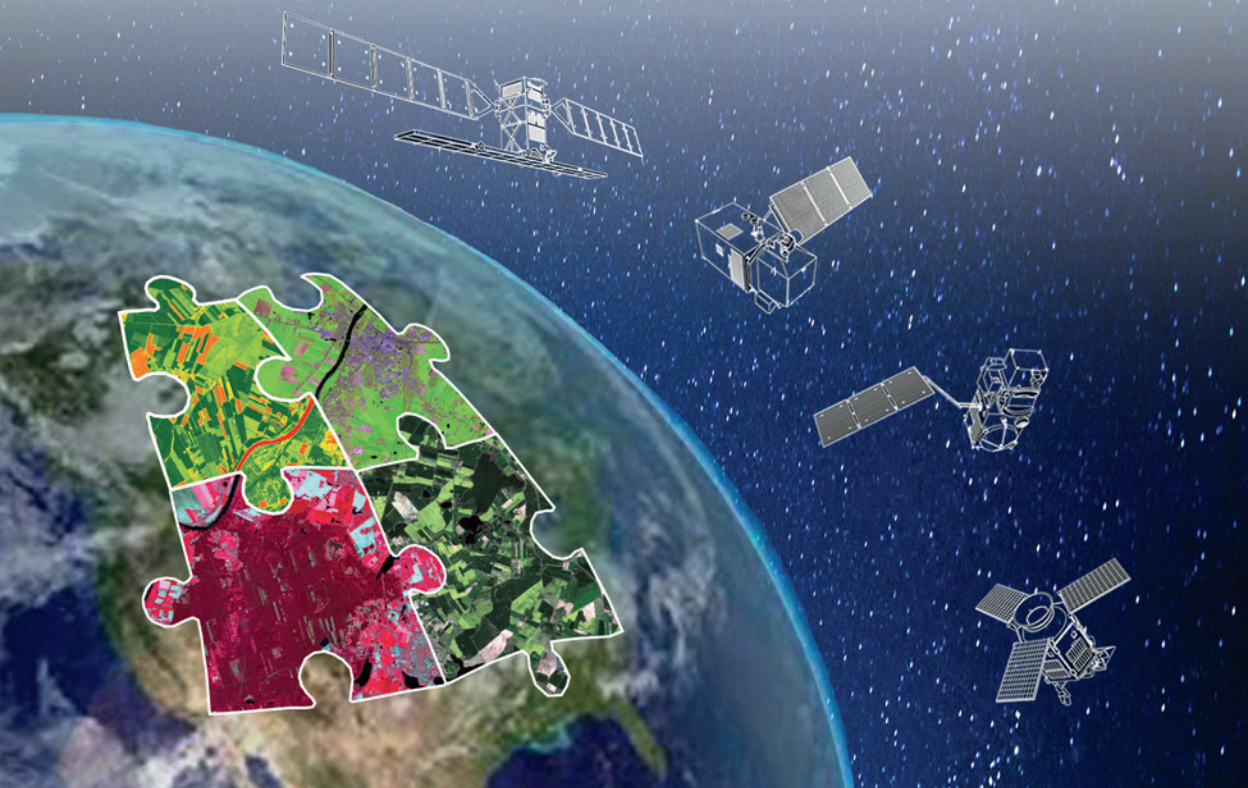




System operacyjnego gromadzenia, udostępniania
i promocji cyfrowej informacji satelitarnej o środowisku

Dane satelitarne dla administracji publicznej



Fundusze
Europejskie
Polska Cyfrowa



POLSKA
AGENCJA
KOSMICZNA

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego



Dane satelitarne dla administracji publicznej

Redakcja naukowa

prof. dr hab. inż. Beata Hejmanowska
dr hab. inż. Piotr Wężyk, prof. UR

Autorzy rozdziałów

dr Katarzyna Bajorek-Zydroń; dr hab. Jarosław Chormański, prof. SGGW; dr inż. Urszula Cisko-Lesicka;
dr inż. Ewa Głowienka; prof. dr hab. inż. Beata Hejmanowska; dr hab. Jarosław Jasiewicz, prof. UAM;
dr inż. Joanna Jaskuła; dr Elżbieta Jędrzejczak; dr hab. inż. Cezary Kaźmierowski, prof. UAM;
mgr inż. Piotr Kramarczyk; dr Sławomir Królewicz; dr inż. Magdalena Mleczeko;
dr hab. inż. Marek Mróz, prof. UWM; mgr inż. Natalia Ostrowska; dr hab. inż. Jan Piekarczyk, prof. UAM;
mgr inż. Małgorzata Słapińska; prof. dr hab. inż. Mariusz Sojka; dr inż. Sylwia Szporak-Wasilewska;
dr hab. inż. Piotr Wężyk, prof. UR; dr inż. Rafał Wróżyński; dr hab. Rafał Zapłata, prof. UKSW;
mgr inż. Karolina Zięba-Kulawik; mgr inż. Anna Żądło

Zespół konsultacyjny PAK

mgr inż. Jolanta Orlińska – przewodnicząca Zespołu, dr inż. Jakub Kowalewski,
mgr Zbigniew Burdzy, mgr Piotr Bednarski, mgr Roger Bachtin – ds. redakcji technicznej

Konsultacja naukowa

dr hab. inż. Przemysław Kupidura, prof. PW

Redakcja

ProGea 4D sp. z o.o.
ul. Henryka Pachocińskiego 9, 31-223 Kraków

Zespół redakcyjny ProGea 4D sp. z o.o.

dr hab. inż. Piotr Wężyk – CEO, dr Katarzyna Bajorek-Zydroń, dr inż. Urszula Cisko-Lesicka,
dr Katarzyna Kozłowska-Kozak, M.Sc. Micah Muir, mgr Berenika Ensztejn, mgr inż. Kinga Szerszeń

Korekta techniczna i redakcja tekstu

mgr Ewelina Wójcikowska-Jakubiec
mgr Grażyna Jabłońska

Projekt okładki

mgr inż. Karolina Zięba-Kulawik

Skład i łamanie

dr inż. Piotr Bieniek

Wydawca

Polska Agencja Kosmiczna
© Copyright by Polska Agencja Kosmiczna 2020

Druk i oprawa

Poligraficzny Zakład Usługowy DRUKMAR
ul. Rzemieślnicza 10, 32-080 Zabierzów

Opracowano w ramach projektu „System operacyjnego gromadzenia udostępniania i promocji
cyfrowej informacji satelitarnej o środowisku – Sat4Envi”

Includes copyrighted material of DigitalGlobe, Inc., All Rights Reserved

Wydanie I
Nakład 100+ egz.

ISBN: 978-83-945436-2-4
e-ISBN: 978-83-945436-3-1 (wersja elektroniczna)

Szanowni Państwo,

w historiach astronautów spisywanych po ich powrocie na Ziemię dominują opisy naszej planety jako niebieskiej kropki – wyjątkowej, przepięknej i kruchej. Każdego dnia uczymy się, jak w pełni korzystać z jej zasobów i jak ją chronić. Technologie satelitarne mogą nam pomóc dbać o naszą Ziemię. Mogą nam również pomóc usprawnić i zoptymalizować pracę, przyspieszyć procesy decyzyjne.

Prace nad technologiami teledetekcji satelitarnej trwają od połowy lat 50. XX w. Wiele się przez ten czas zmieniło – jakość obrazowań, potencjał informacyjny, sposób przetwarzania, rozmiar satelitów i podejście do ich budowy. Już teraz z sukcesami monitorujemy np. jakość powietrza, wód i gleb. Potrafimy dokładnie zidentyfikować i pomierzyć obszary dotknięte suszą, pożarami, powodzią, czy na przykład wody morskie dotknięte plagą sinic.

Rolnicy optymalizują produkcję na podstawie obrazowań satelitarnych, regulując nawodnienie i nawożenie z korzyścią dla środowiska. Jesteśmy w stanie prognozować oraz monitorować m.in. osiadanie gruntów, szczególnie istotne dla bezpieczeństwa mieszkańców na terenach górniczych i w dużych miastach. Możemy w sposób szybki i rzetelny dostarczyć aktualne dane, informacje i materiały o otaczającym nas świecie, obiektach i zjawiskach – obserwować zmiany i prognozować ich przebieg.

Zobrazowania satelitarne stanowią przydatne źródło zarówno dla administracji publicznej, jak i dla firm pragnących wykorzystać te zasoby w swoich produktach, narzędziach, aplikacjach i usługach.

Dlatego cieszę się mogąc przedstawić Państwu podręcznik pt. „Dane satelitarne dla administracji publicznej”, który został przygotowany na bazie analiz potrzeb administracji publicznej oraz wniosków płynących ze spotkań, szkoleń i warsztatów. Były one możliwe dzięki projektowi „System operacyjnego gromadzenia, udostępniania i promocji cyfrowej informacji satelitarnej o środowisku – Sat4Envi”, finansowanemu w ramach Programu Operacyjnego Polska Cyfrowa.

Podręcznik ma pomóc w rozwijaniu Państwa kompetencji i wiedzy. Ma przybliżyć technologie wykorzystywane w teledetekcji satelitarnej, terminologię, jak również źródła danych i narzędzia do ich przetwarzania. Przede wszystkim jednak ma odpowiedzieć na pytanie: jak zobrazowania satelitarne można wykorzystać w codziennym życiu i pracy?

Jest to pierwsza tego typu publikacja w Polsce i wierzę, że niezwykle potrzebna wszystkim tym, którzy chcą dowiedzieć się więcej o teledetekcji satelitarnej, chcą ją lepiej zrozumieć. Jestem przekonany, że podręcznik oraz platforma e-learningowa, która została uruchomiona w ramach projektu, przyczynią się do poszerzenia wiedzy na temat możliwości wykorzystania obrazowań satelitarnych w pracy i ogromnego wpływu obserwacji Ziemi na jakość naszego życia i działania na rzecz środowiska.

Mam nadzieję, że będą Państwo z nami w tych odkryciach i dążeniu do podniesienia świadomości otaczającego nas świata, a także w staraniach, aby chronić naszą planetę.



Życzę miłej lektury

Michał Szaniawski

Prezes Polskiej Agencji Kosmicznej

Spis treści

Wstęp	9
1. Wprowadzenie do teledetekcji satelitarnej	11
1.1. Sztuczne satelity Ziemi.....	11
1.1.1. Historia teledetekcji.....	11
1.1.2. Typy satelitów i ich orbity	18
1.2. Promieniowanie elektromagnetyczne	20
1.2.1. Definicja promieniowania elektromagnetycznego	21
1.2.2. Interakcja promieniowania elektromagnetycznego z powierzchnią Ziemi.....	25
1.2.3. Czułość oka ludzkiego na promieniowanie elektromagnetyczne	28
1.2.4. Krzywe odbicia spektralnego	29
1.3. Cechy satelitarnych systemów teledetekcyjnych	30
1.3.1. Sposób powstawania oraz struktura obrazu cyfrowego	31
1.3.2. Rozdzielczość przestrzenna.....	32
1.3.3. Rozdzielczość spektralna.....	34
1.3.4. Rozdzielczość radiometryczna	36
1.3.5. Rozdzielczość czasowa.....	38
1.4. Rodzaje teledetekcyjnych danych obrazowych i nieobrazowych	38
1.4.1. Pasywne systemy teledetekcyjne	39
1.4.1.1. Zobrazowania w zakresie optycznym	39
1.4.1.2. Zobrazowania w zakresie promieniowania emitowanego	41
1.4.2. Aktywne systemy teledetekcyjne	43
1.4.2.1. Obrazowanie radarowe.....	43
1.4.2.2. Satelitarne skanowanie laserowe.....	52
1.4.3. Kalibracyjne i kontrolne pomiary naziemne.....	55
2. Pozyskiwanie informacji z obrazów cyfrowych	60
2.1. Etapy przetwarzania satelitarnych danych teledetekcyjnych.....	61
2.1.1. Korekcja geometryczna i radiometryczna obrazów rejestrowanych technikami pasywnymi.....	61
2.1.2. Przetwarzanie obrazów optycznych	63
2.1.3. Przetwarzanie obrazów termalnych.....	67
2.1.4. Przetwarzanie obrazów przedstawiających emitowane promieniowanie mikrofalowe.....	70
2.1.5. Przetwarzanie danych radarowych.....	74
2.2. Analiza obrazów teledetekcyjnych	79
2.2.1. Tworzenie kompozycji barwnych obrazów i fotointerpretacja	80
2.2.2. Krzywe spektralne, wskaźniki teledetekcyjne	87
2.3. Klasyfikacja obrazów satelitarnych	93
2.3.1. Klasyfikacja nienadzorowana	97
2.3.2. Klasyfikacja nadzorowana.....	99
2.3.2.1. Metody stosowane w klasyfikacji nadzorowanej.....	100
2.3.2.2. Proces tworzenia zbioru uczącego	104
2.3.2.3. Przykład klasyfikacji metodami ML w SNAP	105
2.3.2.4. Metody przeznaczone do klasyfikacji obrazów hiperspektralnych	107

2.3.3. Metody oparte na analizie obiektowej (GEOBIA)	111
2.3.4. Analiza dokładności klasyfikacji obrazu	116
2.4. Inne metody pozyskiwania informacji z obrazów	120
2.4.1. Metody wykorzystujące modele regresji.....	120
2.4.2. Analiza serii wieloczasowych zobrazowań satelitarnych	125
3. Misje obserwacji Ziemi.....	131
3.1. Program Copernicus	131
3.1.1. Polityka Komisji Europejskiej w zakresie pozyskiwania i wykorzystania danych satelitarnych	132
3.1.2. Rola ESA oraz PAK w realizacji europejskiej polityki kosmicznej, informacje o programie Copernicus.....	133
3.1.3. Misja Sentinel-1.....	135
3.1.4. Misja Sentinel-2.....	138
3.1.5. Misja Sentinel-3	142
3.1.6. Misja Sentinel-5P.....	146
3.1.7. Planowane misje.....	148
3.2. Program Landsat.....	150
3.2.1. Historia programu Landsat oraz możliwości wykorzystania archiwalnych zobrazowań Landsat	151
3.2.2. Aktywne satelity Landsat.....	151
3.2.3. Planowane misje Landsat.....	157
3.3. Wybrane komercyjne optyczne systemy satelitarne o dużej i bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej	158
3.3.1. Wybrane komercyjne misje wysokorozdzielczych optycznych systemów satelitarnych	159
3.3.2. Wybrane komercyjne misje bardzo wysokorozdzielczych optycznych systemów satelitarnych.....	161
3.4. Wybrane systemy o średniej rozdzielczości.....	164
3.5. Wybrane systemy o niskiej rozdzielczości	165
3.5.1. Wybrane niskorozdzielcze misje NASA i NOAA	166
3.5.2. Wybrane niskorozdzielcze misje ESA i EUMETSAT	167
3.6. Wybrane systemy hiperspektralne	169
3.7. Wybrane systemy radarowe.....	173
3.8. Misje wykorzystujące technologię satelitarnego skanowania laserowego	179
4. Dostęp do satelitarnych danych teledetekcyjnych	187
4.1. Platformy i aplikacje do wyszukiwania, przeglądania i pobierania danych.....	187
4.1.1. Copernicus Open Access Hub.....	187
4.1.2. EarthExplorer	190
4.1.3. EO Browser	192
4.1.4. Landsat Explorer	194
4.2. Dostęp do danych i usług przetwarzania w chmurze obliczeniowej.....	196
4.2.1. Usługi DIAS: CREODIAS, MUNDI, SOBLOO, WEKEO, ONDA.....	196
4.2.2. Amazon Web Services.....	200
4.2.3. Google Earth Engine (GEE)	202
4.2.4. Microsoft Azure.....	203
4.3. Sat4Envi.....	205

5. Wybrane oprogramowanie do przetwarzania danych teledetekcyjnych	210
5.1. Wolne oprogramowanie.....	213
5.1.1. SNAP	213
5.1.2. QGIS	217
5.1.3. SAGA GIS	220
5.1.4. ImageJ.....	222
5.1.5. MultiSpec	224
5.1.6. ORFEO	226
5.1.7. Oprogramowanie R, Python, GEE.....	228
5.1.7.1. Środowisko R.....	228
5.1.7.2. Język programowania Python	231
5.1.7.3. Google Earth Engine (GEE)	233
5.2. Oprogramowanie komercyjne	237
5.2.1. ArcGIS Esri.....	237
5.2.2. GeoMedia.....	242
5.2.3. ENVI.....	245
5.2.4. ERDAS IMAGINE	247
5.2.5. PCI Geomatica	249
5.2.6. eCognition	251
6. Zastosowania obrazów satelitarnych, programu Copernicus oraz prezentacja dobrych praktyk w działaniach administracji publicznej	256
6.1. Serwisy programu Copernicus	260
6.1.1. Atmosfera.....	261
6.1.2. Środowisko morskie.....	261
6.1.3. Obszary lądowe.....	262
6.1.3.1. Komponent Dane Globalne (wszystkie kontynenty Ziemi)	262
6.1.3.2. Komponent Paneuropejski	262
6.1.3.3. Komponent Lokalny	268
6.1.3.4. Komponent obrazów satelitarnych i danych referencyjnych	272
6.1.4. Zmiana klimatu.....	273
6.1.5. Bezpieczeństwo	273
6.1.6. Sytuacje kryzysowe.....	273
6.2. Gospodarka przestrzenna	274
6.2.1. Serwis Copernicus na potrzeby gospodarki przestrzennej.....	274
6.2.2. Przykłady zastosowań danych teledetekcyjnych w gospodarce przestrzennej.....	276
6.3. Rolnictwo.....	279
6.3.1. Szacowanie powierzchni upraw za pomocą teledetekcji od skali regionalnej do globalnej	280
6.3.2. Identyfikacja gatunków upraw rolniczych i predykcja plonu.....	282
6.3.3. Analiza i prognoza skutków suszy	286
6.3.4. Wykorzystanie wskaźników roślinności do oceny stanu roślinności.....	291
6.3.5. Rolnictwo a obszary Natura 2000	295
6.4. Infrastruktura drogowa	298
6.4.1. Monitorowanie „cyklu życia” infrastruktury drogowej.....	298
6.4.2. Analiza wpływu dróg na środowisko.....	304

6.5. Gospodarka wodna.....	311
6.5.1. Ocena zagrożenia powodziowego i zarządzanie kryzysowe.....	311
6.5.2. Identyfikacja akwenów (wód powierzchniowych) i powodzi na obrazach radarowych.....	316
6.5.3. Monitoring wód śródlądowych, mórz i oceanów	320
6.6. Leśnictwo.....	327
6.6.1. Globalny monitoring lasów.....	328
6.6.2. Monitoring pożarów lasów.....	336
6.6.3. Globalny system informacji o pożarach – GWIS	340
6.7. Środowisko	342
6.7.1. Serwis Monitorowania atmosfery (Copernicus Atmosphere Monitoring Service).....	343
6.7.2. Zmiana klimatu (Copernicus Climate Change Service).....	348
6.7.3. Przykłady zastosowań zobrazowań satelitarnych w zakresie analiz środowiska	350
6.8. Zarządzanie kryzysowe.....	363
6.8.1. Analiza skutków pożaru lasów.....	363
6.8.2. Analiza skutków huraganu	366
6.8.3. Serwis bezpieczeństwa granic (EUROSUR Frontex)	369
6.8.4. Ochrona przeciwpowodziowa	373
6.9. Ochrona zabytków i dziedzictwa kulturowego	378
6.9.1. Przykłady zastosowania technologii interferometrii różnicowej PSInSAR w monitorowaniu przemieszczeń obiektów inżynierskich – historycznych...380	
6.9.2. Klasyfikacja pokrycia i użytkowania terenu (LULC) w działaniach na rzecz ochrony dziedzictwa kulturowego i krajobrazów kulturowych...384	
6.9.3. Monitorowanie światowego dziedzictwa	388
7. Trendy w teledetekcji satelitarnej.....	392
Epilog	404
Słownik akronimów	410
Literatura	419
Skorowidz	448
Autorzy rozdziałów	456

Wstęp

Drogi Czytelniku,

Gazeta Post-Standard (Advance Publications), wydawana w Syracuse (Nowy Jork, USA), w marcu 1911 roku umieściła pod jedną z reklam hasło o treści: *Use a picture. It's worth a thousand words*, czyli: *Obraz ma wartość tysiąca słów*. Ta sentencja sprzed ponad wieku jest głównym przesłaniem niniejszego podręcznika, który przedstawia zobrazowania teledetekcyjne opisujące od dziesiątków lat językiem cyfrowym naszą planetę.

W wieku XIX określano ówczesne industrialne społeczeństwo jako społeczeństwo *węgla i stali*, po nim nastąpiło *społeczeństwo informacyjne*, a dziś powoli stajemy się *społeczeństwem kosmicznym* – i to nie tylko z powodu powszechności wykorzystywania technologii kosmicznych, ale także z uwagi na poszukiwanie drogi dla dalszego rozwoju naszej cywilizacji – poza Ziemią.

Podręcznik został opracowany na potrzeby szkoleń z zakresu teledetekcji dla administracji publicznej prowadzonych przez Polską Agencję Kosmiczną, w celu lepszego zrozumienia procesów: rejestrowania obrazów powierzchni Ziemi i jej otoczenia przez sensory umieszczone na satelitach oddalonych o setki, a czasem tysiące kilometrów od naszego globu, a także metod przetwarzania danych teledetekcyjnych. Podręcznik ma ułatwić zrozumienie, jak w teledetekcji wykorzystywane jest promieniowanie elektromagnetyczne, które ma pomóc zobaczyć to, co dla naszych oczu jest niewidoczne oraz wykrywać i rejestrować na odległość zjawiska i procesy, których nasze zmysły nie są w stanie śledzić. Podręcznik ma ułatwić wykorzystanie aktualnych i archiwalnych zobrazowań satelitarnych w procesie podejmowania decyzji w jednostkach administracji publicznej, a także wskazać źródła pozyskiwania danych teledetekcyjnych oraz narzędzia do ich przetwarzania. Książka w swym założeniu ma być przewodnikiem po nieznanym i złożonym świecie specjalistycznego nazewnictwa, naukowych pojęć i definicji, skomplikowanych technik oraz technologii satelitarnych.

Napisanie podręcznika będącego kompendium aktualnego stanu wiedzy z zakresu tak dynamicznie rozwijającej się gałęzi nauki i technologii, jakim jest teledetekcja satelitarna, było niebagatelnym zadaniem. Niemal co kilka tygodni pojawiają się bowiem informacje o nowych inicjatywach zmierzających do umieszczenia kolejnych satelitów na orbicie okołoziemskiej w ramach programów rządowych czy projektów komercyjnych. Nie dziwią nas już obrazy płonących lasów w Australii (przełom roku 2019/2020) czy łąk w Biebrzańskim Parku Narodowym (kwiecień 2020), pojawiające się w mediach niemal natychmiast po ich zarejestrowaniu przez sensory satelitów stale obserwujących Ziemię.

Obrazy satelitarne stają się coraz bardziej powszechne, coraz lepiej rozumiane i coraz bardziej potrzebne. Nawet w okresie pandemii COVID-19 sięgamy często po zobrazowania satelitarne (np. Sentinel-5P), by wskazać na przykład, jak poprawiła się jakość powietrza nad Chinami czy Europą w sytuacji zamrożenia gospodarki na wiele tygodni. Dzięki zobrazowaniom satelitarnym monitorujemy ruch na ulicach, obserwujemy puste parkingi przed centrami handlowymi, czy lotniska wypełnione uziemionymi samolotami. Z jednej strony analizujemy zobrazowania satelitarne pod kątem bezpieczeństwa zdrowotnego ludności czy stanu środowiska (np. jakość powietrza, prognozy pogody), a z drugiej strony badamy wpływ zachodzących zmian na gospodarkę. Teledetekcja satelitarna przyczynia się do podejmowania trafniejszych decyzji przez administrację pu-

bliczną, naukowcom pozwala na lepsze rozumienie zjawisk i procesów zachodzących na naszej planecie, a końcowym odbiorcom, np. rolnikom, na stosowanie specjalistycznych aplikacji w swoich gospodarstwach w celu optymalizacji plonów i prowadzenia precyzyjnego rolnictwa.

Dzięki powszechnemu dostępowi do danych satelitarnych za pośrednictwem różnych rozwiązań informatycznych, użytkownicy mogą wykorzystywać zobrazowania gromadzone w zasobach o wolumenie liczonym już w gigabajtach, terabajtach czy petabajtach. Coraz częściej ich przetwarzanie odbywa się w chmurach obliczeniowych, często bez potrzeby bezpośredniego pobierania obrazów na dysk komputera, a wyniki przekazywane są do specjalnie stworzonych do tego celu aplikacji użytkownika.

Dziś nie jesteśmy w stanie funkcjonować bez informacji teledetekcyjnych o zjawiskach i procesach zachodzących na Ziemi w skali globalnej i regionalnej, a czasem nawet lokalnej. Teledetekcja stała się sprzymierzeńcem decydentów w procesie podejmowania kluczowych decyzji, zasilając branżowe bazy danych w odpowiednie informacje niezbędne w procesie zarządzania i monitorowania środowiska Ziemi.

W imieniu wszystkich autorów poszczególnych rozdziałów niniejszego podręcznika, redaktorzy życzą Państwu inspirującej lektury.

*prof. dr hab. inż. Beata Hejmanowska
dr hab. inż. Piotr Wężyk, prof. UR*

1. Wprowadzenie do teledetekcji satelitarnej

Człowiek musi wznieść się ponad Ziemię – na szczyt atmosfery i poza nią – bo tylko w ten sposób w pełni zrozumie świat, w którym żyje.

Sokrates, ok. 500 rok p.n.e.

Do niedawna uważano, że jedynym naturalnym satelitą Ziemi jest Księżyc, ale gdy w 2016 roku Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (ang. *National Aeronautics and Space Administration*, NASA), za pomocą teleskopu Pan-STARRS 1 mieszczącego się w obserwatorium na Hawajach, odkryła planetoidę HO3 – pogląd ten natychmiast zweryfikowano. Planetoida ta jest stosunkowo niewielka (średnica około: 30–100 m) i okrąża naszą planetę po dość szerokiej, rozciągniętej orbicie, prawdopodobnie od około 100 lat (Kosmonauta, 2020). Na orbitach okołoziemskich znajduje się dzisiaj również tysiące innych obiektów. To w głównej mierze sztuczne satelity lub ich fragmenty, które dla bezpieczeństwa lotów kosmicznych muszą być stale monitorowane.

1.1. Sztuczne satelity Ziemi

Piotr Wężyk

Sztuczny satelita Ziemi to statek kosmiczny wykonany przez człowieka z wykorzystaniem najnowszych, innowacyjnych osiągnięć nauki oraz najnowocześniejszych technologii. Wyniesiony odpowiednio na orbitę okołoziemską spełnia powierzoną mu misję, a jego cykl życia zależy w dużej mierze od użytych do jego budowy materiałów i komponentów, praw fizyki (np. grawitacji Ziemi) i aktywności Słońca.

1.1.1. Historia teledetekcji

Człowiek dzięki swojej ciekawości i chęci poznawania otaczającego go świata od zawsze poszukiwał sposobu, aby spojrzeć na planetę Ziemię inaczej. W trakcie rozwoju cywilizacji opracowywano wiele innowacyjnych metod, aby tego dokonać. Od momentu, kiedy człowiek był w stanie wznieść się w powietrze i zabrać ze sobą aparat fotograficzny, możemy mówić o rozpoczęciu ery obserwacji Ziemi. W XIX wieku, wraz z upowszechnieniem się pierwszych technik fotograficznych oraz z rozwojem lotów balonowych, spojrzeliśmy na świat z nowej perspektywy – z lotu ptaka.

Autorem pierwszej znanej fotografii lotniczej był Gaspard-Felix Tournachon. Już w 1958 roku wykonał on z balonu zdjęcie okolic Łuku Triumfalnego w Paryżu (Campbell i Wynne, 2011). Inny znany przykład pionierskiej teledetekcji to zdjęcie Bostonu wykonane również z balonu w 1860 roku przez fotografa Jamesa Wallace'a Blacka. Wykonał on zdjęcie z pułapu 366 m nad miastem, zatytułował je *Boston z perspektywy orła i dzikiej gęsi* (Khorram i in., 2016). Jeszcze inna wzmianka o zastosowaniu zdalnej rejestracji obrazu powierzchni Ziemi dotyczy wykorzystania zdjęć wykonanych z balonu podczas oblężenia i ostrzeliwania przez artylerię fortu Richmond podczas wojny secesyjnej w Ame-

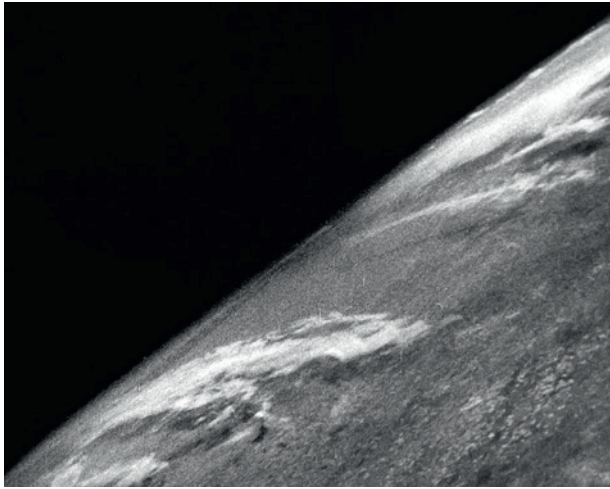
ryce Północnej. Poza zastosowaniami militarnymi, pierwsze znane użycie zdjęć lotniczych w celach pomiarowych (fotogrametrycznych) dla potrzeb np. inwentaryzacji drzewostanów, wiązało się z wykonaniem w 1887 roku zdjęć z balonu okolic wsi Zehdenick koło Berlina, które następnie zostały wykorzystane do aktualizacji map leśnych (Hildebrandt, 1987).

W okresie I wojny światowej wykorzystywano gołębie pocztowe do przenoszenia mikroaparatów fotograficznych wykonujących zdjęcia zwiadowcze w trakcie przelotu ptaka nad frontem walk. Z historycznego punktu widzenia, to właśnie konflikty wojenne przyczyniły się do dynamicznego rozwoju technologii budowy różnorodnych platform latających, takich jak samoloty, balony, sterowce, służących do przenoszenia aparatów, oraz do ulepszania konstrukcji i stałego podnoszenia parametrów technicznych samych kamer fotogrametrycznych (Campbell i Wynne, 2011).

W 1935 roku z pułapu około 20 km z bezzałogowego balonu obserwacyjnego Explorer II wykonano zdjęcia Ziemi, dzięki którym po raz pierwszy potwierdzono fakt istnienia krzywizny naszego globu. Okres II wojny światowej to kolejny skok w rozwoju technik fotografowania. Wtedy wynaleziono m.in. analogowy trójwarstwowy materiał fotograficzny CIR (*Color-InfraRed*) opatentowany później przez firmę Kodak. Film wykorzystywano do detekcji pozycji grup wojsk japońskich ukrywających się pod siatkami maskującymi na wyspach Pacyfiku. W następstwie procesów cyfryzacji idea rejestrowania obiektów w bliskiej podczerwieni przyczyniła się do powstania detektorów (sensorów) wielospektralnych służących obserwacjom stanu roślinności, takich jak choćby MSS (*Multi Spectral Scanner*) czy TM (*Thematic Mapper*) montowanych na satelitach Landsat (NASA).

Poza pracami nad specjalistycznymi materiałami fotolotniczymi czy kamerami czułymi na podczerwień, prowadzono również próby konstrukcyjne samolotów odrzutowych i rakiet balistycznych V-1 oraz V-2 (*Vergeltungswaffe-2*, pol. *broń odwetowa*) wyposażonych w głowice uderzeniowe. Wyścig wojsk amerykańskich i radzieckich pod koniec II wojny światowej miał na celu przejęcie niemieckich konstruktorów pocisków rakietowych V-2, pracujących pod kierunkiem Wernhera von Brauna. Pojmani Niemcy naukowcy pracowali po wojnie dla obu tych mocarstw, wnosząc znaczący wkład w rozwój rakiet balistycznych. Już 24 października 1946 roku z rakiety V-2 wystrzelonej z White Sands Missile Range (Nowy Meksyk, USA) wykonano zdjęcie powierzchni Ziemi z pułapu 105 km (ryc. 1.1). Rakieta V-2 była pierwszym statkiem, który przekroczył tzw. linię Kármána przebiegającą na wysokości 100 km (NASA, 2020). Jest to umowna granica pomiędzy atmosferą ziemską a przestrzenią kosmiczną, zgodnie z definicją przyjętą przez Międzynarodową Federację Lotniczą (fr. *Fédération Aéronautique Internationale*; FAI), która zajmuje się m.in. ustalaniem norm w aeronautyce i astronautyce.

Era podboju kosmosu przez naszą cywilizację rozpoczęła się wraz z wyniesieniem na orbitę 4 października 1957 roku pierwszego sztucznego satelity Ziemi. Satelitą tym był Sputnik 1, co w języku rosyjskim oznacza „towarzysza podróży”. W tym okresie trwała tzw. zimna wojna, której towarzyszył zaciekle wyścig zbrojeń, a także walka ówczesnych mocarstw o dominację w przestrzeni kosmicznej. Zdawano sobie sprawę, że kraj, który jako pierwszy wyniesie w przestrzeń kosmiczną sztuczny satelitę Ziemi, zdominuje erę lotów kosmicznych. Rosjanie wyprzedzili Amerykanów w tym wyścigu o około rok. Sputnik ważył 83 kg, miał średnicę 58 cm i przez 92 doby 1367 razy okrążył Ziemię. Przebył łącznie ponad 60 mln kilometrów. Dzięki dwóm nadajnikom pracującym na częstotliwościach 20 i 40 MHz nadawał przez krótki czas trwania misji sygnały radiowe, aż do momentu rozładowania baterii. Były to pierwsze bada-



Ryc. 1.1. Pierwsze zdjęcie powierzchni Ziemi wykonane z pułapu 105 km z rakiety V-2
(źródło: White Sands/APL, 2006)

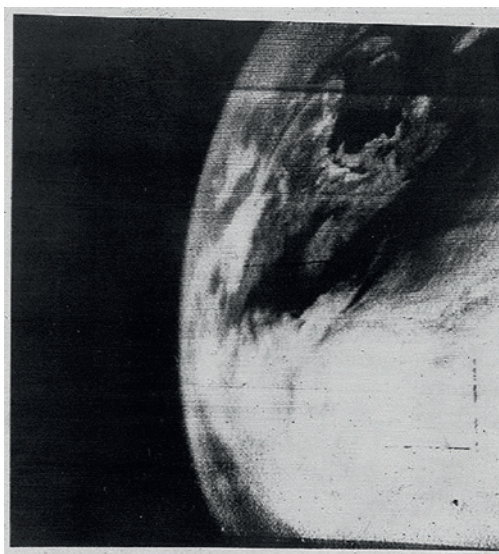
nia nad propagacją fal radiowych w jonosferze ziemskiej. Analiza sygnałów radiowych została wykorzystana do oceny gęstości elektronów w jonosferze, a odczyty wartości temperatury i ciśnienia były przekazywane na Ziemię dzięki odpowiednio modulowanym impulsom radiowym. Sputnik 1 został umieszczony na orbicie za pomocą rakiety R-7. Satelita spalił się w atmosferze Ziemi 3 stycznia 1958 roku (Sputnik, 2020). Amerykański nasłuch wojskowy wychwycił natychmiast sygnały Sputnika na orbicie okołoziemskiej. To doświadczenie legło u podstaw koncepcji wykorzystania sztucznych satelitów do zbudowania w późniejszym okresie satelitarnego systemu pozycjonowania GPS-NAVSTAR (Global Positioning System-Navigation Signal Timing and Ranging).

