
4.4.3 DIAS – Data and Information Access Services	30
5. Analizy danych teledetekcyjnych	32
5.1 Analiza wizualna.....	32
5.2 Wskaźniki istotne dla rolnictwa	33
5.2.1 Wskaźniki roślinności.....	33
5.2.2 Wskaźniki wilgotności	35
5.2.3 Analiza wieloczasowa	36
6. Zakończenie	38
Słownik pojęć:	39

1. WPROWADZENIE

Teledetekcja satelitarna zajmuje się pozyskiwaniem, przetwarzaniem, interpretacją i wykorzystaniem zdjęć satelitarnych, czyli obrazów powierzchni Ziemi wykonywanych z przestrzeni kosmicznej przez sztuczne satelity Ziemi. Obecnie funkcjonuje ponad 700 takich satelitów, zwanych teledetekcyjnymi. Codziennie dostarczają one olbrzymiej liczby zdjęć powierzchni każdego fragmentu Ziemi.

Charakterystyki zarówno satelitów, jak i samych zdjęć różnią się między sobą. Wynika to m.in. z różnorodności zastosowań takich obrazów. W niniejszym opracowaniu skupimy się na ich zastosowaniach w rolnictwie. Dzięki zdjęciom satelitarnym możliwa jest analiza sposobu użytkowania działki, analiza stanu upraw, nawożenie precyzyjne, szacowanie szkód powstałych w wyniku niekorzystnych zjawisk pogodowych, a także prognozowanie plonów. Można również analizować stan gleby, np. jej wilgotność.

Photo: ESA-DENMAN Productions



2. TELEDETEKCJA DLA ROLNICTWA – PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ

Zacniemy od przeglądu możliwości wykorzystania obrazów satelitarnych w rolnictwie. Niektóre z nich mogą wymagać znajomości specjalistycznych metod przetwarzania obrazów, często też specjalistycznego oprogramowania, a nawet sprzętu. Takie zadania warto zlecić specjalistom. Inne – prostsze – można wykonać samodzielnie, korzystając z darmowych zdjęć i bezpłatnego oprogramowania. Przyda się też wiedza, którą przedstawimy w dalszej części broszury.

Najpierw jednak opowiemy o zastosowaniach ważnych z punktu widzenia indywidualnych rolników oraz instytucji zajmujących się monitoringiem dużych obszarów rolnych.

2.1 Analiza stanu upraw

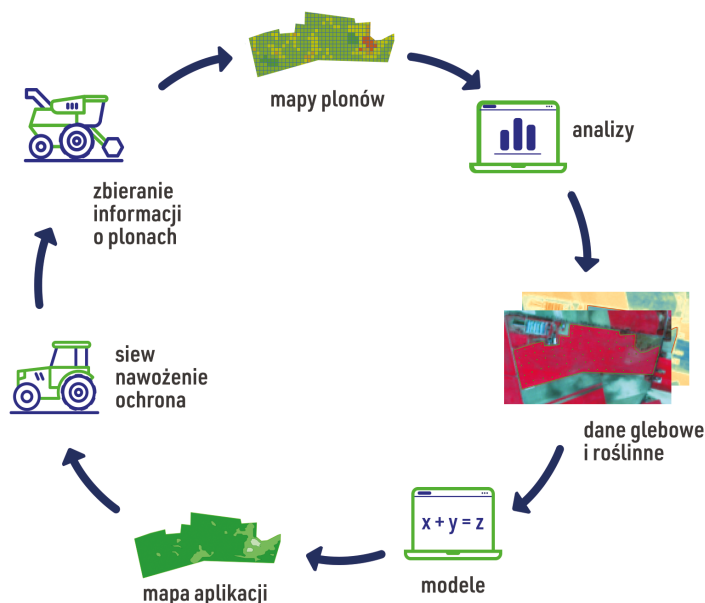
Zdjęcie satelitarne może posłużyć do zwykłej analizy wizualnej, czyli tzw. fotointerpretacji. Aby ją przeprowadzić, wystarczy wyświetlić obraz działki w odpowiednim programie, najlepiej pod postacią obrazu barwnego lub obliczonego wcześniej wskaźnika roślinności określającego stan uprawy. Już sam przegląd takiego obrazu pozwala na przybliżoną ocenę stanu roślinności, co zostanie szczegółowo wytłumaczone na ilustracjach poświęconych analizie wizualnej i wskaźnikom roślinności. Dzięki analizie szeregu czasowego, czyli serii zdjęć z poszczególnych dat w sezonie wegetacyjnym, można powiedzieć, czy uprawa rozwija się prawidłowo i równomiernie. W przypadku problemów łatwo zidentyfikować obszary, które z jakichś względów są słabiej rozwinięte i podjąć adekwatne decyzje agronomiczne. Można także porównywać stan roślinności na różnych działkach. Mając przy tym wiedzę o stosowanych nawozach czy zasadzonej odmianie, można samodzielnie ocenić przewagi poszczególnych decyzji.

2.2 Rolnictwo precyzyjne

Bardziej zaawansowane zastosowanie technologii satelitarnej ma miejsce w rolnictwie precyzyjnym. Zdjęcia mogą dostarczyć wiarygodnej informacji o stanie uprawy, dzięki czemu możliwe jest rozsądne różnicowanie wysiewu nasion, dawek nawozu czy środków ochrony roślin, a nawet wody. Na podsta-

wie zdjęć satelitarnych, dzięki analizom wykonywanym we wcześniejszych latach, możemy również szacować wysokość spodziewanych plonów z danej działki rolnej.

Rysunek 1 przedstawia schemat wpisany w okrąg, ponieważ taki jest charakter działań w ramach rolnictwa precyzyjnego. W idealnym ujęciu to cykl zamknięty, w którym co roku zbiera się nowe doświadczenia, nowe dane pozwalające zwiększać dokładność modelu na kolejny okres. Cykl przebiega w następujący sposób: na początek potrzebne są informacje o glebie uzyskane z prób glebowych. Ze zdjęć satelitarnych można wnioskować o stanie uprawy, w szczególności jej wewnętrznym zróżnicowaniu na polu. Te informacje pozwalają stworzyć mapy aplikacji środków chemicznych i najczęściej są wykorzystywane w nawożeniu azotem. Nowoczesne rozsiewacze i opryskiwacze, wyposażone w mapy aplikacyjne, odpowiednio różnicują dawkę nawozu. Na koniec sezonu kombajn wyposażony w odpowiednie czujniki zlicza plony zbierane z pola. Na tej podstawie generowana jest mapa plonów, która pokazuje ilość zbiorów w każdym punkcie działki. Takie dane mogą być następnie wykorzystane do poprawienia modeli na przyszły sezon. Dzięki znajomości charakterystyki gleby oraz ilości zastosowanych środków na każdym fragmencie działki oraz ostatecznych plonów można ocenić zasadność poszczególnych strategii agronomicznych. W kolejnym roku można lepiej skalibrować modele decyzyjne, w wyniku czego stają się one coraz skuteczniejsze.



Rysunek 1. Schemat działania idealnego systemu rolnictwa precyzyjnego, obejmującego wszystkie jego ważne elementy.

Zaprezentowany powyżej schemat to optymalne rozwiązanie, pozwalające uzyskiwać najlepsze wyniki, ale rolnictwo precyzyjne przynosi dobre efekty, nawet jeśli jest stosowane „wrywkowo”. Na tyle dużo wiadomo o tym, jak powinny rozwijać się wybrane uprawy oraz w jaki sposób można stan rozwoju określać na podstawie obrazów satelitarnych, że taka kalibracja modelu decyzyjnego na podstawie danych historycznych nie jest niezbędna, choć bywa przydatna.

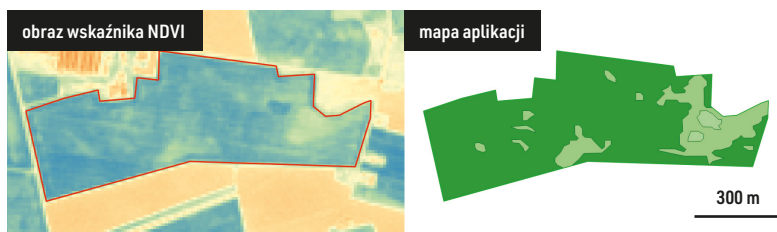
Zostało wspomniane, że precyzyjnie można także podlewać uprawy. Odpowiednie wskaźniki obliczone na podstawie obrazów satelitarnych pozwalają oszacować ich wilgotność (szczegóły techniczne zostaną wyjaśnione w dalszej części broszury). Dzięki takim wskaźnikom można zidentyfikować obszary, w których występują przesuszenia uprawy. Na tej podstawie, uwzględniając ograniczenia związane z możliwościami przedstawiania systemu podlewania, można tworzyć mapy do nawadniania precyzyjnego. Najlepsze wyniki można osiągnąć, łącząc tego typu informacje z prognozami meteorologicznymi. Te bardziej skomplikowane modele oferowane są przez specjalistyczne firmy. Jednak nawet samodzielna analiza wyłącznie wskaźników wilgotności pomoże w podejmowaniu bardziej świadomych decyzji dotyczących podlewania.

Dobrze działający system rolnictwa precyzyjnego wymaga odpowiedniego sprzętu, ale przynosi też znaczące oszczędności – zwłaszcza że zdjęcia satelitarne, stanowiące ważny element takiego systemu, można pozyskiwać i przetwarzać nieodpłatnie. Nie sposób też nie wspomnieć o ochronie środowiska – mniejsza ilość nawozów to lepsza jakość wód gruntowych i poprawa zdrowia nas wszystkich.

Poniżej są opisane dwa zadania rolnictwa precyzyjnego, dla których szczególnie przydatne jest wykorzystanie obrazów satelitarnych.

2.2.1 MAPA APLIKACJI

Mapy aplikacji to zapisane w odpowiednim formacie instrukcje dla maszyny rolniczej określające dawkę danego środka (nasion, nawozu, środka ochrony roślin czy wody) w zależności od lokalizacji na działce. Wymagają one szczegółowej informacji dotyczącej stanu uprawy lub/oraz gleby. Do określenia składu gleby póki co niezbędna jest analiza próbek pobranych z działki. Dane satelitarne nie dostarczają informacji o składzie chemicznym gleby, szczególnie z warstw, z których rośliny faktycznie pobierają składniki odżywcze. Jeśli jednak chodzi o stan roślinności, dane satelitarne są bardzo dobrym i tanim źródłem informacji.



Rysunek 2. Obraz wskaźnika NDVI oraz obliczona na jego podstawie mapa aplikacji nawozu azotowego.

Przykładem takiej mapy, opartej właśnie na zdjęciach satelitarnych, może być mapa aplikacji nawozów azotowych. Wymaga ona analizy stanu uprawy, którą można wykonać na podstawie wskaźnika roślinności, np. NDVI (szczegóły dotyczące tego wskaźnika znajdują się w rozdziale „Podstawy teledetekcji satelitarnej”). Jest to pokazane na rysunku 2. Ilość zastosowanych środków i skala zróżnicowania dawek jest indywidualną decyzją każdego gospodarza. Powinna być uzależniona od takich czynników, jak typ gleby, gatunek uprawy, rodzaj stosowanego nawozu czy zakładane plony.

2.2.2 PROGNOZA PLONÓW

Badania nad prognozą plonów są prowadzone od wielu lat w różnych ośrodkach naukowych na całym świecie, również w Polsce. Najczęściej opierają się one na porównaniu danych o wysokościach plonów z wartościami wskaźników roślinności (np. NDVI) obliczonymi na podstawie zdjęć wykonanych w odpowiednich okresach roku. Określenie ilościowej zależności między wysokością plonów a wartością wskaźnika roślinności na podstawie danych historycznych pozwala prognozować wysokość plonów na dany rok. Robi się to na podstawie analizy aktualnych zdjęć satelitarnych.