W grudniu 1954 roku Amerykanie, równoległe z Rosjanami, rozpoczęli prace nad swoim pierwszym satelitą (1958 Alpha 1). Mierzył on 2,03 m długości i miał 15,24 cm średnicy, przy wadze zaledwie 14 kg. Został wyposażony w sześciokrotnie mniejszy ładunek użytkowy niż Sputnik 1. Start rakiety nośnej Juno utrzymywano w wielkiej tajemnicy. 31 stycznia 1958 roku satelita Explorer 1 (tak nazwano satelitę 1958 Alfa1) został umieszczony na orbicie. Explorer na swoim pokładzie posiadał, m.in. licznik Geigera-Müllera, detektory mikrometeoroidów, czułe termometry wewnętrzne do mierzenia wewnętrznej i zewnętrznej temperatury, w okresach, gdy satelita był oświetlony promieniami Słońca lub gdy przebywał w cieniu Ziemi, a także nadajniki, których masa wraz z bateriami chemicznymi wynosiła około 900 g (Explorer, 2020).

Za pierwszy lot otwierający erę załogowych lotów kosmicznych uznaje się misję Wostok 1 rozpoczętą przez Rosjan 12 kwietnia 1961 roku. To wtedy kosmonauta Jurij Gagarin dokonał kompletnego okrążenia Ziemi w czasie około 1 godziny i 48 minut. Z kolei pierwszym Amerykaninem w kosmosie był kosmonauta Alan Shepard, który odbył swój lot w ramach programu Mercury zaledwie miesiąc po locie Gagarina. Jednak dopiero rok później pierwszy Amerykanin (John Glenn) zdołał okrążyć Ziemię po jej orbicie. W roku 2003, tj. po ponad 40 latach od tamtych wydarzeń, Chiny dołączyły do dwóch mocarstw kosmicznych (Rosji i USA) zdolnych samodzielnie wynieść człowieka w kosmos, wystrzelując na orbitę pierwszego tajkonautę (astronautę, pułkownika Yang Liwei) na pokładzie pojazdu Shenzhou 5 (PWN, 2020).

Pierwszy satelita meteorologiczny Vanguard 2 (prototyp stworzony przez korpus USASC – United States Army Signal Corps), został wystrzelony 17 lutego 1959 roku w celu pomiaru rozkładu zachmurzenia w części jego orbity oświetlonej Słońcem oraz do dostarczenia informacji o gęstości atmosfery w ciągu zaplanowanych 19 dni eksperymentu. Właściwa era satelitów meteorologicznych rozpoczęła się jednak w roku 1960, wraz z wyniesieniem na orbitę pierwszego amerykańskiego (Goddard Space Flight Center, NASA) satelity TIROS-1 (Television Infrared Observational Satellite). W ciągu 78 dni swego funkcjonowania przysyłał on na Ziemię telewizyjny sygnał chmur rejestrowany w bliskiej podczerwieni (ryc. 1.2). Jego następcami były serie satelitów ITOS oraz NOAA. W roku 1964 na orbicie, tylko przez bardzo krótki czas (ok. 3 tygodni, awaria urządzeń zasilania energią), funkcjonował meteorologiczny satelita Nimbus, przeznaczony do obserwowania chmur oraz temperatury radiacyjnej lądów. Satelita wyniesiony został na rakiemie Thor SLV-2 Agena B i wykonał blisko 27 tys. zdjęć chmur pokrywających Ziemię. Kilka lat później zastąpił go inny satelita meteorologiczny – Nimbus-2.

Na początku lat 60. XX wieku, Evelyn Pruitt, naukowiec pracująca dla Biura Badań Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych (U.S. Navy's Office of Naval Research), wprowadziła jako pierwsza termin teledetekcja (ang. *Remote Sensing*), gdy zdała sobie sprawę, iż termin „fotografia lotnicza” nie opisuje już dokładnie wielu form obrazów rejestrowanych przy użyciu promieniowania spoza widzialnego obszaru widma (Campbell i Wynne, 2011).



Ryc. 1.2. Obraz Ziemi zarejestrowany przez satelitę TIROS-1 (źródło: NASA, 2009)

W latach 60. XX wieku podczas bardzo wielu misji amerykańskich, takich jak Merkury, Gemini czy Apollo, astronauta wielokrotnie sfotografowali Ziemię z kosmosu. Z tamtego okresu pochodzi bardzo znane zdjęcie, tzw. *Wschód Ziemi* (ryc. 1.3). Ten spektakularny widok Ziemi wznoszącej się ponad powierzchnię Księżyca został uchwycony przez Billa Andersa, pilota księżycowego modułu Apollo 8, podczas pierwszej załogowej podróży wokół Księżyca 24 grudnia 1968 roku. 21 lipca 1969 roku nastąpiło lądowanie człowieka na Księżycu, co miało być dowodem technologicznego zaawansowania naszej cywilizacji i zwieńczeniem programu Apollo prowadzonego w latach 1966–1972.

Prawdopodobnie najświetniejszym w dziejach ludzkości obrazem Ziemi jest jednak zdjęcie znane jako *Blue Marble*, przedstawiające oświetlony glob ziemski (ryc. 1.4). Zostało ono wykonane przez astronautów 7 grudnia 1972 roku podczas misji Apollo 17. Ziemia przypominała astronautom szklaną kolorową kulkę, jaką bawią się dzieci, stąd tytuł tego słynnego zdjęcia. Opublikowano je w okresie wzrostu świadomości ekologicznej i aktywności ruchów społecznych na rzecz ochrony środowiska, przez co stało się symbolem wrażliwości człowieka i unikatowości Ziemi jako naszego miejsca do życia.



Ryc. 1.3. Zdjęcie *Wschodu Ziemi* wykonane w 1968 roku z orbity Księżyca podczas misji Apollo 8 (źródło: NASA, 2018)



Ryc. 1.4. *Blue Marble* – najbardziej znany obraz Ziemi widzianej z kosmosu (źródło: NASA, 2015)

Wielu użytkowników danych teledetekcyjnych rok 1972, poza zakończeniem programu Apollo, kojarzy się zwykle z początkiem ery satelitów i obserwacji Ziemi prowadzonej przez NASA (ang. *Earth Observation*, EO). Wyniesienie statku kosmicznego ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), konstrukcyjnie zbliżonego do satelitów Nimbus, nastąpiło 23 lipca 1972 roku na pokładzie rakiety Delta 0900 z bazy Vanden-

berg w Kalifornii. Rakieta wyniosła satelitę na orbitę o wysokości ponad 900 km i nachyleniu $99,1^\circ$ względem równika. Satelita ETRS-1 wykorzystywany był do pozyskiwania danych teledetekcyjnych dla rolnictwa, leśnictwa, geologii, hydrologii, geografii, kartografii, oceanografii czy meteorologii. Dopiero po jakimś czasie jego nazwę zmieniono na Landsat 1 (Landsat, 2020). Był to pierwszy z całej serii satelitów Landsat (NASA) przeznaczonych do obserwacji Ziemi w zakresach wielospektralnych, w wieloletnim programie, który nieprzerwanie trwa do dzisiaj (Campbell i Wynne, 2011). Ostatni z serii (do tej pory), Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission), umieszczony został na orbicie w 2013 roku. Misje obserwacji Ziemi (EO) przez satelity Landsat będą kontynuowane w przyszłości przez NASA oraz USGS (United States Geological Service) przy wykorzystaniu satelity Landsat 9 (start rakiety ATLAS V z satelitą zapowiadany jest na połowę roku 2021).

W roku 1974 NASA umieściła na orbicie geostacjonarnej (ang. *Geostationary Earth Orbit*, GEO) satelitę meteorologicznego SMS (Synchronous Meteorological Satellite), prekursora dzisiejszej serii satelitów GOES (Geostationary Operational Satellite), co przyczyniło się do poprawy jakości modelowania prognozy pogody. Uzupełnieniem satelitów meteorologicznych był Nimbus-7 (kolejny ze wspomnianej wcześniej serii), wyposażony w spektrometr do pomiaru ozonu. Wykonane przezeń pomiary jednoznacznie potwierdziły istnienie dziury ozonowej na Antarktydzie, co doprowadziło w efekcie do podjęcia międzynarodowych decyzji o ograniczeniu stosowania freonu. Poza satelitą do obserwacji jakości powietrza, w 1978 roku skonstruowano i wyniesiono na orbitę satelitę SeaSat specjalizującego się w badaniach mórz i oceanów (Earth, 2020).

Początki lat 80. XX wieku przyniosły w NASA nowy program budowy promów kosmicznych (ang. *Space Shuttle*), które wyniosły na orbitę okołoziemską m.in. pierwsze elementy Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ang. *International Space Station*, ISS). Nie sposób byłoby nie wspomnieć w tym miejscu o Endeavour (OV-105), ostatnim z promów kosmicznych. Podczas 11 dni misji w lutym 2000 roku agencje kosmiczne USA, Niemiec i Włoch realizowały na jego pokładzie wspólną misję SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), z wykorzystaniem sensorów mikrofalowych (pasmo C oraz X) umieszczonych na najdłuższej antenie w dziejach eksploracji kosmosu (ramię promu kosmicznego Endeavour, na którego końcu zainstalowano anteny, miało długość 60 m). Antena ta wyciągnięta została z luku bagażowego promu kosmicznego. Po kilku latach przetwarzania danych mikrofalowych wygenerowano i udostępniono dla dużej części globu ziemskiego model wysokościowy DTED-1 (znany jako SRTM). Przez długie lata był to jedyny globalny model wysokościowy dostępny do zastosowań cywilnych, o poziomej (XY) rozdzielczości przestrzennej około $3''$ tj. ok. 90 m GSD (Ground Sampling Distance) i błędzie rzędnej wysokościowej modelu (ang. *Root Mean Square Error*, RMSE) nie większym niż 16 m. Model DTED-1 po pewnych udoskonaleniach (np. danymi LiDAR (Light Detection and Ranging) z misji ICESat-1 oraz ASTER Global DEM) wykorzystywany jest w bardzo wielu aplikacjach i projektach badawczych, a niedawno pojawiła się jego nowa wersja NASADEM (Earthdata NASADEM, 2020).

Europejska Agencja Kosmiczna (ang. *European Space Agency*, ESA) 10 lipca 1991 roku zleciła wyniesienie rakiety Ariane 4 z kosmodromu w Gujanie Francuskiej pierwszego europejskiego satelity obserwacyjnego Ziemi ERS-1, który został umieszczony na orbicie na wysokości 785 km. Na pokładzie satelity zainstalowano radiolokator SAR (pasmo C = 5,6 cm), wysokościomierz radarowy oraz instrumenty do pomiaru temperatury powierzchni oceanu i kierunku wiatru na morzu. Obrazy mikrofalowe charakteryzowały

się rozdzielczością przestrzenną 25 m i polaryzacją typu VV (*Vertical Vertical*). Około 4 lata później Europejska Agencja Kosmiczna umieściła na orbicie bliźniaczego satelitę ERS-2, na którym dodatkowo zamontowano instrument do pomiaru poziomu ozonu w atmosferze (ESA ERS, 2020).

Współpraca agencji kosmicznych USA i Francji doprowadziła do zbudowania w 1992 roku satelity TOPEX/Posejdon, powstałego w celu monitorowania poziomu morza i sezonowych zmian w cyrkulacji oceanicznej. W krótkim czasie dane pozyskiwane przez system potwierdziły globalny wzrost poziomu mórz związany z wciąż rosnącą temperaturą powietrza na świecie.

Komercyjne satelity radarowe o wysokiej rozdzielczości pojawiły się w 1995 roku w Kanadzie wraz z satelitą Radarsat-1 obsługiwanym przez firmę MDA Robotics and Automation (MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd). Z kolei niemieckie wspólne przedsięwzięcie rządowej agencji kosmicznej DLR oraz firmy Airbus Defence and Space doprowadziło do powstania systemu mikrofalowego TerraSAR-X (rok 2007) i bliźniaczego satelity TanDEM-X (rok 2010). Dane pozyskane przez te satelity posłużyły do wygenerowania globalnego modelu wysokościowego WorldDEM dystrybuowanego głównie komercyjnie.

Rok 1999 jest niewątpliwie przełomowym w zakresie zobrazowań o wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Wiąże się to z umieszczeniem na orbicie okołoziemskiej satelity IKONOS-2 (Space Imaging), który pierwszy raz w historii ludzkości umożliwił rejestrację obrazu w kanale panchromatycznym (ang. *panchromatic*, PAN) z rozdzielczością przestrzenną poniżej GSD 1,0 m (0,82 m w nadirze, czyli bezpośrednio, prostopadłe pod sensorem do powierzchni Ziemi). Satelita funkcjonował bardzo długo, pozyskując obrazy PAN oraz wielospektralne (ang. *multispectral*, MS, GSD 3,2m) w kanałach RGB (kanał czerwony – ang. *red*, R; zielony – ang. *green*, G oraz niebieski – ang. *blue*, B), czyli zakres widzialny, oraz w bliskiej podczerwieni (ang. *Near InfraRed*, NIR). Średni czas rewizyty tego satelity wynosił 3 dni dzięki kamerze wychylnej do około 30° (ang. *off-nadir*). W ciągu doby IKONOS-2 był w stanie zobrazować 240 000 km² powierzchni Ziemi. Obrazy satelitarne IKONOS-2 o bardzo wysokiej rozdzielczości stały się przełomem w kartografii. Były szeroko wykorzystywane w analizach zmian pokrycia terenu, transporcie morskim i lotniczym, tworzeniu map dla potrzeb wojska, czy w realizacji zadań administracji publicznej. W Polsce, w roku 2004 w Komorowie (koło Ostrowi Mazowieckiej), uruchomiono stację odbiorczą danych z satelity IKONOS-2 oraz Satelitarne Centrum Operacji Regionalnych (SCOR), które, niestety, zamknięto w 2010 roku.

Rozwój satelitarnych systemów bardzo wysokorozdzielczych (GSD < 1,0 m) rozpoczęty przez IKONOS-2 trwał dalej. Wkrótce, w 2001 roku, na orbicie pojawił się konkurencyjny satelita QuickBird-2 (firmy DigitalGlobe) a za nim kolejne. Gwałtowny przyrost liczby umieszczanych nowych satelitów na orbitach Ziemi wymagał lepszej koordynacji na poziomie międzynarodowym, stąd 16 lutego 2005 roku na III Szczycie Obserwacji Ziemi w Brukseli aż 61 państw przyjęło dziesięcioletni plan wdrożenia w życie programu Globalny System Systemów Obserwacji Ziemi (ang. *Global Earth Observation System of Systems*, GEOSS). Projekt ten, wspierany przez niemal 40 organizacji międzynarodowych, jest narzędziem do koordynowania i harmonizacji pracy około 100 tys. urządzeń pomiarowych rozmieszczonych na lądzie, bojach oceanicznych, statkach, dnach oceanów, a także na satelitach obserwacji Ziemi (Earthobservations, 2020). W roku 2007 na orbicie okołoziemskiej znajdowało się już 50 satelitów obserwujących naszą planetę. W tym samym roku Włochy umieściły na orbicie pierw-

szą konstelację 4 satelitów mikrofalowych COSMO-SkyMed-1, z których korzysta m.in. Wojsko Polskie.

Od początku ery podboju Kosmosu wystrzelono już ponad 5000 rakiet wynoszących satelity, elementy Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) lub promy kosmiczne. Tylko niewielka część z wystrzelonych rakiet może powrócić na Ziemię do ponownego wykorzystania, tak jak np. rakiety SpaceX. Zużyte człony rakiet nośnych, nie działające satelity, tysiące drobnych części powstałych w wyniku eksplozji (240 satelitów), zderzeń (10 satelitów), czy nawet świadomego niszczenia satelitów, składają się na miliony śmieci leących z zawrotną szybkością i bardzo powoli zbliżających się do atmosfery ziemskiej. Liczbę wszystkich kosmicznych śmieci (ang. *space debris*) szacuje się na około 170 mln sztuk. Stanowią one ogromne zagrożenie dla ISS oraz innych satelitów. Aby ograniczyć ryzyko kolizji satelitów ze śmieciami kosmicznymi, powołano do życia międzynarodowe organizacje, jak europejskie Konsorcjum Obserwacji i Śledzenia Obiektów Kosmicznych (ang. *Space Surveillance and Tracking, SST*). Prowadzi ono rejestry (bazy danych) obiektów kosmicznych, na bieżąco monitorując trajektorie większych śmieci orbitalnych (ESA Safety Security, 2020). Zdarza się często, że kolizyjna trajektoria lotu śmieci powoduje przełożenie startu rakiet z nowymi satelitami, czy wręcz jest powodem alarmu ewakuacyjnego dla załogi ISS (np. w 2009 i 2015 roku).

Dzisiaj żyjemy niewątpliwie w okresie, który możemy nazwać erą satelitarną. Szacuje się, że od roku 1960 na orbitach okołoziemskich zostało umieszczonych już prawie 9000 sztucznych satelitów Ziemi. Obecnie znajduje się na nich 4987 satelitów, z czego 1957 pozostaje aktywnych (Gisplay, 2019). Najwięcej satelitów należy obecnie do Stanów Zjednoczonych, na drugiej pozycji znajdują się Chiny, a na trzeciej Rosja. Aktywnie zaangażowane w eksplorację przestrzeni kosmicznej są również takie kraje jak Japonia, Wielka Brytania, Indie, Kanada, Luksemburg, Niemcy, Hiszpania oraz Argentyna. Aż 846 satelitów służy celom komercyjnym, w tym dużą część stanowią nanosatelity tworzące ogromne konstelacje. Na przykład około 400 nanosatelitów należy do amerykańskiej firmy Planet Labs, z czego około 150 jest aktywnych. Około 385 satelitów realizuje programy rządowe poszczególnych krajów, natomiast 302 satelity mają przeznaczenie ściśle wojskowe. Elon Musk w 2019 roku rozpoczął umieszczanie na niskiej orbicie nanosatelitów telekomunikacyjnych z serii Starlink w liczbie 12 000 sztuk. Ma ona być później powiększona o dodatkowe 30 000 sztuk (Spacenews, 2020).

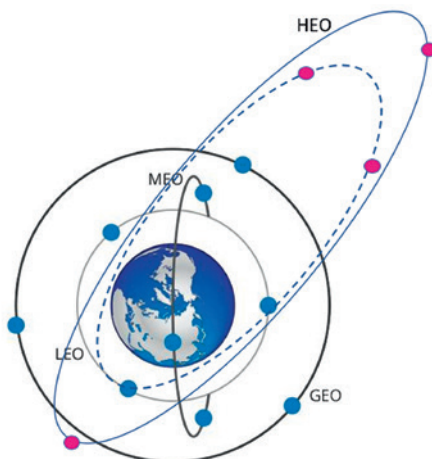
1.1.2. Typy satelitów i ich orbity

Satelity pełnią bardzo wiele ważnych funkcji i ze względu na ich przeznaczenie dzielimy je na: satelity telekomunikacyjne (transmisja danych, radio, telewizja, Internet), nawigacyjne (ang. *Global Navigation Satellite Systems, GNSS*), meteorologiczne, obserwacyjne, technologiczne, wywiadowcze (rozpoznawcze), naukowe (doświadczalne), orbitalne stacje kosmiczne oraz teleskopy kosmiczne.

Ze względu na wysokość umieszczenia satelitów nad powierzchnią Ziemi wyróżnia się (ryc. 1.5) (ESA Enabling Support, 2020):

- niskie orbity okołoziemskie (ang. *Low Earth Orbit, LEO*), które znajdują się na wysokości od 200 (100–500) do 2000 (1000) km nad Ziemią. Na niej umieszczane są głównie satelity obserwacyjne o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, ale czasem też satelity meteorologiczne;

- średnie orbity okołoziemskie (ang. *Medium Earth Orbit*, MEO) – satelity w tej części przestrzeni (od 3000 do 30 000 km na powierzchnię Ziemi) są najczęściej wykorzystywane do nawigacji satelitarnej (np. GPS-NAVSTAR, GALILEO, GLONASS, BEIDOU);



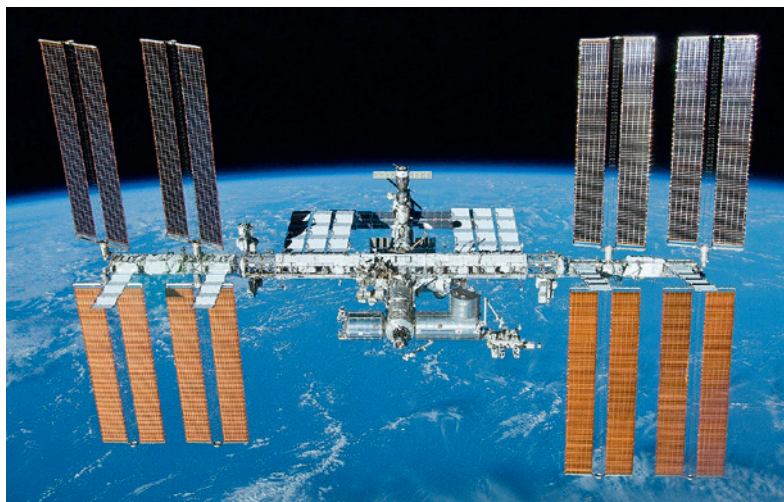
Ryc. 1.5. Typy orbit okołoziemskich (źródło: ESOA, 2020)

- orbitę geostacjonarną (ang. *Geostationary Earth Orbit*, GEO) – odległą o 35 786 km od powierzchni Ziemi. Czas obiegu Ziemi przez satelitę po orbicie GEO jest identyczny z czasem obrotu Ziemi wokół swojej osi. Każdy satelita umieszczony na orbicie GEO może bez przerwy obserwować aż do 42% powierzchni Ziemi. Trzy satelity geostacjonarne, umieszczone w równej odległości od siebie, teoretycznie mogą objąć zasięgiem obszar całego globu ziemskiego, za wyjątkiem fragmentów obszarów okołobiegunowych. W przypadku orbity GEO, naziemna antena odbiorcza skierowana jest bezpośrednio na konkretnego satelitę, stąd nie ma potrzeby zmian jej położenia w ciągu doby. Satelity na orbitach GEO stosowane są przede wszystkim w telekomunikacji i obserwacjach meteorologicznych. Obrazy z satelitów meteorologicznych mogą być pozyskiwane nawet co 15 min., co pozwala na tworzenie serii wieloczasowych (w tym również animacji) obrazów powierzchni terenu oraz chmur. Ze względu na dużą wysokość orbity, szczegółowość obrazów teledetekcyjnych jest bardzo niska (GSD ok. 1–6 km);
- silnie eliptyczne orbity (ang. *Highly Elliptical Orbits*, HEO), na których poruszają się satelity Tundra (obieg 24 godziny, apogeum – czyli największa odległość od Ziemi: 48 000 km) oraz Molnya (obieg 12 godzin, apogeum około 40 000 km);
- orbity pseudo-satelitów tzw. HAPS (*High-Altitude Platform Systems*), odległe od Ziemi o około 20–50 km, przeznaczone dla statków bezzałogowych, głównie dla celów telekomunikacyjnych i obserwacyjnych.

Trajektorie satelitów na orbitach LEO przebiegają nad biegunami lub w ich pobliżu, a ich nachylenie w stosunku do równika wynosi 90°. Szczególnym ich przypadkiem są orbity tzw. heliosynchroniczne (ang. *Sun-Synchronous Orbit*, SSO; 600–800 km nad Ziemią), czyli, jak sama nazwa wskazuje, są one synchronizowane z ruchem Ziemi wokół Słońca. Rejestrowany przez satelitę obraz oświetlany jest w podobny sposób, zawsze

o tym samym czasie słonecznym (lokalnym), co ułatwia porównywanie kolejnych obrazów tego samego obszaru.

Prędkość satelity na orbicie okołobiegunowej musi wynosić minimalnie 7,8 km/s, co stanowi tzw. pierwszą prędkość kosmiczną. Podczas każdego pełnego przelotu, trwającego około 90 min., Ziemia wykonuje obrót, w wyniku czego satelita obrazuje w wąskich pasmach poszczególne fragmenty jej powierzchni. Po kilku lub kilkunastu dniach lub tygodniach satelita obrazuje ponownie ten sam obszar.



Ryc. 1.6. Międzynarodowa stacja kosmiczna ISS (źródło: NASA, 2019)

Nietypowym statkiem kosmicznym na niskiej orbicie LEO jest Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ang. *International Space Station*, ISS) (ryc. 1.6). Jej budowę rozpoczęto w 1998 roku. Duże komponenty ISS były wynoszone przez amerykańskie promy kosmiczne. Już po dwóch latach od rozpoczęcia tego projektu pierwsze moduły stacji zostały zamieszkane przez astronautów. ISS jest wspólną inicjatywą kilku krajów, w tym: USA (NASA), Rosji (ROSKOSMOS), Europy (ESA), Japonii (JAXA), Kanady (CSA) i innych. Stacja orbitalna ISS znajduje się na wysokości około 420 km nad Ziemią i okrąża ją około 16 razy na dobę (ISS, 2020). Na ISS umieszczono bardzo wiele instrumentów, takich jak np. GEDI (skaner laserowy) czy też kamery wysokorozdzielcze, dzięki którym na żywo można śledzić obraz Ziemi.

1.2. Promieniowanie elektromagnetyczne

Beata Hejmanowska

Teledetekcja oznacza zdalne wykrywanie obiektów i zjawisk, głównie dzięki wykorzystaniu promieniowania elektromagnetycznego. Poza opisanymi w niniejszym podręczniku technikami zdalnej obserwacji istnieją również inne jak np. echolokacja wykorzystująca fale akustyczne. W rozdziale opisane zostały podstawy fizyczne zjawiska promieniowania elektromagnetycznego oraz procesy, które zachodzą w atmosferze i na powierzchni Ziemi.

1.2.1. Definicja promieniowania elektromagnetycznego

Człowiek widzi obiekty jedynie wtedy, gdy są one oświetlone światłem naturalnym (np. Słońca) lub sztucznym (inne źródła energii). To właśnie obecność światła, a dokładnie wzajemna interakcja światła z otaczającymi obiektami umożliwia nam postrzeganie świata. Światłem potocznie nazywamy zakres promieniowania elektromagnetycznego (PEM), które jest dostrzegalne przez człowieka. Źródłem promieniowania jest ruch drgający elektronów, atomów, cząstek czy ładunków elektrycznych. Zjawisko promieniowania elektromagnetycznego jest tajemnicze i do końca niepoznane, ponieważ nie opracowano do tej pory jednorodnej teorii je opisującej. W fizyce klasycznej opis opiera się na falowych właściwościach PEM, podczas gdy w fizyce nowoczesnej na jego właściwościach korpuskularnych. Mówimy o tak zwanej teorii korpuskularno-falowej PEM. Podejście falowe traktuje promieniowanie jako przepływ energii za pomocą zmiennego pola elektromagnetycznego w postaci fali rozchodzącej się z prędkością światła.

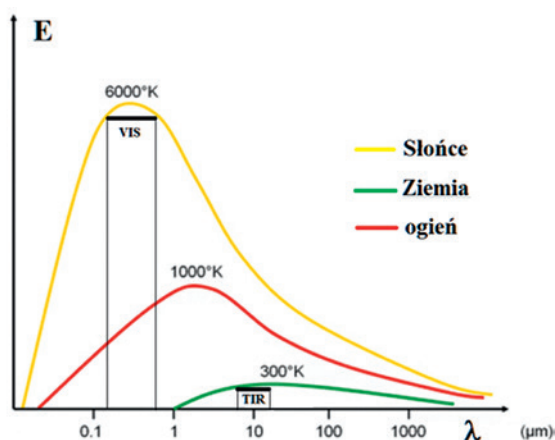
W związku z tym definiuje się takie wielkości jak długość (λ) i częstotliwość (f) fali, które są ze sobą powiązane prędkością światła (c – stała fizyczna: 299 792 458 m/s):

$$\lambda = c \cdot f \quad (1.1)$$

Z drugiej strony PEM tłumaczymy jako przepływ fotonów, które również przemieszczają się z prędkością światła. Fotonów, czyli cząstek nieposiadających masy, ale mających określoną energię proporcjonalną do częstotliwości fali i stałej Plancka:

$$E = h \cdot f \quad (1.2)$$

Z powyższego wzoru można obliczyć energię dla poszczególnych długości fali. Nie oznacza to, że w przypadku konkretnego promieniowania, zawsze w przypadku fal krótkich i o dużej częstotliwości mamy do czynienia z dużą energią promieniowania, a w przypadku fal długich i o niskiej częstotliwości z małą energią. Zależy to bowiem od składu widmowego PEM, czyli energii promieniowania w zależności od długości fali (ryc. 1.7), która z kolei zależy od temperatury ciała. Przy analizowaniu wykresu zależności PEM Słońca od długości fali można zauważyć, że udział promieniowania krótkofalo-



Ryc. 1.7. Zależność energii promieniowania od długości fali w zależności od temperatury ciała: na wykresie zaznaczono przykładowy zakres fal widzialnych (VIS) i termalnych (TIR) wykorzystywany w teledetekcji (źródło: SEOS, 2020b)

wego i długofalowego jest mały, ale oczywiście energie fal krótkich są znacznie większe niż fal długich.

Teoria teledetekcji opiera się na trzech prawach fizycznych: prawie Plancka, prawie przesunięć Wiena i prawie Stefana-Boltzmana.

Prawo Plancka definiuje zależność energii promieniowania ($E(\lambda)$) od temperatury kinetycznej ciała (T) i długości fali (λ). W ogólnym przypadku dotyczy ono tzw. ciała doskonale czarnego, które całkowicie pochłania promieniowanie i w całości je również emituje.

$$E(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1.3)$$

gdzie:

$$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{m}$$

Drugie z praw – prawo Wiena, zwane też prawem przesunięć Wiena, głosi, że wraz ze wzrostem temperatury ciała maksimum promieniowania przesuwa się w kierunku fal krótszych:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (1.4)$$

Natomiast prawo Stefana-Boltzmana określa całkowitą moc promieniowania emitowaną przez ciało doskonale czarne o temperaturze (T) i jest całką (sumą) mocy promieniowania dla wszystkich długości fal:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (1.5)$$

gdzie:

$$\sigma - \text{stała Stefana-Boltzmana} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4).$$

Podczas rejestracji teledetekcyjnej wielkość promieniowania elektromagnetycznego jest zapisywana umownie za pomocą liczb z określonego zakresu od 0 do 255, jeśli zapisu dokonujemy na ośmiu bitach (1 bajt) lub od 0 do 65536, jeśli na 16 bitach (2 bajty). Wielkości te muszą zostać w dalszej kolejności przeliczone do postaci jednostek fizycznych ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$). Powyższe wzory mają kluczowe znaczenie. Użytkownik zwykle nie musi wykonywać obliczeń samodzielnie, ponieważ obecnie większość obrazów teledetekcyjnych jest już wstępnie przetworzona i dostępne są gotowe produkty, które zostały omówione w dalszej części podręcznika.

Warto jednak zdawać sobie sprawę z pewnych właściwości PEM. Przykładowo, analizując PEM (ryc. 1.7), można zauważyć, że maksimum promieniowania słonecznego przypada na zakres fal widzialnych (pokrywa się to dokładnie z zakresem fal, które widzi człowiek). Ponadto prawo przesunięć Wiena umożliwia rejestrację promieniowania Ziemi w zakresie fal termalnych, ponieważ w tym zakresie maleje udział promieniowania słonecznego, a rośnie promieniowania Ziemi. Z kolei z prawa Stefana-Boltzmana korzystamy zawsze, kiedy chcemy określić zdalnie temperaturę obiektu. Jak widać ze wzoru 1.5, wystarczy pomierzyć wielkość całkowitej energii promieniowania wyemitowanej przez ciało doskonale czarne, żeby wyznaczyć jego temperaturę. Ponadto warto również zdawać sobie sprawę z wielkości emitowanej energii. Przykładowo ciało

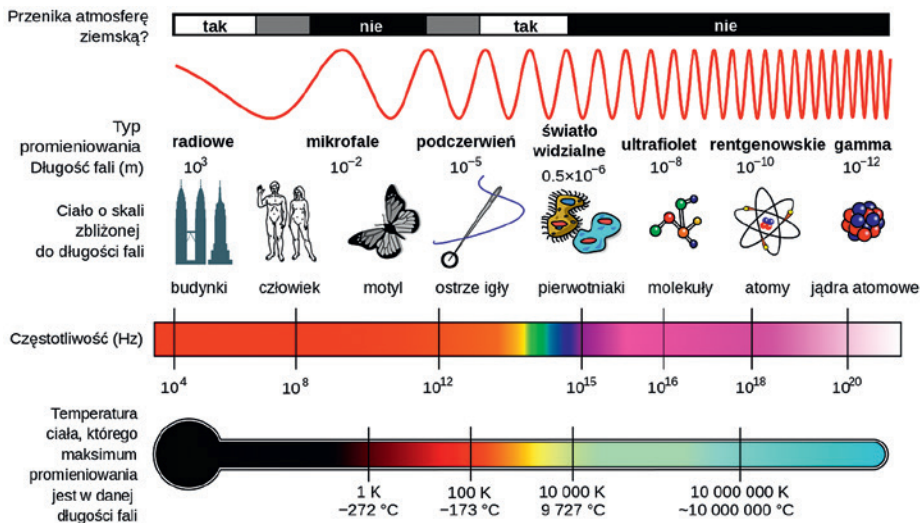
o temperaturze 36,6°C (ok. 300 K) emituje z powierzchni jednego m² ok. 0,5 kW, a ciało o temperaturze 100°C (373 K) ok. 1 kW, podczas gdy Słońce o temperaturze 6000K emituje aż ok. 70 MW. Przytoczone powyżej prawa fizyczne mają praktyczne zastosowanie w teledetekcji, ponieważ opisują one, co i jak może zostać zarejestrowane i w dalszej kolejności analizowane. Teoretycznie ciało emituje promieniowanie w całym zakresie długości fal od zera do nieskończoności. Z tym, że ilość tego promieniowania jest zmienna w zależności od długości fali i dąży do zera dla każdego ciała, zarówno dla fal krótkich, jak i długich (ryc. 1.7).