Tego typu badania – ze względu na ich statystyczny charakter – dotyczą często bardzo dużych obszarów (np. wielkości całego województwa). Jednak dzięki danym wynikającym ze stosowania technik rolnictwa precyzyjnego można budować precyzyjne modele prognostyczne nawet dla pojedynczych gospodarstw czy poszczególnych działek rolnych. Jednym z elementów niezbędnych do stworzenia takiego modelu są mapy plonów generowane przez kombajny w trakcie żniw. Ważne są również pozostałe elementy rolnictwa precyzyjnego: skład gleby, znajomość ilości zastosowanych środków i wreszcie obrazy satelitarne, np. w formie wskaźnika roślinności. Odpowiednia analiza tych danych może pozwolić zbudować szczegółowy model, dzięki któremu będzie można z dużą dokładnością obliczyć spodziewaną wysokość plonu z danej działki rolnej. Taka wiedza ułatwia planowanie nie tylko zbiorów, ale przede wszystkim ilości miejsca potrzebnego na ich składowanie; pomaga również w opracowaniu harmonogramu ich dalszego przetwarzania lub wczesnej kontraktacji sprzedaży. Im większy producent, tym większe potencjalne korzyści z prognozowania plonów.

Warto przy tym zaznaczyć, że precyzyjne prognozowanie plonów nie jest jeszcze w praktyce zbyt często stosowane. Wynika to przede wszystkim z braku świadomości producentów rolnych co do tego, jakie korzyści płyną ze szczegółowego zbierania informacji o swoich polach. Choć wielu rolników ma dostęp do wysokiej jakości maszyn rolniczych, w tym kombajnów, które umożliwiają generowanie map plonów, to niewielu z nich takowe faktycznie generuje i przechowuje. Wiedząc jednak, jak bardzo takie dane mogą być przydatne, warto je zbierać. Nawet jeśli samemu nie potrafi się ich wykorzystać, można je przekazać zespołom badawczym i tym samym wspomóc kalibrowanie modeli naukowych. Po jakimś czasie nowa wiedza trafi w ręce praktyków i będzie można z niej skorzystać.

2.3 Analiza szkód

Analiza roślinności na podstawie obrazów satelitarnych pozwala oceniać straty wynikające z różnego rodzaju czynników klimatycznych, takich jak złe przezimowanie czy susza. To bardziej skomplikowane zadanie niż zwykła ocena stanu uprawy. Należy umieć ocenić prawidłowy stan uprawy, żeby stwierdzić, czy rzeczywiście doszło do uszkodzeń, a także zidentyfikować ich przyczynę. Taka analiza wymaga zdjęć z okresu wystąpienia uszkodzeń, ale również sprzed tego czasu, a także z innych lat, w których wystąpiły (lub nie) określone czynniki (jak susza czy wymarzenie). Do tego potrzebne mogą być również dane meteorologiczne, dzięki którym można ocenić, czy w ogóle (i w którym momencie) wystąpiły czynniki mające wpływ na powstałe szkody. Możliwość oceny skali szkód na polu bez kontroli na miejscu jest przydatna z punktu widzenia pojedynczego gospodarstwa. Jest ona jednak niezbędna przede wszystkim dla zakładów ubezpieczeń, które danymi satelitarnymi mogą wspierać proces likwidacji szkód.

2.4 Analiza zagospodarowania działek

Ciekawym zastosowaniem zdjęć satelitarnych z punktu widzenia instytucji nadzorujących duże obszary ziemi, na przykład agencji rolnych, jest identyfikacji pokrycia terenu. Dzięki informacjom pochodzącym z rozmaitych obrazów spektralnych (zawierających dane dotyczące odbicia w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego) możemy określić, czy dany obszar to odkryta gleba, czy też roślinność, a także jakiego jest typu i w jakim stanie. Analiza wieloczasowa przeprowadzona na serii zdjęć pozwala prześledzić zmiany pokrycia terenu w czasie. Prawidłowa analiza takiej informacji umożliwia identyfikację upraw lub ocenę prawidłowości prac rolnych wykonywanych na działce. Do niektórych zadań w zupełności wystarczą jednak pojedyncze zdjęcia. Kilka przykładów przedstawiono poniżej.

WYKRYWANIE ZADRZEWIEN

Na nieuprawianych odpowiednio obszarach rolnych może pojawić się wtórna sukcesja drzew. W sytuacji, gdy drzewa osiągną znaczny stopień rozwoju, przywrócenie działki do stanu umożliwiającego produkcję rolną może być bardzo kosztowne. Zdjęcia satelitarne pozwalają zidentyfikować takie zadrzewienia. Przy odpowiednio dużej rozdzielczości obrazów możliwe jest ich wykrycie nawet we wczesnym stadium rozwoju, co pozwoli na odpowiednio szybką reakcję.

Co więcej, dzięki archiwom zdjęć (np. Landsat) takie analizy można wykonywać nawet dla okresów sprzed kilkunastu czy kilkudziesięciu lat, co pozwala porównywać aktualny stan zagospodarowania z historycznym, np. z początku dzierżawy czy chwili kupna gruntu.

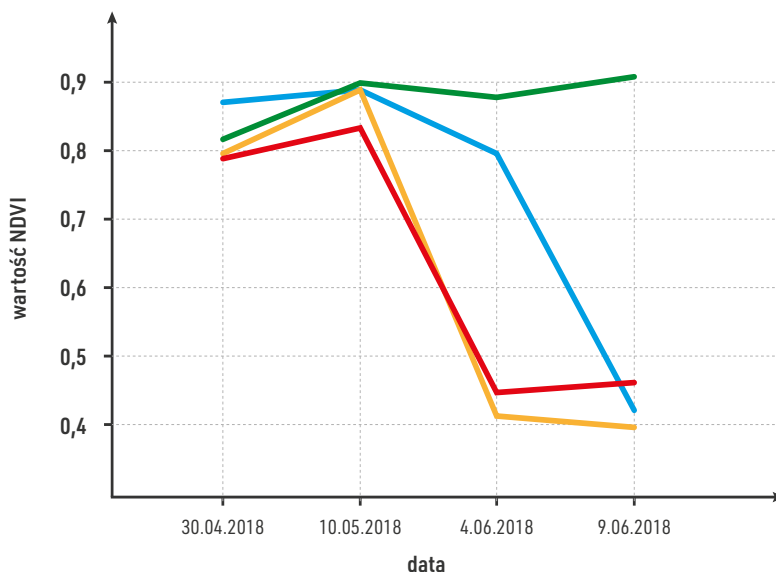
ANALIZA DOBRYCH PRAKTYK ROLNYCH

Prace rolne wpływają na stan gleby lub uprawy w taki sposób, że zmieniają wygląd danego obszaru na zdjęciach satelitarnych. Dzięki temu można monitorować, czy są wykonywane odpowiednio i terminowo. Tego typu analiza wymaga szeregu zdjęć z różnych okresów. Im większa rozdzielczość czasowa zdjęć (czyli im częściej wykonywane są takie zdjęcia), tym większa precyzja samej analizy.

Przykładem może być koszenie łąk. Rolnicy uzyskujący dopłaty do trwałych użytków zielonych mają obowiązek wykosić łąki do końca lipca. Wykoszenie łąki jest dobrze widoczne na obrazie satelitarnym, ponieważ w jego wyniku spada wartość odbicia w bliskiej podczerwieni (skoszona, sucha trawa odbija tego promieniowania znacznie mniej niż zdrowa, wciąż rosnąca). Można to zaobserwować, analizując wartości NDVI – jednego z najbardziej popularnych wskaźników roślinności.

Przeanalizujmy kształt wskaźnika roślinności na czterech działkach (rysunek 3). Średnie wartości NDVI na tych działkach rosną między datami pierwszego i drugiego pomiaru. To wynik rozwoju roślinności i wzrostu biomasy. W kolejnym punkcie (4 czerwca) działki czerwona i żółta mają już obniżone wartości NDVI, co znaczy, że zostały wykoszone. Natomiast dla działki zaznaczonej kolorem niebieskim spadek wartości wskaźnika można zobaczyć dopiero 9 czerwca, co oznacza, że została ona wykoszona między 4 a 9 czerwca. Z kolei działka zaznaczona na zielono ma wysokie wartości NDVI na wszystkich czterech obrazach, co pozwala stwierdzić, że nie została wykoszona w tym okresie.

Rysunek 3. Średnie wartości NDVI dla czterech zaznaczonych wyżej działek. Obserwując znaczący spadek wartości, możemy określić czas, w którym dana działka została wykoszona.



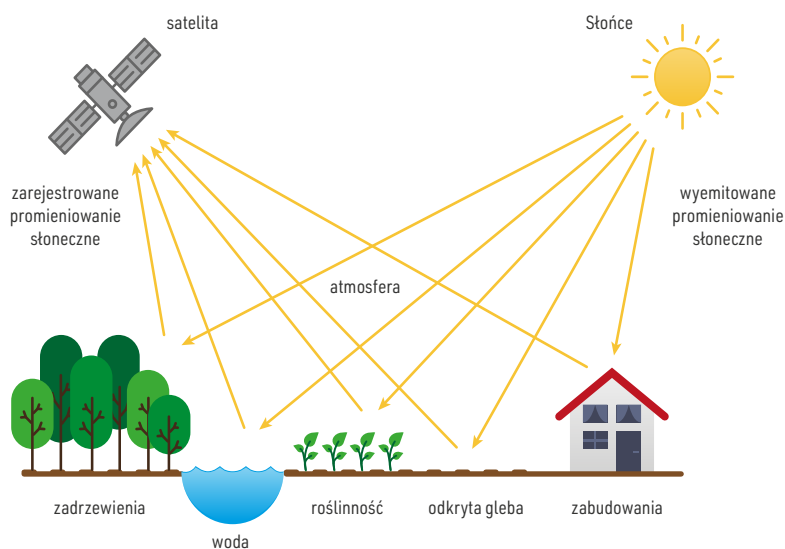
2.5 Identyfikacja upraw

Kolejnym zastosowaniem analizy wieloczasowej obrazów satelitarnych jest identyfikacja upraw. Ta funkcjonalność jest przydatna bardziej z punktu widzenia instytucji zarządzających ziemią lub dla ubezpieczycieli. Pojedyncze zdjęcie niewiele mówi o gatunku uprawy. Czasem nawet odróżnienie roślin okopowych od zbóż może stwarzać problemy. Jednak analiza wielu zdjęć wykonanych w ciągu całego sezonu pozwala na obserwację okresów, w których następują kolejne fazy rozwoju uprawy. To natomiast, przy znajomości charakterystyki okresów fenologicznych poszczególnych upraw, pozwala identyfikować nawet poszczególne gatunki upraw. Przy tym zadaniu bardzo ważna jest rozdzielczość czasowa zdjęć (pojęcie to jest szczegółowo wyjaśnione we wprowadzeniu teoretycznym). Im częściej są one wykonywane, tym większa jest szczegółowość tego rodzaju analizy. W niektórych okresach różne uprawy na zdjęciach mają zbliżony wygląd, co uniemożliwia ich identyfikację na podstawie pojedynczego zdjęcia. Jednak w kolejnych terminach część upraw coraz bardziej się różnicuje i mając kilka zdjęć, można te uprawy od siebie odróżnić.

W tym celu przydatne mogą być także obrazy radarowe. Ich bardzo dużą zaletą jest to, że mogą być wykonywane nawet przy całkowitym zachmurzeniu. Dzięki temu są pozyskiwane z bardzo dużą rozdzielczością czasową, czyli często. Wprawdzie takie obrazy raczej nie dostarczą informacji o stanie roślinności, ale znacząco wspomogą analizę rozwoju fenologicznego uprawy.

2.6 Podsumowanie zastosowań dla rolnictwa

Dane satelitarne mogą być przydatne zarówno dla indywidualnego rolnika (fotointerpretacja, zdjęcia dla rolnictwa precyzyjnego), jak i dla instytucji, dla których istotne jest monitorowanie dużych obszarów ziemi. Część zastosowań, jak chociażby analiza szkód, jest przydatna dla wszystkich. Warto wspomnieć, że połączenie różnych funkcjonalności teledetekcji satelitarnej (analiza zagospodarowania terenu, dobre praktyki rolne, identyfikacja upraw) stanowi podstawę tworzenia narzędzi wspomagających rozliczanie dopłat bezpośrednich. Biorąc pod uwagę skalę inwestycji w rozwój systemu satelitarnego (budżet samego programu Copernicus na lata 2021-2027 to 5,8 mld euro), nie ma wątpliwości, że jego zastosowanie będzie coraz powszechniejsze, także w rolnictwie. W tym kontekście warto zrozumieć, na czym polega teledetekcja i świadomie obserwować jej wpływ na rozwój sektora.



Rysunek 4. Schemat powstawania obrazu satelitarnego na podstawie odbitego promieniowania słonecznego.

3. PODSTAWY TELEDETEKCJI SATELITARNEJ

W dalszej części broszury znajdują się wyjaśnienia wszystkich pojęć, które zostały wcześniej wspomniane. Warto zacząć od tego, w jaki sposób powstaje obraz satelitarny i jaką ma strukturę.

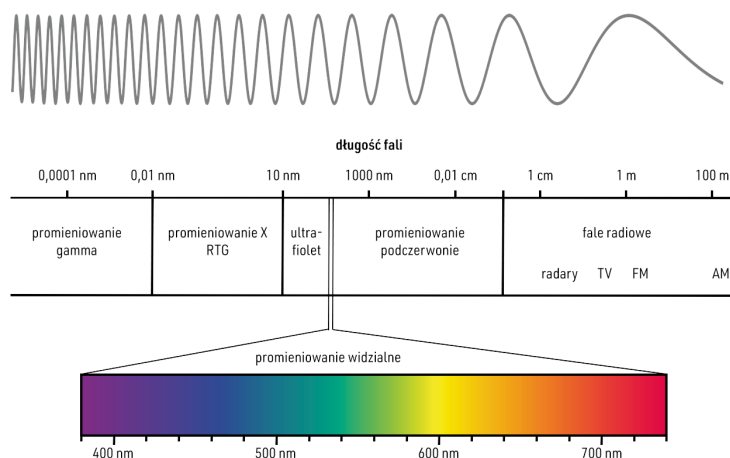
3.1 Sposób pozyskiwania zdjęć satelitarnych

Najczęściej zdjęcia satelitarne powstają w wyniku rejestracji promieniowania słonecznego odbitego od powierzchni Ziemi (rysunek 4).

Różne obiekty w różny sposób odbijają to promieniowanie, co zależy od ich właściwości. W przypadku roślinności może to być zawartość chlorofilu, biomasa lub wilgotność. Tak jak patrząc na uprawę potrafimy ocenić, czy już wykiełkowała, czy jest zdrowa bądź dojrzała, tak też można to zobaczyć na zdjęciach satelitarnych. Tyle tylko, że pod pewnymi względami z kosmosu widać więcej i wyraźniej.

Po pierwsze, zdjęcia satelitarne składają się najczęściej z kilku jednocześnie wykonanych obrazów, tzw. kanałów spektralnych. Każdy z nich przedstawia powierzchnię Ziemi w innym zakresie spektrum odbitego promieniowania słonecznego. Tego typu zobrazowania składające się z wielu kanałów spektralnych nazywamy wielospektralnymi.

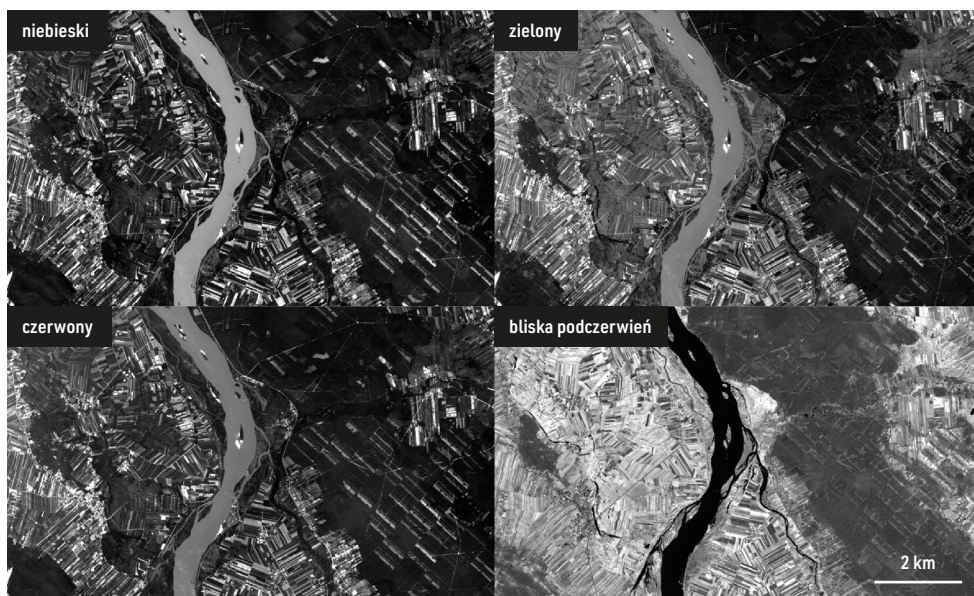
Rysunek 5. Zakres promieniowania elektromagnetycznego z zaznaczonym pasmem widzialnym. Ludzkie oko rejestruje promieniowanie tylko w bardzo wąskim zakresie. Jednak dzięki odpowiednim urządzeniom (kamerom i antenom) możemy rejestrować promieniowanie w pozostałych zakresach.



Liczba, a przede wszystkim rodzaj rejestrowanych zakresów w takim obrazie wielospektralnym są bardzo ważne z punktu widzenia potencjalnych zastosowań. Najczęściej są to zakresy widzialne: niebieski, zielony i czerwony. To zakresy promieniowania, w których postrzegamy świat oczami. Jednak to tylko niewielka część promieniowania elektromagnetycznego. Ilustruje to rysunek 5. Widzimy na nim zaznaczony zakres promieniowania widzialnego, ale też inne zakresy promieniowania (niedostrzegalne dla ludzkiego oka).

Często kluczowych informacji dostarczają właśnie te inne zakresy, np. zakres podczerwieni. Dla naszych oczu promieniowanie podczerwone jest niewidoczne. Jesteśmy jednak w stanie budować kamery lub urządzenia, które mogą rejestrować to promieniowanie i na jego podstawie tworzyć obrazy – takie same, jak te w zakresach widzialnych. Przydatne bywa również promieniowanie radarowe (fale radiowe).

Przyjrzyjmy się rysunkowi 6. Zaprezentowano na nim 4 różne obrazy spektralne przedstawiające odbicie w zakresach promieniowania: niebieskiego, zielonego, czerwonego oraz bliskiej podczerwieni. Wszystkie obrazy zostały wykonane w tym samym momencie i przedstawiają dokładnie ten sam obszar. Jak widać, znacząco się różnią.

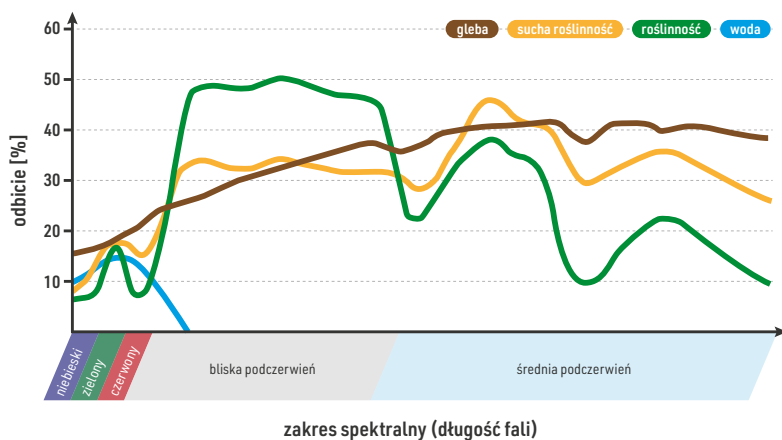


Rysunek 6. Cztery obrazy spektralne przedstawiające ten sam obszar w tym samym momencie.

Różnice biorą się stąd, że odmienne właściwości obiektów na powierzchni Ziemi, w tym roślin, wpływają na odbicie w różnych zakresach spektralnych. Dzięki temu każdy z tych zakresów wnosi dodatkową informację, chociażby na temat stanu uprawy lub gleby. Inaczej mówiąc, analizując jasność obiektu na poszczególnych obrazach spektralnych, możemy odczytać jego różne właściwości. Bardzo ważne jest zestawienie informacji o odbiciu od analizowanych obiektów w różnych zakresach spektralnych. Przykładowo, czasem w zakresach widzialnych roślinność i woda mogą wyglądać podobnie. Ale już w podczerwieni wyglądają zupełnie inaczej, ponieważ woda jest prawie czarna, zaś roślinność odwzorowuje się w jaśniejszych odcieniach szarości. Z kolei na obrazach w bliskiej podczerwieni roślinność może przypominać bardzo jasną glebę (np. piasek, wapień itp.). Tu z kolei wyjaśnienia dostarczy odbicie w zakresach widzialnych.

Dzięki prowadzonym od lat badaniom wiadomo, jakiego rodzaju obiekty i o jakich właściwościach odbijają promieniowanie w wybranych zakresach mocniej lub słabiej. Przedstawiają to tzw. charakterystyki spektralne. Ich przykłady zostały zaprezentowane na rysunku 7. Należy je czytać w następujący sposób: im wyższe wartości na krzywej, tym większe odbicie w danym zakresie spektralnym, a więc tym jaśniejszy jest obraz danego obiektu (np. uprawy) na odpowiednim obrazie spektralnym.

Rysunek 7. Charakterystyki spektralne wybranych typów pokrycia terenu. Przedstawiają one stopień odbicia promieniowania elektromagnetycznego w zależności od długości fali.



Jak widać, zdrowa roślinność zielona (zielona linia) odbija bardzo dużo promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni (zielona linia przebiega tam bardzo wysoko). To oznacza, że taka roślinność będzie bardzo jasna na obrazach bliskiej podczerwieni. Jednocześnie zdrowa roślinność odbija bardzo mało promieniowania czerwonego (zielona linia przebiega tam bardzo nisko). Oznacza to, że na obrazach

w zakresie czerwieni roślinność zielona będzie ciemna. Jeśli więc znajdziemy obszar, który jest bardzo jasny na obrazie bliskiej podczerwieni i ciemny na obrazie czerwieni, możemy być prawie pewni, że to roślinność.

Te dwa typy obrazów – w zakresie czerwieni oraz w bliskiej podczerwieni – są bardzo przydatne w zastosowaniach rolniczych, przede wszystkim przy analizie stanu upraw. Na ich podstawie są obliczane różnego rodzaju wskaźniki roślinności, często używane przy ocenie stanu upraw. Ważne są zwłaszcza obrazy w bliskiej podczerwieni, ponieważ różnego rodzaju istotne zmiany stanu roślin, takie jak wysuszenie, bardzo szybko i bardzo mocno wpływają na odbicie w tym zakresie promieniowania. Na rysunku 7 widać, że żółta linia suchej roślinności w zakresie bliskiej podczerwieni przebiega wyraźnie niżej niż zielona linia dla zdrowej roślinności zielonej. To znaczy, że sucha roślinność będzie na takim obrazie znacznie ciemniejsza niż zdrowa. Ponadto sucha roślinność odbija nieco więcej promieniowania czerwonego, dlatego widzimy ją jako żółtą lub brązową. Bardzo ważne jest jednak to, że zmiana odbicia w zakresie podczerwieni następuje znacznie szybciej, niż możemy to zobaczyć gołym okiem (czyli też w zakresie czerwonym). Wysuszenie uprawy, które dla człowieka jest widoczne po kilku, kilkunastu dniach, w zakresie bliskiej podczerwieni uwidacznia się już po kilkunastu godzinach.

Nie tylko obrazy bliskiej podczerwieni i czerwieni są przydatne w rolnictwie. Ważną rolę mogą pełnić również obrazy w zakresie średniej podczerwieni, ponieważ niosą ze sobą informacje na temat wilgotności obiektu – uprawy lub odkrytej gleby. Wykorzystując takie obrazy, możemy obliczać wskaźniki informujące o stresie wilgotnościowym uprawy lub miejscach, w których gleba jest zbyt sucha. Obrazy w zakresie zielonym umożliwiają natomiast szybkie sprawdzenie, czy w danym miejscu leży śnieg bądź lód.