Żeby można było zarejestrować promieniowanie, muszą zostać spełnione trzy warunki: po pierwsze, musimy mieć detektor czuły na dane promieniowanie, na daną długość fali, po drugie, źródło promieniowania musi emitować promieniowanie o tej długości fali, a po trzecie, promieniowanie musi dotrzeć do detektora. Warto zauważyć, że nie istnieją sensory wrażliwe na cały zakres PEM. Najlepszym przykładem jest oko ludzkie, uczulone na promieniowanie widzialne, dokładnie w zakresie, w którym Słońce ma maksymalną moc promieniowania. Promieniowanie widzialne obejmuje jedynie bardzo wąski wycinek spektrum elektromagnetycznego w zakresie długości fal: 400–700 nm. Fale krótsze (rentgenowskie, gamma, kosmiczne) mają bardzo duże częstotliwości i w związku z tym bardzo dużą energię (wzór 1.2), dlatego też są szkodliwe dla żywych organizmów na Ziemi, ale na szczęście tłumione przez atmosferę. Zakres fal dłuższych niż widzialne to: podczerwień, mikrofałe i fale radiowe (ryc. 1.8, tabela 1.1). Spektrum elektromagnetyczne dzielimy na zakresy, głównie z uwagi na obszar zastosowań poszczególnych długości fali. Rejestracja promieniowania elektromagnetycznego wymaga, aby do sensora o danej czułości dotarła odpowiednia ilość promieniowania z zakresu rejestracji sensora. Rozchodzenie się PEM w atmosferze jest różne, w zależności od długości fali, niektóre fale są praktycznie całkowicie tłumione przez atmosferę, jak wspomniane promieniowanie krótkie: rentgenowskie, gamma, kosmiczne lub całkowicie przez atmosferę przepuszczane, jak promieniowanie widzialne czy radiowe (ryc. 1.9). Zakresy długości fal, w których PEM jest przepuszczane przez atmosferę, są nazywane oknami atmosferycznymi. Oprócz okna zakresu widzialnego i fal radiowych są dwa dodatkowe okna obejmujące podczerwień i mikrofałe.

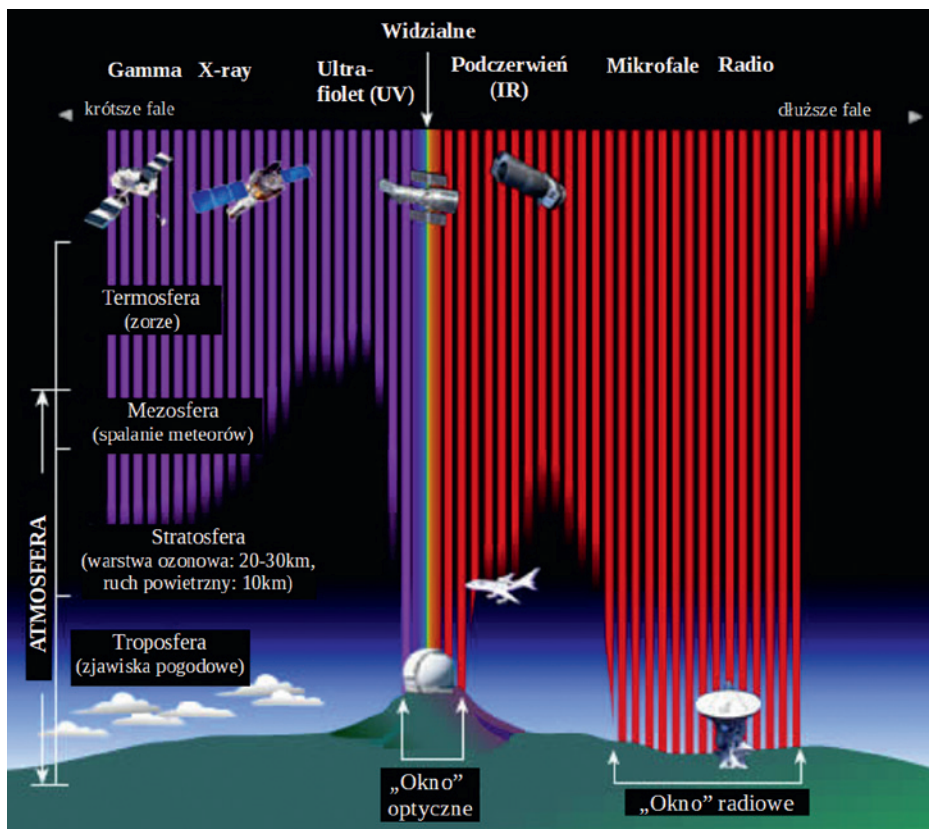
Tabela 1.1. Zakres PEM wykorzystywany w teledetekcji

Zakres PEM	Długość fali
UV (UltraViolet)	300–400 nm
VNIR (Visible & Near InfaRed)	400–1 400 nm
SWIR (Short-Wave InfaRed)	1 400–2 500 nm
TIR (Thermal InfaRed)	2 500–14 000 nm
MW (Microwave)	0,75–100 cm

Zanim PEM dotrze do detektora znajdującego się – na przykład – w instrumencie zainstalowanym na satelicie musi pokonać w przypadku satelitów (Landsat, Sentinel, WorldView) odległość kilkuset kilometrów. Promieniowanie przechodzi przez atmosferę, pada na powierzchnię Ziemi, jest odbijane i po powtórny przejściu przez atmosferę i po dotarciu do detektora, może zostać zarejestrowane. Promieniowanie przechodząc przez atmosferę wchodzi z nią w interakcję, może zostać rozproszone lub zaabsorb-



Ryc. 1.8. Widmo promieniowania elektromagnetycznego (źródło: Spektrum, 2008)



Ryc. 1.9. Tłumienie promieniowania w atmosferze oraz tzw. okna atmosferyczne (źródło: IU NASA, 2013)

bowane (ryc. 1.10). Rozproszenie polega na zmianie kierunku promienia światła i jest spowodowane obecnością różnych cząsteczek w atmosferze. Może być selektywne, tzn. zależne od długości fali lub nieselektywne, czyli niezależne od długości fali. Obecność małych cząsteczek, mniejszych niż długość fali (cząsteczki pyłu, azotu, tlenu) powoduje rozpraszanie Rayleigha, które występuje głównie w górnej warstwie atmosfery i rośnie wraz ze zmniejszaniem się długości fali (dlatego niebo jest niebieskie; zakres niebieski to promieniowanie o najkrótszej długości fali w zakresie widzialnym). Rozpraszanie typu Mie przeważa w dolnej części atmosfery, następuje na cząsteczkach o rozmiarze porównywalnym z długością fali (cząsteczki pyłów, dymu i pary wodnej) i rośnie wraz z długością fali. Rozpraszanie nieselektywne występuje na cząsteczkach dużo większych niż długość fali, co w praktyce oznacza rozpraszanie promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni i jest jednakowe dla wszystkich długości fali. Tego rodzaju rozpraszanie można zaobserwować na cząsteczkach chmur czy zamgleniach, które właśnie z tego powodu widzimy jako białe (B+G+R = WHITE).



Ryc. 1.10. Interakcja PEM z atmosferą: rozproszenie, rozproszenie nieselektywne, absorpcja (źródło: NRCAN, 2019)

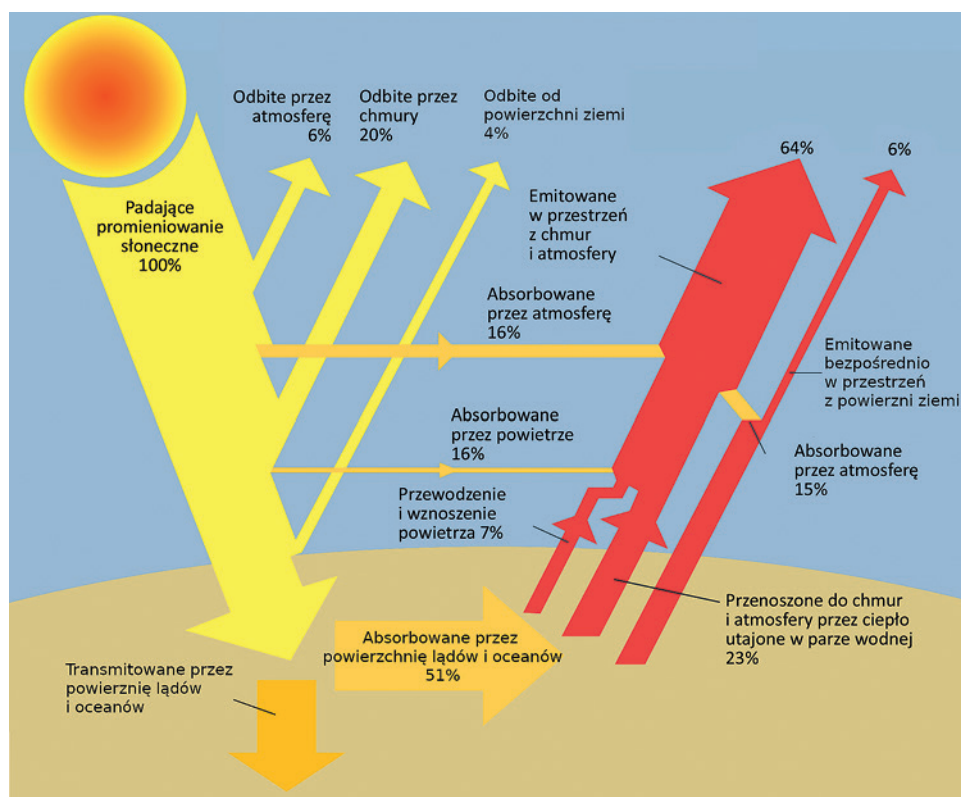
1.2.2. Interakcja promieniowania elektromagnetycznego z powierzchnią Ziemi

Interakcja PEM z atmosferą i z powierzchnią Ziemi ma decydujące znaczenie w teledetekcji. Tłumienie w atmosferze wpływa na ilość promieniowania docierającego do powierzchni Ziemi, natomiast zjawiska fizyczne związane z oddziaływaniem PEM z obiektami na Ziemi determinują ilość promieniowania, które opuszcza powierzchnię Ziemi i może dotrzeć do detektora, oczywiście wcześniej przechodząc ponownie przez atmosferę. Promieniowanie jest zatem dwukrotnie osłabiane, raz w trakcie przechodzenia przez atmosferę w kierunku Słońce – powierzchnia Ziemi i drugi raz w kierunku powierzchni Ziemi – sensor.

Padające PEM (E) jest przez powierzchnię Ziemi częściowo odbijane (E_r), a w przypadku obiektów przezroczystych transmitowane (E_t). Część promieniowania jest pochłaniana, czyli absorbowana (E_{abs}), powodując wzrost temperatury obiektów. W przypadku promieniowania odbitego mamy na myśli zarówno odbicie zwierciadlane, jak i rozproszenie na powierzchni obiektu. Zjawisko odbicia zwierciadlanego oznacza, że padający promień jest odbijany pod takim samym kątem, pod jakim pada na powierzchnię. Typowym przykładem jest lustro.

W teledetekcji zjawisko to jest czasem widoczne na obrazach w postaci bardzo jasnych rozbłysków na powierzchni falującej wody w momencie, kiedy akurat spełniony jest ten warunek geometryczny i detektor „widzi” np. mały fragment powierzchni wody pod tym samym kątem, pod jakim padają na niego promienie słoneczne (ryc. 1.11). W przypadku odbicia zwierciadlanego obiekt jest widoczny tylko wtedy, kiedy kąt odbicia jest równy kątowi padania. Większość obiektów na powierzchni Ziemi nie odbija promieniowania w sposób zwierciadlany, a rozprasza promieniowanie w mniej lub bardziej jednorodny sposób tak, że zarejestrowane promieniowanie nie zależy od kąta rejestracji. Obiekty widzimy w zbliżony sposób, niezależnie od kąta pod jakim je oglądamy. Mogą one być jaśniejsze lub ciemniejsze w zależności od kąta oświetlenia. Biorąc pod uwagę wyżej opisane składowe, na które rozkłada się promieniowanie padające, można sformułować równanie:

$$E = E_{\alpha} + E_r + E_{abs} \quad (1.6)$$



Ryc. 1.11. Interakcja PEM z powierzchnią Ziemi (źródło: Earthguide, 2020 – zmieniony)

Metodami teledetekcyjnymi można zarejestrować promieniowanie, które opuści powierzchnię Ziemi, czyli promieniowanie odbite. Promieniowania transmitowanego nie można zarejestrować za pomocą sensora umieszczonego na platformie latającej, ze względu na kierunek rozchodzenia się tego promieniowania. Promieniowanie absorbowane jest z kolei pochłaniane przez obiekt, powodując wzrost jego temperatury i nie może być bezpośrednio zarejestrowane z użyciem technik teledetekcyjnych. Jednocze-

śnie obiekty, które absorbują PEM, również je emitują, a to promieniowanie można już zarejestrować teledetekcyjnie. Jeśli założymy, że nie ma dodatkowych źródeł energii, to energia, która została zaabsorbowana (E_{abs}) zostanie wyemitowana (E_e), a równanie 1.6 przyjmie postać:

$$E = E_\alpha + E_\tau + E_\varepsilon \quad (1.7)$$

Ilość promieniowania padającego, a zatem również odbijanego, transmitowanego i emitowanego zależy od pory roku, dnia i szerokości geograficznej. W celu standaryzacji i umożliwienia porównywania obrazów teledetekcyjnych wykonanych w różnych miejscach na Ziemi i w różnym czasie, można podzielić obustronnie równanie 1.7 przez wielkość promieniowania padającego (E) uzyskując równanie:

$$1 = \frac{E_\alpha + E_\tau + E_\varepsilon}{E} \quad (1.8)$$

Można je uprościć, definiując tzw. współczynniki odbicia (α), transmisji (τ) i emisyjności (ε):

$$1 = \alpha + \tau + \varepsilon \quad (1.9)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{E_\alpha}{E} \quad (1.10)$$

$$\tau = \frac{E_\tau}{E} \quad (1.11)$$

$$\varepsilon = \frac{E_\varepsilon}{E} \quad (1.12)$$

W zakresie promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni (ang. *Visible & Near InfaRed*, VNIR) wstępne przetwarzanie obrazów teledetekcyjnych polega na przekształceniu zarejestrowanego sygnału do postaci współczynnika odbicia. W przypadku obiektów na powierzchni lądu, które są nieprzezroczyste, $E_\tau = 0$. Założenie to nie obowiązuje podczas obrazowania zbiorników wodnych. Część padającej energii jest bowiem transmitowana w głąb, w pewnych przypadkach odbita od dna i przechodząc powtórnie przez warstwę wody razem z promieniowaniem odbitym, dociera do sensora. Jeśli jednak $\tau = 0$ równanie 1.12 przyjmuje postać:

$$\alpha + \varepsilon = 1 \quad (1.13)$$

Jeśli obiekty mają duży współczynnik odbicia, to znaczy, że mają mały współczynnik emisyjności. Równanie 1.13 pozwala na obliczenie współczynnika emisyjności, jeśli znany jest współczynnik odbicia i odwrotnie. W zakresie VNIR, jak już zostało nadmienione powyżej, w wyniku wstępnego przetworzenia obrazów uzyskuje się obraz współczynnika odbicia, który może być poddany dalszemu przetwarzaniu na potrzeby rozpoznania obiektów i zjawisk na powierzchni Ziemi. W przypadku zakresu podczerwieni termalnej (ang. *thermal infrared*, TIR) sprawa się komplikuje, ponieważ oprócz zjawiska odbicia mamy do czynienia ze zjawiskiem emisji promieniowania i energia rejestrowana przez detektor składa się z części promieniowania odbitego i rozproszonego przez

obiekt, ale także promieniowania emitowanego przez ten obiekt. W przypadku obiektów rzeczywistych równanie Stefana-Boltzmana ulega modyfikacji, ponieważ energia emitowana zależy od zdolności ciała do emisji, czyli współczynnika emisyjności:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1.14)$$

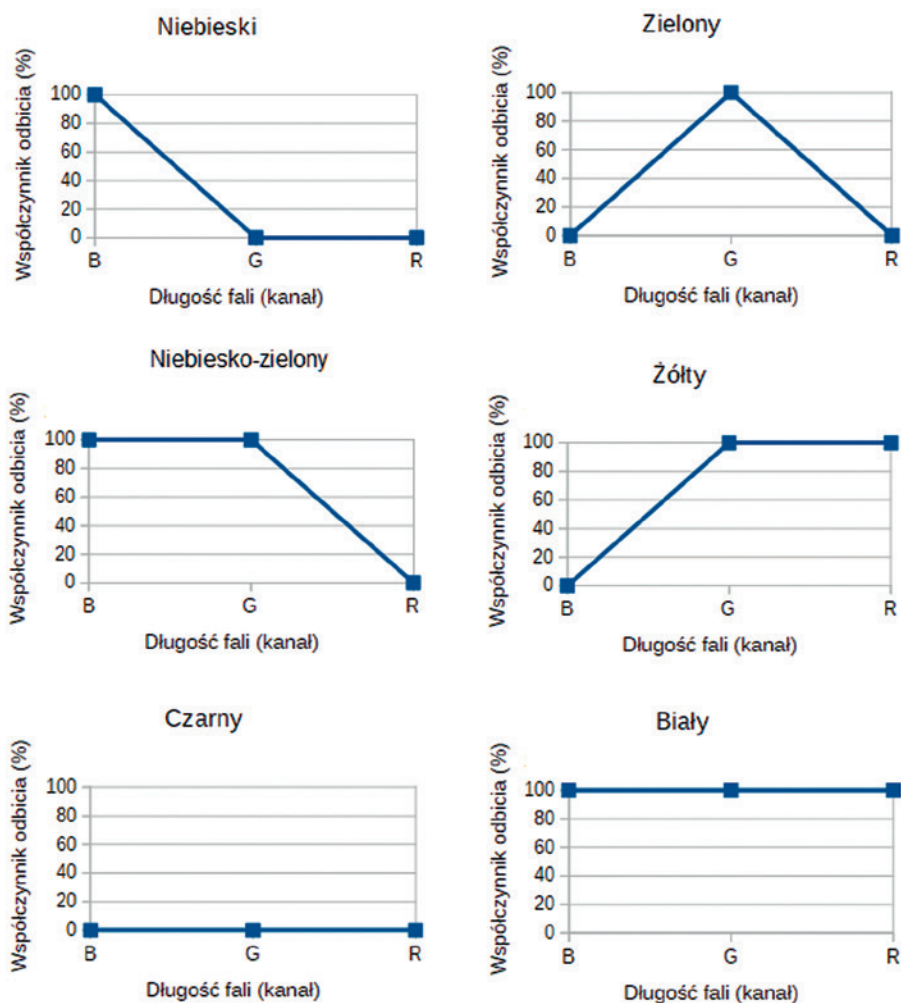
W przypadku ciała doskonale czarnego współczynnik emisyjności wynosi $\varepsilon = 1$, w przypadku ciał rzeczywistych jest on zawsze mniejszy od 1. Oznacza to, że promieniowanie emitowane zależy od temperatury ciała i od jego współczynnika emisyjności i zawsze jest mniejsze niż promieniowania ciała doskonale czarnego w tej samej temperaturze.

1.2.3. Czułość oka ludzkiego na promieniowanie elektromagnetyczne

Ciała mogą promieniować w sposób ciągły, jak np. Słońce, lub w selektywny, w określonym zakresie długości fal, np. lampy UV czy na podczerwień wykorzystywane w zabiegach medycznych czy kosmetycznych. Promieniowanie elektromagnetyczne emitowane w sposób ciągły, w całym zakresie spektrum, tak jak promieniowanie Słońca, nie może być zarejestrowane przez jeden sensor, ponieważ nie istnieje substancja wrażliwa na PEM w całym zakresie spektralnym. Istniejące detektory są czułe na PEM w pewnym określonym zakresie. Typowym przykładem detektora jest oko ludzkie reagujące na promieniowanie widzialne (światło widzialne), czyli w zakresie 380–780 nm. Światłoczułymi receptorami siatkówki oka są czopki i pręciki. Czopki są to tzw. białka receptorowe, które absorbują światło w różnych zakresach długości fali i umożliwiają w związku z tym widzenie kolorów, tzw. widzenie fotonowe (normalne widzenie w dobrych warunkach oświetleniowych pozwalające na wykorzystanie w pełni możliwości zmysłu wzroku). Czopki rozmieszczone są nieregularnie, tworząc skupiska. Najmniej jest czopków uczulonych na kolor niebieski, być może dlatego, że w tym zakresie spektrum największa jest energia promieniowania słonecznego. Moc promieniowania słonecznego w kanale niebieskim wynosi ok. 2000 W/(m²·μm) i jest o ok. 100 większa niż w kanale zielonym i ok. 400 większa niż w kanale czerwonym (Landsat 7 Handbook, 2019). Pręciki natomiast umożliwiają widzenie czarno-białe, tzw. widzenie skotopowe (widzenie w skrajnie niekorzystnych warunkach oświetleniowych). Pręciki są około 100 razy bardziej czułe na światło niż czopki. Ponadto informacje z wielu pręcików są zbierane w celu wzmocnienia sygnału, co powoduje zmniejszenie rozdzielczości przestrzennej. Innym efektem jest duża czułość na ruch, co umożliwia tzw. widzenie kątem oka. Narząd wzroku ludzkiego pozwala na pozyskiwanie informacji o jasności obiektu (jak na zdjęciu czarno-białym), dzięki pręcikom i informacji o kolorach za pomocą czopków. Z tym, że w odróżnieniu od detektorów opracowanych przez człowieka, obraz czarno-biały (odpowiednik wykorzystywanych w teledetekcji obrazów panchromatycznych) ma mniejszą rozdzielczość przestrzenną niż kolorowy, ale za to pozwala na detekcję małej ilości promieniowania. Ciekawe jest również to, że czułość narządu wzroku na kolor jest zależna od mocy padającego promieniowania, ponieważ im moc mniejsza, tym więcej receptorów.

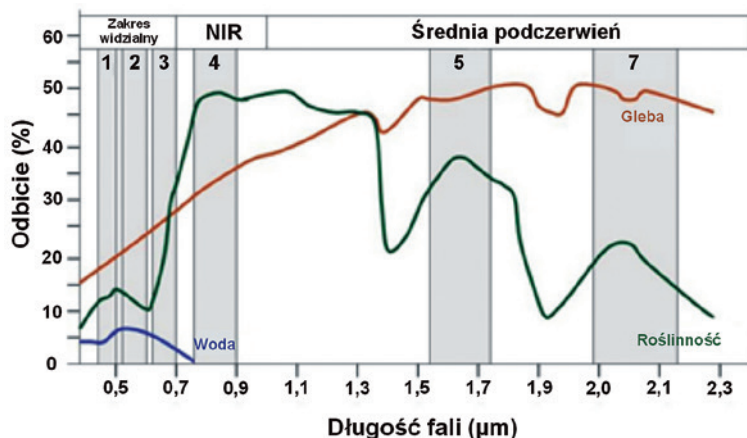
1.2.4. Krzywe odbicia spektralnego

Krzywe spektralne, inaczej krzywe odbicia spektralnego czy sygnatury spektralne, prezentują zależność pomiędzy współczynnikiem odbicia lub emisyjności, a długością fali. Na przykład obiekty w kolorach podstawowych: niebieskim (ang. *blue*, B), zielonym (ang. *green*, G), czerwonym (ang. *red*, R) odbijają w odpowiednich zakresach, a w innych nie (ryc. 1.12). Wszystkie inne kolory powstają z kombinacji kolorów podstawowych: BGR. Na przykład obiekt w kolorze cyjanowym odbija w 100% w zakresie fal niebieskich i zielonych, obiekt w kolorze fioletowym w 100% w zakresie fal czerwonych i niebieskich i zero w zielonych. Obiekt w kolorze białym odbija w 100% w całym zakresie fal widzialnych, a obiekt w kolorze czarnym odwrotnie, pochłania 100% w całym zakresie. Obiekt w kolorze szarym z kolei oznacza się takim samym poziomem współczynnika odbicia w zakresie od 0 do 100%, we wszystkich kanałach.



Ryc. 1.12. Przykładowe krzywe spektralne obiektów w wybranych kolorach

W teledetekcji wykorzystujemy zmienność współczynnika odbicia od długości fali dla różnych obiektów w celu ich detekcji. Poniżej przedstawiono przykładowe krzywe spektralne wybranych typów pokrycia terenu (ryc. 1.13). Charakterystyczne krzywe spektralne mają woda i roślinność. Woda charakteryzuje się ogólnie niskim współczynnikiem odbicia w całym zakresie spektralnym. Wartość współczynnika odbicia dla wody osiąga najwyższe wartości w zakresie fal niebieskich i maleje wraz ze wzrostem długości fali prawie do zera w zakresie podczerwieni.



Ryc. 1.13. Krzywe spektralne wody, roślinności i gleb
(źródło: Siegmund i Menz, 2005 po modyfikacjach za SEOS, 2020a)

Przeciwnie odkryta gleba – ma bardzo duży współczynnik odbicia w całym zakresie spektralnym, z tym że tendencja jest odwrotna, tzn. współczynnik odbicia rośnie wraz z długością fali. Natomiast najbardziej specyficzną krzywą spektralną ma roślinność, którą my widzimy w kolorze zielonym. Wynika to z faktu, że w zakresie fal widzialnych maksymalna wartość współczynnika odbicia występuje w kanale zielonym. Inną cechą charakterystyczną krzywej spektralnej roślinności jest jej gwałtowny wzrost w zakresie bliskiej podczerwieni, czyli w zakresie spektrum elektromagnetycznego, którego oko ludzkie nie widzi. Można powiedzieć, że dla nas roślinność jest zielona, a dla organizmów, które widzą w podczerwieni jest podczerwona.

1.3. Cechy satelitarnych systemów teledetekcyjnych

Piotr Kramarczyk

Rejestrowanie powierzchni Ziemi wykonywane z pułapu satelitarnego może dostarczać różnych danych obrazowych. Wybór typu obrazów zależy od planowanego zastosowania i oczekiwań użytkownika. Podstawowymi cechami obrazów satelitarnych, które wpływają na zakres ich wykorzystania są:

- rozdzielczość przestrzenna,
- rozdzielczość spektralna,
- rozdzielczość radiometryczna,
- rozdzielczość czasowa.

W bardzo ogólnym ujęciu można stwierdzić, że im wyższe są rozdzielczości danego obrazu, tym lepiej. Istnieją jednak techniczne ograniczenia, które powodują, że nie jest możliwe uzyskiwanie obrazów o dowolnie wysokich rozdzielczościach, w szczególności:

- wysoka rozdzielczość przestrzenna wiąże się ze średnią lub niską rozdzielczością spektralną,
- analogicznie, wysoka rozdzielczość spektralna związana jest z relatywnie niższą rozdzielczością przestrzenną.

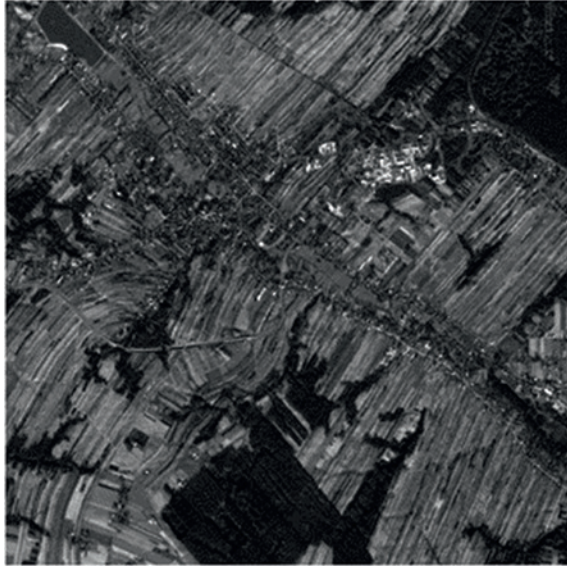
1.3.1. Sposób powstawania oraz struktura obrazu cyfrowego

Na satelicie umieszczony jest detektor rejestrujący określony zakres promieniowania PEM, np. zakres widzialny lub zakres promieniowania radarowego. Sensor rejestruje promieniowanie dochodzące z powierzchni Ziemi (odbite lub emitowane zależnie od przeznaczenia sensora). Najprostszy model powstawania satelitarnych obrazów cyfrowych można opisać na przykładzie obrazów rejestrujących odbite od powierzchni Ziemi promieniowanie słoneczne:

- Słońce emituje promieniowanie elektromagnetyczne, które oświetla Ziemię,
- Ziemia odbija promieniowanie,
- detektor umieszczony na satelicie rejestruje promieniowanie odbite od obiektów znajdujących się na powierzchni Ziemi.

Elementem rejestrującym promieniowanie elektromagnetyczne jest sensor kamery zbudowany z elementów czułych na promieniowanie – detektorów. Generalnie elementy w sensorze ułożone są w ten sposób, że tworzą macierz (tablicę). Zarejestrowany przez sensor sygnał ma więc format tablicy. W przypadku zobrazowań satelitarnych detektory ułożone są w formie linijki, zatem powstający obraz składa się z wielu linijek, które tworzą macierz. Zapis danych w pamięci komputera może następować w różny sposób (niekoniecznie w formie tablicy), ale wyświetlenie danych na monitorze ponownie przyjmuje postać matrycy (macierzy). Przy wyświetlaniu obrazu cyfrowego jego powierzchnia podzielona jest na małe i równe obszary, które najczęściej mają postać kwadratu i są zwane pikselami. Inaczej mówiąc, obraz cyfrowy można przedstawić jako siatkę/tablicę złożoną z określonej liczby wierszy i kolumn. Oczko takiej siatki to wspomniany piksel. Każdemu pikselowi przyporządkowana jest liczba reprezentująca jasność, zwana z języka angielskiego DN (ang. *Digital Number*). Podczas wyświetlania obrazu na ekranie komputer przyporządkowuje każdej wartości DN określony poziom jasności. Obraz cyfrowy i jego model (tablicę liczb) zaprezentowano na rysunku (ryc. 1.14).

Termin piksel jest używany zarówno w odniesieniu do samego obrazu cyfrowego, jak i czasem w odniesieniu do elementu w sensorze – mówi się np., że matryca ma 8 milionów pikseli. Sensory rejestrujące energię elektromagnetyczną mogą być czułe na promieniowanie w różnym zakresie spektralnym. Każdy zakres spektralny jest wtedy osobnym obrazem, zwanym kanałem. Liczba jednocześnie rejestrowanych przez sensor kanałów wiąże się z pojęciem rozdzielczości spektralnej opisanej szczegółowo poniżej. Opisany natomiast powyżej model powstawania obrazu satelitarnego jest uproszczony i nie uwzględnia wielu czynników, jak np. wpływu atmosfery na rejestrowane promieniowanie oraz budowy i działania sensorów rejestrujących obraz.



168	145	161	151	156	132	128	118	109	110
215	167	168	187	208	172	161	136	116	116
183	184	177	185	195	188	173	148	134	114
167	173	212	173	175	187	177	162	141	150
158	167	177	170	176	173	175	198	163	147
155	150	157	168	177	163	163	190	182	185
191	195	187	182	174	184	200	192	199	209
179	177	176	180	194	203	203	210	207	171
200	171	156	186	198	220	241	243	248	164
199	236	194	221	227	228	232	248	249	187

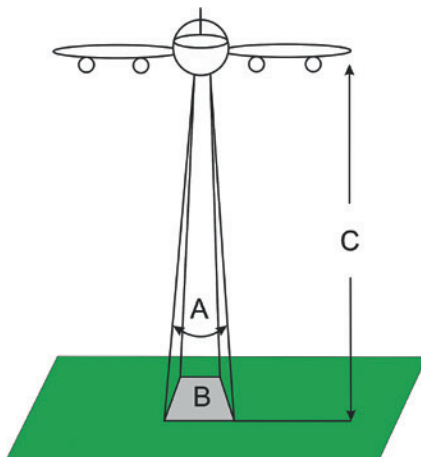
Ryc. 1.14. Model obrazu cyfrowego

1.3.2. Rozdzielczość przestrzenna

Rozdzielczość przestrzenna definiowana jest przez wielkość piksela w terenie (na powierzchni Ziemi) i wyrażana zwykle w metrach. Im większy piksel, np. jeśli jego wymiary liniowe mają 30×30 m, tym mniejsza rozdzielczość, i odwrotnie: im mniejsze wymiary, tym większa rozdzielczość przestrzenna. Rozdzielczość przestrzenna jest miarą, która określa, jak małe obiekty mogą być rozróżniane na obrazie.

Rozdzielczość przestrzenna detektorów pasywnych (przyjrzymy się później specjalnemu przypadkowi aktywnych sensorów mikrofalowych) zależy przede wszystkim od ich chwilowego pola widzenia (ang. *Instantaneous Field of View*, IFOV) (NRCAN, 2015; ryc. 1.15). IFOV jest stożkowym kątem widoczności sensora (A) i określa obszar na powierzchni Ziemi, który jest „widziany” z określonej wysokości w danym momencie (B). Rozmiar oglądanego obszaru określa się, mnożąc IFOV przez odległość od Ziemi do sensora (C). Ten obszar na Ziemi jest nazywany pikselem terenowym i określa maksy-

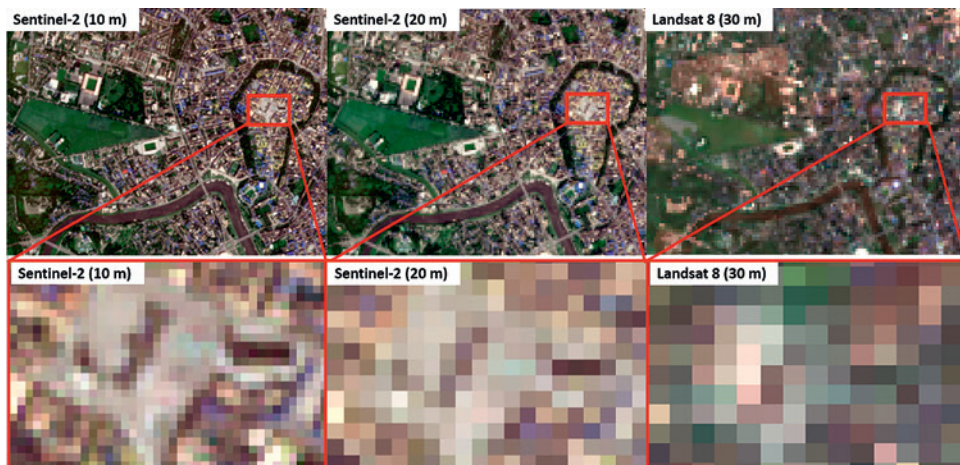
małą rozdzielczość przestrzenną sensora. Aby można było wykryć jednorodny obiekt, jego rozmiar musi na ogół być równy lub większy niż piksel terenowy. Jeśli obiekt jest mniejszy od piksela terenowego, może nie być wykrywalny, ponieważ zostanie zarejestrowana średnia jasność wszystkich cech/obiektów znajdujących się wewnątrz piksela terenowego. Jednak mniejsze obiekty mogą być czasami wykrywalne, jeśli ich współczynnik odbicia dominuje w obszarze piksela.



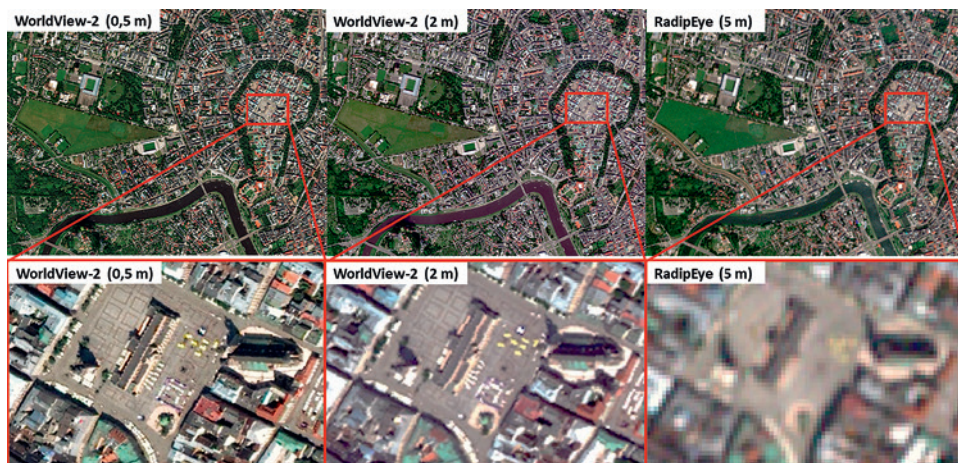
Ryc. 1.15. Uproszczony model rejestracji obrazu (źródło: NRCAN, 2015)

Poniższe ryciny (ryc. 1.16, ryc. 1.17, ryc. 1.18) pokazują różnicę pomiędzy obrazami o różnej rozdzielczości przestrzennej:

- Landsat 8: GSD 30 m,
- Sentinel-2: GSD 10 i 20 m,
- RapidEye: GSD 5 m,
- WorldView-2: 0,5 m (*pan-sharpening*) i 2 m.



Ryc. 1.16. Porównanie rozdzielczości obrazów Sentinel-2 (ESA) GSD: 10 i 20 m oraz Landsat 8 GSD 30 m (źródło: ProGea 4D, 2020)



Ryc. 1.17. Porównanie rozdzielczości obrazów WorldView-2 © 2018 European Space Imaging GSD: 0,5 m (*pan-sharpening*) i 2 m oraz RapidEye (Planet Labs) GSD 5 m (źródło: ProGea 4D, 2020)



Ryc. 1.18. Porównanie rozdzielczości obrazów: ortofotomapa GSD 10 cm (MSIP Kraków), WorldView-2 © 2018 European Space Imaging GSD 0,5 m (*pan-sharpening*) (źródło: ProGea 4D, 2020)

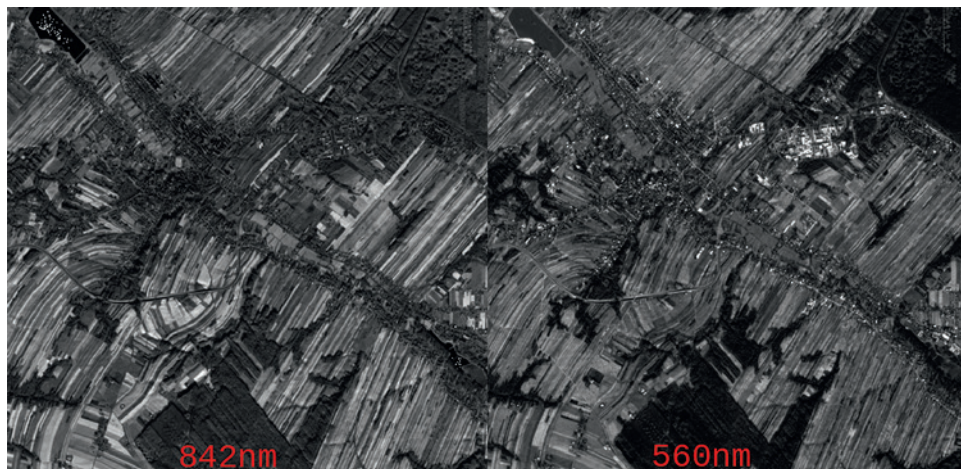
Można sformułować ogólną zasadę doboru rozdzielczości przestrzennej obrazów teledetekcyjnych do odpowiednich zastosowań:

- mniejsza rozdzielczość przestrzenna (większy piksel terenowy):
 - większe obszary/obiekty (np. pustynie, morza),
 - obszary jednolite (małe zróżnicowanie klas pokrycia terenu).
- większa rozdzielczość przestrzenna:
 - mniejsze obszary/obiekty (np. autostrady),
 - większe zróżnicowanie pokrycia terenu (np. obszary zabudowy w miastach).

1.3.3. Rozdzielczość spektralna

Obrazy cyfrowe mogą być rejestrowane w różnych zakresach długości fal elektromagnetycznych. Może się zdarzyć, że różne obiekty odbijają dany zakres widma w podobny sposób, co powoduje ich małe różnicowanie się i trudność w ich odróżnieniu. Można też znaleźć taki zakres widmowy, w którym obiekty te mają różną odpowiedź spektralną, dzięki czemu można je łatwo odróżnić. Porównanie obrazów z kanałów 8

(842 nm) i 3 (560 nm) Sentinel, wyświetlonych w odcieniach szarości przedstawia rysunek (ryc. 1.19).



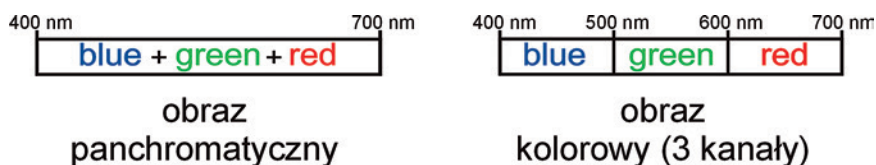
Ryc. 1.19. Porównanie kanałów Sentinel: 842 nm i 560 nm

Przyjmując ogólne ramy, użyteczne w teledetekcji zakresy widma można podzielić na wiele węższych zakresów spektralnych, zwanych kanałami spektralnymi. W zależności od liczby kanałów dostępne są obrazy:

- panchromatyczne (ang. *panchromatic*, PAN) – rejestrowanie w jednym kanale czasem dość szerokiego pasma,
- wielospektralne (ang. *multispectral*, MS) – umownie posiadają kilka do kilkunastu kanałów,
- hiperspektralne (ang. *hyperspectral*, HS) – posiadają kilkadziesiąt (> 40) i więcej kanałów.

Rozdzielczość spektralna jest terminem, który określa na jak dużą liczbę zakresów spektralnych (kanałów) został podzielony zakres widma rejestrowany przez sensor. Im większa liczba, tym rozdzielczość spektralna większa.

Obrazy satelitarne mają obecnie różne rozdzielczości spektralne – od kilku/kilkunastu kanałów, jak np. Landsat 5/7/8 czy Sentinel-2 (obrazy wielospektralne) do nawet kilkuset (obrazy hiperspektralne), jak np. Hyperion. Przykład podziału widzialnego zakresu widma elektromagnetycznego na trzy kanały został pokazany na poniższym rysunku (ryc. 1.20):



Ryc. 1.20. Podział widma widzialnego na 3 kanały

1.3.4. Rozdzielczość radiometryczna

Każdy sensor ma określony zakres energii (od minimum do maksimum), który może zarejestrować. Rozdzielczość radiometryczna jest terminem określającym z jaką dokładnością/czułością zapisywany jest rejestrowany sygnał. Inaczej mówiąc, ile wartości liczbowych zostało użytych do zapisania zarejestrowanego sygnału.

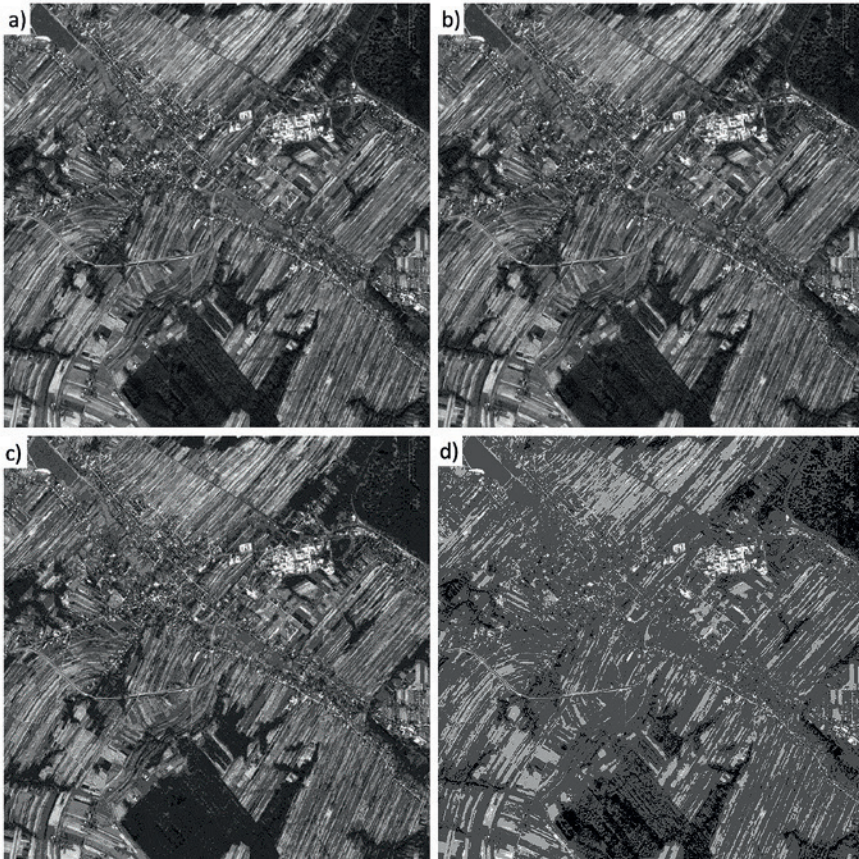
W skrajnym przypadku sygnał mógłby być zapisywany jako wartość binarna: zero – brak sygnału, 1 – detekcja sygnału. Z drugiej strony, zakres rejestrowanego sygnału można podzielić na bardzo duży zakres liczbowy i otrzymywać bardzo wysoką rozdzielczość radiometryczną. Ograniczeniem rozdzielczości jest możliwość przechowywania i przetwarzania obrazów – im większa rozdzielczość radiometryczna, tym więcej pamięci potrzeba do zapisu obrazu i tym większe są wymagania co do sprzętu komputerowego. Większa rozdzielczość powoduje też wzrost czasu przetwarzania i udostępniania (przesyłu) obrazów. Poniżej zamieszczone rysunki (ryc. 1.21, ryc. 1.22) dotyczą tego samego obrazu satelitarnego (pojedynczy kanał z Landsat 8, oryginalnie zarejestrowany na 12 bitach, a zapisany na 16 bitach) w różnych wersjach rozdzielczości radiometrycznej: 8, 6, 5 i 4 bity. W przeszłości obrazy satelitarne były zapisywane na 8 bitach i ich rozdzielczość radiometryczna wynosiła $2^8 = 256$. Oznacza to, że do zapisu informacji na obrazie użyto 256 różnych wartości (od 0 do 255). Każdemu więc pikselowi w obrazie może być przyporządkowana liczba tylko z tego zakresu.

W technice komputerowej używany jest termin bajt oznaczający najmniejszą adresowalną jednostkę pamięci. Wielkość bajta określana jest przez liczbę bitów – najczęściej używany jest bajt ośmiobitowy. W związku z tym mówi się również, że obraz zapisany jest na 1 bajcie, czyli 8 bitach. Obecnie spotyka się również obrazy zapisane na 2 bajtach.

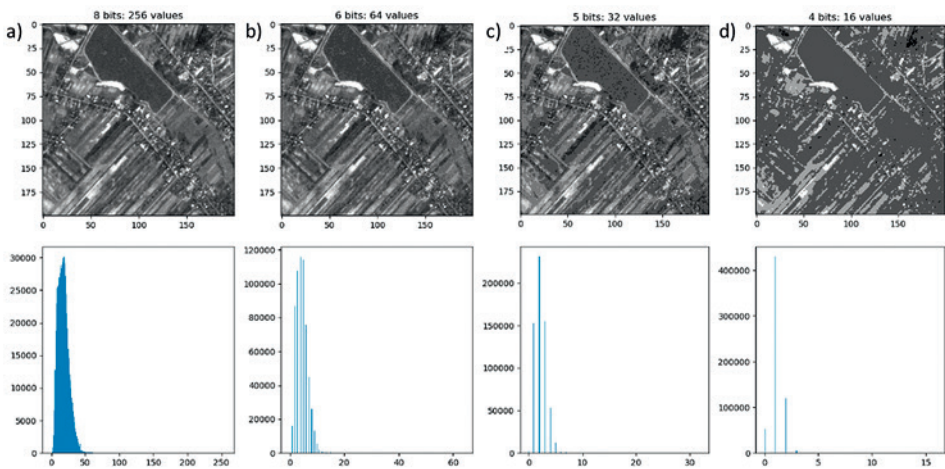
Z czasem, w celu zwiększenia możliwości rozróżniania obiektów, zwiększono liczbę bitów, na których zapisywana jest wartość jasności piksela. Przykładowo, Landsat 8 jest rejestrowany na 12 bitach, co daje $2^{12} = 4096$ poziomów. W związku z tym, że zwykle typ liczb musi być wielokrotnością 1 bajta, ostatecznie obraz Landsat 8 jest zapisywany na 2 bajtach, czyli na 16 bitach. Na poniższym rysunku (ryc. 1.21) przedstawiono obraz Landsat 8 w czterech różnych rozdzielczościach. Widoczny jest spadek szczegółowości obrazu, przy czym największe różnice można zauważyć, porównując obraz lewy górny zapisany na 8 bitach (256 unikalnych wartości) z prawym dolnym, zapisanym na 4 bitach (16 unikalnych wartości).

Na rysunku (ryc. 1.22) przedstawiono obrazy zapisane w różnych rozdzielczościach radiometrycznych z odpowiadającymi im histogramami, które pokazują rozkład wartości DN w obrazach.

Najczęstszym sposobem zapisu obrazu jest wykorzystanie liczb całkowitych z zakresu od 0 do 255, czyli 8 bitów (1 bajt), ale można również spotkać obrazy zapisane na 10, 12 i 16 bitach. Zdarzają się również obrazy zapisane na liczbach rzeczywistych z przedziału od 0 do 1.



Ryc. 1.21. Obraz Landsat 8 zapisany w różnych rozdzielczościach radiometrycznych: a) 8 bitów (256 wartości), b) 6 bitów (64 wartości), c) 5 bitów (32 wartości), d) 4 bity (16 wartości)



Ryc. 1.22. Rozdzielczość radiometryczna: a) 8 bitów (256 wartości), b) 6 bitów (64 wartości), c) 5 bitów (32 wartości), d) 4 bity (16 wartości)

1.3.5. Rozdzielczość czasowa

Rejestrowanie zmian na powierzchni Ziemi, czy to naturalnych (np. okresy wegetacyjne roślin), czy powodowanych działalnością człowieka, wymaga wielokrotnego wykonywania zdjęć danego fragmentu terenu. Okres, po którym satelita ponownie rejestruje ten sam obszar, określany jest mianem rozdzielczości czasowej. Rozdzielczość czasowa zależy przede wszystkim od orbity na jakiej znajduje się satelita (rozdział 1.1.2.).

Na rozdzielczość czasową mają wpływ również:

- szerokość geograficzna – w przypadku stałej szerokości pasa skanowania satelitów okołobiegunowych stopień pokrycia, a zatem czas rewizyty, zależy od szerokości geograficznej;
- parametry satelity – szerokość pokosu (szerokość z jaką obrazowana jest powierzchnia Ziemi), kąt pod jakim sensor może wykonywać rejestrację obrazów, w przypadku satelitów z możliwością rejestracji nienadirowej jest możliwość elastycznego projektowania rejestracji, czyli w konsekwencji zwiększenie czasu rewizyt;
- liczby satelitów w misji, np. Sentinel-2A i Sentinel-2B.

Informacje o rozdzielczości czasowej satelitów Landsat i Sentinel można znaleźć na stronach [www](#):

- Landsat (Landsat Science, 2020): zgodnie z opisem przedstawionym na tej stronie czas obiegu Ziemi przez satelitę wynosi 99 min., co w przybliżeniu oznacza 15 obiegów w ciągu doby. W czasie 16 dni satelita Landsat rejestruje całą powierzchnię Ziemi, a w 17. dniu powtarza pierwszy obieg. Z zamieszczonego opisu wynika, że co 16 dni satelita obrazuje ten sam obszar powierzchni.
- Sentinel (Sentinel User Guides, 2020): dla satelitów Sentinel informacje o poszczególnych satelitach zawarte są w przewodniku. Dla satelity Sentinel-2 czas rewizyty pojedynczego satelity wynosi 10 dni, ale faktyczny czas rewizyty (dla bliźniaczych satelitów Sentinel-2A oraz Sentinel-2B) wynosi 5 dni w tych samych warunkach rejestracji. Czas ten może być jednak krótszy, jeśli weźmie się pod uwagę nakładanie się na siebie pokosów z sąsiednich orbit – z zastrzeżeniem różnych warunków rejestracji.

1.4. Rodzaje teledetekcyjnych danych obrazowych i nieobrazowych

Beata Hejmanowska

W teledetekcji do obserwowania Ziemi (ang. *Earth Observation*) wykorzystuje się najczęściej dane w postaci obrazów. Jasność piksela na obrazie przedstawia wielkość energii elektromagnetycznej, która została odbita lub wyemitowana. Źródłem promieniowania może być Słońce, wtedy technika teledetekcyjna nazywana jest pasywną. W aktywnych metodach teledetekcyjnych źródło promieniowania umieszczone jest na pokładzie satelity lub samolotu. W celu kalibrowania obrazów teledetekcyjnych wykonuje się naziemne lub laboratoryjne pomiary spektrometryczne i w tych przypadkach

uzyskuje się dane nieobrazowe, które można przedstawić graficznie w postaci krzywych spektralnych.

1.4.1. Pasywne systemy teledetekcyjne

W pasywnych systemach teledetekcyjnych nie korzystamy z żadnych sztucznych źródeł promieniowania, a wykorzystujemy odbite promieniowanie Słońca lub promieniowanie emitowane (termalne i mikrofalowe) przez powierzchnię Ziemi.

1.4.1.1. Zobrazowania w zakresie optycznym

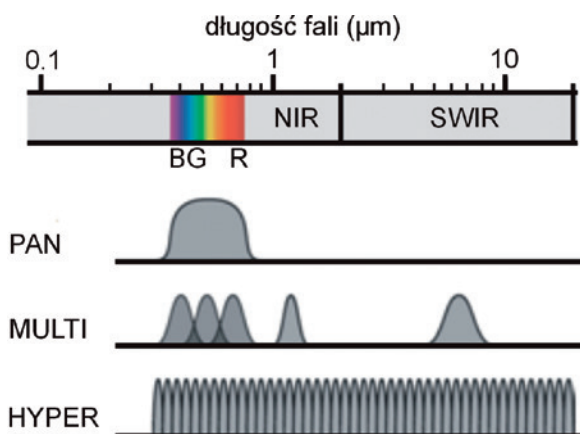
Zobrazowania w zakresie optycznym obejmują następujące zakresy: PAN (jeden zakres, najczęściej widzialny, czasem z udziałem bliskiej podczerwieni), RGB (obraz kolorowy, w barwach naturalnych), obrazy wielospektralne i hiperspektralne w zakresach fal widzialnych i bliskiej podczerwieni (ang. *Visible & Near InfraRed*, VNIR), średniej podczerwieni (ang. *ShortWave InfraRed*, SWIR).

W zakresie fal widzialnych – bliskiej i średniej podczerwieni – promieniowanie elektromagnetyczne po przejściu przez atmosferę (gdzie jest tłumione przez rozpraszanie i absorpcję), pada na powierzchnię Ziemi, następnie jest w różny sposób odbijane przez różne obiekty i po ponownym przejściu przez atmosferę zostaje zarejestrowane przez sensor. Ilość energii promieniowania dla danej długości fali docierająca do sensora po odbiciu od danego obiektu, określa jego charakterystykę spektralną. W teledetekcji używaną miarą wielkości odbicia jest współczynnik odbicia, którego wartości mieszczą się w przedziale [0, 1], natomiast graficznie można go przedstawić jako zależność w funkcji długości fali, uzyskując krzywą odbicia spektralnego (krzywa spektralna, podrozdział 1.2.2, ryc. 1.22).

Sensory teledetekcyjne rejestrują jeden lub większą liczbę zakresów spektralnych (kanałów) promieniowania elektromagnetycznego. W wyniku rejestrowania promieniowania z zakresu widzialnego w jednym kanale uzyskiwany jest obraz panchromatyczny. Zróżnicowanie promieniowania można zwizualizować przy użyciu skali szarości. W przypadku rozdzielenia rejestracji zakresu widzialnego na 3 przedziały spektralne (niebieski, zielony, czerwony) uzyskiwane są trzy obrazy, na podstawie których można otrzymać obraz kolorowy w modelu RGB (obrazy spektralne odpowiadają odpowiednim składowym kolorów: czerwonemu (R), zielonemu (G) i niebieskiemu (B)). Wybór liczby kanałów jest indywidualny dla poszczególnych sensorów. W przypadku sensorów wielospektralnych jest to od 4 do 20 kanałów spektralnych (np. Landsat, ALI, Sentinel-2), a hiperspektralnych – od dwudziestu do kilkuset kanałów (np. Hyperion, CHRIS) (ryc. 1.23). Sensory wielospektralne są od lat powszechnie wykorzystywane do obserwacji Ziemi. Generalnie liczba kanałów spektralnych (4–20) w przypadku sensorów wielospektralnych jest wystarczająca do identyfikowania i klasyfikowania podstawowych form pokrycia terenu, tj. wody, lasu, terenów rolnych i zurbanizowanych, itp. Jednakże dane te nie są wystarczające do takich zastosowań jak rozpoznanie gatunków, monitorowanie upraw czy zanieczyszczenie gleb. W tym celu wykorzystywane są obrazy z sensorów hiperspektralnych, które umożliwiają scharakteryzowanie i określenie ilościowe różnorodności środowiska przy użyciu kilkuset kanałów spektralnych z zakresów od widzialnego do podczerwonego.

Przydatność wielospektralnych danych teledetekcyjnych do rozpoznania określonych obiektów lub typu pokrycia terenu dla wymaganej skali, można wyznaczyć

np. według hierarchicznego systemu klasyfikacji stosowanego przez USGS (United States Geological Service). System składa się z 4 poziomów: poziom I – ogólny, poziom II – opisowy, poziom III – szczegółowy, poziom IV – najbardziej szczegółowy. W tabeli (tabela 1.2) przedstawiono przykład wymaganej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej danych teledetekcyjnych w celu uzyskania atrybutów krajobrazu naturalnego i krajobrazu pochodzenia antropogenicznego o określonym poziomie dokładności (Jensen i Cowen, 1999).



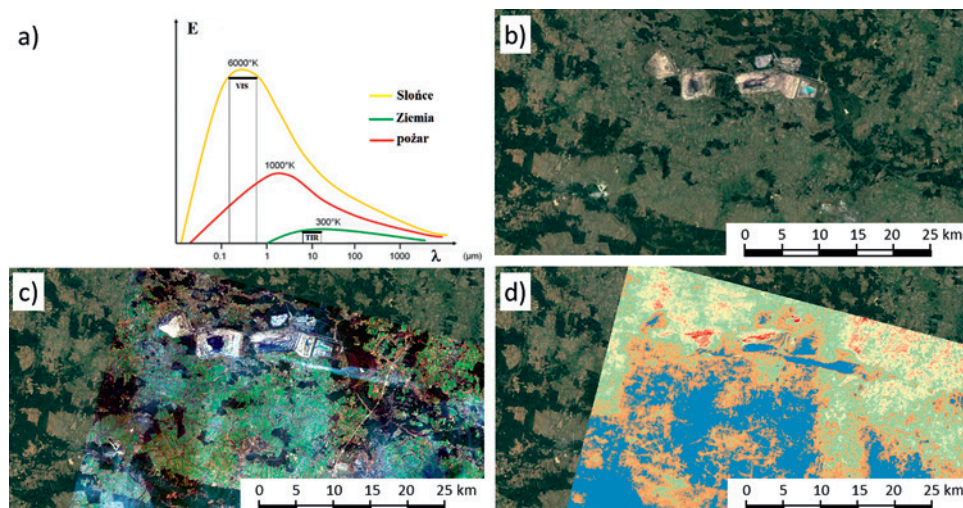
Ryc. 1.23. Porównanie liczby kanałów danych panchromatycznych, wielospektralnych i hiperspektralnych (źródło: zmodyfikowane za Velez-Reves i Goodman, 2011)

Tabela 1.2. Wymagana minimalna rozdzielczość przestrzenna i spektralna w celu uzyskania atrybutów krajobrazu naturalnego i krajobrazu pochodzenia antropogenicznego o określonym poziomie dokładności z danych teledetekcyjnych (źródło: za Jansen i Cowen, 1999)

		Minimalna rozdzielczość przestrzenna [m]	Minimalna rozdzielczość spektralna (zakresy spektralne)
Atrybuty poziomów urbanizacji			
pokrycie/ użytkowanie terenu	Poziom I: USGS	20–100	VNIR, SWIR, Radar
	Poziom II: USGS	5–20	VNIR, SWIR, Radar
	Poziom III: USGS	1–5	PAN, SWIR, Radar
	Poziom IV: USGS	0,25–1	PAN
Atrybuty naturalne			
klasy lasu	Poziom I: pokrycie terenu	20–1000	VNIR, SWIR, Radar
	Poziom II: typy pokrycia	10–100	VNIR, SWIR, Radar
	Poziom III: dominacja gatunków	1–30	PAN, VNIR, SWIR, Radar
	Poziom IV: identyfikacja gatunków	0,1–2	PAN

1.4.1.2. Zobrazowania w zakresie promieniowania emitowanego

Zakres promieniowania elektromagnetycznego, nazywany podczerwienią termalną (TIR), wykorzystywany w teledetekcji, obejmuje zakres długości fali od $2,5 \mu\text{m}$ do $14 \mu\text{m}$, a z uwzględnieniem tłumienia przez atmosferę właściwie dwa zakresy, tzw. okna atmosferyczne: $2,5\text{--}3,6 \mu\text{m}$ oraz $8\text{--}14 \mu\text{m}$. Mikrofałe natomiast obejmują zakres fal dłuższych od $0,75 \text{ cm}$ do 100 cm . Omawiane w niniejszym rozdziale metody należą do metod pasywnych, to znaczy, że rejestrowane jest promieniowanie pochodzące z powierzchni Ziemi, w tym przypadku jest to głównie promieniowanie emitowane. Wynika to z prawa rozkładu promieniowania w zależności od długości fali i temperatury (prawa Plancka i prawa przesunięć Wiena). Dla większych długości fali maleje natężenie promieniowania słonecznego, którego maksimum przypada na zakres fal widzialnych i ujawnia się promieniowanie pochodzące od Ziemi, którego z kolei maksimum przypada na ok. $14 \mu\text{m}$ (ryc. 1.24a). Żeby można było zarejestrować promieniowanie musi ono, po pierwsze, w ogóle występować, czyli być odbite od obiektu lub z niego emitowane, a po drugie, musi dotrzeć do detektora, czyli nie może być tłumione przez atmosferę. Zatem na poniższy rysunek (ryc. 1.24a) trzeba nałożyć wykres przepuszczalności atmosfery, okna atmosferyczne (ryc. 1.9). Ta wspólna informacja definiuje zakresy fal PEM wykorzystywane w teledetekcji. Moc PEM zależy zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana od temperatury ciała w czwartej potęgze, jego zdolności emisyjnych, czyli współczynnika emisyjności oraz od stałej Stefana-Boltzmana (wzór 1.5).



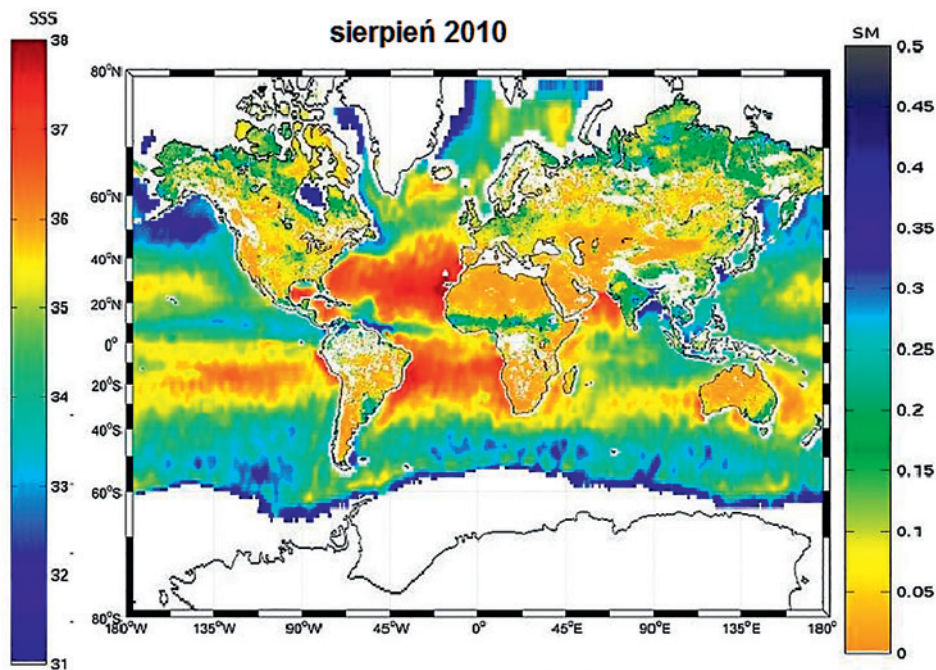
Ryc. 1.24. a) Rozkład mocy promieniowania elektromagnetycznego od długości fali dla ciał o różnej temperaturze (źródło: SEOS, 2020b),

b) kopalnia węgla brunatnego „Bełchatów” (źródło: [google.pl/maps](https://www.google.pl/maps)),

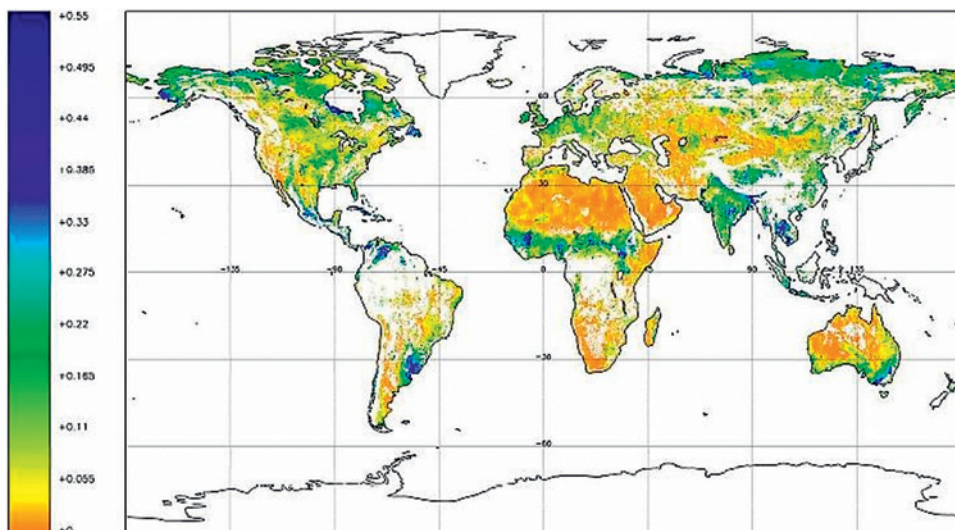
c) kompozycja w barwach naturalnych Landsat 8, d) obraz temperatur

Rejestracja promieniowania termalnego nie jest powszechna. Oprócz satelitów meteorologicznych o bardzo słabej rozdzielczości przestrzennej umożliwia ją np. satelita Landsat 8 w kanałach 10 i 11 (sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor)) o rozdzielczości przestrzennej 100 m przepróbkowywanych do 30 m i w takiej wersji dostępnych. Obrazy termalne z satelity Landsat 8 umożliwiają wyznaczenie temperatury z dokładnością $0,1^\circ$.