Należy zatem pamiętać, że każdy obraz spektralny ma do spełnienia swoją rolę. Niektóre z nich (bliska i średnia podczerwień oraz zakres czerwieni) są nieco ważniejsze z punktu widzenia zastosowań w rolnictwie.

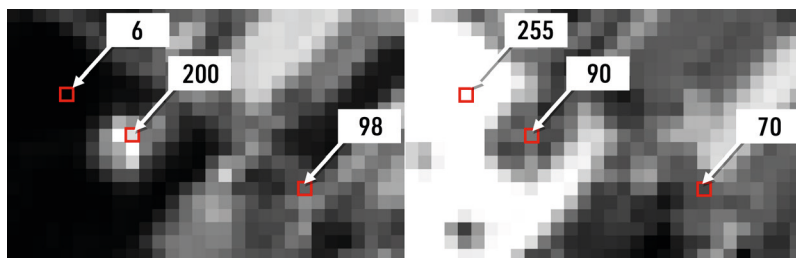
3.2 Cechy zdjęć satelitarnych

Zdjęcia satelitarne są wykonywane i przechowywane w formie cyfrowej. Pod pewnymi względami bardzo przypominają zdjęcia wykonywane popularnymi aparatami cyfrowymi, choćby takimi jak w telefonach komórkowych. Dzięki temu, że są w postaci cyfrowej, łatwo można je przesłać z pokła-

du satelity do którejś z naziemnych stacji odbiorczych lub z serwera przechowującego takie zdjęcia na nasz lokalny dysk w komputerze (o tym, jak to zrobić, opowiemy w dalszej części). Co ważne, ich jakość jest niezmienna w czasie. Nie trzeba się martwić, że wyblakną pod wpływem światła czy odkształcą się pod wpływem wilgoci, jak to zdarzało się w przypadku fotografii tradycyjnej. Można je też dowolnie kopiować i przetwarzać.

Ważną cechą obrazów cyfrowych jest to, że składają się z pikseli. Piksel (z jęz. ang. picture element) to najmniejszy, niepodzielny element obrazu. Każdy piksel na obrazie satelitarnym przedstawia jakiś fragment powierzchni Ziemi, najczęściej kwadrat, o określonej jednostkowej powierzchni, np. 10 x 10 m. Taki piksel ma przypisaną wartość (tzw. wartość radiometryczną), która określa, jak dużo promieniowania w danym zakresie odbiło się od fragmentu powierzchni Ziemi reprezentowanego przez dany piksel. Inaczej mówiąc, wartość radiometryczna na danym obrazie spektralnym oznacza jasność konkretnego obiektu w danym zakresie spektralnym. Zatem analizując te wartości, możemy pozyskiwać wszystkie informacje, które niosą ze sobą poszczególne zakresy spektralne.

Rysunek 8. Fragmenty dwóch obrazów spektralnych z zaznaczonymi pikselami o różnych wartościach. Najczęściej piksele o dużych wartościach przedstawiamy na obrazie w jasnych tonach szarości, a piksele o małych wartościach – w ciemnych.



Na rysunku 8 widzimy fragmenty dwóch satelitarnych obrazów spektralnych – w zakresach czerwonym (po lewej stronie) i bliskiej podczerwieni (po prawej). Kwadratowe piksele reprezentują fragmenty powierzchni Ziemi o rozmiarach 10 x 10 m. Widzimy również wskazane wartości radiometryczne dla wybranych pikseli. Na obydwu obrazach piksele przedstawiają te same fragmenty powierzchni, jednak ich wartości radiometryczne znacznie się różnią, ponieważ odmienne właściwości obiektów decydują o innym odbiciu w różnych zakresach spektralnych.

Istnieje wiele rodzajów zdjęć satelitarnych. Są one wykonywane przez różne satelity i mają czasem bardzo odmienne cechy, które decydują o tym, czy dane zdjęcie może być przydatne, czy nie. Poniżej zostaną omówione najważniejsze z tych cech.

3.2.1 ROZDZIELCZOŚĆ PRZESTRZENNA

Rozdzielczość przestrzenna to jedna z ważniejszych cech obrazu. Określa ona, jakiego rozmiaru obiekty możemy na nim zobaczyć. Im większa jest rozdzielczość przestrzenna, tym bardziej szczegółowy jest obraz i tym mniejsze obiekty da się na nim zauważyć. Na rysunku 9 przedstawiono zestawienie obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej (w barwach naturalnych, czyli takich, jakie widzielibyśmy oczami). Pierwszy obraz składa się z pikseli o rozmiarze 0,5 x 0,5 m. Na takim obrazie można dostrzec bardzo wiele szczegółów, nawet pojedyncze drzewa lub niewielkie zakrzaczenia. Taką rozdzielczością przestrzenną cechują się tylko niektóre odpłatne zdjęcia satelitarne, a zdjęcia lotnicze i z dronów mogą być jeszcze dokładniejsze. Obok widać obraz składający się z pikseli o rozmiarze 2,5 x 2,5 m. Wciąż jest na nim wiele szczegółów, takich jak pojedyncze drzewa, ale już znacznie mniej wyraźnych. Zdjęcia satelitarne o takiej rozdzielczości można znaleźć o wiele łatwiej, ale wciąż są one dość drogie. Dalej znajduje się obraz złożony z pikseli o rozmiarze 10 x 10 m. Tu już nie da się dojrzeć pojedynczych drzew, ale wciąż można rozpoznać pokrycie terenu, nawet na dość wąskich działkach. Całkiem dobrze widać też strukturę lasu. Mniej więcej tak wyglądają obrazy z satelity Sentinel-2 – obecnie bardzo popularne m.in. dlatego, że dostępne są nieodpłatnie. Wreszcie obraz złożony z pikseli o rozmiarze 30 x 30 m. Tu już nie widać węższych działek, trudno też analizować strukturę lasu. Jednak wciąż bez problemu można rozróżnić klasy pokrycia terenu, pod warunkiem że zajmują one odpowiednio duże obszary. Taką rozdzielczością charakteryzują się np. zdjęcia z serii Landsat (nieodpłatne). Ważne, że satelity z tej serii działają już od kilkudziesięciu lat, dzięki czemu możliwa jest rozległa analiza danych historycznych.



Rysunek 9. Obrazy teledetekcyjne tego samego obszaru o różnej rozdzielczości przestrzennej. W zależności od rozmiaru piksela widzimy więcej lub mniej szczegółów.

Warto zaznaczyć, że większa rozdzielczość przestrzenna nie zawsze jest lepsza. Wszystko zależy od potrzeb i potencjalnego wykorzystania takiego zdjęcia. Większość zastosowań obrazów w rolnictwie dotyczy analizy stanu upraw, często na dużych działkach. W takich przypadkach obrazy o pikselach 10×10 m, a nawet większych, są w zupełności wystarczające. Warto o tym pamiętać przed pobraniem zdjęcia na dysk. Im większa rozdzielczość, tym więcej miejsca potrzebnego na jego zapisanie. W jednym pikselu o rozmiarze 10×10 m mieści się aż 400 pikseli o rozmiarze $0,5 \times 0,5$ m. To znaczy, że dla wybranego obszaru obraz o pikselu $0,5 \times 0,5$ m będzie zajmował aż 400 razy więcej przestrzeni dyskowej niż obraz o pikselu 10×10 m. W sytuacji, gdy większa rozdzielczość nie wnosi istotnych informacji, optymalny będzie wybór obrazu o mniejszej rozdzielczości.

3.2.2 ROZDZIELCZOŚĆ SPEKTRALNA

Pod tym pojęciem kryje się m.in. liczba zakresów spektralnych rejestrowanych przez satelitę, a także ich rodzaj. To ważne, bo każdy taki zakres spektralny dostarcza informacji o innych właściwościach obiektów. Można więc powiedzieć, że im więcej takich zakresów – obrazów spektralnych – tym lepiej, gdyż z takiego zdjęcia możemy pozyskać więcej informacji. Jednak podobnie jak w przypadku rozdzielczości przestrzennej, należy brać pod uwagę to, do czego takie zdjęcia mają nam posłużyć. Istnieją zobrazowania, które zawierają kilkadziesiąt, a nawet kilkaset obrazów spektralnych – te ostatnie nazywamy hiperspektralnymi ze względu na bardzo dużą liczbę rejestrowanych zakresów. Aż tak duża rozdzielczość spektralna na ogół nie jest potrzebna. Wystarczą zobrazowania wielospektralne, a więc takie, które zawierają kilka, kilkanaście obrazów spektralnych. Bardzo ważne jest przy tym, żeby zawierały zakresy widzialne, zwłaszcza czerwony oraz podczerwony, w szczególności bliską i średnią podczerwień. Takie obrazy spektralne pozwalają obliczyć większość wskaźników roślinności i wilgotności przydatnych w analizie stanu roślinności lub gleby.

3.2.3 ROZDZIELCZOŚĆ CZASOWA

Roślinność czy uprawa to obiekty zmieniające się bardzo dynamicznie. W analizie stanu roślinności ważny jest więc czas. Dlatego kolejną istotną właściwością satelitów teledetekcyjnych jest rozdzielczość czasowa, czyli cecha mówiąca o tym, jak często dany satelita może wykonać zdjęcie określonego obszaru powierzchni Ziemi. To na tyle ważne, że część producentów wprowadza na orbitę okołoziemską kilka satelitów tego samego rodzaju, żeby móc częściej wykonywać takie zdjęcia. Przykładem jest europejski satelita Sentinel-2, a w zasadzie dwa bliźniacze satelity: Sentinel-2A oraz Sentinel-2B. Jeden z dwóch tych „bliźniaków” przelatuje nad każdym miejscem w Polsce co ok. 5 dni, a w konstelacji dwóch satelitów można uzyskać obraz nawet co 2-3 dni. Większość satelitarnych systemów teledetekcyjnych cechuje się rozdzielczością czasową od kilku do kilkunastu dni. Ze względu na dużą liczbę takich

systemów praktycznie codziennie przynajmniej jeden satelita przelatuje nad dowolnym punktem na Ziemi i – być może – rejestruje jego obraz. Można także zamówić celowane zdjęcie danego obszaru „na żądanie”, czyli niezależnie od harmonogramu przelotu danego satelity. Satelita będzie obserwował zadane miejsce, aż uda mu się zrobić niezachmurzone zdjęcie. To kosztowna funkcja, ale przydatna w okresach, kiedy bezchmurnych dni jest niewiele, a konieczne jest pozyskanie danych. Nic też nie stoi na przeszkodzie, by w analizie wykorzystywać zdjęcia pochodzące z różnych systemów satelitarnych.

Mówiąc o rozdzielczości czasowej systemów satelitarnych, konieczne trzeba podkreślić, że nie wszystkie zdjęcia nadają się do wykorzystania. Bardzo często przeszkodę stanowią chmury. Zatem im częściej dany satelita wykonuje zdjęcia, tym większa szansa, że trafi na bezchmurne niebo i wykona użyteczne zdjęcie. W zależności od klimatu i częstotliwości zachmurzenia taki problem może być bardziej lub mniej znaczący. W Polsce pochmurnych dni jest dość dużo, ale nie na tyle, żeby nie można było prowadzić obserwacji wystarczających dla potrzeb rolnictwa. Dla przykładu, z ok. 100 zdjęć Sentinela-2 wykonywanych w ciągu roku dla wybranego obszaru w Polsce ok. 20 nadaje się do wykorzystania. Warto wspomnieć, że najmniej zdjęć jest dostępnych w okresie od listopada do lutego, czyli wtedy, kiedy wegetacja i tak się zatrzymuje, a prace polowe nie są wykonywane.