Rejestracja emitowanego promieniowania mikrofalowego jest wykorzystywana do badania wilgotności gleb i zasolenia oceanów. Przykładem jest misja ESA SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity), która za pomocą radiometru MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) rejestruje promieniowanie emitowane z powierzchni Ziemi w kanale L (L-Band 1–2 GHz, 15–30 cm). Satelita SMOS jest w fazie operacyjnej od 2009 roku i dostarcza obrazy z rozdzielczością czasową 3 dni, dostępne na różnych poziomach przetworzenia, w tym produkty na trzecim poziomie przetworzenia (ang. *level-3*), gotowe do wykorzystania. Przykładowy produkt na poziomie *level-3* jest obrazem rozkładu wilgotności gleby lub zasolenia wody o rozdzielczości 25 km (ryc. 1.25, ryc. 1.26). Dokładność określenia wilgotności podaje się na poziomie $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (Kerr i in., 2013; Bannari i in., 2018; ESA eoPortal 2020).



Ryc. 1.25. Mapa rozkładu zasolenia oceanów (legenda z lewej [m^3/m^3]), SSS (Sea Surface Salinity) i rozkładu wilgotności gleb (legenda z prawej [m^3/m^3] SM (Soil Moisture) (źródło: ESA Salinity Map, 2020)



Ryc. 1.26. SM integracja obrazów zarejestrowanych w ciągu 3 dni 14–16.08.2010
(źródło: CESBIO za ESA eoPortal, 2020)

1.4.2. Aktywne systemy teledetekcyjne

Aktywne systemy teledetekcji wykorzystują techniki bazujące na sztucznych źródłach promieniowania elektromagnetycznego umieszczanych na pokładach satelitów bądź samolotów. Promieniowanie jest wysyłane w kierunku obiektu (np. powierzchni Ziemi), a następnie rejestrowane jako sygnał odbity. Powszechnie stosowane są dwie technologie: radarowe (mikrofalowe) oraz skanowania laserowego.

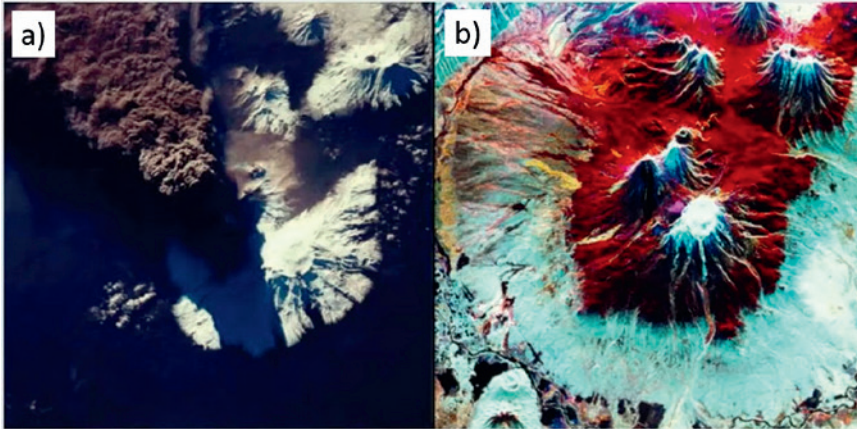
1.4.2.1. Obrazowanie radarowe

Marek Mróz, Magdalena Mleczeko

Technika obrazowania radarowego wykorzystuje mikrofalowy zakres spektrum elektromagnetycznego w sposób aktywny w przeciwieństwie do mikrofalowych technik pasywnych opisanych w poprzednim podrozdziale (Henderson i Lewis 1998; Woodhouse 2006). Warto podkreślić ponownie, że mikrofałe charakteryzuje większa rozpiętość długości fal niż np. zakres widzialny i ma to swoje późniejsze konsekwencje zarówno w zakresie dostarczanych przez nie informacji, jak i trudności w interpretowaniu obrazów radarowych. Systemy radarowe wykorzystują własne źródło energii, emitując mikrofałe, które przechodzą przez chmury i penetrują w pewnym stopniu szatę roślinną lub suchy grunt. Systemy radarowe są więc niezależne od pory dnia i zachmurzenia, co czyni je bardziej skutecznymi w pozyskiwaniu obrazów niż systemy pasywne (np. obrazujące w zakresie światła widzialnego).

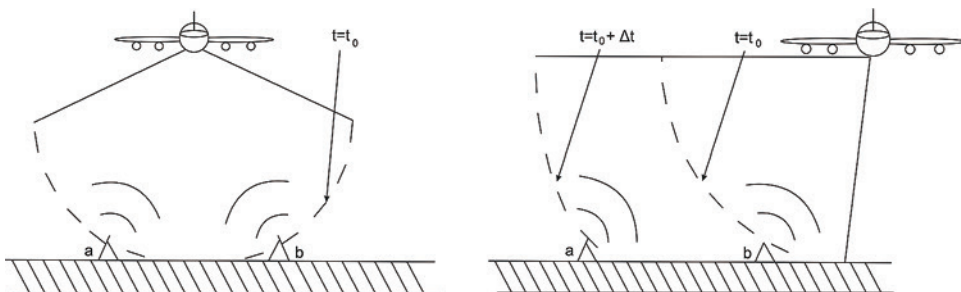
Oprócz ww. zalet obrazy radarowe charakteryzują się pewnymi cechami, które utrudniają ich interpretację i wykorzystanie. Jest to ziarnistość obrazu (plamkowanie lub cętkowanie), silne zniekształcenia geometrii w obszarze o dużych deniwelacjach terenu i zupełnie odmienne czynniki kształtujące zawartość informacyjną obrazu (Richards, 2009; Hein, 2010). Mikrofałe są wrażliwe na właściwości dielektryczne po-

wierzchni i jej strukturę (szorstkość). Poniższy rysunek (ryc. 1.27) przedstawia fotografię wulkanu na Kamczatce wykonaną przez astronautów z pokładu promu kosmicznego Endeavour 5 października 1994 roku oraz kompozycję barwną RGB trzech obrazów radarowych SIR-C/X-SAR, odpowiednio: R – obraz w pasmie L/polaryzacja pozioma HH, G – pasmo L/polaryzacja krzyżowa HV, B – pasmo C/polaryzacja krzyżowa HV. Na fotografii po lewej widoczne są chmury i pióropusz pyłu wulkanicznego, na obrazie radarowym po prawej wyraźnie widoczny jest stożek wulkaniczny i struktury lawowe.



Ryc. 1.27. Obraz wulkanu w czasie erupcji w świetle widzialnym (a) i w zakresie mikrofalowym (b) (źródło: Michigan Tech Volcanology za Podest, 2018a)

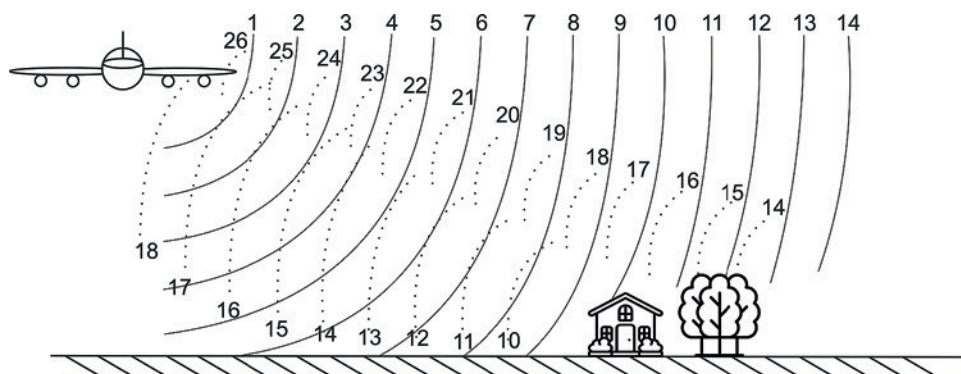
Zadajmy sobie pytanie: czym właściwie jest radar? W istocie jest to urządzenie do pomiaru odległości przy użyciu mikrofal. Wyróżnia się dwie kategorie radarów: radary obrazujące i nieobrazujące. Przykładem radaru tej drugiej kategorii jest altimetr satelitalny. W niniejszym paragrafie przedstawiony zostanie radar obrazujący, który ze swojej natury jest radarem „bocznego wybierania”, czyli instrumentem obrazującym ukośnie (ang. *side-looking radar*, SLR). Jest to sytuacja (konstrukcja geometryczna) wymuszona zasadą działania, gdyż obrazowanie pionowe (ryc. 1.28 po lewej) polegające na wysyłaniu symetrycznej wiązki promieniowania w kierunku Ziemi, w pewnym kącie jej rozwarcia prowadziłoby do niejednoznaczności w identyfikacji punktów a i b, położonych w jednakowej odległości od radaru, na podstawie dwóch ech powracających dokładnie po tym samym czasie od momentu wysłania sygnału (Podest 2018a, Podest 2018b).



Ryc. 1.28. Idea radaru bocznego wybierania (źródło: Podest, 2018a – zmienione)

System obrazowania radarowego składa się z nadajnika, odbiornika, anteny i bloku elektronicznego do przetwarzania i zapisywania danych. Obrazowanie radarowe polega na „bombardowaniu” powierzchni terenu seriami milionów krótkich impulsów mikrofalowych i odbiorze echa po odbiciu od obiektu. Nadajnik generuje sukcesywnie serie impulsów w stałych interwałach, które antena formuje w wiązkę i oświetla nią powierzchnię ukośnie do linii pionu, a jednocześnie prostopadłe do linii lotu platformy nośnej (samolotu lub satelity). Ta sama antena odbiera część transmitowanej energii odbitej w jej kierunku przez oświetlane wiązką objekty terenowe, nazywaną również energią rozproszoną wstecznie (ang. *backscattered energy*), mierząc czas, w jakim powraca każde echo wyemitowanego impulsu. Na podstawie czasu oraz znanej prędkości propagacji fali radarowej oblicza się drogę między radarem i objektem, a więc lokalizuje miejsce odbicia fali w kierunku zasięgu (ang. *in range*).

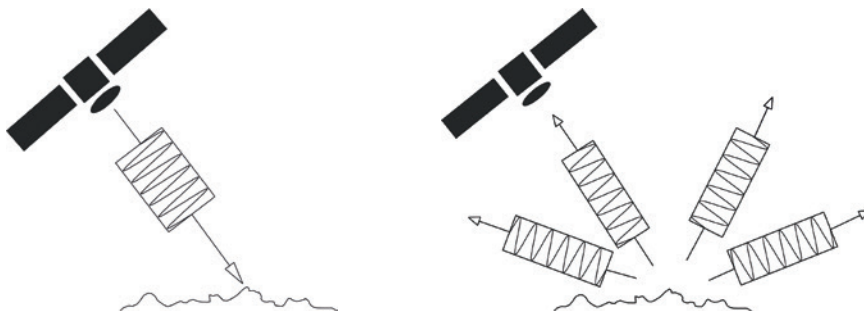
Jak widać na ryc. 1.29 ten sam impuls odbija się w różnym czasie od różnych obiektów położonych w różnej odległości. Na ryc. 1.29 symbolicznie reprezentują to linie przerywane (echa) o numerach od 14 do 18 występujące dwukrotnie. Najpierw jako odbicia od obiektów bliższych (między samolotem i domkiem), a potem jako odbicia od obiektów dalszych (od drzew do końca pasa obrazowania). Linie ciągłe numerowane od 1 do 14 symbolizują kolejne położenia czoła fali danego impulsu.



Ryc. 1.29. Idea ukośnego obrazowania radarowego (źródło: Podest, 2018a – zmienione)

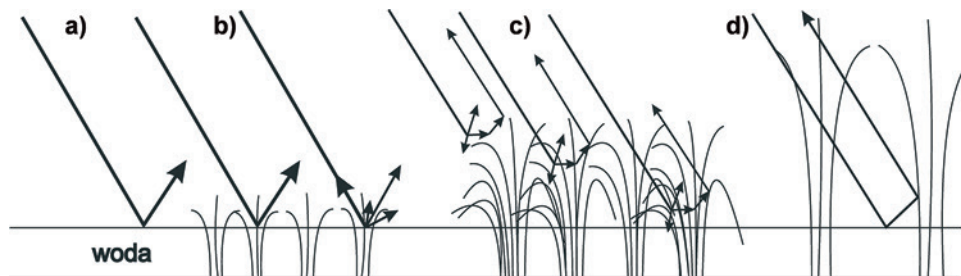
Ponieważ platforma posuwa się do przodu, zapisując i przetwarzając odbierane echa, buduje się zatem dwuwymiarowy obraz powierzchni. Bez wchodzenia w szczegóły fizyczne można stwierdzić, że rozdzielczość w kierunku lotu (kierunku azymutalnym) i rozdzielczość w kierunku zasięgu (prostopadłym do kierunku lotu) jest definiowana przez niezależne parametry. Rozdzielczość w zasięgu jest określona przez długość impulsu, rozdzielczość azymutalna natomiast jest wprost proporcjonalna do długości anteny. Ponieważ w kosmosie trudno jest operować długimi antenami fizycznymi, tworzy się anteny wirtualne, inaczej zwane syntetyzowanymi, symulowane przez wykorzystanie ruchu postępowego platformy nośnej, uwzględniając w przetwarzaniu sygnału powstający z powodu tego ruchu efekt Dopplera, czyli dodatnie lub ujemne zmiany częstotliwości odbieranego sygnału. Stąd współczesne radary obrazujące nazywane są radarami z syntetyzowaną aperturą, po angielsku SAR (Synthetic Aperture Radar). Przesunięcie dopplerowskie jest wykorzystywane do lokalizacji echa w kierunku azymutalnym (Maître, 2008; Younis, 2018).

Radar mierzy amplitudę i fazę powracającego sygnału, ale tylko część echa, która (ryc. 1.30) wraca do anteny, impulsy pokonują drogę od radaru do powierzchni Ziemi i z powrotem z prędkością światła, a moc rejestrowanego sygnału opisywana jest tzw. współczynnikiem rozpraszania wstecznego Sigma Zero (ang. *Sigma Naught*) i wyrażana w decybelach [dB].



Ryc. 1.30. Radar emituje impulsy, a odbiera część echa (źródło: Podest, 2018a – zmienione)

Istotne jest to, że obrazy radarowe zawierają informacje o dwóch parametrach wymienionych wcześniej: o strukturze (szorstkości) powierzchni i jej właściwościach dielektrycznych (dla obiektów naturalnych takich jak gleby i rośliny – o ich wilgotności). Podstawowe mechanizmy rozpraszania ilustruje ryc. 1.31 na przykładzie roślinności częściowo podtopionej. Te same mechanizmy obowiązują dla roślinności lądowej, powierzchni gleb i elementów antropogenicznych (np. budynków).



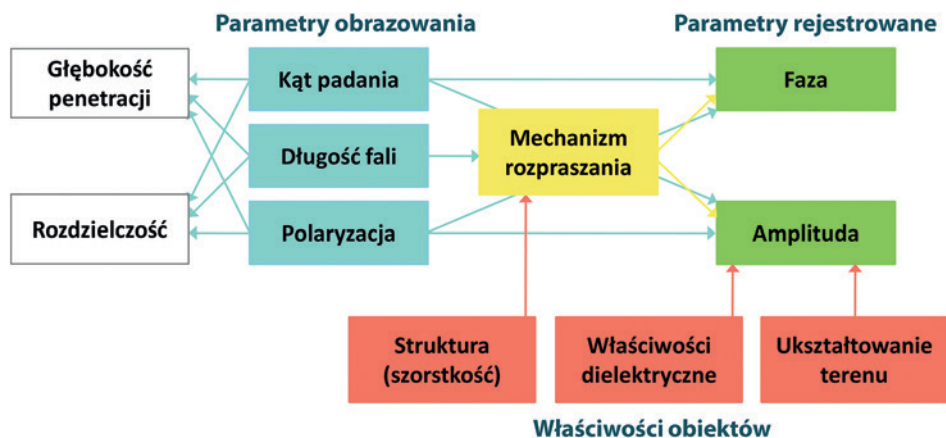
Ryc. 1.31. Podstawowe mechanizmy rozpraszania:

- a) odbicie zwierciadlane powierzchniowe od powierzchni gładkiej (wody lub łądu),
- b) odbicie powierzchniowe rozproszone (od szorstkiej powierzchni gleby, sfałowanej powierzchni wody lub roślinności nadwodnej),
- c) rozproszenie objętościowe w warstwie roślinności,
- d) podwójne odbicie zwierciadlane od powierzchni gładkich (źródło: Mleczeko, 2017)

Oprócz ww. cech obrazowanej powierzchni na propagację sygnału przez środowisko mają wpływ trzy parametry systemu radarowego:

- długość fali,
- polaryzacja,
- kąt obrazowania.

Wzajemne powiązania cech obrazowanych powierzchni oraz parametrów systemowych i rejestrowanych sygnałów powracających ilustruje rycina 1.32.



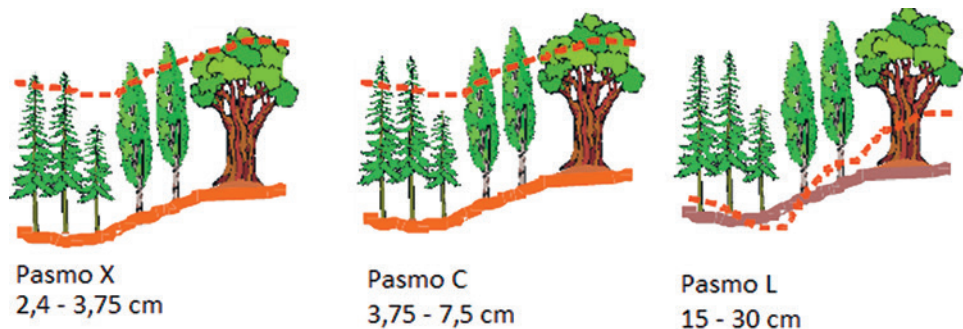
Ryc. 1.32. Zależności: radar – obiekt – sygnał odbierany (źródło: Mleczek, 2017)

Tabela 1.3 zawiera informacje o nazwach pasm, długościach wykorzystywanych w teledetekcji mikrofal oraz zakresach częstotliwości przyznanych przez Międzynarodową Unię Telekomunikacji. Oznaczenia literowe pasm pochodzą z pierwszego okresu rozwoju militarnych systemów radarowych.

Tabela 1.3. Pasma promieniowania mikrofalowego wykorzystywane w teledetekcji

Pasma	Zakres częstotliwości	Wykorzystywana długość fali [cm]
P	300 MHz–1 GHz	70
L	1–2 GHz	21
C	4–8 GHz	5
X	8–12GHz	3

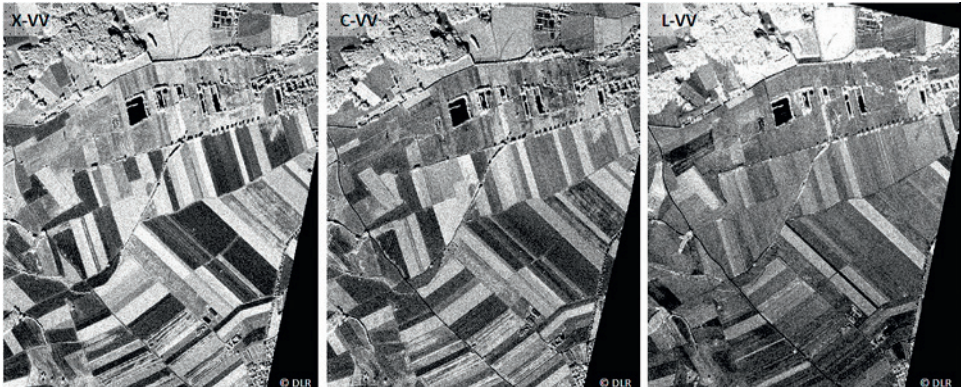
Oczekiwana penetracja szaty roślinnej lub gruntu jest pierwszym czynnikiem przy wyborze stosowanej długości fali (ryc. 1.33). Penetracja drzewostanu przez falę pasma P będzie dużo większa niż penetracja przez falę pasma C. Penetracja suchego gruntu przez falę pasma L może osiągać nawet 1 m. Przy wilgotnej glebie wzrasta jej stała



Ryc. 1.33. Głębokość penetracji jest wprost proporcjonalna do długości padającej fali

dielektryczna, a więc wzrasta jej współczynnik odbicia, wzmacniany dodatkowo przez szorstkość powierzchni (ryc. 1.34).

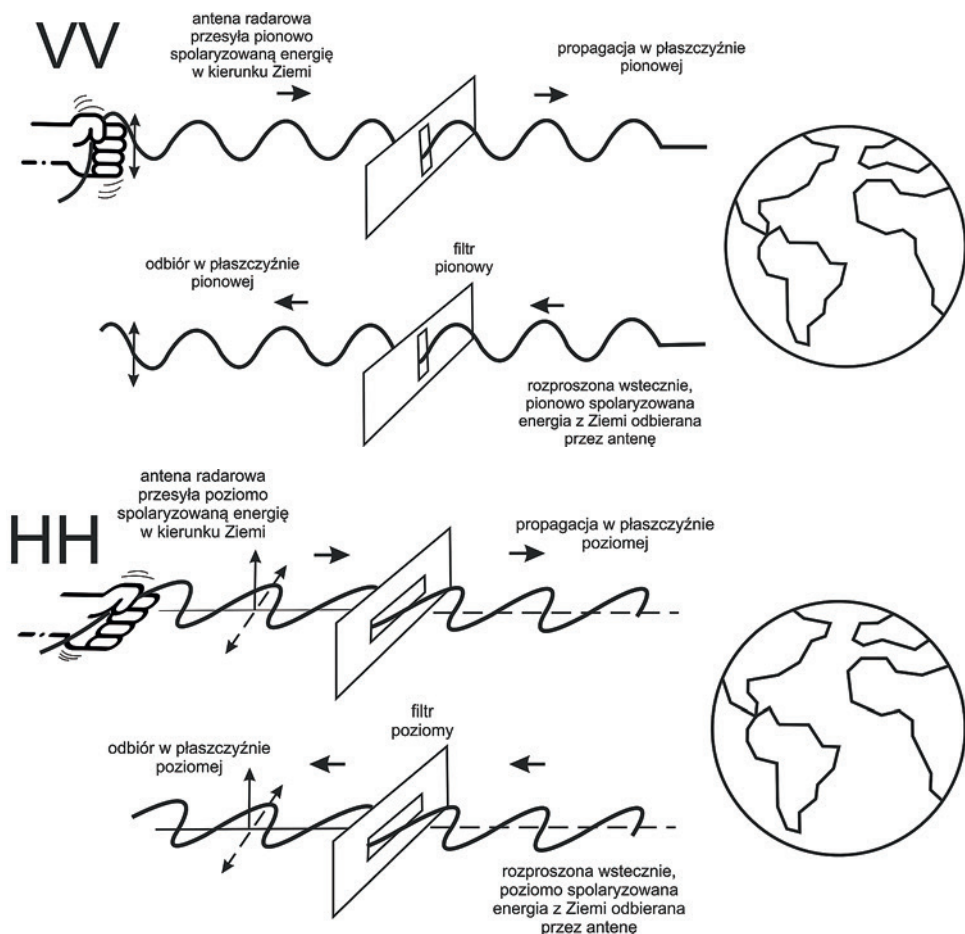
Powierzchnia gruntu o średniej szorstkości (rzędu 3–5 cm) będzie na obrazach radarowych w paśmie L ciemna, ponieważ dla tej długości fali jest gładka i nie rozprasza promieniowania wstecznie, ale ta sama powierzchnia dla pasma X lub C będzie na obrazie jasna, ponieważ elementy strukturalne tej powierzchni są tego samego rzędu wielkości co długość padającej na nie fali, przez co ulega ona silniejszemu rozproszeniu wstęcznemu.



Ryc. 1.34. Pasma X – o falach krótszych niż fale pasm C i L dostarcza więcej informacji o rodzajach upraw, pasmo L – penetrujące głębiej dostarcza więcej informacji o wilgotności gleby i roślin niż o ich typach

Drugim parametrem obrazowania jest polaryzacja (Jensen, 2000), która odnosi się do płaszczyzny propagacji wektora pola elektrycznego. Bez względu na częstotliwość sygnały radarowe mogą być nadawane lub odbierane w różnych trybach polaryzacji. Większość radarów jest zaprojektowana do emitowania promieniowania mikrofalowego spolaryzowanego poziomo lub pionowo.

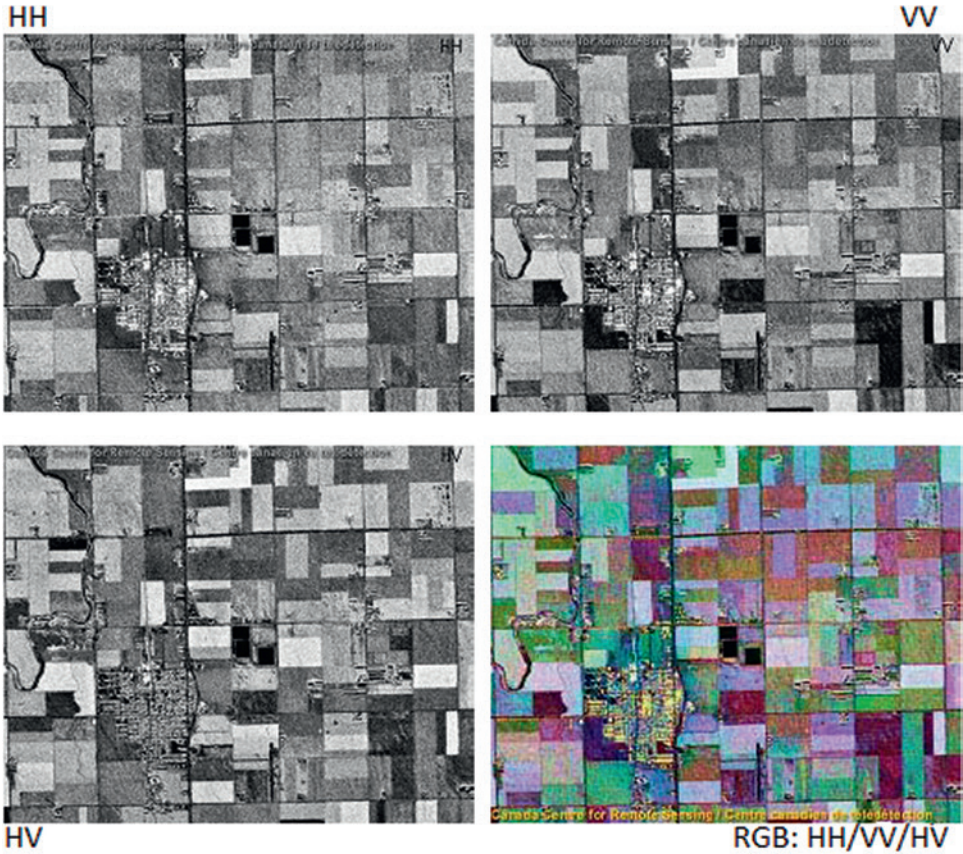
Podobnie jak przy generowaniu fal mechanicznych za pomocą sznurka (ryc. 1.35) można sobie wyobrazić działanie anteny, która przez zastosowanie specyficznych filtrów nadaje lub odbiera promieniowanie mikrofalowe w obu płaszczyznach (poziomej – H lub pionowej – V). Radar emitujący i odbierający promieniowanie w tej samej płaszczyźnie pracuje w polaryzacji zgodnej (zachowanej) VV lub HH, emitujący w jednej i odbierający w drugiej polaryzacji generuje obraz w trybie polaryzacji krzyżowej – VH lub HV. Systemy, które zbierają dane przy wszystkich czterech kombinacjach, nazywane polarymetrycznymi, są w stanie lepiej analizować strukturę i charakteryzować fizyczne właściwości obserwowanych obiektów. Polaryzacja dostarcza informacji o pionowych i poziomych elementach obserwowanego środowiska. Polarymetria radarowa jest obszernym działem teledetekcji mikrofalowej.



Ryc. 1.35. Idea polaryzacji fal (źródło: Jensen, 2000)

W poniższym przykładzie (ryc. 1.36) wewnętrzna struktura łąnow upraw tworzona przez zbiorowisko roślin o określonych grubościach łodyg lub źdźbeł, obsadzie, biomacie, wysokości, grubości i orientacji liści oraz zawartości wody determinuje moc rozpraszania mikrofal odmiennie dla każdej polaryzacji. Dlatego syntetyczna kompozycja barwna jest dobrym materiałem do rozpoznawania rodzajów czy gatunków roślin uprawnych, np. w statystyce rolniczej.

Pojęcie kąta obrazowania wymaga pewnego wprowadzenia w niuanse zarówno terminologiczne, jak i geometryczne. Najważniejsze jest zdefiniowanie punktu, z którego wyprowadzane będą wszystkie kierunki definiujące wzajemne położenie w przestrzeni platformy nośnej i obrazowanego obiektu. Kąt padania (ang. *incidence angle*) jest często mylony z kątem obrazowania (ang. *imaging angle*). Ten drugi jest w częstszym użyciu, gdy mówimy o parametrach SAR-u, ten pierwszy, gdy rozważamy kąt, pod jakim mikrofala penetruje roślinność. Bardzo często zbyt pochopnie stosuje się wymiennie pojęcie „kąta padania” i „lokalnego kąta padania”. Potrzebne jest zawsze doprecyzowanie, czy kierunkiem odniesienia jest normalna do powierzchni odniesienia, którą może być np. elipsoida,

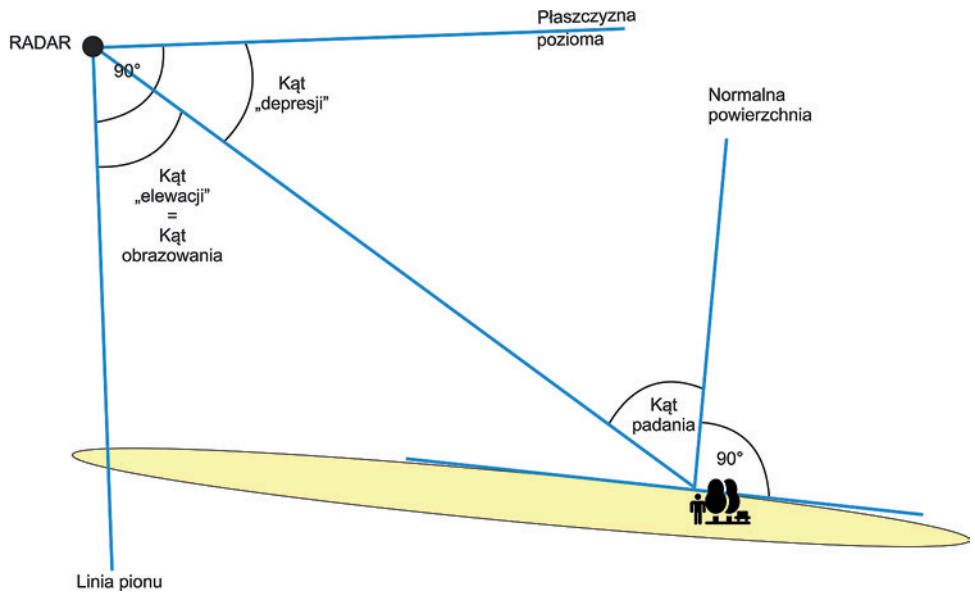


Ryc. 1.36. Trzy monochromatyczne obrazy radarowe wykonane w paśmie C przy trzech polaryzacjach: HH, VV i HV, czwarty – barwny obraz jest ich kompozycją RGB (źródło: CCRS, 2020)

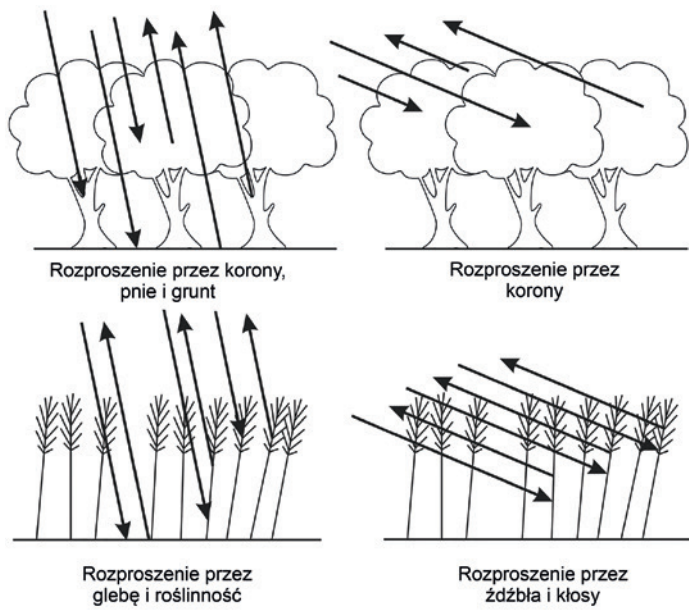
czy też normalna do lokalnej powierzchni topograficznej (normalna do stoku obliczona na podstawie numerycznego modelu terenu). Poniższy rysunek (ryc. 1.37) obrazuje te zależności. Pojęcia „kąt depresji” i „kąt elewacji” zostały zapożyczone z dokumentacji technicznej systemu ENVISAT/ASAR ESA (ENVISAT/ASAR Product Handbook, 2020).

Mniejszy kąt padania skutkuje większą penetracją roślinności i silniejszym sygnałem powrotnym, większy kąt padania zmniejsza wrażliwość na szorstkość powierzchni i zwraca mniejszy sygnał powrotny (ryc. 1.38).

Zaawansowane systemy radarowe oferują obrazowanie przy zmiennym kącie padającej wiązki, ponieważ – w zależności od aplikacji – zmiana kąta obrazowania może przynieść korzyści w postaci podniesienia kontrastu między obiektami na zdjęciu albo wpłynąć na zmianę mechanizmów rozpraszania. Stromy kąt obrazowania może skutkować podwójnym odbiciem zwierciadlanym na części obszarów mokradłowych, umożliwiając identyfikację podtopień, a duży kąt padania redukuje wpływ falowania wody na szorstkość powierzchni i poprawia identyfikację granic zbiorników wodnych.