3.2.4 KOSZTY POZYSKANIA ZDJĘĆ SATELITARNYCH

Ważną cechą zdjęć satelitarnych – z punktu widzenia ich praktycznego zastosowania – jest koszt ich pozyskania. Dzięki Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) oraz Amerykańskiej Agencji Kosmicznej (NASA) znaczna część zdjęć satelitarnych jest dostępna bezpłatnie (np. pozyskiwane przez satelity Sentinel i Landsat). Właściwie każdy z nas może z nich skorzystać. Pewnym ograniczeniem jest umiejętność przetworzenia zdjęć tak, żeby można z nich było wyciągać wiarygodne wnioski. Same zdjęcia nie stanowią przy tym kosztu. Te darmowe dane mają jednak swoje ograniczenia w zakresie istotnych parametrów technicznych. Dlatego też istnieją liczne i ciągle pojawiają się nowe konstelacje satelitów, które oferują dane odpłatne, charakteryzujące się lepszymi parametrami. Ich ceny są zróżnicowane w zależności od specyfikacji zdjęć, ale z punktu widzenia pojedynczego odbiorcy można powiedzieć, że na ten moment są to dane bardzo drogie. Wiąże się to przede wszystkim z koniecznością jednorazowego zakupu obrazów znacznie większego obszaru niż jest nam faktycznie potrzebny. Może to być nawet 100 km², co wiąże się z kosztem rzędu kilku tysięcy euro. Szczegółowe parametry poszczególnych odpłatnych systemów satelitarnych podsumujemy na końcu rozdziału.

3.2.5 ZDJĘCIA SATELITARNE A ZDJĘCIA LOTNICZE (W TYM Z DRONÓW)

Obrazowanie powierzchni Ziemi nie ogranicza się do zdjęć satelitarnych. W ostatnim czasie bardzo popularne stały się tzw. drony, czyli bezzałogowe statki powietrzne (BSP) wyposażone w kamery. Latają one zazwyczaj na bardzo niskim pułapie, czyli blisko ziemi (100-200 m). Dzięki temu zdjęcia, które wykonują, mają bardzo małe piksele (szerokości nawet kilka centymetrów), a w efekcie bardzo dużą rozdzielczość przestrzenną. Wiele firm dysponuje dronami wyposażonymi w zwykłe kamery RGB, a więc wykonującymi zdjęcia w barwach naturalnych. Takie kamery nie mają możliwości rejestracji kanałów podczerwonych, cechują się zatem bardzo ograniczoną przydatnością w analizie stanu upraw. Są jednak również dostępne drony wyposażone w kamery z możliwością rejestracji bliskiej podczerwieni. Niektóre z nich nawet automatycznie tworzą obrazy wskaźników roślinności. Zaletą dronów jest to, że teoretycznie można z nich korzystać w dowolnym, dogodnym terminie. Warto jednak zdać sobie sprawę z tego, że wartościowy nalot dronowy także wymaga dobrych warunków meteorologicznych, szczególnie niskiej siły wiatru oraz wyrównanych warunków oświetleniowych. Taki nalot wymaga również umówienia i opłacenia operatora z odpowiednim sprzętem. W szczycie sezonu czas oczekiwania na tego rodzaju usługę może być wydłużony. Decydując się na zakup drona z odpowiednią kamerą (to koszt rzędu kilku, kilkunastu tysięcy złotych), trzeba też liczyć się z koniecznością samodzielnego przetworzenia uzyskanych obrazów. Dla jednego pola może być ich kilkadziesiąt lub więcej. Można również skorzystać z jednego z płatnych serwisów przeznaczonych do tego celu.

Tradycyjne samoloty także są wykorzystywane do robienia zdjęć. Najczęściej są one wyposażone w profesjonalne kamery teledetekcyjne o bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej, niekiedy także spektralnej. Dzięki temu obrazy są bardzo szczegółowe oraz dostarczają bogatych informacji o powierzchni Ziemi, w tym o stanie upraw. Jednak wykonanie takich zdjęć jest bardzo drogie i z tego względu wykonuje się je dość rzadko, na przykład raz do roku.

Porównując zdjęcia satelitarne do tych z dronów czy samolotów, należy stwierdzić, że cechują się mniejszą szczegółowością, czyli słabszą rozdzielczością przestrzenną. To ważna cecha obrazów teledetekcyjnych, o ile duża szczegółowość jest potrzebna. Do analizy stanu uprawy w zupełności powinny nam wystarczyć np. obrazy Sentinel-2 o pikselu 10 x 10 m. Stan uprawy nie zmienia się przecież skokowo, a często wynika z ukształtowania terenu i typu gleby – taka rozdzielczość przestrzenna będzie zatem wystarczająca do analizy tego typu czynników. Na rysunku 10 zestawiono 2 obrazy: lotniczy, złożony z pikseli o rozmiarze 15 x 15 cm, oraz satelitarny (właśnie z Sentinela-2), złożony z pikseli o rozmiarze 10 x 10 m.



Rysunek 10. Porównanie dwóch obrazów tego samego obszaru: lotniczego i satelitarnego. Dla analiz wielkoobszarowych bardzo duża rozdzielczość przestrzenna obrazu lotniczego nie wnosi istotnych informacji.

Na obrazie lotniczym widać znacznie więcej szczegółów, jak chociażby zabudowania czy pojedyncze drzewa. Jednak rozdzielczość obrazu satelitarnego jest wystarczająca do analizy zagospodarowania działki czy stanu uprawy, a można go pozyskać nieodpłatnie. Wystarczy zwykły komputer z podłączeniem do Internetu oraz wiedza, gdzie takich zobrazowań szukać. Istotny jest także dostęp do danych archiwalnych. Na przykład satelity Sentinel-2 wykonują zdjęcia powierzchni Ziemi w trybie ciągłym i są one przechowywane na serwerach, do których każdy zarejestrowany użytkownik ma wolny dostęp. Dzięki temu można porównywać zdjęcia z różnych okresów, a na podstawie tych porównań wyciągać wnioski, także dotyczące upraw czy stanu zagospodarowania terenu.

Dobrym pomysłem może być wykorzystywanie obrazów z różnych źródeł, choćby satelitarnych i z dronów. Przykładowo, gdy ze względu na zachmurzenie nie ma dostępnego przydatnego zdjęcia satelitarnego, a pilnie potrzebna jest informacja o stanie uprawy, można wykonać nalot dronem z odpowiednią kamerą (o ile możliwe jest jego zorganizowanie w interesującym nas momencie). Należy przy tym pamiętać o dodatkowych kosztach takiej operacji.

4. WYBRANE SATELITARNE SYSTEMY TELEDETEKCYJNE

Istnieje dużo satelitarnych systemów teledetekcyjnych, których zdjęcia można wykorzystać w analizach rolniczych. Niektóre bardzo się od siebie różnią: dostępnością, ceną, rozdzielczością przestrzenną i spektralną. Poniżej zestawiono podstawowe cechy wybranych systemów i oferowanych przez nie obrazów.

4.1 Program Copernicus – satelity Sentinel

Program Obserwacji Ziemi Copernicus powstał z inicjatywy Komisji Europejskiej i Europejskiej Agencji Kosmicznej. Jednym z jego celów jest monitorowanie stanu środowiska. Jednym z ważniejszych zadań Programu Copernicus jest analiza powierzchni rolnych.

Bardzo ważnym elementem Programu Copernicus są satelity Sentinel. Jest to cała rodzina satelitów różnych typów (tych typów ma być w sumie 6). Codziennie dostarczają one dużej ilości danych do wielu różnych zastosowań. Jak wspomniano, można je pozyskiwać nieodpłatnie.

Z punktu widzenia zastosowań dla rolnictwa najważniejsze są satelity Sentinel-2 i Sentinel-1 (właśnie w takiej kolejności). Pozostałe satelity Sentinel stanowią ważne elementy całego systemu, ale mają mniejszą przydatność dla rolnictwa. Skupimy się więc na tych dwóch rodzajach satelitów.

SENTINEL-2

Obrazy z satelitów Sentinel-2 niosą ze sobą dużo informacji ważnych dla rolnictwa. W tej chwili na orbicie znajdują się dwa satelity Sentinel-2, ale w bliskiej przyszłości planowane jest uruchomienie kolejnych dwóch.

Rozdzielczość przestrzenna obrazów (piksele o rozmiarach 10 x 10 m /4 kanały spektralne/, 20 x 20 m /9 kanałów spektralnych/, 60 x 60 m /3 kanały spektralne/) ustępuje znacząco zdjęciom lotniczym, a nawet zobrazowaniom pochodzącym z niektórych komercyjnych satelitów teledetekcyjnych. Jednak dla większości zastosowań w rolnictwie taka rozdzielczość przestrzenna zdjęć jest wystarczająca.

Jeśli chodzi o rozdzielczość spektralną, Sentinel-2 oferuje wszystkie najważniejsze typy obrazów spektralnych przydatnych w rolnictwie, m.in.: zakresy widzialne (niebieski, zielony i czerwony), bliską podczerwień i 2 zakresy średniej podczerwieni. Na podstawie tych obrazów można z powodzeniem analizować stan upraw bądź gleby czy obliczać różnorodne wskaźniki roślinności.

Ich rozdzielczość czasowa również jest bardzo duża, ponieważ wynosi ok. 5 dni. To znaczy, że jeden z satelitów Sentinel-2 co 5 dni wykonuje zdjęcie danego obszaru powierzchni Ziemi. W przypadku konstelacji dwóch satelitów, dla szerokości geograficznej Polski zdjęcia mogą być rejestrowane nawet co 2-3 dni. Trzeba jednak pamiętać o zachmurzeniu, które sprawia, że tylko część wykonanych zdjęć jest użyteczna.

Program Copernicus przechowuje na serwerach wszystkie obrazy wykonane przez satelity Sentinel-2 od początku działania systemu, czyli od 2015 r.

SENTINEL-1

Sentinel-1 to seria satelitów radarowych.

Obrazy radarowe bardzo mocno różnią się od tych wykonywanych z satelitów optycznych, takich jak choćby Sentinel-2, rejestrujących promieniowanie widzialne i podczerwone. Również składają się z pikseli, jednak ich wartości radiometryczne zależą od zupełnie innych właściwości obiektów niż w przypadku zdjęć optycznych. Obrazy radarowe są również znacznie trudniejsze w przygotowaniu i interpretacji niż zdjęcia optyczne. Nie będziemy się tutaj skupiać na szczegółach, ale opowiemy o kilku istotnych zaletach obrazów radarowych w odniesieniu do zastosowań w rolnictwie.

Jedną z najważniejszych zalet fal radarowych jest to, że są one praktycznie niewrażliwe na zachmurzenie. Promieniowanie radarowe przechodzi przez chmury, dzięki czemu możemy uzyskiwać przydatne obrazy nawet przy pełnym pokryciu chmurami. Te same chmury sprawiają, że zdjęcia optyczne są zupełnie nieprzydatne do analizy powierzchni Ziemi. Rzeczywista rozdzielczość czasowa zdjęć radarowych jest znacznie większa niż zdjęć optycznych. Wszystkie wykonane obrazy nadają się do użycia, a nie tylko część, jak w przypadku zdjęć optycznych. Obrazy radarowe Sentinel-1 dla dowolnego miejsca w Polsce możemy pozyskiwać co 1-2 dni. To bardzo istotna cecha.

Obrazy radarowe zawierają zupełnie inny rodzaj informacji niż zdjęcia optyczne. Za ich pomocą nie da się obliczyć np. wskaźników roślinności. Da się już jednak przeanalizować wilgotność gleby, ponieważ

jasność pikseli na tego typu obrazach bardzo mocno zależy od wilgotności obrazowanego obiektu. Takie obrazy nadają się do wykrywania oczek wodnych lub wody stojącej w zagłębieniach na polu. Inną cechą, od której zależy jasność na zobrazowaniach radarowych, jest tzw. szorstkość obiektu. Dla przykładu, wyrosnięta uprawa cechuje się dość dużą szorstkością i na tego typu obrazach będzie wyglądała inaczej niż odkryta gleba, która ma małą szorstkość. Złożenie wielu takich obrazów z różnych okresów w danym roku czy sezonie umożliwia dość precyzyjne określenie, kiedy roślinność wyrosła, a kiedy została ścięta. Ta informacja umożliwia natomiast zidentyfikowanie typu uprawy.