Ryc. 1.37. Kąt obrazowania *versus* kąt padania



Ryc. 1.38. Różnice w penetrowaniu roślinności spowodowane zmiennym kątem padania

1.4.2.2. Satelitarne skanowanie laserowe

Piotr Wężyk

Technologia skanowania laserowego znana jest najczęściej pod akronimem LiDAR (Light Detection And Ranging) i podobnie jak radar (ang. *Radio Detection And Ranging*) należy do grupy aktywnych systemów teledetekcyjnych. System LiDAR wykorzystuje do obrazowania obiektów na powierzchni Ziemi energię lasera z zakresu bliskiej podczerwieni lub światła zielonego. Dzięki własnemu źródłu promieniowania system LiDAR jest niezależny od zewnętrznych warunków oświetleniowych, co oznacza, że rejestrowania obiektów można dokonywać nawet w nocy, przy całkowitym braku światła słonecznego.

W ogromnym uproszczeniu typowy lotniczy (ang. *Airborne Laser Scanning*, ALS) czy naziemny (ang. *Terrestrial Laser Scanning*, TLS) system LiDAR składa się zazwyczaj z modułu generującego światło lasera (diody), systemu wirujących luster (ich zadaniem jest równomierne odchylenie wiązek i tym samym rozrzucenie ich po obiekcie badań), teleskopu (skupiającego promieniowanie powracające czyli odbite) oraz rejestrującego go detektora impulsów (sensora). Zarówno nadajnik, jak i detektor podlegają jednostce kontrolującej sterowanej komputerem.

W dużym uproszczeniu rozróżnia się dwa typy instrumentów LiDAR, tj. tzw. systemy topograficzne – do pomiarów lądów i obiektów na nich występujących (ang. *topographic scanners*) oraz do pomiarów batymetrycznych (dna płytkich zbiorników wodnych, ang. *bathymetric scanners*). Systemy te różnią się głównie w zakresie wykorzystywanej długości światła lasera. W większości systemów topograficznych stosowana jest długość 1064 nm (niewidoczny dla ludzkiego oka zakres promieniowania bliskiej podczerwieni), a w systemach batymetrycznych tzw. zielony laser (promieniowanie o długości 532 nm). Wynika to z faktu, że woda całkowicie pochłania zakres NIR, w przeciwieństwie do zakresu światła zielonego, które może znacznie głębiej penetrować dość czyste wody (bez zawiesiny planktonu czy innych zanieczyszczeń). Głębokość penetracji zielonego światła lasera systemów batymetrycznych LiDAR (np. ALS czy SLS) podaje się nie jako głębokość wyrażoną w metrach (maksymalnie do 50 m), ale w formie wielokrotności (np. 2–3) widoczności w wodzie tzw. krążka Secchiego (Kurczyński, 2014b).

System batymetryczny wykorzystuje w zasadzie jednocześnie dwa lasery w zakresie światła podczerwonego oraz zielonego. Wiązki zwykle nie są prostopadle skierowane do powierzchni wody (jak ma to miejsce w przypadku topograficznego ALS LiDAR), ale do przodu pod kątem 15–20°, tak by promień podczerwony odbił się od lustra wody i nie został pochłonięty. W podobny sposób działają opisane w rozdziale 3.8 Podręcznika altimetry GLAS oraz ATLAS systemów SLS LiDAR.

Działanie skanera laserowego, niezależnie od platformy na jakiej jest ulokowany, polega na precyzyjnym pomiarze odległości dalmierza od badanego obiektu. Pomiar jest realizowany dzięki rejestrowaniu czasu, jaki upływa od momentu wysłania światła lasera do jego powrotu do detektora po uprzednim odbiciu się fotonów od powierzchni obiektu. Znana bardzo dokładnie w fizyce prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej (światła, stała $c = 299\,792\,458$ m/s) oraz precyzyjnie pomierzony czas wędrówki światła pozwalają na obliczenie odległości obiektu od skanera (równej iloczynowi połowy pomierzonego czasu i stałej c).

Dodatkowo skaner rejestruje także kąt, pod jakim jest odchylana wiązka lasera oraz koduje kolejno wysyłane impulsy, aby odpowiednio rozpoznać powracające. Pomierzone elementy, tj. czas i kąt odchylenia wiązki lasera, pozwalają na wyznaczenie współ-

rzędnych XYZ pomierzonych obiektów, czyli odbić sygnału, inaczej echa, ang. *puls echo*), a w zasadzie wygenerowanie tzw. chmury punktów (ang. *point cloud*) w przyjętym lokalnym układzie skanera (XYZ). W procesie post-processingu, wykorzystując informacje o trajektorii platformy z systemem LiDAR, w tym dane GNSS lub IST (Instrument Star Tracker, tj. urządzenie służące nawigacji na gwiazdy) oraz informacje z jednostki inercyjnej (ang. *Inertial Measurement Unit*, IMU) a także kontrolnych punktów naziemnych pomierzonych w docelowym układzie współrzędnych płaskich i wysokościowym, następuje transformacja wszystkich wygenerowanych punktów pomiarowych chmury do układu docelowego (np. XY: PL-1992; Z: Kronsztad 86).

W literaturze, poza akronimami systemów LiDAR ALS czy TLS, znane są także: MLS (Mobile Laser Scanning), oznaczający mobilne skanowanie i to zarówno z przemieszczających się pojazdów (samochód, pociąg), jak i noszonych przez operatora w specjalnym plecaku urządzeń HLS (Hand-Held Laser Scanning), czyli ręcznych skanerów laserowych, czy w końcu ILS (Industrial Laser Scanning) – przemysłowych dalmierzy oraz SLS (Satellite Laser Scanning) – satelitarnego skanowania laserowego.

Impuls altimetru LiDAR (niezależnie od typu używanej platformy, np. ALS czy SLS) dociera do obiektu i w zależności od albedo jego powierzchni (np. skała wapienna) jest odbijany (echo) lub rozpraszany, a część fotonów powraca do detektora skanera i jest rejestrowany czas ich wędrówki. Jeżeli impuls trafi na obszar zalesiony czy zadrzewiony, to pierwsze częściowe odbicie może nastąpić od korony drzewa (szczególnie w sytuacji pełnego ulistnienia drzew liściastych), ale reszta energii plamki lasera (ang. *laser beam*) jest w stanie dalej penetrować koronę drzewa i dotrzeć aż do gruntu (ostanie echo, ang. *last pulse-LP*, *last echo-LE*). Między tymi skrajnymi odbiciami sygnału mogą pojawić się oczywiście odbicia pośrednie, np. od gałęzi drzew.

Wybrane systemy LiDAR tzw. ToF (Time of Flight) czyli zbudowane z laserów pulsacyjnych i zliczające powracające fotony, rejestrują tylko pierwsze, ostatnie lub oba odbicia od obiektów. Są one często określane akronimem systemów dyskretnych (ang. *discrete LiDAR*). Przykładem instrumentu dyskretnego LiDAR SLS był altimetr GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) zamontowany na satelicie ICESat-1 (NASA).

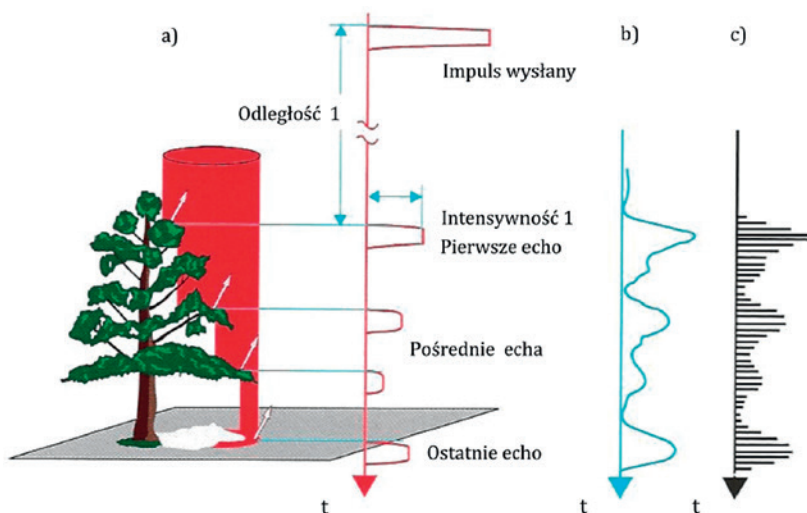
Inne systemy (głównie ALS LiDAR) mogą rejestrować rejestrujące odbicia pośrednie (nawet do pięciu odbić). Są też systemy (np. ALS, TLS czy SLS) oparte na analizie tzw. pełnego kształtu fali powracającej (ang. *full waveform*, FWF). Przykładem systemu typu pełnej fali (FWF) mogą być liczne systemy lotnicze ALS (np. RIEGL VQ-1560i-DW).

Innym jeszcze przykładem wykorzystania technologii laserowej może być altimetr ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) zainstalowany na satelicie ICESat-2 (NASA). Wykorzystuje on system polegający na zliczaniu fotonów światła w postaci mikropulsów. System jest czuły na poziomie pojedynczych fotonów, stąd rejestruje dowolne fotony powracające z powierzchni Ziemi lub będące nawet tłem promieniowania słonecznego. Wpływa to na rejestrację stosunkowo dużej ilości szumów, zwłaszcza w ciągu dnia (negatywny wpływ Słońca). Proponuje się jednak liczne algorytmy do usuwania negatywnego wpływu tego zjawiska. Dzięki bardzo szybkiemu generowaniu impulsów ATLAS może dokonywać kolejnych pomiarów (plamka światła o średnicy około 14 m), co około 76 cm wzdłuż naziemnej trajektorii (ślądu, ścieżki) satelity. Około 20 trylionów fotonów opuszcza altimetr ATLAS z każdym impulsem lasera, ale powraca do niego (przez teleskop berylowy o średnicy 86 cm) już tylko kilkanaście fotonów. Jako referencję ATLAS wychwytuje część promieniowania laserowego, zanim opuści ono satelitę i porównuje ustawienie lasera z pozycją teleskopu. W razie potrzeby

mechanizm sterujący przesuwa odpowiednio wiązkę laserową tak, by można było zarejestrować odbicia. Fotony, które wracają do teleskopu ATLAS skupiają się na sześciu światłowodach w płaszczyźnie ogniskowej. Z tych włókien fotony przechodzą przez szereg filtrów, które przepuszczają tylko światło o długości 532 nm, co ma kluczowe znaczenie w zapobieganiu negatywnemu wpływowi promieniowania słonecznego na detektory. Pojedynczy foton po przejściu przez filtry dociera do detektora, wzbudzając go. Systemy pokładowe ICESat-2 są w stanie określić pozycję satelity na orbicie (trajektorię przelotu) z błędem około 5 m wykorzystując do tego celu, m.in. system śledzenia pozycji gwiazd (IST) wyposażony w kamery oraz IMU (jednostka inercyjna).

Dzięki precyzyjnym pomiarom ATLAS, dokładność pomiaru gruntu pozbawionego roślinności określa się na ok. $-0,6$ m (niewielkie zaniżanie) w porównaniu do referencyjnych danych ALS LiDAR. Największy wpływ na jakość uzyskiwanych dokładności wysokościowych ma, jak wykazano, spadek terenu. Błędy pomiarowe wzrastają szczególnie w obszarach powyżej 20° spadku. Na obszarach leśnych oraz tundry błędy pomiaru wysokości zwiększają się także wraz z wysokością drzew oraz wzrostem zwarcia poziomego warstwy koron (Wang i in., 2019).

Powracający ciągły sygnał lasera (FWF) podlega digitalizacji (dyskretyzacji, kwantowaniu) z dużą częstotliwością tak, że zarejestrowane punktowe wartości amplitudy oddają kształt fali ciągłej. Na podstawie zarejestrowanej większej liczbie odbić, można określić np. długość koron drzew, wysokość drugiego piętra drzew w drzewostanie, czy w końcu bardziej precyzyjnie określać przebieg numerycznego modelu terenu (NMT) (ryc. 1.39).



Ryc. 1.39. Wielokrotne echa impulsu laserowego i pełny kształt fali (FWF) powracającego sygnału: a) echa systemu dyskretnego ToF; b) ciągły kształt powracającego sygnału (FWF) oraz c) powracający sygnał FWF zdigitalizowany (źródło: Kurczyński, 2014a za Vosselman i Mass, 2010)

Na etapie post-processingu danych powracający sygnał lasera jest dokładnie rekonstruowany i szczegółowo analizowany w celu określenia odległości do obiektu (dach budynku, grunt, korona drzewa), kształtu powracającego sygnału, wskaźników rodzaju obiektu, od którego nastąpiło odbicie oraz jego parametrów (wybranych cech).

W zarejestrowanym odbitym sygnale można badać:

- amplitudę (intensywność) odbicia P [DN],
- odległość R [m], oraz
- szerokość echa S_p [ns].

Analiza fali pełnej (FWF) pozwala na ekstrakcję dodatkowej informacji o właściwościach obserwowanych obiektów, ich szorstkości i albedo. Jest to istotny krok w kierunku modelowania fizykalnego opisującego interakcję impulsu laserowego ze złożonymi obiektami naziemnymi. Przykładem tego typu obiektów mogą być drzewa lub np. precyzyjne wykrywanie krawędzi budynków. Analiza pełnego kształtu fali odbitej lasera znajduje już zastosowanie w leśnictwie precyzyjnym, rolnictwie, inwentaryzacji terenów zurbanizowanych, sieci energetycznych, opracowaniach precyzyjnego NMT obszarów zagrożonych powodzią, w planowaniu przestrzennym i innych ważnych dziedzinach gospodarki.

Analiza pełnej fali (FWF) wymaga sporej wiedzy od operatora specjalistycznego oprogramowania. Jest to technika stosunkowo nowa i niezbyt często stosowana, ciągle w fazie rozwoju, stąd można oczekiwać, iż znajdzie ona nowe zastosowania (Kurczyński, 2014a).

Poza czasem wędrowki oraz kolejnym echem (obiekty takie jak słupy energetyczne mogą dawać kilka ech sygnału) systemy rejestrują często intensywność (ang. *intensity*) sygnału. Odpowiada ona energii odbitego sygnału i poza albedo czy szorstkością zależy m.in. od kąta nachylenia powierzchni obiektu w stosunku do kierunku padania sygnału lasera.

1.4.3. Kalibracyjne i kontrolne pomiary naziemne

Jan Piekarczyk, Beata Hejmanowska

Metody teledetekcyjne są coraz powszechniej wykorzystywane w wielu różnych dziedzinach gospodarki. Uzyskanie na ich podstawie wiarygodnych wyników wymaga kalibracji i kontroli, które często wykonuje się wykorzystując pomiary bezpośrednie w terenie. Porównanie krzywych spektralnych uzyskanych z obrazu z krzywymi spektralnymi z pomiarów terenowych (łac. *in situ*, czyli sensor umieszczony jest „w miejscu”, którego dotyczą pomiary) w wybranych punktach, umożliwia np. wykonanie korekcji radiometrycznej obrazu. W produkcji roślinnej metody teledetekcyjne oparte są na interpretacji zdjęć lotniczych, zdjęć z niskiego pułapu lub obrazów satelitarnych i ekstrakcji informacji na temat właściwości gleb na polach uprawnych, stanu odżywienia i uwodnienia roślin, obecności chwastów, chorób czy szkodników.

Spektroskopia polowa

Wiarygodna i efektywna fotointerpretacja obrazów teledetekcyjnych dla zastosowań w rolnictwie wymaga wcześniejszego poznania właściwości spektralnych powierzchni roślinnych oraz gleb, na jakich uprawy wzrastają. Właściwości spektralne obiektów określają sposób, w jaki docierające do roślin lub gleby promieniowanie słoneczne odbija się, jest absorbowane lub jest przez nie przepuszczane (podrozdział 1.2.2). Promieniowanie akumulowane może być potem również emitowane przez obiekt. Intensywność każdego z tych procesów oddziaływania promieniowania słonecznego z różnych zakresów widma na różne obiekty, typy pokrycia/użytkowania terenu, takie jak roślinność, gleby, zabudowa, wody zależy od różnych czynników. W przypadku roślinności

zależy od budowy morfologicznej i anatomicznej oraz składu biochemicznego pokrywy roślinnej (uprawy). Ilość odbitego promieniowania, którą rejestrują sensory teledetekcyjne jest zależna np. od zawartości chlorofilu czy cząsteczek wody w liściach lub ich budowy anatomicznej (zewnętrznej i wewnętrznej struktury komórkowej). Duża zawartość chlorofilu w liściach powoduje silniejszą absorpcję promieniowania w zakresie widzialnym (B oraz R), co w konsekwencji daje niższe odbicie fal widzialnych rejestrowane przez sensor. Zatem na podstawie wielkości odbicia światła w zakresie widzialnym rejestrowanego na detektorach można oszacować zawartość chlorofilu, która z kolei jest silnie związana, m.in., z potrzebami pokarmowymi roślin czy ich stanem zdrowotnym, a w konsekwencji biomasa. Aby tego rodzaju interpretacja zdjęć lotniczych i satelitarnych była możliwa, konieczne jest zebranie danych referencyjnych z wykorzystaniem naziemnych pomiarów i obserwacji obiektów wzorcowych identyfikowanych jednoznacznie na obrazie teledetekcyjnym. Dane takie uzyskać można np. w wyniku analizy prób glebowych lub roślinnych zebranych w reprezentatywnych miejscach (np. o różnych warunkach dla wzrostu roślin). Jedną z ważniejszych kategorii danych referencyjnych są charakterystyki spektralne powierzchni, które sporządza się na podstawie polowych pomiarów spektralnych specjalistycznymi spektrometrami. W kolejnym kroku określa się zależności między wynikami analiz fizykochemicznych próbek (roślin, gleby), a wartościami współczynników odbicia zarejestrowanymi przez spektrometr oraz detektor umieszczony na satelicie.

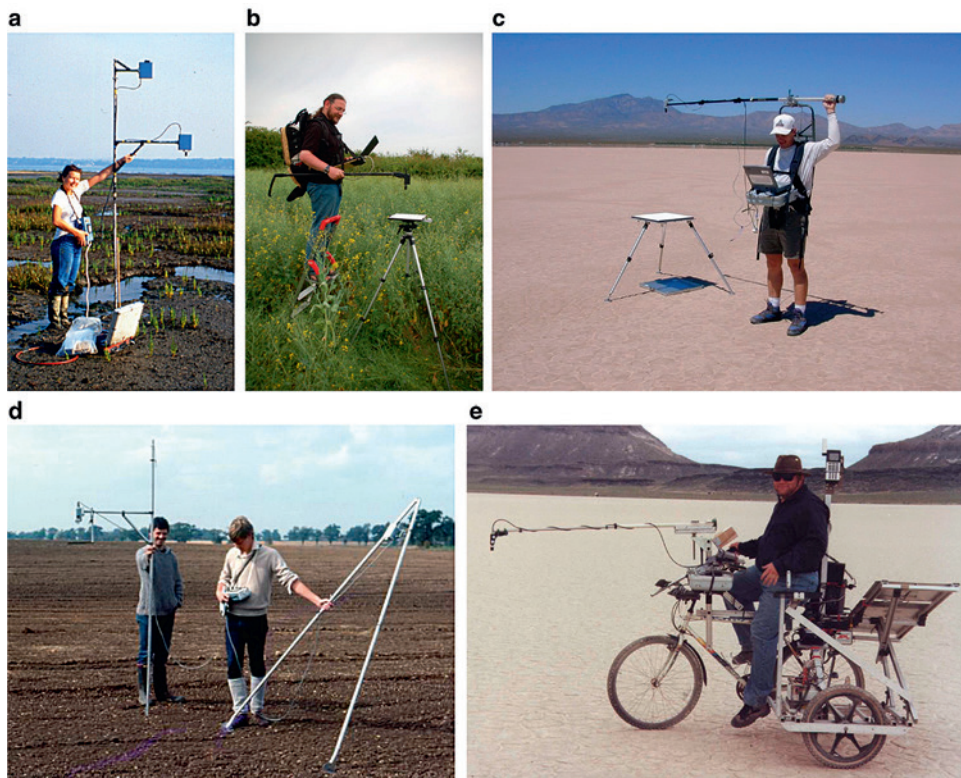
W celu dokładnego rozpoznania właściwości spektralnych roślin i gleb, i późniejszego wykorzystania tej wiedzy w klasyfikacji obrazów teledetekcyjnych, konieczne jest prowadzenie pomiarów odbitego promieniowania w warunkach kontrolowanych, czyli w terenie lub w laboratorium. W wyniku naziemnych pomiarów wykonywanych za pomocą spektrometrów polowych (ryc. 1.40) mierzących światło odbite, uzyskuje się wzorcowe charakterystyki spektralne powierzchni roślinnych różnych gatunków znajdujących się w różnym stanie. Zebrane wzorcowe charakterystyki tworzące tzw. biblio-



Ryc. 1.40. Naziemne pomiary spektralne uprawy jęczmienia z wykorzystaniem spektrometru FieldSpec4 (źródło: Fieldsites, 2020; fot. Uttam Kumar)

teki spektralne mogą być dalej wykorzystywane do rozpoznawania stanu roślin (upraw rolniczych) przez porównanie ich z charakterystykami (statystykami) uzyskanymi z obrazów satelitarnych i zdjęć lotniczych w poszczególnych kanałach spektralnych.

Naziemne pomiary spektralne wykonuje się zwykle na niedużych, reprezentatywnych powierzchniach przy użyciu spektrometrów ręcznych lub umieszczanych na specjalnych statywach (ryc. 1.41). Wielkość powierzchni wzorcowych powinna odpowiadać rozdzielczości przestrzennej użytego sensora satelitarnego, co wymaga próbkowania w kilku lub nawet kilkudziesięciu miejscach w terenie, w celu uśrednienia charakterystyk współczynnika odbicia.



Ryc. 1.41. Spektrometry polowe montowane na różnych statywach w trakcie wykonywania pomiarów odbitego promieniowania od powierzchni glebowych roślinnych i wzorców bieli (źródło: Milton i in., 2009)

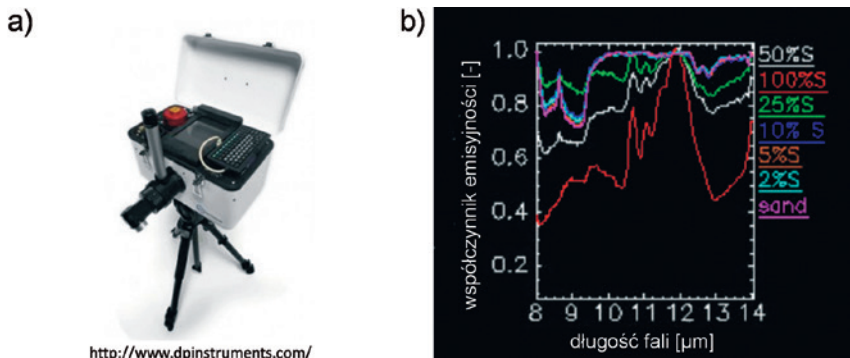
Sensor spektrometru rejestruje odbite od badanej powierzchni promieniowanie elektromagnetyczne w różnych zakresach widma (np. 400–2500 nm) odpowiadających często zakresom rejestracji detektorów satelitarnych. W trakcie spektralnych pomiarów polowych wykonuje się również pomiar luminancji tzw. wzorca bieli. Obliczając stosunek całkowitej luminancji badanej powierzchni do całkowitej luminancji powierzchni wzorcowej dla określonej długości fali, uzyskuje się współczynniki odbicia (Jackson i in., 1992). Zastosowanie kalibrowanych wzorców bieli umożliwia porównywanie charakterystyk spektralnych zbieranych w różnym czasie i przy wykorzystaniu różnych sensorów. W polowych badaniach spektralnych stosowanych jest wiele rodzajów wzorców o znanych charakterystykach odbiciowych.

W czasie wykonywania polowych pomiarów spektralnych konieczna jest stała kontrola warunków oświetlenia. Zalecane jest również ciągle rejestrowanie natężenia całkowitego promieniowania słonecznego przy wykorzystaniu solarymetrów oraz dokładne rejestrowanie zmian zenitalnego położenia Słońca w trakcie pomiarów. Wielkość odbicia spektralnego od powierzchni roślinnych zmienia się istotnie wraz ze zmianą kąta zenitalnego oświetlenia, gdyż zmienia się udział oświetlonych powierzchni pokrywy roślinnej lub pojawiają odbicia od gleby (Kimes i in., 1980).

W przypadku zastosowania metod teledetekcyjnych w badaniach, w których właściwości obserwowanych obiektów nie zmieniają się istotnie w czasie, np. w badaniach geologicznych, naziemne dane spektralne mogą być pozyskiwane w zasadzie jednorazowo. W sytuacjach, w których badania dotyczą obiektów takich jak roślinność (np. uprawy rolnicze), której zmienność w czasie jest bardzo duża, jej naziemne badania teledetekcyjne, prowadzone w celu uzyskania charakterystyk spektralnych, muszą być wykonywane z dużą częstotliwością i to w wielu sezonach wegetacyjnych.

Omówiony powyżej spektrometr rejestruje promieniowanie w zakresie: 0,3–2,5 μm . Urządzeń pracujących w zakresie TIR jest mniej. Przykładem jest spektrometr firmy Design&Prototype (μFTIR) rejestrujący promieniowanie w zakresie: 2–14 μm . Szczegółowa metodyka pomiaru tym spektrometrem znajduje się np. w publikacji (Korb i in., 1996; Hejmanowska, 2002). Ten zakres długości fal jest wykorzystywany do badań obszarów pozbawionych roślinności: monitoringu gleb czy postępów rekultywacji obszarów pogórnicznych (Hejmanowska i in., 2004) oraz np. w monitoringu obszarów antropogenicznych w określaniu stanu nawierzchni dróg (rozdział 6.4).

W tym zakresie również badane są krzywe spektralne, w tym przypadku zależności współczynnika emisyjności od długości fali, aby znaleźć zakresy, w których występują zaburzenia przebiegu krzywej, z reguły gwałtowne. W zakresie VNIR przykładem jest krzywa roślinności i zakres tzw. czerwieni krawędziowej (ang. *RedEdge*, RE) znajdujący się pomiędzy zakresem fal czerwonych i podczerwonych, pozwalający na monitoring typów i stanu roślinności. Natomiast w zakresie TIR krzywa spektralna krzemionki ma charakterystyczny pik (gwałtowny, krótkotrwały wzrost przebiegu krzywej) dla długości fali ok. 8,5 μm . Przykładem są krzywe spektralne różnych mieszanek piasku i siarki, przedstawione na rysunku (ryc. 1.42). Wraz ze wzrostem zawartości siarki obserwuje się



Ryc. 1.42. a) Spektrometr Micro Fourier Transform Interferometer firmy Design&Prototypes pracujący w zakresie TIR; b) zależność współczynnika emisyjności od długości fali w zakresie TIR dla mieszanek piasku i siarki (różowy – czysty piasek, czerwony – czysta siarka) (źródło: DP, 2020; Hejmanowska, 2002)

zmniejszanie się pików od krzemionki. Zjawisko to było wykorzystywane do określania stopnia zanieczyszczenia gleb siarką na obszarze rekultywowanej kopalni siarki w Jeziórku (Hejmanowska, 2002). Piki od krzemionki jest również parametrem analizowanym w monitoringu stanu nawierzchni dróg (rozdział 6.4). W tym przypadku eksploatacja dróg prowadzi do zużywania się nawierzchni asfaltowych, w wyniku czego na powierzchni zaczynają pojawiać się ziarna piasku. W tym przypadku mamy do czynienia z pojawianiem, a nie zanikaniem tego pików.

2. Pozyskiwanie informacji z obrazów cyfrowych

Pozyskiwanie informacji z obrazów cyfrowych jest procesem wieloetapowym, który rozpoczyna się od momentu ich zarejestrowania, a kończy opracowaniem produktu końcowego. Energia promieniowania elektromagnetycznego padająca na detektor [$W/m^2/sr$] jest przeliczana z wykorzystaniem krzywych kalibracyjnych na liczby (z określonego zakresu), które są w sposób ciągły zapisywane bit po bicie. W celu zwizualizowania, czy dalszego przetwarzania ten zapis wymaga transformacji do postaci macierzy. Elementami macierzy są piksele, w których zapisana jest wartość (ang. *Digital Number*, DN) proporcjonalna do energii padającego na detektor promieniowania elektromagnetycznego. Obrazy cyfrowe charakteryzują się m.in. rozdzielczością spektralną, która określa liczbę kanałów, w których jednocześnie rejestrowane jest promieniowanie elektromagnetyczne, czy rozdzielczością radiometryczną, która z kolei definiuje liczbę bitów, na których został zapisany jeden piksel. Obraz składa się z określonej liczby kolumn i wierszy. Informacja o liczbie bitów przypadających na zapis cyfrowy jednego piksela oraz o liczbie kolumn stanowi minimalną liczbę informacji, by z nieprzetworzonych danych (ang. *raw data*) wygenerować obraz. Znajomość liczby wierszy nie jest niezbędna, ponieważ można ją wyliczyć z wielkości pliku i liczby kolumn. Pierwszym etapem prac z obrazami teledetekcyjnymi jest tzw. przetwarzanie wstępne obejmujące korekcje radiometryczne i geometryczne. Korekcja radiometryczna polega na odpowiedniej transformacji wartości sygnału (DN) w celu uzyskania wartości fizycznych (np. współczynnika odbicia, emisyjności czy wstecznego rozpraszania). Z kolei korekcję geometryczną – w dużym uproszczeniu – przeprowadza się, aby wpasować obraz w przyjęty przez użytkownika układ współrzędnych, w którym realizowane są jego projekty (np. PL-1992).

Procesy ww. korekcji przeprowadza się inaczej dla pasywnych, a inaczej dla aktywnych systemów teledetekcyjnych. W obu przypadkach rejestrowane jest odbite promieniowanie elektromagnetyczne padające na detektor umieszczony na satelicie. W systemach pasywnych jest to promieniowanie słoneczne (np. instrument TM na satelicie Landsat 5), a w aktywnych promieniowanie wyemitowane uprzednio przez antenę nadawczą (np. TerraSAR-X) lub diodę skanera laserowego (np. system ICESat-2). Dodatkowo, w przypadku systemów aktywnych, rejestrowane są także parametry fali elektromagnetycznej takie jak amplituda i faza.

Następnym etapem przetwarzania obrazów jest analiza obrazów teledetekcyjnych, obejmująca tworzenie kompozycji barwnych, interpretację obrazów oraz obliczanie różnych wskaźników teledetekcyjnych pomocnych w pozyskiwaniu informacji z obrazów na potrzeby np. monitoringu roślinności, jakości wód czy przemian na obszarach antropogenicznych.

Końcowym etapem przetwarzania obrazów jest sklasyfikowanie ich treści, aby uzyskać konkretne produkty, takie jak np. mapy pokrycia terenu czy mapy aktywnych pożarów lasów lub przemieszczania się aerozoli w skali globalnej. Temu etapowi towarzyszy nieodłącznie ocena wiarygodności uzyskanych wyników, przeprowadzana dzięki sprawdzeniu jakości tych produktów odpowiednimi metodami (np. macierz błędów).

2.1. Etapy przetwarzania satelitarnych danych teledetekcyjnych

Beata Hejmanowska

W podrozdziale omówiono etapy przetwarzania obrazów optycznych, termalnych, mikrofalowych i radarowych.

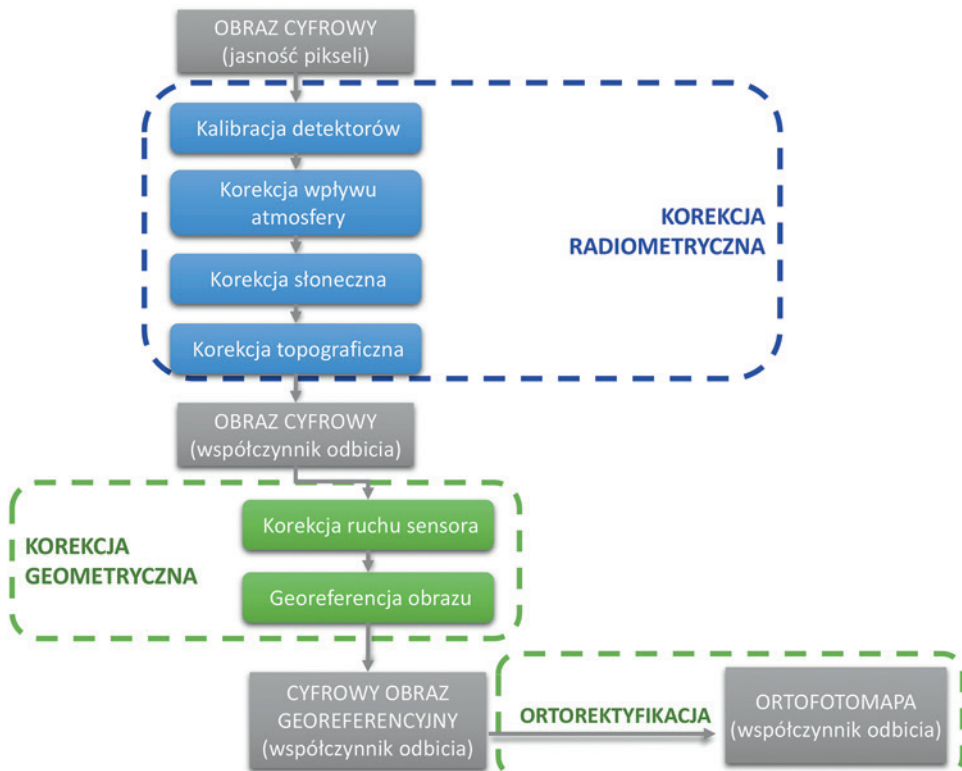
2.1.1. Korekcja geometryczna i radiometryczna obrazów rejestrowanych technikami pasywnymi

Korekcja geometryczna obrazów teledetekcyjnych polega na usunięciu zniekształceń geometrycznych, jakie powstają podczas rejestrowania obrazów na skutek np. krzywizny Ziemi czy sposobów rejestracji (np. budowy sensora). Ciąg bitów informacji zamieniony na macierz z wykorzystaniem określonej liczby kolumn i wierszy detektora przedstawia obraz zniekształcony geometrycznie, m.in. ze względu na ruch obrotowy Ziemi. Obraca się ona z zachodu na wschód, zatem satelita poruszający się po orbicie z północy na południe rejestruje powierzchnię Ziemi, która oddala się od niego w kierunku wschodnim. Dlatego też każdy obraz satelitarny po wykonanej korekcji geometrycznej przedstawiony jest w postaci równoległoboku, a nie prostokąta. Nie jest jednak możliwe przechowywanie obrazu w takiej formie, dlatego najczęściej jest on zapisywany jako prostokątna macierz, w której wiersze górne są przesunięte w stosunku do dolnych, a pikselom w pustych miejscach przypisuje się wartość największą z możliwych, np. 65536 dla obrazów zapisanych na 16 bitach. W związku z tym, obraz w trakcie wizualizacji musi być poddawany procedurze rozciągania kontrastu, często przeprowadzanego automatycznie (np. w programie SNAP lub innych specjalistycznych programach tego typu). W przeciwnym razie rozciągnięcie kontrastu (histogramu) należy wykonać manualnie, ponieważ będzie on całkowicie czarny ze względu na dużą różnicę wartości DN w pustych pikselach i na obszarach z treścią obrazu (sytuacja taka ma miejsce np. w programie QGIS czy w innych, które inaczej interpretują np. statystyki obrazu).

Korekcję geometryczną zobrazowań (ryc. 2.2) przeprowadza się na podstawie parametrów orbity satelity, zapisanych w momencie ich zarejestrowania lub wykorzystując tzw. punkty dostosowania (ang. *Ground Control Points*, GCP), czyli identyfikowalne na obrazie i w terenie, dobrze kontrastujące naturalne punkty terenowe (o znanych współrzędnych, np. przecięcia dróg), rzadziej punkty specjalnie sygnalizowane przed wykonaniem rejestracji. Korekcja geometryczna przebiega w dwóch etapach. Pierwszy z nich polega na znalezieniu funkcji do przeliczenia współrzędnych obrazu z układu pikselowego (kolumna, wiersz) do terenowego układu współrzędnych (np. ogólnosiwiatowego UTM-Universal Transverse Mercator, dla Polski strefy: 33U oraz 34U, czy obowiązującego państwowego: PL-1992, PL-2000). Przy wykorzystaniu funkcji można dokonywać prostych przekształceń geometrycznych – przesunięcie, obrót i zmiana skali, usuwać zniekształcenie perspektywiczne obrazu przez transformację rzutową lub w sposób ścisły przeliczać położenie każdego piksela w obrazie na prawidłowe położenie w terenie przy wykorzystaniu geometrii – promienia padającego na detektor/teren. Na podstawie punktów dostosowania można wyznaczyć parametry funkcji przeliczenia pomiędzy układem współrzędnych pikselowych a układem terenowym (np. PL-1992). Zniekształcenia geometryczne obrazu powodują, że regularny wymiar piksela nie od-

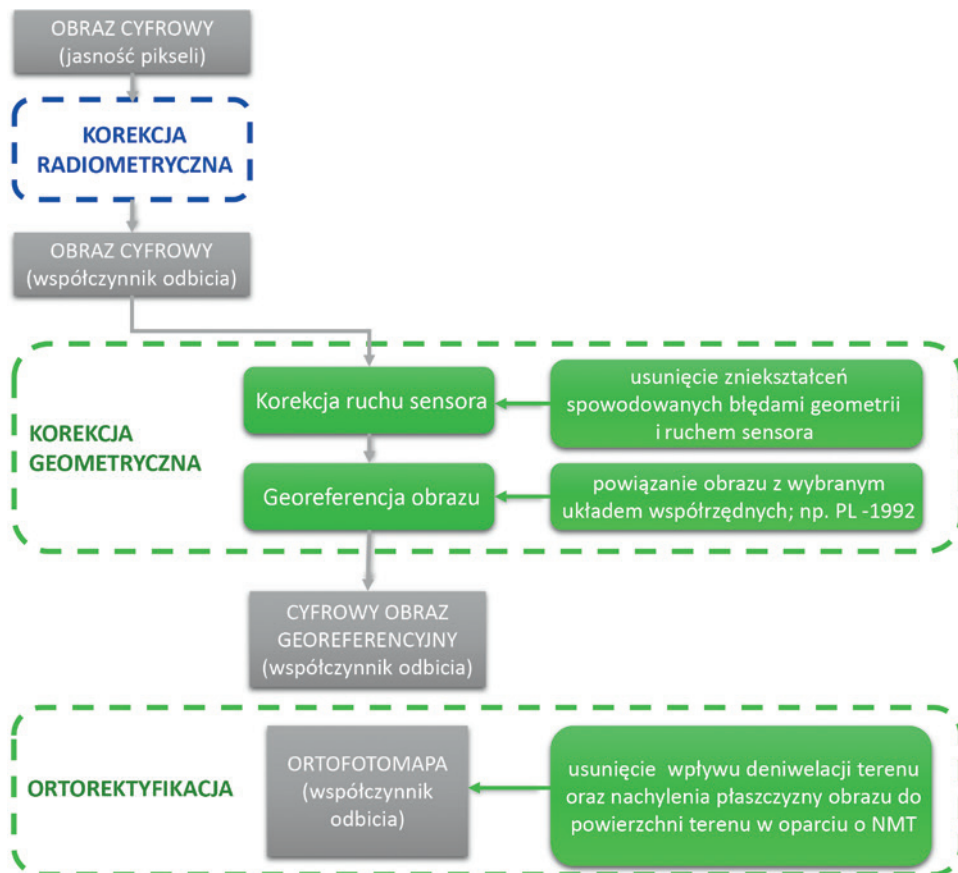
powiada regularnym obszarom w terenie, czyli aby piksel odpowiednio wpasować w teren należy go przekształcić, tj. obrócić, zmienić jego skalę, przesunąć, zniekształcić geometrycznie, czasem do nieregularnego czworokąta. Tak zniekształconych pikseli nie da się zapisać w postaci regularnej macierzy, dlatego konieczny jest następnny etap polegający na utworzeniu nowego, skorygowanego, wolnego od zniekształceń geometrycznych obrazu. Etap ten nazywa się przepróbkowaniem obrazu (ang. *resampling*). W jego wyniku otrzymujemy obraz wpasowany w określony układ współrzędnych o pikselach w kształcie regularnego wieloboku (kwadrat), których rozmiar odpowiada rozdzielczości przestrzennej (inaczej terenowej).

Korekcja radiometryczna (ryc. 2.1) obejmuje przetwarzanie obrazów w celu obliczenia odpowiednich wartości fizycznych. Pierwszym etapem jest kalibracja wartości zarejestrowanych przez detektor (DN) do wartości energii, która do niego dociera. Biorąc pod uwagę kąt widzenia detektora, energię określa się jako radiancję, czyli strumień promieniowania na jednostkę powierzchni, na jednostkę kąta bryłowego i wyraża się w jednostkach: $W/m^2/sr$ (w przypadku rejestracji wielospektralnej, w określonym zakresie spektralnym radiancja wyrażana jest w jednostkach: $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$). Przeliczenia niemianowanych wartości jasności piksela DN do jednostek radiancji dokonuje się na podstawie wzorów kalibracyjnych detektorów, zwykle opartych na zależności liniowej (Landsat 7 Handbook, 2020) (rozdział 4.6.6).



Ryc. 2.1. Schemat wstępnego przetwarzania obrazów teledetekcyjnych (źródło: ProGea 4D, 2020)

Następne etapy korekcji obrazów zarejestrowanych technikami pasywnymi przebiegają odmiennie dla zakresu promieniowania odbijanego widzialnego i podczerwonego (ang. *Visible & Near InfraRed*, VNIR) i średniej podczerwieni (ang. *ShortWave InfraRed*, SWIR) oraz emitowanego termalnego (ang. *Thermal InfraRed*, TIR) i mikrofalowego (ang. *MicroWave*, MW).



Ryc. 2.2. Etapy korekcji geometrycznej – przykład wykorzystania punktów dopasowania (źródło: ProGea 4D, 2020)

2.1.2. Przetwarzanie obrazów optycznych

Dalsza korekcja radiometryczna obrazów zarejestrowanych w zakresie VNIR oraz SWIR polega na przeliczeniu wielkości radiancji do współczynnika odbicia na tzw. poziomie powyżej atmosfery (ang. *Top of Atmosphere Reflectance*, TOA). Wartość padającej na detektor radiancji zależy od odbicia od obiektu na powierzchni Ziemi oraz od właściwości atmosfery. Ponadto energia słoneczna jest dwukrotnie tłumiona przez atmosferę, raz w drodze do obiektu, a potem podczas wędrówki po odbiciu przez niego. Na tym etapie przeprowadzana jest normalizacja ze względu na ilość promieniowania padającego, co umożliwia wykonywanie analiz wieloczasowych (Landsat 7 Handbook, 2020).

$$\rho = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s} \quad (2.1)$$

gdzie:

L_{λ} – radiancja zarejestrowana przez detektor,

d – odległość Ziemia–Słońce w jednostkach astronomicznych (możliwa do odczytania z tabel astronomicznych lub metadanych obrazu),

$ESUN_{\lambda}$ – średnia wartość stałej słonecznej (średnia irradiancja Słońca),

θ_s – kąt zenitalny Słońca.

Wzór (2.1) ulega modyfikacji, jeśli uwzględnimy zakłócający wpływ atmosfery (QGIS plugins, 2020 za Moran i in., 1992):

$$\rho = \frac{\pi \cdot (L_{\lambda} - L_p) \cdot d^2}{T_v [(ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s \cdot T_z) + E_{down}]} \quad (2.2)$$

gdzie:

L_p – wartość wstecznego rozpraszania atmosfery,

T_v – współczynnik przepuszczalności atmosfery w kierunku rejestracji,

T_z – współczynnik przepuszczalności atmosfery w kierunku padania promieni słonecznych,

E_{down} – padające na powierzchnię Ziemi promieniowanie rozproszone.

Uwzględnienie zakłócającego wpływu atmosfery wymaga pomiarów różnych parametrów atmosfery lub wybrania odpowiedniego modelu atmosfery zależnie od pory roku, szerokości geograficznej i typu pokrycia terenu. Dostępne są narzędzia bazujące na opracowanych w tym celu modelach (np. ATCOR, MODTRAN, S6).

Inne podejście do korekcji wpływu atmosfery na jakość zobrazowań satelitarnych bazuje na charakterystycznych obiektach obrazu. Przykładem jest metoda odejmowania radiancji obiektów ciemnych (ang. *Dark Object Subtraction*, DOS). Metoda ta opiera się na założeniu, że jasność obiektów ciemnych, których współczynnik odbicia powinien wynosić zero (np. obiekty całkowicie zacienione) jest spowodowana wstecznym rozpraszaniem atmosfery. Ta metoda korekcji została zaimplementowana we wtyczce *Semi-Automatic Classification* (SCP) w oprogramowaniu QGIS.

Ostatecznie, po wykonaniu korekcji geometrycznej i radiometrycznej, obraz jest pozbawiony zniekształceń geometrycznych, czyli można go nałożyć na mapę w zdefiniowanym przez użytkownika układzie współrzędnych, a DN pikseli odpowiadać będzie wartościom współczynnika odbicia. Stosunkowo łatwo jest zauważyć efekt korekcji geometrycznej; szczegóły na obrazie pokrywają się ze szczegółami na mapie. Obraz po korekcji atmosferycznej może wyglądać niemal tak samo jak przed tym procesem, czyli jasność piksela będzie taka sama, zmienia się natomiast wartość piksela (DN), przykładowo z wartości z zakresu: 0–255 (8 bit), na wartości współczynnika odbicia w zakresie: 0–1. Wszystkie dane teledetekcyjne, zarówno wielospektralne, jak i hiperspektralne, można uszeregować według określonego stopnia przetworzenia obrazu, który jest wykorzystywany przez użytkownika.

Produkty znajdujące się w bazie EOSDIS (ang. *Earth Observing System Data and Information System*, EOSDIS) są przetwarzane na różnych poziomach, tj. od 0 do 4 (tabela 2.1). Produkty poziomu 0 są to surowe dane (ang. *raw data*) w pełnej rozdzielczości

instrumentu (detektora). Na wyższych poziomach przetworzeń dane są konwertowane na bardziej przydatne parametry i formaty. Wszystkie instrumenty EOSDIS muszą mieć produkty poziomu 1. Większość ma produkty na poziomie 2 (pojedyncze obrazy skorygowane geometrycznie i radiometrycznie, włącznie z korekcją atmosferyczną) i na poziomie 3, co oznacza mozaikę obrazów utworzonych ze skorygowanych pojedynczych obrazów. W wielu przypadkach dostępne są nie tylko mozaiki, ale gotowe produkty przetworzenia, czyli np. wyniki klasyfikacji, które stanowią poziom 4 (choć nie wprost wyróżniony w tabeli 2.1).

Tabela 2.1. Konwencja nazewnictwa produktów teledetekcyjnych opisująca różne poziomy przetwarzania (źródło: EOSDIS, 2020)

Level 0 (poziom 0)	Surowe dane obrazowe (postać cyfrowa danych – DN)
Level 1A (poziom 1A)	Surowe dane obrazowe z pełną rozdzielczością, referencja czasowa, metadane. Podane współczynniki do korekcji radiometrycznej i geometrycznej. Brak wykonanej korekcji radiometrycznej i geometrycznej
Level 1B (poziom 1B)	Orientacja zewnętrzna platformy/sensora poszerzona o informacje bazowe GPS, co pozwala na pełną korekcję radiometryczną, atmosferyczną i geometryczną
Level 1C (poziom 1C)	Zawarte pomiary <i>in situ</i>
Level 2 (poziom 2)	Wykonana korekcja geometryczna i atmosferyczna dla pojedynczych scen
Level 3+ (poziom 3+)	Produkt końcowy użytkownika. Zwykle rezultat mozaikowania pojedynczych scen zarejestrowanych dla obszaru badań użytkownika. Produkty mogą być mapami klasyfikacji lub parametrami modelu. W zależności od rozbudowy poziomu końcowy produkt użytkownika określa się jako Level 3 lub Level 4

W przypadku danych Europejskiej Agencji Kosmicznej rejestrowanych np. przez sensor MSI (MultiSpectral Instrument) satelity Sentinel-2, tylko produkty poziomu 1 (ang. *Level-1C*, L1C) i poziomu 2 (ang. *Level-2A*, L2A) są udostępniane użytkownikom (tabela 2.2). Wszystkie dane pozyskane przez Sentinel-2 są systematycznie przetwarzane do poziomu L1C przez naziemny segment opracowania danych (ang. *Payload Data Ground Segment*, PDGS). Produkty poziomu L2A są generowane przez segment naziemny PDGS przy użyciu procesora *Sen2Cor* albo po stronie użytkownika za pomocą narzędzi oprogramowania Sentinel-2 Toolbox (ESA S-2 Toolbox, 2020).

Wszystkie obrazy satelitarne wymagają wpasowania w zdefiniowany układ współrzędnych tak, by użytkownik mógł z nich korzystać w praktyce, np. wizualizować na tle innych wcześniej pozyskanych zobrazowań lub danych GIS (np. granice jednostek administracyjnych). Prace wstępne zależą od poziomu przetworzeń produktów. Przykładowo Landsat 8 Level 2 oraz Sentinel-2 Level-2A są już odpowiednio przygotowane do ich użycia, tzn. są poprawnie skorygowane geometrycznie przez producenta (NASA i ESA) do odwzorowania UTM oraz radiometrycznie: do wartości współczynnika odbicia i temperatury. Nie zawsze jednak obrazy o takim stopniu przetworzenia są dostępne dla użytkownika i wtedy należy tego typu korekcję przeprowadzić we własnym zakresie. Produkty Landsat 8 Level 1 oraz Sentinel-2 Level-1C są wstępnie skorygowane geometrycznie, natomiast nie podlegały korekcji radiometrycznej. W pewnych przypadkach użytkownik musi poprawić wpasowanie geometryczne obrazów. Korekcję geometryczną przeprowadza się z identycznymi parametrami dla wszystkich kanałów spektralnych, w tym także dla kanałów termalnych.

Tabela 2.2. Poziomy przetworzenia obrazów Sentinel-2 (źródło: ESA S-2 Products, 2020)

Poziom 0 (Level 0)	Nieprzetworzone, skompresowane surowe dane obrazowe
Poziom 1A (Level-1A)	Nieskompresowane dane obrazowe, wstępna georejestracja, dane pomocnicze (dane telemetryczne)
Poziom 1B (Level-1B)	Dane obrazowe po korekcy radiometrycznej, wstępna georejestracja, załączone modele geometryczne
Poziom 1C (Level-1C)	Dane obrazowe po procesie ortorektyfikacji, geokodowanie (UTM), korekcja atmosferyczna (TOA*), rejestracja podpikselowa (wielospektralna, wieloczasowa)
Poziom 2A (Level-2A)	Dane obrazowe po ortorektyfikacji, geokodowanie (UTM), korekcja atmosferyczna (BOT**), dodatkowe dane wyjściowe: mapa grubości optycznej atmosfery (AOT***), mapa pary wodnej, klasyfikacja sceny, dane dotyczące wskaźników jakości

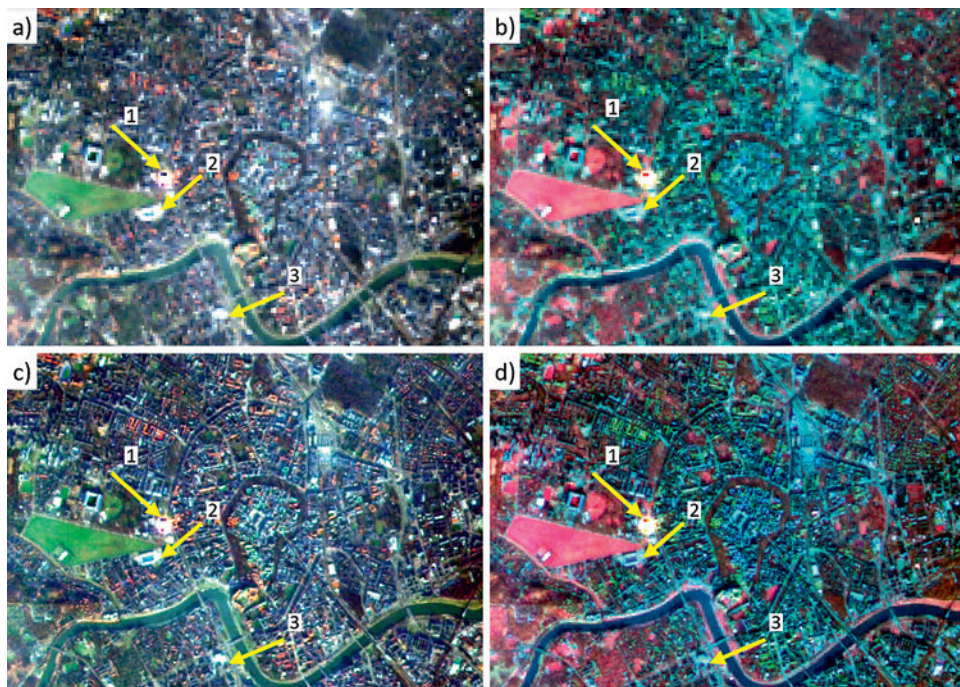
* TOA (Top-of-Atmosphere)

** BOA (Bottom-of-Atmosphere)

*** AOT (Aerosol Optical Thickness)

Jedną z procedur wstępnego przetwarzania obrazów w zakresie VNIR i SWIR jest jego tzw. wzmocnienie czy wyostrzenie kanałem o wyższej rozdzielczości przestrzennej (ang. *pan-sharpening*). Jest to technika łączenia obrazów panchromatycznych (ang. *panchromatic*, PAN) o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (np. 15 m) z obrazami wielospektralnymi o niższej rozdzielczości przestrzennej (np. 30 m; ryc. 2.3). W wyniku fuzji danych uzyskiwany jest barwny obraz o wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Metody fuzji obrazów mają za zadanie zachowanie jak najlepszej charakterystyki radiometrycznej źródłowych danych wielospektralnych i charakterystykę geometryczną danych panchromatycznych.

Przykładowe kompozycje barwne (RGB oraz FCC (False Color Composite, nazywana także Colour InfraRed, CIR), utworzone z kanałów obrazu Landsat 8, zarejestrowanego w dniu 15.01.2020 roku zaprezentowano na rycinie 2.3 (więcej informacji na temat tworzenia kompozycji barwnych z obrazów wielospektralnych znajduje się w rozdziale 1.2.1). Kompozycje utworzone z wykorzystaniem oryginalnych kanałów wielospektralnych Landsat (GSD 30 m) można porównać z kompozycjami utworzonymi z kanałów po wstępnym przetworzeniu polegającym na zwiększeniu rozdzielczości przestrzennej kanałów wielospektralnych przy wykorzystaniu kanału panchromatycznego Landsat (GSD 15m). Oprócz efektu zwiększenia rozdzielczości przestrzennej widoczny jest wyraźny wpływ zamglenia oraz odbłaski, częste o tej porze roku (1 – Biblioteka Jagiellońska i Muzeum Narodowe, 2 – Stadion Cracovii, 3 – Centrum Kongresowe).



Ryc. 2.3. Porównanie kompozycji RGB oraz FCC (CIR) przed i po przeprowadzeniu pan-sharpeningu na obrazie Landsat 8 (data rejestracji: 15.01.2020): a) RGB dane oryginalne, wielkość piksela 30 m, b) FCC dane oryginalne, wielkość piksela 30 m, c) RGB po pan-sharpeningu, wielkość piksela 15 m, d) FCC po pan-sharpeningu, wielkość piksela 15 m

2.1.3. Przetwarzanie obrazów termalnych

W zakresie promieniowania termalnego (TIR) o długości fali powyżej $2,5 \mu\text{m}$ zaczyna pojawiać się, oprócz promieniowania odbitego, także promieniowanie emitowane. Obrazy zarejestrowane w tym zakresie spektralnym są poddawane innej korekcji radiometrycznej, którą wykonuje się w dwóch krokach. W pierwszym kroku korzysta się z prawa Plancka (wzór 1.3, rozdział 1), z którego po obustronnym zlogarytmowaniu i prostych przekształceniach można obliczyć temperaturę radiacyjną T_B (ang. *effective at-satellite brightness temperature*) ze wzoru (Landsat 7 Handbook, 2019):

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2.3)$$

gdzie:

T_B – temperatura [K],

L_λ – radiancja [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$], wielkość obliczona na podstawie DN z kanału termalnego,

K_1 – stała dla danej długości fali związana z pierwszą stałą promieniowania c_1 ,

K_2 – stała dla danej długości fali związana z drugą stałą promieniowania c_2 .

Stałe można znaleźć w opisie produktu, metadanych lub obliczyć z poniższych wzorów:

$$K_1 = \frac{c_1}{\lambda^5} \quad (2.4)$$

$$K_2 = \frac{c_2}{\lambda} \quad (2.5)$$

gdzie:

c_1 – pierwsza stała promieniowania [$1,191 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 / \text{sr}$],

c_2 – druga stała promieniowania [$1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$],

λ – długość fali.

Temperaturę rzeczywistą, tzw. kinetyczną, można obliczyć pod warunkiem znajomości współczynnika emisyjności (ε) bezpośrednio z prawa Stefana-Boltzmana (wzór 1.14, rozdział 1), jeśli zostało zarejestrowane promieniowanie w całym zakresie długości fali (prawo Stefana-Boltzmana określa całkowitą energię elektromagnetyczną emitowaną przez ciało i powstaje przez scałkowanie krzywej Plancka):

$$T = \frac{T_B}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \quad (2.6)$$

Jeśli natomiast pomiar był wykonany dla jakiejś długości fali, temperaturę kinetyczną można obliczyć z przekształconego wzoru Plancka:

$$T = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda \cdot \frac{T_B}{c_2} \right) \cdot \ln \varepsilon} \quad (2.7)$$

gdzie:

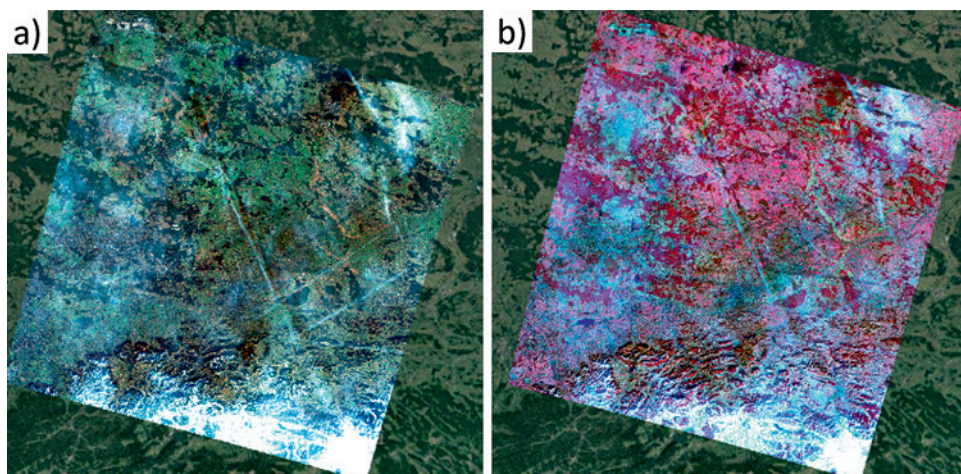
ε – współczynnik emisyjności.

Przykładowe wartości współczynnika emisyjności zamieszczono w tabeli (tabela 2.3). Przy wykorzystaniu obrazu satelitarnego, np. kanału 10 Landsat 8, można otrzymać obraz temperatur. Zawsze należy mieć na uwadze, że jest to temperatura radiacyjna T_B , a nie temperatura kinetyczna, czyli taka, jaką uzyskalibyśmy w wyniku pomiaru termometrem. Temperatura radiacyjna jest równa temperaturze kinetycznej tylko dla ciała doskonale czarnego, a dla wszystkich innych ciał jest zawsze wyższa. Przykładowo, jeśli temperatura obiektu na obrazie wynosi 20°C , to w przypadku roślinności, której współczynnik emisyjności jest zbliżony do ciała doskonale czarnego i wynosi ok. 0,98, to oznacza temperaturę rzeczywistą równą $20,1^\circ\text{C}$. Temperatura kinetyczna może jednak znacznie odbiegać od wartości obliczonej teledetekcyjnie. Na przykład temperatura 20°C na obrazie dla piasku ($\varepsilon = 0,7$) oznacza w rzeczywistości $22,4^\circ\text{C}$, a już dla blachy aluminiowej ($\varepsilon = 0,09$) $36,7^\circ\text{C}$. Różnice mogą być znacznie większe, przykładowo powierzchnia pokryta blachą, dla której odczytamy temperaturę z obrazu Landsat równą 60°C , będzie miała w rzeczywistości temperaturę 82°C .

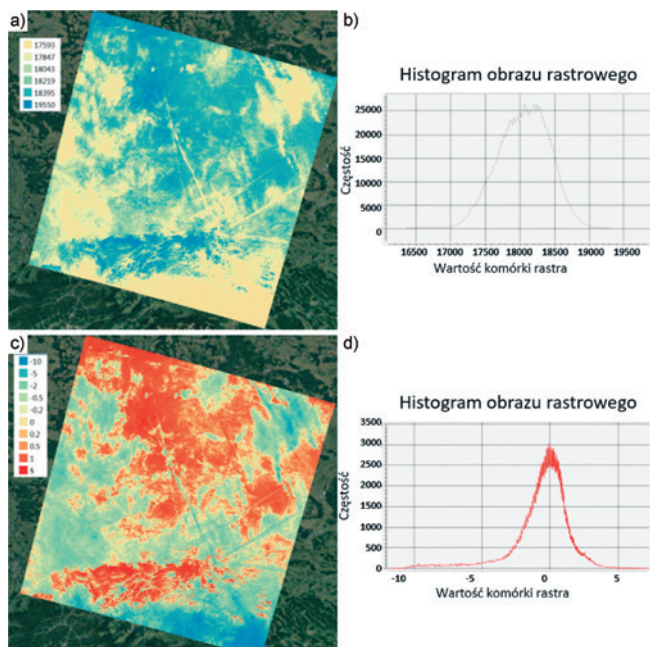
Tabela 2.3. Przykładowe wartości współczynnika emisyjności
(źródło: za Congedo, 2017 i EN, 2020)

Typ pokrycia terenu	Współczynnik emisyjności (ϵ)
gleba	0,90–0,95
roślinność trawiasta	0,98
asfalt	0,93
beton	0,94
piasek	0,76
korona sosny	0,84
blacha aluminiowa	0,09

Korekcję radiometryczną obrazów z Landsat 8 można wykonać automatycznie z wykorzystaniem wtyczki do programu QGIS: *Semi-Automatic Classification*. Różnice pomiędzy obrazami zarejestrowanymi w tzw. odbijalnym zakresie fal (VNIR), a obrazami zarejestrowanymi w zakresie fal emitowanych (TIR) zwizualizowano na rycinach 2.4 i 2.5.



Ryc. 2.4. Kompozycje barwne obrazu Landsat 8 (data rejestracji: 15.01.2020): a) RGB – kompozycja w barwach naturalnych, b) FCC (CIR) – kompozycja w barwach zafalszowanych



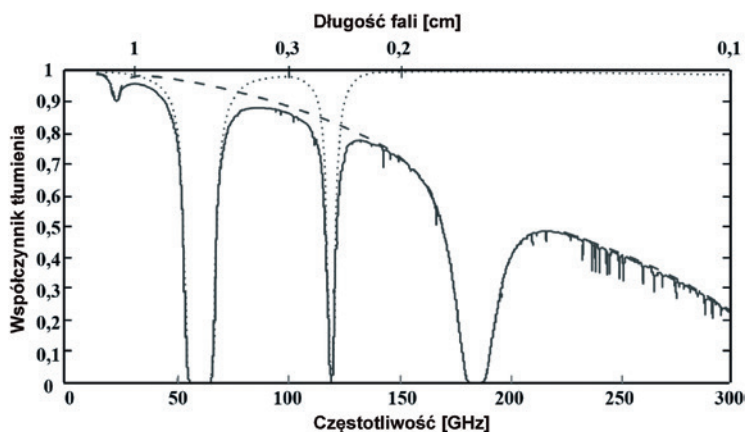
Ryc. 2.5. Obraz kanału termalnego (10) Landsat 8 (data rejestracji: 15.01.2020): a) obraz kanału termalnego (wartości DN) przed korekcją, b) histogram kanału termalnego przed korekcją, c) obraz kanału termalnego (wartości temperatur w °C) po korekcji, d) histogram kanału termalnego po korekcji

2.1.4. Przetwarzanie obrazów przedstawiających emitowane promieniowanie mikrofalowe

Radiometr mikrofalowy jest pasywnym sensorem, który mierzy PEM (promieniowanie elektromagnetyczne) emitowane z powierzchni Ziemi w dalszym zakresie spektralnym niż zakres TIR – od 0,1 mm do ponad 1 m. W przypadku mikrofal częściej podaje się zamiast długości fali (λ) częstotliwość (f), biorąc pod uwagę ich zależność od prędkości światła ($f = c/\lambda$, gdzie c – prędkość światła): 3000 GHz do 0,3 GHz. Atmosfera tłumia promieniowanie mikrofalowe przez absorpcję na cząsteczkach H_2O i O_2 . Tłumienie atmosfery dla długości fali większych niż 3 cm ($f < 10$ GHz) jest zaniedbywalnie małe. W praktyce, w tym zakresie, promieniowanie nie jest tłumione przez mgłę ani przez chmury (ryc. 2.6).

Rejestracja w zakresie mikrofal jest możliwa w dzień lub w nocy, zasadniczo podczas każdych warunków pogodowych, jeśli wykorzystuje się częstotliwości mniejsze niż 10–15 GHz. Natomiast długości fal mniejsze niż 1 mm ($f > 300$ GHz) są w całości tłumione przez atmosferę.

Wielkością wyznaczaną w oparciu o pomiar energii emitowanej w zakresie mikrofal jest, podobnie jak w przypadku zakresu TIR, temperatura radiacyjna. Z fizycznego punktu widzenia promieniowanie emitowane w zakresie mikrofal podlega oczywiście prawu Plancka. Postać prawa Plancka może być różna w zależności od tego, czy używa-



Ryc. 2.6. Tłumienie atmosfery w zakresie mikrofal (źródło: za Philipson i Philpot, 2012)

my długości fali, czy jej częstotliwości i jak definiujemy stałe. Równanie Plancka można napisać w bardziej ogólnej formie niż wzór 1.3 (rozdział 1) (Philipson i Philpot, 2012):

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} \quad (2.8)$$

gdzie:

- T – temperatura ciała doskonale czarnego,
- λ – długość fali,
- c – prędkość światła,
- h – stała Plancka,
- k – stała Stefana-Boltzmana.

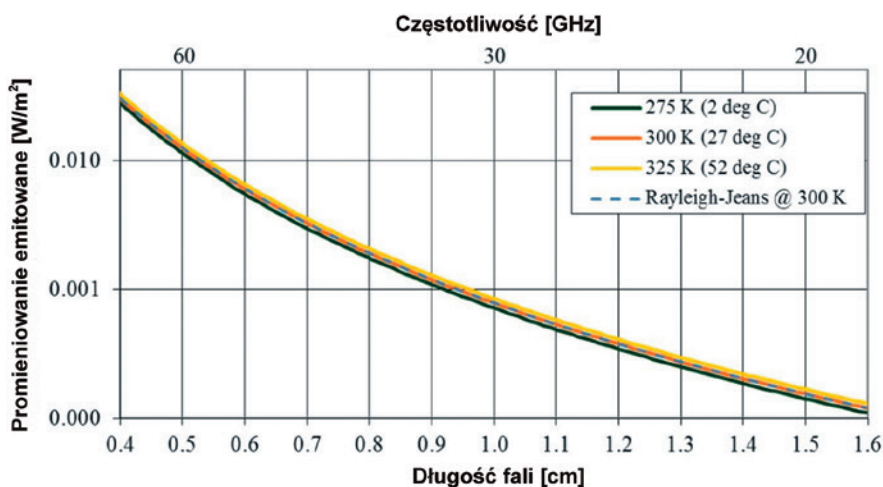
Po rozwinięciu w szereg Taylora i uproszczeniu, zakładając, że $\exp(hc/\lambda kT) - 1$ równa się w przybliżeniu $hc/\lambda kT$ dla mikrofal, powyższy wzór można zapisać w następującej postaci:

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi ck}{\lambda^4} \cdot T \quad (2.9)$$

Powyższa zależność jest bardzo istotna, ponieważ oznacza, że w zakresie mikrofal wielkość promieniowania zależy liniowo proporcjonalnie od temperatury, co odróżnia tę zależność od silnej zależności energii promieniowania od temperatury w czwartej potęgze w zakresie TIR.