Ze względu na skomplikowaną analizę zwykłemu użytkownikowi zdjęcia radarowe niewiele mówią. O ile samodzielne interpretowanie zdjęć optycznych, chociażby z Sentinel-2, powiedzie się w podstawowym wymiarze każdemu chętnemu, o tyle interpretację zdjęć radarowych lepiej zostawić specjalistom. Warto jednak pamiętać, że system radarowy jest przydatnym uzupełnieniem informacji pozyskiwanych ze zdjęć optycznych i jeśli ktoś potrafi to wykorzystać, z takich połączonych zobrazowań może wyciągnąć znacznie więcej wniosków.

4.2 Program Landsat

Landsat to nazwa programu dwóch amerykańskich agencji badawczych: NASA i USGS, a jednocześnie kilku generacji satelitów teledetekcyjnych, które wspólnie dostarczają obrazów powierzchni Ziemi nieprzerwanie od 1972 r. Obrazy Landsat są dostępne nieodpłatnie.

Najnowszym satelitą z tej grupy jest Landsat-8 (czyli ósmy satelita z tej serii, choć w przeciągu tych lat działało tylko 7 satelitów – Landsat-6 nigdy nie osiągnął orbity). Ma on taką samą rozdzielczość przestrzenną jak Landsat-7: 30 x 30 m dla zobrazowań wielospektralnych oraz 15 x 15 m dla zobrazowań panchromatycznych (są to czarno-białe obrazy, na których rejestrowane jest jednocześnie promieniowanie widzialne, często poszerzone o fragment bliskiej podczerwieni), jednak w stosunku do niego ma ulepszoną rozdzielczość spektralną. W tej chwili działają dwa satelity z serii Landsat: Landsat-7 i Landsat-8. Niestety, Landsat-7 już dość dawno (w 2003 r.) uległ awarii i generuje „uszkodzone” obrazy, co utrudnia korzystanie z nich.

Obrazy z wcześniejszych satelitów Landsat również mogą być przydatne. Dzięki nim możemy wykonywać różnego rodzaju analizy historyczne. Dla przykładu, mamy możliwość określenia stanu zagospodarowania terenu na wybranej działce sprzed ponad 30 lat. Należy przy tym pamiętać, że najwcześniejsze

zdjęcia Landsat (z lat 70. XX w.) mają mniejszą rozdzielczość przestrzenną – piksele na nich miały rozmiar 63 x 83 m. Jednak pierwsze zdjęcia o pikselu 30 x 30 m (Landsat 4) pojawiły się już w 1982 r.

Nazwa satelity	Odpłatność	Rozmiar piksela		Liczba kanałów spektralnych*	Dostępność obrazów spektralnych		
		Obraz pan-chromatyczny	Obrazy wielo-spektralne		Widzialne	Bliska podczerwień	Średnia podczerwień
Sentinel-2	Nie	Brak	10 m	13	Tak	Tak	Tak
Landsat-8	Nie	15 m	30 m	10	Tak	Tak	Tak
GeoEye-1	Tak	0,46 m	1,84 m	4	Tak	Tak	Nie
WorldView-2	Tak	0,46 m	1,84 m	8	Tak	Tak	Nie
WorldView-3	Tak	0,31 m	1,24 m	8	Tak	Tak	Nie
WorldView-4	Tak	0,31 m	1,24 m	4	Tak	Tak	Nie
Pleiades-1	Tak	0,5 m	2 m	4	Tak	Tak	Nie
SPOT-6, SPOT-7	Tak	1,5 m	6 m	4	Tak	Tak	Nie
RapidEye	Tak	Brak	6,5 m/5 m**	5	Tak	Tak	Nie

* bez panchromatycznego

** oryginalny rozmiar piksela/rozmiar piksela po przetworzeniu (w sprzedaży)

LANDSAT-8

Satelita Landsat-8 działa od 2013 r.

Rozdzielczość przestrzenna obrazów Landsat-8 (30 x 30 m) jest znacznie mniejsza niż obrazów Sentinel-2. Mimo to wciąż jest ona wystarczająca dla większości zastosowań w rolnictwie (np. do analizy stanu upraw lub gleby), tym bardziej że dzięki obrazowi panchromatycznemu o większej rozdzielczości przestrzennej możemy – po odpowiednich przetworzeniach – zwiększyć rozdzielczość obrazów i używać piksele o rozmiarze 15 x 15 m.

Landsat-8 oferuje w większości bardzo podobne obrazy spektralne do tych z satelity Sentinel-2. Są tu obrazy widzialne (niebieski, zielony i czerwony), obraz w bliskiej podczerwieni oraz dwa obrazy w średniej podczerwieni. Dodatkowo są tu jeszcze obrazy w podczerwieni termalnej (Sentinel-2 nie oferuje takich rozwiązań). Co prawda mają one mniejszą rozdzielczość przestrzenną (piksel ma rozmiar 100 x 100 m), za to pozwalają określać warunki ciepło-wilgotnościowe upraw i gleby.

Rozdzielczość czasowa satelity Landsat-8 jest już wyraźnie mniejsza niż Sentinela-2 – wynosi 16 dni, choć dla szerokości geograficznej Polski można pozyskać obraz nawet co 7 dni. Jest jeszcze satelita

Landsat-7, dzięki któremu zdjęcia wybranego obszaru dostajemy częściej, ale – jak wspomniano – są one częściowo uszkodzone. Obrazy z satelity Landsat-8 są dobrym uzupełnieniem dla tych z Sentinel-2, bo dzięki nim są większe szanse na uzyskanie odwzorowania danego obszaru w wybranym okresie.

4.3 Inne satelitarne systemy teledetekcyjne (w tym komercyjne)

Sentinel i Landsat to niejedyny satelitarne systemy teledetekcyjne. Istnieje duża liczba systemów komercyjnych, oferujących zdjęcia satelitarne o bardzo dobrych parametrach, zarówno jeśli chodzi o rodzaje obrazów spektralnych, jak i często znacznie lepszą rozdzielczość przestrzenną. Tego typu zdjęcia są udostępniane odpłatnie. Ich koszt różni się w zależności od rodzaju satelity, trybu zamówienia (z archiwum czy specjalnie zamawiane) oraz rodzaju zdjęć, jakie chcemy zakupić, i może wynosić od kilku do kilkudziesięciu dolarów (a więc od kilkunastu do nawet kilkuset złotych) za kilometr kwadratowy. Trzeba przy tym wziąć pod uwagę, że minimalny obszar, dla którego trzeba kupić zdjęcie, to najczęściej 25-100 kilometrów kwadratowych. Zatem minimalny koszt zakupu takiego zdjęcia to od kilkuset do kilku tysięcy złotych. To dużo, zwłaszcza gdy zależy nam na obrazie zaledwie jednej lub kilku działek. Jednak w wyjątkowych sytuacjach, szczególnie gdy zarządzamy dużym gospodarstwem, warto rozważyć taką opcję, ponieważ korzystanie z tych produktów ma istotne zalety. Pomijając większą szczegółowość zdjęć, za tę cenę można zamówić tzw. zdjęcia celowane. Należy zdefiniować okres, w którym zdjęcie danego obszaru ma zostać wykonane (np. tydzień), a satelita robi zdjęcie wtedy, kiedy nie ma zachmurzenia. Zazwyczaj udaje się znaleźć przynajmniej jeden bezchmurny dzień w zadanym okresie. Zatem gdy wiadomo, że w jakimś okresie brakuje zdjęć z satelitów Sentinel lub Landsat, dane z tych komercyjnych mogą je świetnie (choć nie tanio) zastąpić.

W poniższej tabeli zostały zestawione podstawowe charakterystyki zdjęć pochodzących z satelitów komercyjnych. Więcej szczegółów można znaleźć na stronach internetowych dystrybutorów zdjęć.

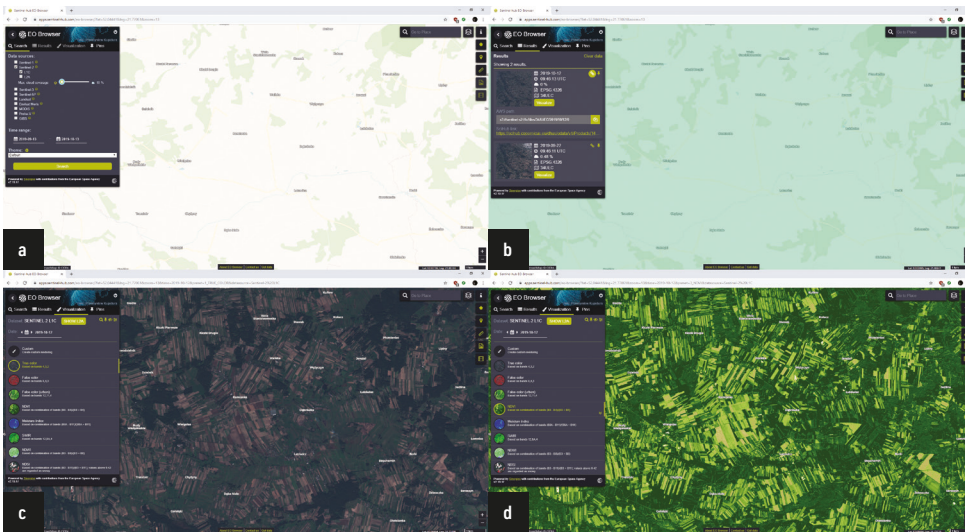
4.4 Gdzie znaleźć i oglądać zdjęcia satelitarne?

Jak już zostało podkreślone, systemy satelitarne Sentinel i Landsat udostępniają swoje zasoby nieodpłatnie. Wystarczy dostęp do Internetu oraz znajomość odpowiedniej aplikacji. Każdy z systemów ma swój własny serwis pozwalający wybierać i zamawiać wybrane dane. Zaczniemy jednak od przedsta-

wienia innej bezpłatnej aplikacji, której funkcjonalność jest najbardziej dostosowana do potrzeb początkujących użytkowników.

4.4.1 PRZYJAZNA APLIKACJA DO PRZEGLĄDANIA ZDJĘĆ SATELITARNYCH – EO BROWSER

EO Browser jest darmową aplikacją oferującą kilka kluczowych funkcji. Za jej pomocą możemy nie tylko wyszukiwać i pobierać obrazy pochodzące z różnych satelitów, m.in. Sentinel i Landsat, ale także przeglądać je oraz ich typowe przetworzenia bezpośrednio w serwisie. Aplikacja znajduje się pod adresem <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. Jest opracowana po angielsku, jednak wymaga co najwyżej podstawowej znajomości tego języka.



Rysunek 11. Kolejne ekrany aplikacji EO Browser. W aplikacji można podać parametry poszukiwanego obrazu (a), wybrać i pobrać odpowiedni obraz (b), wyświetlić go na ekranie jako kompozycję barwną (c) lub w dowolny inny sposób, np. z wykorzystaniem wskaźnika NDVI (d).

W pierwszej kolejności należy się zalogować (po wcześniejszej – szybkiej i bezpłatnej – rejestracji). Następnie trzeba wybrać satelitę, z którego obrazy chce się wyszukać, podać okres wykonania zdjęcia i akceptowany stopień zachmurzenia, a na mapie wskazać interesujący obszar (rysunek 11a). Po zatwierdzeniu wyboru zostanie wyświetlona lista obrazów spełniających wskazane warunki wraz z podstawowymi informacjami dotyczącymi poszczególnych zdjęć, m.in. datą wykonania i procentowym zachmurzeniem (rysunek 11b). Po kliknięciu w link wybrany obraz zostanie pobrany na komputer.

Można jednak również wyświetlić obraz wybranego obszaru bezpośrednio w aplikacji. Domyślnie jest to obraz w barwach naturalnych (rysunek 11c), ale można to zmienić na jeden z wielu innych typów obrazów. Jedną z opcji jest obraz popularnego wskaźnika roślinności o nazwie NDVI (rysunek 11d). Informacje o tym oraz innych wskaźnikach znajdują się w następnym rozdziale.

Wyświetlanie wybranych obrazów to przydatna funkcja, pozwalająca je obejrzeć w dużym przybliżeniu bez konieczności wcześniejszego pobierania. Poza tym wyświetlenie takiego obrazu na swoim komputerze wymaga specjalistycznego oprogramowania. Dzięki EO Browser można to zrobić bezpośrednio w przeglądarce internetowej.

4.4.2 OFICJALNE APLIKACJE PROGRAMÓW COPERNICUS I LANDSAT

Oficjalne aplikacje internetowe do przeglądania i pobierania danych Copernicus (czyli zdjęć Sentinel) i Landsat są dostępne pod następującymi linkami: <https://scihub.copernicus.eu/> (Copernicus) oraz <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Landsat). Warto odwiedzić te strony, choćby po to, by założyć konto, które potem może być niezbędne do pobierania wybranych obrazów również przy użyciu innych aplikacji (jak EO Browser).

Obsługa obydwu aplikacji opiera się na tym samym schemacie (choć szczegóły mogą być różne). Należy wskazać obszar, dla którego chcemy pozyskać obrazy, okres ich wykonania, zaznaczyć typ obrazów, a także zdefiniować inne parametry, takie jak np. dopuszczalny stopień zachmurzenia.

Warto zwrócić uwagę, że o ile aplikacja programu Copernicus udostępnia obrazy z satelitów Sentinel-1, -2 i -3, o tyle aplikacja, w której znajdziemy obrazy Landsat, oferuje również dane pochodzące z innych satelitów, również z Sentinela. Niektóre z tych danych mogą być odpłatne. Przy każdym zbiorze danych znajduje się ikona, która – po jej naciśnięciu – przenosi do informacji o tym zbiorze, w tym tych dotyczących licencji i kosztów ich udostępnienia.

4.4.3 DIAS – DATA AND INFORMATION ACCESS SERVICES

Istnieją również platformy oparte na chmurach danych, pozwalające nie tylko pobierać obrazy, ale także przetwarzać je bez pobierania, właśnie w chmurze. Udostępniają one odpowiednią ilość miejsca w chmurze, czyli na swego rodzaju wirtualnych dyskach, na których możemy przechowywać interesujące nas dane, a także je przetwarzać. To właśnie możliwość operacji na obrazach bez konieczności ich pobierania jest główną zaletą takich rozwiązań, szczególnie w przypadku przetwarzania dużej ilości danych.

W ostatnich latach, na zlecenie Komisji Europejskiej, powstało 5 platform przeznaczonych dla danych tworzonych w ramach programu Copernicus. Mają one wspólną nazwę: DIAS (z jęz. ang. Data and Information Access Services), co można tłumaczyć jako usługi dostępu do danych oraz informacji. Jedną z nich – CreoDIAS – została opracowana przez polskie firmy.

Chociaż same dane są nieodpłatne, korzystanie z platform w chmurze wiąże się z kosztami dotyczącymi przechowywania i przetwarzania danych. W sytuacji zainteresowania pojedynczymi obrazami, które w krótkim czasie można samodzielnie pobrać i przetworzyć, korzystanie z DIAS-a jest zbyt kosztowne. Jednak gdy pracuje się z dużą ilością danych (wiele zdjęć dla dużych obszarów), warto rozważyć korzystanie z tego typu rozwiązań.

5. ANALIZY DANYCH TELEDETEKCYJNYCH

Obrazy satelitarne mogą mieć różne zastosowania – od wizualnej analizy zdjęć (tzw. fotointerpretacji) po obliczanie rozmaitych wskaźników i znacznie bardziej zaawansowane operacje. Poniżej przedstawimy krótko kilka podstawowych rodzajów analiz, które można wykorzystać w rolnictwie.

5.1 Analiza wizualna

Analiza wizualna, inaczej fotointerpretacja, to po prostu ogląd obrazu w celu zapoznania się ze stanem uprawy. Do takiego zadania najlepiej nadają się kompozycje barwne, czyli trzy złożone razem obrazy spektralne, ale w takiej konfiguracji, że każdy z nich jest przedstawiony w innej barwie. Najprostszą w interpretacji kompozycją barwną jest ta w kolorach naturalnych (rysunek 12 – z lewej strony). Powierzchnia Ziemi na takim obrazie wygląda w taki sam sposób, jak oglądana naszymi oczami. Niestety, takie obrazy nie mają zbyt dużej wartości informacyjnej. Znacznie więcej informacji zawierają natomiast obrazy w bliskiej podczerwieni. Dlatego kompozycje barwne w podczerwieni (rysunek 12 – z prawej strony) będą bardziej przydatne. Są przy tym nieco trudniejsze w interpretacji, ponieważ wykorzystują obrazy w zakresie podczerwonym, z którym większość osób nie ma większych doświadczeń. Łatwo można się jednak tego nauczyć, bo na takich obrazach zdrowa roślinność jest przedstawiona w odcieniach czerwieni (im bardziej intensywna czerwień, tym lepszy stan uprawy). Na kompozycji w podczerwieni widzimy jaskrawoczerwone pole, jednak z wyraźnie dostrzegalnymi ciemniejszymi plamami. Te plamy to miejsca o słabiej rozwiniętej roślinności. Na kompozycji w barwach naturalnych te różnice są znacznie słabiej widoczne.



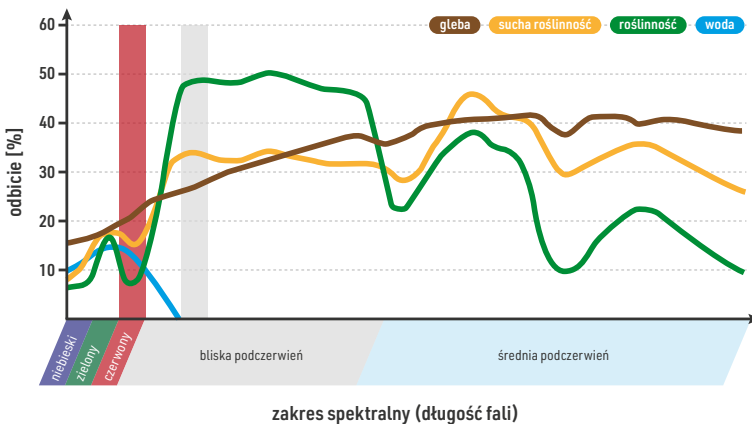
Rysunek 12. Porównanie kompozycji barwnych w barwach naturalnych oraz w podczerwieni.

5.2 Wskaźniki istotne dla rolnictwa

Wskaźniki roślinności lub wilgotności to dość proste przetworzenia dwóch lub więcej obrazów spektralnych pozyskanych dla danego obszaru w tym samym czasie. Tworzone są dzięki wiedzy o tym, jakie właściwości poszczególnych obiektów wpływają na odbicie w danych zakresach. Wskaźniki mają tę przewagę nad fotointerpretacją, że piksele uzyskują konkretne wartości, które niosą ze sobą informację ilościową na temat stanu uprawy lub gleby. Najbardziej popularne są wskaźniki roślinności, za pomocą których możemy ocenić właśnie stan uprawy lub ogólnie – roślinności. Istnieją jednak również inne wskaźniki: wilgotności roślin lub gleby. Informacje uzyskane za pomocą wszystkich tych wskaźników są niezwykle cenne z punktu widzenia rolnictwa precyzyjnego. Dzięki nim można zróżnicować chociażby nawożenie w zależności od stopnia rozwoju i kondycji uprawy.

5.2.1 WSKAŹNIKI ROŚLINNOŚCI

Większość wskaźników roślinności opiera się na dwóch obrazach spektralnych: czerwieni i bliskiej podczerwieni. Patrząc na wykres przedstawiający charakterystyki spektralne (o których była mowa na początku), ale tym razem z zaznaczonymi zakresami czerwieni i bliskiej podczerwieni (rysunek 13), łatwo zauważyć, że zdrowa roślinność odbija bardzo dużo promieniowania bliskiej podczerwieni, a jednocześnie bardzo mało promieniowania czerwonego. W uproszczeniu można powiedzieć, że im więcej jest na danym obszarze roślinności i im jest ona zdrowsza, tym większe będzie odbicie w zakresie bliskiej podczerwieni, a jednocześnie mniejsze w zakresie czerwonym. Inne rodzaje pokrycia terenu mają już odmienne charakterystyki.



Rysunek 13. Charakterystyki spektralne z zaznaczonymi dwoma zakresami spektralnymi najczęściej wykorzystywanymi do obliczania różnego rodzaju wskaźników roślinności: czerwonym i bliskiej podczerwieni.

NDVI (ang. Normalised Difference Vegetation Index – znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności) jest najbardziej popularnym wskaźnikiem roślinności. Bardzo prosto go obliczyć, a jednocześnie dobrze oznacza on miejsca występowania roślinności oraz jej stan. Przykład obrazu wskaźnika NDVI jest przedstawiony na rysunku 14. Górne fragmenty ukazują obrazy w czerwieni i bliskiej podczerwieni. Zwróćmy uwagę na obszar uprawy – ten sam, któremu przyglądaliśmy się już na rysunku 12 (na kompozycji barwnej w podczerwieni widzimy go w kolorze jaskrawoczerwonym). Na obrazie czerwonym jest bardzo ciemny (ponieważ odbija mało promieniowania czerwonego), za to na obrazie bliskiej podczerwieni jest bardzo jasny (gdyż odbija dużo promieniowania podczerwonego). Ostatni fragment rysunku 14 to obraz wskaźnika NDVI. Roślinność w najlepszym stanie jest na tym obrazie widoczna w kolorze ciemnozielonym. Roślinność w gorszym stanie to kolory jasnozielone. Z kolei kolory zbliżone do żółtego to odkryta gleba, a ciemnopomarańczowe – tereny zabudowane i zbiorniki wodne.



Rysunek 14. Obraz wskaźnika NDVI oraz dwa obrazy spektralne, na podstawie których został on obliczony (czerwony i bliskiej podczerwieni). Można go porównać z kompozycją barwną w podczerwieni.

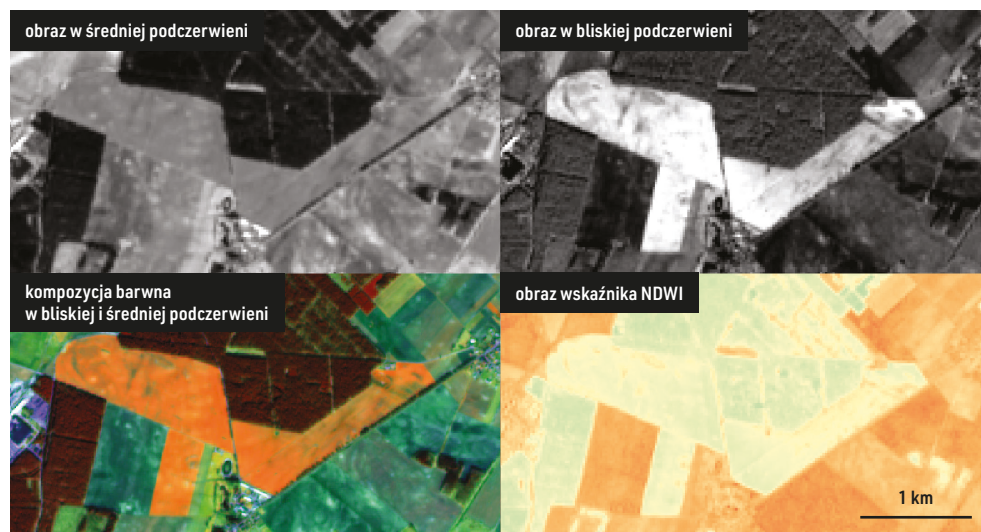
Jak widać, z obrazu wskaźnika NDVI odczytuje się podobne informacje, co z kompozycji barwnej w podczerwieni: jaskrawoczerwone obszary na kompozycji barwnej są jednocześnie ciemnozielone na obrazie wskaźnika NDVI. Ciemniejsze na kompozycji fragmenty uprawy mają jaśniejszy odcień zieleni, zbliżony do żółtego, co świadczy o gorszym stanie roślin. Jednak obraz wskaźnika roślinności

ma ważną zaletę: stan roślinności jest wyrażony jedną konkretną liczbą. Nie trzeba dalej interpretować tego obrazu (do tego wystarczająco dobra będzie kompozycja barwna). Taka konkretna wartość może być bezpośrednio wykorzystana na przykład do określenia, ile nawozu azotowego należy zastosować w konkretnych miejscach działki rolnej w danym momencie sezonu.

5.2.2 WSKAŹNIKI WILGOTNOŚCI

Za pomocą wielospektralnych obrazów satelitarnych można również analizować zawartość wody w uprawach. Tego typu wskaźniki wykorzystują najczęściej obrazy średniej podczerwieni. Średnia podczerwień jest bardzo wrażliwa na wodę zawartą w obiekcie – czy to roślinie, czy glebie (woda pochłania ten zakres promieniowania w dużym stopniu).

NDWI (ang. Normalised Difference Water Index – znormalizowany różnicowy wskaźnik wody) jest jednym z popularnych wskaźników tego rodzaju. Został przedstawiony na rysunku 15. Wykorzystuje on, obok obrazu średniej podczerwieni, również obraz bliskiej podczerwieni. Poza tymi obrazami na rysunku 12 widać również kompozycję wykorzystującą obydwie zakresy podczerwone – zdrowa roślinność przyjmuje na niej kolor pomarańczowy. I wreszcie obraz samego wskaźnika wilgotności NDWI – im bardziej zielony fragment obrazu, tym więcej wody zawiera roślina. Obszary w kolorach żółtych lub pomarańczowych przedstawiają suchą roślinność lub brak roślinności.



Rysunek 15. Obraz wskaźnika NDWI oraz dwa obrazy spektralne, na podstawie których został on obliczony (średniej i bliskiej podczerwieni). Można go porównać z kompozycją barwną w bliskiej i średniej podczerwieni.

Wskaźnik NDWI oblicza się równie łatwo, jak NDVI. Obrazy w średniej podczerwieni, niezbędne do jego obliczenia, są jednak znacznie rzadziej rejestrowane niż obrazy widzialne i w bliskiej podczerwieni (wymagane do obliczenia wskaźnika NDVI). Większość satelitów komercyjnych (jak choćby te przedstawione wyżej) nie rejestruje średniej podczerwieni – na ich podstawie nie obliczymy więc tego ani innych wskaźników wilgotności. Na szczęście zarówno Sentinel-2, jak i Landsat-8 oferują takie obrazy.

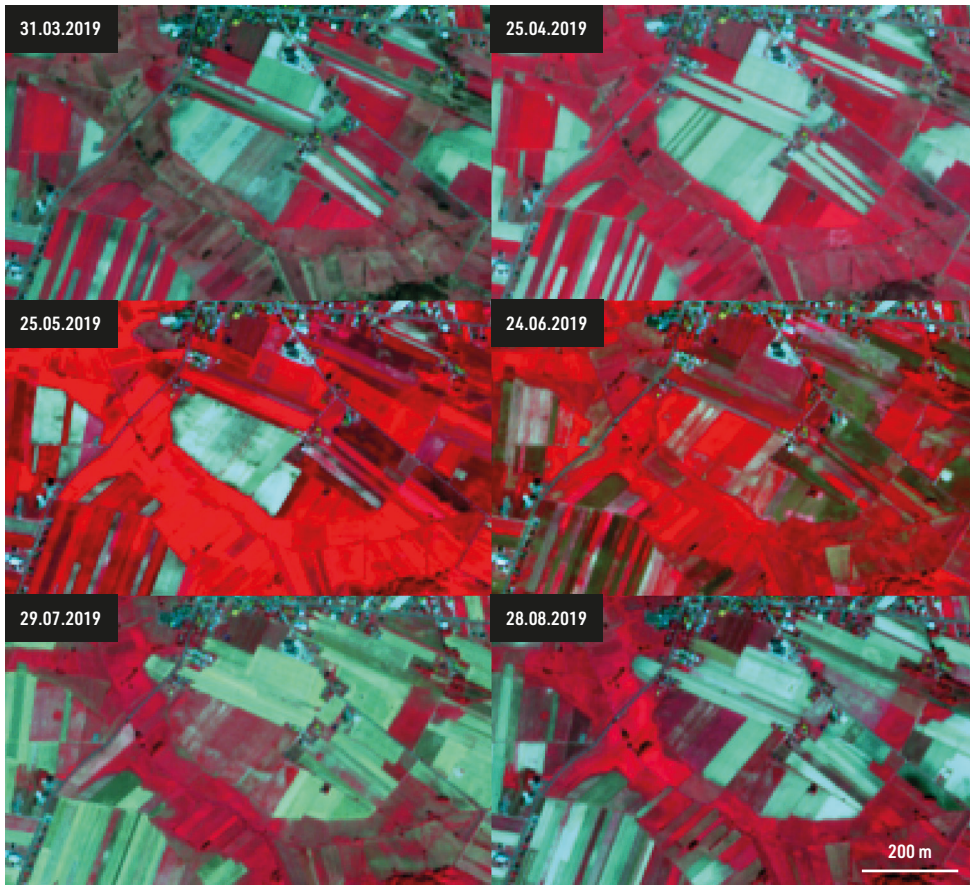
5.2.3 ANALIZA WIELOCZASOWA

Analiza wieloczasowa obrazów satelitarnych odgrywa ważną rolę w zastosowaniach rolniczych. Polega ona na równoczesnej analizie obrazów tego samego obszaru pozyskanych w różnych okresach w roku. Dzięki temu możemy monitorować sposób gospodarowania wybranymi działkami lub analizować rozwój upraw. Pojedynczy obraz – pozyskany w jednym terminie – mówi nam wiele o stanie uprawy w danym momencie. Jednak rozwój upraw rolnych jest bardzo dynamiczny, dlatego znacznie więcej informacji jesteśmy w stanie uzyskać z serii czasowej zdjęć.

W przypadku analizy wieloczasowej ważna jest rozdzielczość czasowa wybranych systemów satelitarnych. Warto pamiętać, że budując taką serię czasową, można korzystać z obrazów z różnych satelitów.

Na rysunku 16 widać taką serię obrazów z Sentinela. Są to kompozycje barwne w podczerwieni (zdrowa, zielona roślinność jest na tych obrazach czerwona), przedstawiające okolice Siedlec, wykonane w następujących dniach 2019 r.: 31 marca, 25 kwietnia, 25 maja, 24 czerwca, 29 lipca, 28 sierpnia.

Porównując ze sobą wygląd poszczególnych działek rolnych na obrazach z kolejnych dni, można określić (przynajmniej w przybliżeniu) rodzaj uprawy, ocenić, w jaki sposób się rozwija lub sprawdzić, czy została poddana odpowiednim praktykom.



Rysunek 16. Kompozycje barwne w podczerwieni przedstawiające wybrane obszary w różnych okresach roku.

6. ZAKOŃCZENIE

Przedstawiliśmy Państwu przykładowe zastosowania zobrazowań satelitarnych w rolnictwie. Mamy nadzieję, że udało nam się pokazać nie tylko korzyści płynące z teledetekcji, ale też to, iż korzystanie z omówionych rozwiązań może być całkiem łatwe i – co ważne – niedrogie.

Podsumowując najistotniejsze zastosowania teledetekcji w rolnictwie należy wymienić:

- analizę wizualną pól i możliwość samodzielnego wnioskowania o stanie upraw na przestrzeni sezonu wegetacyjnego, w tym możliwość analizy porównawczej pomiędzy różnymi polami;
- podstawę informacyjną dla rolnictwa precyzyjnego, w tym do wszelkiego typu map aplikacyjnych (sianie, nawożenie, opryski, nawadnianie);
- ocenę szkód związanych z niekorzystnymi zjawiskami pogodowymi (złe przezimowanie upraw, susza);
- prognozowanie plonów;
- analizę zagospodarowania działek rolnych, w tym ocena stosowania dobrych praktyk rolnych (np. terminowego koszenia łąk);
- rozpoznawanie upraw
- w niedalekiej przyszłości – podstawę informacyjną do rozliczania dopłat bezpośrednich.

Teledetekcja satelitarna stale się rozwija. Co roku na orbitę okołoziemską trafiają kolejne satelity teledetekcyjne. Są one wyposażone w coraz lepsze kamery. Dzięki temu uzyskujemy i wciąż będziemy uzyskiwać coraz więcej jeszcze lepszych obrazów powierzchni Ziemi. Rozwijają się również metody ich wykorzystywania. Z roku na rok dowiadujemy się coraz więcej na temat potencjalnych zastosowań teledetekcji, również w rolnictwie. Zaś same zastosowania szybko się upowszechniają z korzyścią zarówno dla indywidualnych gospodarstw, jak i środowiska naturalnego. Możemy się spodziewać, że w niedalekiej przyszłości wykorzystanie technik satelitarnych będzie w rolnictwie ważnym warunkiem konkurencyjności. Warto być na to przygotowanym.

SŁOWNIK POJĘĆ:

ESA – (ang. European Space Agency) – Europejska Agencja Kosmiczna – organizacja międzyrządowa w skład której wchodzi 22 państwa, w tym Polska, powołana do eksploracji przestrzeni kosmicznej.

Kanał spektralny – zakres promieniowania elektromagnetycznego rejestrowanego przez kamerę teledetekcyjną. Obraz przedstawiający ilość zarejestrowanego promieniowania w danym kanale spektralnym nazywany jest obrazem spektralnym.

Landsat-8 – najnowszy satelita teledetekcyjny wchodzący w skład amerykańskiej misji Landsat, dobrze nadający się do zastosowań rolniczych. Jest wyposażony w kamerę optyczną oraz sensor termalny. Rozdzielczość przestrzenna zdjęć to 15m x 15m. Zobrazowania są dostępne nieodpłatnie.

NDVI – (ang. Normalised Difference Vegetation Index) – znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności – jeden z najbardziej popularnych wskaźników roślinności, obliczany na podstawie obrazów teledetekcyjnych (np. satelitarnych) w zakresach czerwieni i bliskiej podczerwieni. Pozwala na ilościową analizę roślinności, jej stanu i biomasy.

NDWI – (ang. Normalised Difference Water Index) – znormalizowany różnicowy wskaźnik wilgotności – wskaźnik obliczany na podstawie obrazów np. bliskiej i średniej podczerwieni. Pozwala określać zawartość wody w roślinności.

Obraz radarowy – obraz teledetekcyjny powstający w wyniku rejestracji fal radiowych. Przydatny w rolnictwie, szczególnie, że jest odporny na zachmurzenie. Trudny go jednak zinterpretować, dlatego warto to zostawić specjalistom.

Obraz wielospektralny (multispektralny) – obraz składający się z kilku lub więcej obrazów spektralnych. Zawiera dane o ilości odbicia w różnych zakresach (kanałach) spektralnych.

Pasmo widzialne – światło widzialne, zakres promieniowania elektromagnetycznego widzianego przez ludzkie oko. Na pasmo widzialne składa się promieniowanie niebieskie, zielone i czerwone.

Program Copernicus – inicjatywa realizowana przez Unię Europejską we współpracy z Europejską Agencją Kosmiczną (ESA). Głównym celem Programu jest monitoring stanu środowiska, m.in. za pomocą satelitów teledetekcyjnych. Istotną częścią Programu Copernicus jest rodzina satelitów Sentinel.

Sentinel-2 – satelitarna misja teledetekcyjna, w skład której wchodzi dwa satelity wyposażone w kamery optyczne, niezwykle przydatne do zastosowań rolnych. Rozdzielczość przestrzenna zdjęć (wielkość piksela) to 10m x 10m. Satelity Sentinel-2 są częścią Programu Copernicus. Zobrazowania są dostępne nieodpłatnie.

Zdjęcia optyczne – obrazy zarejestrowane za pomocą tradycyjnych kamer optycznych. Najczęściej są to zdjęcia z zarejestrowanym promieniowaniem widzialnym lub / oraz bliskiej i średniej podczerwieni. Mogą być rejestrowane przez kamery zarówno z satelitów, jak i z samolotów, dronów, czy naziemnie.



Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa

ul. Karolkowa 30
01-207 Warszawa
www.kowr.gov.pl

Opracowano na zlecenie:
Departamentu Innowacji
tel. 22 376 71 30



orbitale

www.orbitale.com