Moc promieniowania emitowanego spada wraz z długością fali i w zakresie mikrofal jest znacznie mniejsza, niż w zakresie termalnym TIR. Przykładowy rozkład mocy promieniowania w zależności od długości fali dla ciał o różnej temperaturze zilustrowano na rycinie 2.7.

Niska moc promieniowania w zakresie mikrofal jest, między innymi, powodem niskiej rozdzielczości przestrzennej obrazów rejestrowanych w tym zakresie (tabela 2.4). Z drugiej strony rozdzielczość przestrzenna jest ograniczona przez parametry anteny odbiorczej.



Ryc. 2.7. Zależność mocy promieniowania od długości fali w zakresie mikrofal (źródło: Philipson i Philpot, 2012)

Tabela 2.4. Przykładowe wartości stałej dielektrycznej i współczynniki emisyjności (źródło: Philipson i Philpot, 2012)

Typ pokrycia terenu	ϵ'	ϵ
Woda	80	0,01
Lód	3–100	0,33–0,01
Roślinność	3	0,33
Sól	3–15	0,33–0,07
Śnieg	3,3	0,30
Pszenica	3,0–5,0	0,33–0,20
Powietrze	1	1

Temperatura radiacyjna dla ciała doskonale czarnego jest równa temperaturze kinetycznej w zakresie mikrofal i można ją obliczyć z przekształconego wzoru 2.9:

$$T_B = \frac{E_\lambda \lambda^4}{2\pi ck} \quad (2.10)$$

W zakresie mikrofal, tak jak i promieniowaniu termalnym, w celu określenia temperatury kinetycznej (T) rzeczywistego obiektu należy uwzględnić współczynnik emisyjności:

$$T = \frac{T_B}{\epsilon} \quad (2.11)$$

Innym zjawiskiem różniącym zakres MW i TIR jest zmienność współczynnika emisyjności różnych typów pokrycia terenu. Przykładowo może on zmieniać się od wartości 0,4 dla wody do 1,0 dla śniegu, podczas gdy w zakresie TIR wartość współczynnika emisyjności nie jest tak zróżnicowana, a dla wielu typów pokrycia wynosi powyżej 0,95.

Współczynnik emisyjności zależy od kilku czynników: stałej dielektrycznej materiału (przewodności właściwej, zawartości wody, zasolenia), kąta widzenia detektora, polaryzacji, szorstkości powierzchni. W zakresie mikrofal współczynnik emisyjności jest odwrotnie proporcjonalny do względnej przenikalności ϵ_r , która jest mierzona jako zdolność materiału do transmisji (przenikania) pola elektrycznego i składa się z części rzeczywistej (składowej rozpraszania) ϵ' i urojonej (składowej absorpcji) ϵ'' .

$$\epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (2.12)$$

Część rzeczywista nazywana jest stałą dielektryczną i określa zdolność materiału do przechowywania ładunku elektrycznego, a następnie do przesyłania tej energii (stosunek wartości indukcji pola elektrycznego do natężenia tego pola).

Ogólnie, im większa stała dielektryczna, tym wolniej energia mikrofalowa może być wypromieniowana, czyli tym mniejszy jest współczynnik emisyjności. Pozwala to zdefiniować współczynnik emisyjności następująco: $\epsilon = 1/\epsilon'$ jako odwrotność stałej dielektrycznej.

Ze względu na niską emisyjność wody jej temperatura radiacyjna jest niska. Podobnie zasolenie gleb powoduje wzrost stałej dielektrycznej i w związku z tym zmniejszenie współczynnika emisyjności.

Jeśli powierzchnia obiektu jest bardzo gładka (np. powierzchnia wody) może ona również odbijać promieniowanie np. nieba. Dla nieprzezroczystych powierzchni można podać ogólną zależność uwzględniającą, oprócz części związanej z emisyjnością, także składnik związany z odbiciem:

$$T_B = \epsilon T_s + \rho T_i(\theta_i) = \epsilon T_s + (1 - \epsilon) T_i(\theta_i) \quad (2.13)$$

gdzie:

- T_i – temperatura otoczenia,
- θ_i – zenitalny kąt widzenia sensora,
- ϵ – współczynnik emisyjności,
- ρ – współczynnik odbicia.

Warto ponadto zauważyć, że:

- temperatura radiacyjna powierzchni o wysokim współczynniku emisyjności (jak np. w TIR) jest w znikomym stopniu zaburzona przez inne źródła promieniowania, składnik $(1 - \epsilon)$ jest zanedbywalnie mały,
- w zakresie mikrofal występują przypadki, w których współczynnik emisyjności jest stosunkowo mały (0,6–0,9), co wymaga podczas przetwarzania danych uwzględnienia również części promieniowania odbitego,
- należy uwzględniać ponadto zależność współczynnika emisyjności od kąta rejestracji, polaryzacji, szorstkości powierzchni i od przestrzennego rozkładu emitowanego promieniowania (tzw. *Bidirectional Reflectance/Radiance Distribution Function*, BRDF).

Satelita ESA SMOS ma na pokładzie radiometr MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis), który umożliwia wygenerowanie dwóch produktów: mapy wilgotności gleb i zasolenia oceanów (tabela 2.5).

Tabela 2.5. MIRAS – SMOS (za: SMOS, 2020)

Charakterystyka	Wilgotność gleby (SM)	Zasolenie powierzchni morza (SSS)
Czas trwania misji	3–5 lat	3–5 lat
Częstotliwość	Pasma L	Pasma L+C
Polaryzacja	H+V	–
Rozdzielczość przestrzenna	10 km	20 km
Czas rewizyty	1–3 dni	1–10 dni
Dokładność radiometryczna	1 K	0,5 K
Czułość radiometryczna	1 K	0,25 K

2.1.5. Przetwarzanie danych radarowych

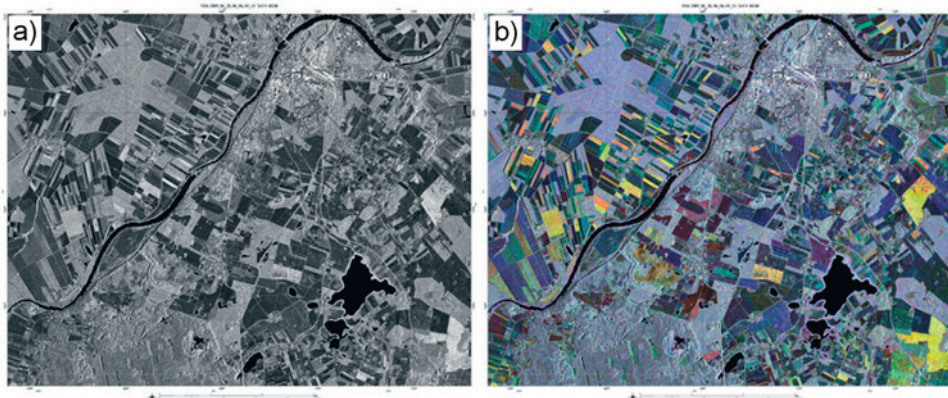
Marek Mróz, Magdalena Mleczko

Jak napisano w rozdziale 1.4.2.1., radar jest mikrofalowym urządzeniem obrazującym, ale w jego naturę wpisany jest również pomiar odległości do obserwowanych obiektów. Właśnie dlatego na podstawie obserwacji radarowych możliwe jest generowanie wielu produktów o znaczeniu geofizycznym – począwszy od map pokrycia terenu i uwilgotnienia gruntów opracowywanych na podstawie rejestrowanej amplitudy po zastosowania geodezyjne, geodynamiczne i inżynierskie wykorzystujące fazę odbieranego sygnału. Dlatego na rynku geoinformacji i geoinżynierii można spotkać oferty opracowań opartych na obrazowaniu radarowym „od rolnictwa do górnictwa”. Uwzględniając specyfikę obrazów radarowych można podzielić opracowania (produkty) na: a) produkty generowane na podstawie amplitudy obrazów SAR oraz b) produkty generowane na podstawie fazy lub różnicy faz kolejnych rejestracji. Produkty te możemy też podzielić na opracowania kartograficzne dwuwymiarowe (2D) oraz trójwymiarowe (3D), a dodając do tego aspekt monitorowania w czasie, uzyskujemy rzeczywistość 4D.

Podstawowymi produktami uzyskiwanymi w najprostszy sposób z obrazów amplitudowych (ryc. 2.8) są obrazy współczynnika wstecznego rozpraszania mikrofal znanego jako sigma zero (ang. *sigma naught*). Co przedstawia taki obraz-wskaźnik? Kontrastujące ze sobą obiekty, których wilgotność i/lub szorstkość jest odmienna, np. różne rodzaje szaty roślinnej, w tym upraw rolniczych, różne obiekty topograficzne, jak budynki czy elementy dużej infrastruktury charakteryzujące się bardzo silnym odbiciem mikrofal w stosunku do otaczających je tzw. obiektów rozciągniętych (pola, lasy), o niższym współczynniku sigma zero.

Radary obrazujące, czyli urządzenia zdalnie mierzące odległość, wkroczyły również w dziedzinę pomiarów geodezyjnych. Wytworzyły się takie technologie pomiarowe jak radarogrametria i inklinometria radarowa, a szczególnie satelitarna interferometria radarowa (InSAR).

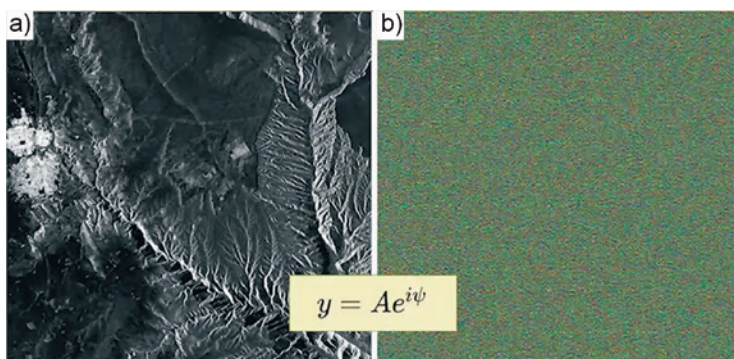
Dwie pierwsze metody są mało popularne i zostały tu wymienione tylko dla porządku, a zainteresowany Czytelnik może sięgnąć do szczegółowych opracowań. Formalizm matematyczny radarogrametrii jest już dobrze opisany, a sama metoda wykazuje



Ryc. 2.8. a) pojedynczy obraz amplitudowy TerraSAR-X; b) kompozycja RGB trzech obrazów (obszar testowy Malbork, opracowanie własne, źródło obrazów: DLR, 2008)

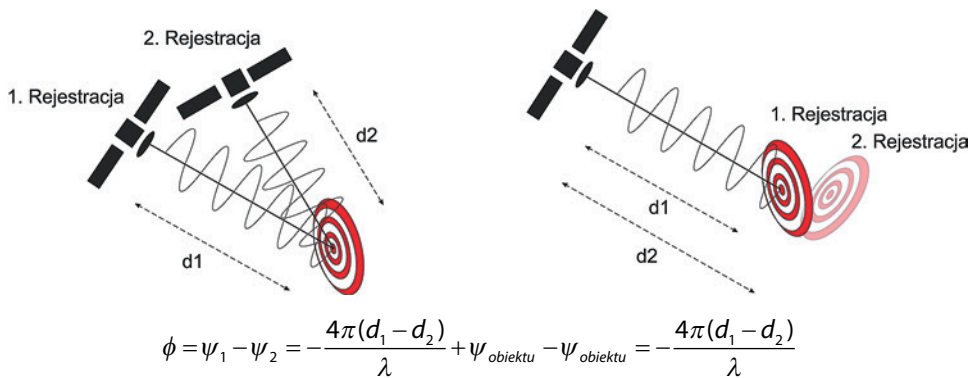
duże analogie do stereoskopowego widzenia w fotogrametrii (Henderson i Lewis, 1998; Richards, 2009). Niestety techniki stereoskopii nie mogą być łatwo transponowane w świat radaru, m.in. z powodu ukośnej geometrii obrazowania, wrażliwości mikrofal na orientację przestrzenną powierzchni odbijających i wszechobecne zjawisko plamkowania/cętkowania zakłócające proces tzw. matchingu, czyli automatycznego dopasowania obrazów. Inklinometria radarowa jest techniką tworzenia modelu wysokości terenu na podstawie jednego obrazu, a nie pary obrazów jak w przypadku dwóch pozostałych metod. Można powiedzieć, że „inklinometria jest jakościową metodą rekonstrukcji rzeźby terenu” (Maître, 2008), oparta jest bowiem na zasadzie „shape from shading” czyli „kształt na podstawie cienia”. Sprawdziła się dość dobrze w krajobrazach pozaziemskich, skalistych, np. w misji sondy Magellan badającej krajobrazy Wenus. W zastosowaniach terestrialnych nie odgrywa większej roli.

Satelitarna interferometria radarowa jest techniką umożliwiającą zarówno budowanie numerycznego modelu terenu (NMT), jak i pomiary jego przemieszczeń wraz z infrastrukturą na nim posadowioną (Hanssen, 2001; DeZan, 2012; Podest, 2018b). W obu przypadkach wykorzystujemy precyzyjnie zmierzoną odległość radar – obiekt z dokładnością ułamka długości fali, czyli fazę interferometryczną (ryc. 2.9).



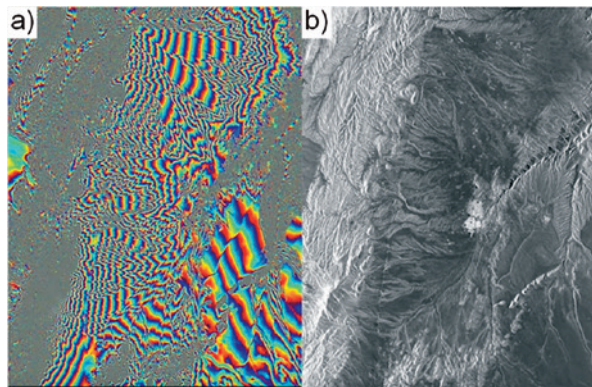
Ryc. 2.9. a) obraz amplitudy; b) obraz fazy (wzór na obrazie przedstawia zapis obrazu radarowego w postaci zespolonej: A – amplituda, ψ – faza) (źródło: Grunfeld Brook, 2019)

Faza powracającej fali zależy głównie od odległości radar – obiekt i w mniejszym stopniu od właściwości samego obiektu. Do budowania modelu terenu 3D, jak i wyznaczania niewielkich deformacji, niezbędny jest interferogram, który przedstawia różnice faz dwóch obrazów zespolonych. Aby taki interferogram uzyskać, niezbędne są dwa obrazy tego samego terenu wykonane w jednej z dwóch konfiguracji. Po lewej stronie ryciny 2.10 przedstawiona jest konfiguracja zwykle stosowana do budowy NMT, w której dwie kolejne rejestracje satelitarne są wykonywane z dwóch różnych punktów oddalonych od siebie o tzw. bazę interferometryczną. Po prawej stronie przedstawiona jest idealna konfiguracja do opracowania map deformacji, w której radar obrazuje z tego samego punktu, a zmiana odległości w czasie powodowana jest jedynie przemieszczeniem obiektu (np. osiadaniem terenu), przy założeniu niezmiennych wartości ψ obiektu.

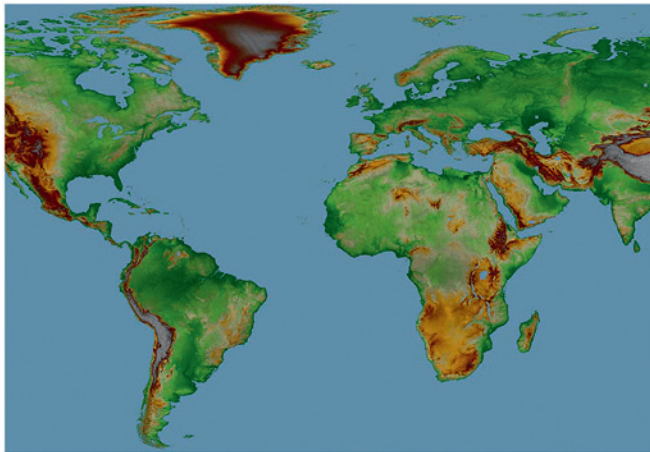


Ryc. 2.10. Faza interferometryczna ψ jest różnicą faz tego samego piksela na dwóch obrazach (źródło: za Grunfeld Brook, 2019)

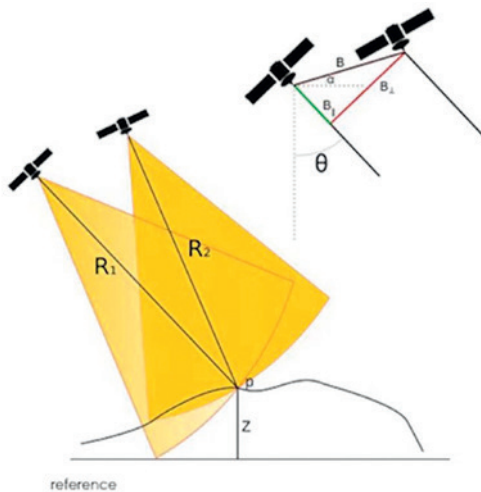
Rycina 2.11 przedstawia po lewej stronie interferogram uzyskany w konfiguracji „do budowy NMT”, na którym barwne prążki interferometryczne powstają jako „odzwierciedlenie topografii”, a po prawej stronie – odpowiadający mu obraz amplitudowy. Faza interferogramu po jej rozwinięciu i odpowiednich korekcjach pozwala na uzyskanie pełnego modelu topografii (NMT).



Ryc. 2.11. Interferogram (a) i odpowiadający mu obraz amplitudowy (b) (źródło: Grunfeld Brook, 2019)



Ryc. 2.12. Wizualizacja Globalnego Numerycznego Modelu Terenu wygenerowanego metodami interferometrii na podstawie obrazów TerraSAR-X/TanDEM-X w siatce 12×12 m o dokładności względnej 2 m i bezwzględnej 4 m (źródło: Airbus Defence and Space, 2019)



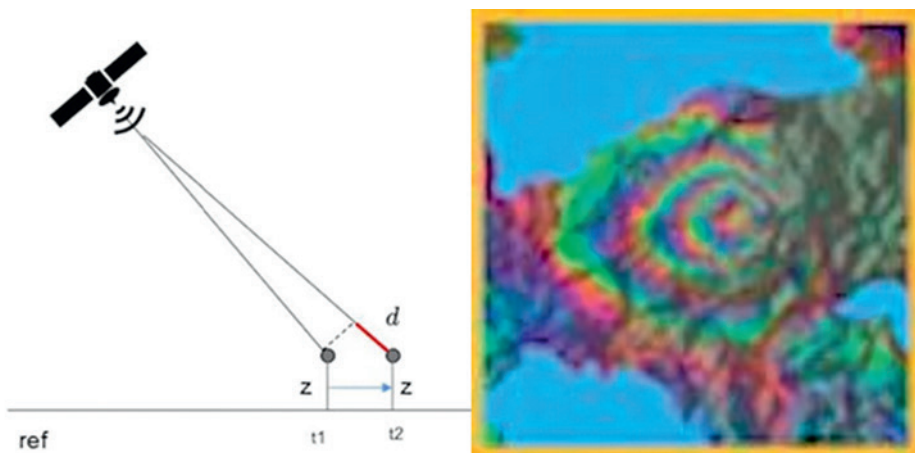
Ryc. 2.13. Wyznaczanie wysokości punktu „z” z bazy interferometrycznej (źródło: Grunfeld Brook, 2019)

Numeryczny model terenu budowany metodami interferometrii (ryc. 2.12) wymaga odpowiednio długiej bazy geometrycznej (ryc. 2.13) i jak najkrótszego interwału obrazowania w czasie, ponieważ konieczne jest zachowanie stabilności fazy (koherencji), która maleje, gdy obiekt zmienia swoje właściwości dielektryczne. Dokładność wysokościowa takiego modelu wynosi kilka metrów. Zależności matematyczne pozwalające na wyznaczenie wysokości punktu przedstawia wzór:

$$\phi = \frac{-4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin\theta} Z + \phi_{ref} \tag{2.14}$$

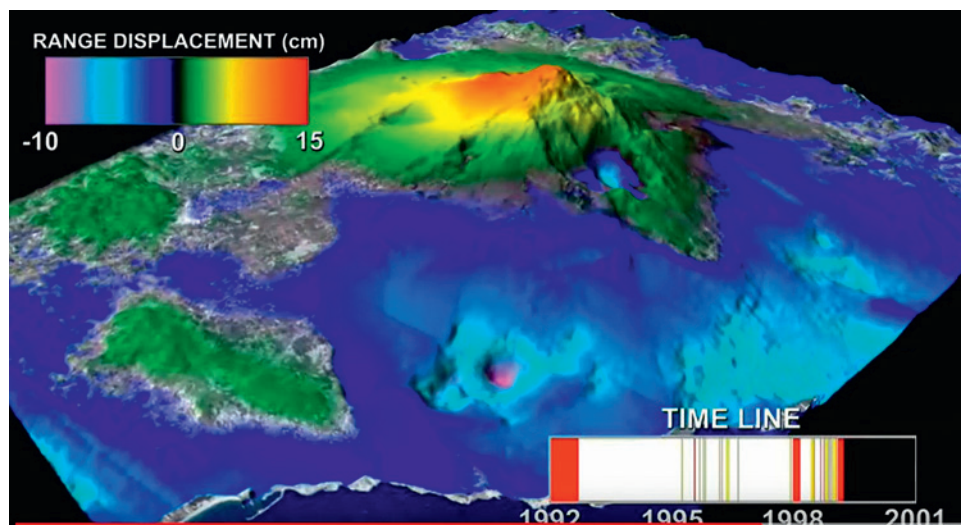
Wyznaczanie deformacji terenu opiera się na założeniu, że kolejne obserwacje wykonuje się dokładnie z tego samego punktu, co jest niemożliwe do zrealizowania

w praktyce (ryc. 2.14, 2.15). Dlatego w technice interferometrii różnicowej (ang. *Differential Interferometric SAR*, DInSAR) niezbędne jest dysponowanie numerycznym modelem terenu, aby wyeliminować komponent topograficzny wpływający na fazę (DeZan 2012, Podest 2018b). Deformacja wyznaczona z jednego interferogramu różnicowego jest deformacją wyznaczaną w kierunku obrazowania (ang. *Line of Sight*, LoS). Aby wyznaczyć składowe pionowe i poziome deformacji, niezbędne są interferogramy generowane z orbity zstępującej i wstępującej.



Ryc. 2.14. Przykład interferometrii różnicowej (DInSAR) – interferogram wulkanu o deformacji powierzchni rzędu 30 cm (LoS) (źródło: za Grunfeld Brook, 2019)

$$\phi = \frac{-4\pi}{\lambda} d + \phi_{ref} \quad (2.15)$$



Ryc. 2.15. Interferometrycznie wyznaczone deformacje wulkanu Etna (źródło: YouTube, 2020)

Warto zapamiętać, że czułość fazy interferometrycznej na zmiany wysokości topograficznych jest niewielka i wynosi na ogół kilka, kilkanaście metrów. Zależy ona przy tym od długości bazy interferometru. Z drugiej strony, czułość fazy na wolnozmiennie deformacje terenu rzędu centymetrów i milimetrów na rok jest o wiele większa i niezależna od bazy. Dokładności różnicowej interferometrii SAR w badaniach deformacji i przemieszczeń terenu są porównywalne z dokładnościami precyzyjnych metod GNSS i niwelacji geodezyjnej.

Zastosowanie radarów pełnopolarymetrycznych, których ideę zasygnalizowano w rozdziale 1.4.2.1, ukształtowało specjalność polarymetria radarowa (ang. *Polarimetric SAR*, PolSAR). W dyskusjach naukowych przeważa pogląd, że najważniejszym zastosowaniem satelitarnej polarymetrii radarowej jest klasyfikacja pokrycia i użytkowania terenu. Polarymetria pozwala na rozróżnianie obiektów powierzchniowych na podstawie odmiennych mechanizmów rozpraszania mikrofal (powierzchniowe, objętościowe, podwójne) identyfikowanych na podstawie dekompozycji macierzy rozpraszania. Obrazowanie pełnopolarymetryczne przewyższa np. dokładnością klasyfikacji niektórych rodzajów upraw rolniczych – obrazowanie w jednej lub dwu polaryzacjach. Przykładem satelitarnego radaru polarymetrycznego jest Radarsat-2.

Dość dobre wyniki klasyfikacji drzewostanu pod względem biomasy uzyskuje się na podstawie obrazów amplitudowych w paśmie L i P. Klasyfikacja oparta na danych polarymetrycznych (PolSAR) (Henderson i Lewis 1998) w paśmie P wykazała ich dobrą korelację z klasami wieku drzewostanu jednorodnego. W drzewostanach zróżnicowanych wg. rodzajów, wysokości i struktury gatunkowej polarymetria traci swoją skuteczność klasyfikacyjną. Połączenie informacji interferometrycznej z polarymetryczną pozwala na oszacowanie wysokości drzewostanu, a to już przekłada się na poprawę jakości klasyfikacji drzewostanów i ich biomasy. To połączenie technik polarymetrii i interferometrii nosi nazwę interferometrii polarymetrycznej, w skrócie PolinSAR, i jest zaawansowaną metodą badania struktury, biomasy i tempa wzrostu szaty roślinnej.

Możliwości trójwymiarowych pomiarów powierzchni Ziemi, dokonywane metodami fotogrametrii lotniczej i satelitarnej w zakresie promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni, zostały rozszerzone na zakres mikrofalowy, dając zupełnie nowe narzędzia monitorowania środowiska geograficznego i przyrodniczego.

2.2. Analiza obrazów teledetekcyjnych

Beata Hejmanowska

W niniejszym rozdziale przedstawiono zasady tworzenia kompozycji barwnych na bazie obrazów wielospektralnych. Opisano także w skrócie proces fotointerpretacji obrazów teledetekcyjnych, czyli wykrycia i identyfikacji różnych typów pokrycia terenu na różnych kompozycjach. Szczególnie fotointerpretacja kompozycji w tzw. barwach zafałszowanych, czyli kolorach odmiennych w stosunku do tych, do których człowiek jest przyzwyczajony, może stanowić pewien problem dla osób mniej zapoznanych z analizą obrazów. W tym rozdziale zestawiono również wskaźniki teledetekcyjne obliczane w oparciu o wartości DN obrazów wielospektralnych, wykorzystywane często w teledetekcji na potrzeby pozyskiwania informacji o różnych typach pokrycia terenu.

2.2.1. Tworzenie kompozycji barwnych obrazów i fotointerpretacja

Obrazy kolorowe (czyli barwne) niosą dla obserwatora znacznie więcej informacji niż obrazy panchromatyczne (PAN), potocznie nazywane czarno-białymi (albo w odcieniach szarości; ang. *grey-scale*). Obraz panchromatyczny rejestrowany jest tylko w jednym kanale spektralnym. Szerokość zakresu fal może być w zasadzie różna, więc może to być tradycyjnie cały zakres światła widzialnego (ang. *visible*, VIS), lub ewentualnie poszerzony o fragment bliskiej podczerwieni (ang. *Near InfraRed*, NIR), tak jak ma to miejsce w przypadku obrazów PAN Landsat (ryc. 2.16). Z drugiej strony obraz PAN może być po prostu jakimś wybranym fragmentem PEM (promieniowania elektromagnetycznego) zarejestrowanym w jednym kanale spektralnym. Wizualizacja obrazu PAN może być w zasadzie umowna. Obraz może być prezentowany w skali szarości, w skali różnicowania intensywności wybranego koloru lub w skali barwnej (np. gradient różnych kolorów).

Obrazy wielospektralne (ang. *MultiSpectral*, MS) natomiast rejestrowane są w różnych zakresach spektralnych i składają się z kilku, kilkunastu czy nawet kilkuset pojedynczych obrazów (zarejestrowanych pasm promieniowania). Obrazy MS można oglądać pojedynczo lub w postaci kompozycji barwnych, przy czym zazwyczaj złożonych z 3 podstawowych barw: niebieskiej (ang. *blue*, B), zielonej (ang. *green*, G) i czerwonej (ang. *red*, R). Obrazy zarejestrowane w zakresie VIS w podstawowych kanałach, w programach do wizualizacji i analizy, mogą być składane do postaci barwnej, czyli tak jak widzi to człowiek. W takiej sytuacji kanał niebieski wizualizowany jest z wykorzystaniem koloru niebieskiego (B), kanał zielony w kolorze zielonym (G), a kanał czerwony w czerwonym (R). Uzyskujemy wtedy tzw. barwną kompozycję RGB (ryc. 2.17). Oprogramowanie pozwala w dowolny sposób generować kompozycje barwne, tzn. zamienić np. kolejności poszczególnych kanałów. Na przykład można zamienić kanał niebieski z czerwonym, tzn. kanał niebieski wyświetlić w kolorze czerwonym, a kanał czerwony w kolorze niebieskim, pozostawiając kolor zielony dla wizualizacji kanału zielonego (ryc. 2.18).

Tak generowane kompozycje barwne będą jednak czytelne, ale nie będą one odpowiadać rzeczywistym kolorom. W takiej sytuacji nazywamy je kompozycjami w barwach zafałszowanych (ang. *false colors*; ryc. 2.19). O ile kanały RGB składamy zwykle w kolorach naturalnych, to jeśli użyjemy zakresu fal, których oko ludzkie nie widzi, to kompozycja taka będzie zawsze fałszywa, czyli powstanie w tzw. zafałszowanych kolorach, które nie odpowiadają tym w rzeczywistości. Kompozycją najbardziej rozpoznawaną w teledetekcji jest tzw. FCC (*False Color Composite*), w której wykorzystuje się kanał bardzo bliskiej podczerwieni (NIR). Często kompozycja ta znana jest pod synonimem CIR (*Color InfraRed*).

W związku z tym, że tworząc kompozycję barwną, możemy użyć tylko trzech kolorów: RGB, to kanał bliskiej podczerwieni musimy zwizualizować za pomocą jednego z tych trzech kolorów. Tradycyjnie w teledetekcji przyjęło się, że będzie to kolor czerwony. Tym samym trzeba było zrezygnować z jakiegoś kanału widzialnego, więc w tym przypadku zrezygnowano z używania kanału niebieskiego. W kompozycji FCC (inaczej CIR) następuje więc swoiste przesunięcie o jeden kolor, tzn. kanał zielony jest wizualizowany w kolorze niebieskim (B), kanał czerwony w zielonym (G), a bliskiej podczerwieni w czerwonym (R) (ryc. 2.20). Przykładową kompozycję utworzoną wyłącznie z kanałów bardzo bliskiej podczerwieni (NIR) oraz dalszych zakresów tzw. SWIR (*Short Wave Infra-Red*) zaprezentowano na rycinie 2.21.

Obraz teledetekcyjny jest macierzą pikseli o określonej liczbie kolumn i wierszy, w których zapisane są wartości liczbowe (DN) zależne od ilości padającego na detektor promieniowania, w przypadku technik pasywnych obejmującego odbite promieniowanie słoneczne lub własne promieniowanie cieplne obiektu. W zakresie optycznym (VNIR i SWIR) jest to odbite promieniowanie słoneczne, a w zakresie TIR i MW w dużej mierze emitowane promieniowanie własne Ziemi. W przypadku technik aktywnych (LiDAR, radar), tworzenie obrazu jest bardziej skomplikowane niż w przypadku technik pasywnych, ze względu na zmienną geometrię nadajnik–obiekt–sensor. Sygnał radarowy i lidarowy po przetworzeniu jest również macierzą pikseli, przy czym DN zależy od ilości promieniowania laserowego lub radarowego (w sensie długości fali nazywanego też mikrofalowym) odbitego od obiektu.

Obraz, kompozycja RGB przedstawia powierzchnię Ziemi w sposób, w jaki widzi ją detektor na pokładzie satelity z odległości np. 700 km. Na obrazie znajduje się bardzo dużo informacji, których jednak najczęściej nie można wykorzystać wprost, w przeciwieństwie do informacji przedstawionych na mapie. Na mapie znajdują się określone obiekty, które możemy zidentyfikować jednoznacznie, posługując się legendą. Na obrazie satelitarnym zapisana jest natomiast ciągła informacja o rejestrowanej powierzchni, która wymaga interpretacji tak, by mogła być użyteczna. Interpretacja obrazu polega na detekcji i rozpoznaniu (identyfikacji) obiektów na obrazie w celu wytworzenia czytelnej informacji.

Patrząc na otaczający świat, dokonujemy automatycznie interpretacji tego, co widzimy i dzięki zgromadzonej wcześniej wiedzy dokonujemy identyfikacji, czyli rozpoznania obiektów oraz określamy kontekst całej informacji. Im dalej obiekty się od nas znajdują, tym większe bywają problemy z ich poprawnym rozpoznaniem. Tym samym obiekty stają się coraz mniejsze i maleje możliwość nie tylko ich rozpoznania, ale także rozróżnienia. W przypadku obrazów teledetekcyjnych jest to najczęściej związane z rozdzielczością przestrzenną sensora (GSD). Im mniejsza jest rozdzielczość całego systemu, tym trudniej jest rozpoznać obiekty.

Zwykle proces rozpoczyna się od wizualnej interpretacji obrazu, która jest zresztą zwykle najlepsza i może służyć za referencję. Wizualną interpretację obrazu nazywa się fotointerpretacją, zgodnie z którą definiuje się tzw. cechy fotointerpretacyjne obrazu i obiektu. Cechami fotointerpretacyjnymi obrazu są:

- jasność,
- kontrast,
- rozdzielczość przestrzenna,
- efekt stereoskopowy.

Jasność i kontrast charakteryzują jakość obrazu. Parametry te powinny być optymalnie dobrane, żeby na obrazie wszystkie obiekty były odpowiednio widoczne. Obrazy satelitarne są rejestrowane z dużą rozdzielczością radiometryczną i najczęściej w wersji nieprzetworzonej są mało kontrastowe, co można łatwo zobaczyć w różnych portalach internetowych np. Sentinel Playground Hub (Sentinel Playground, 2020), szczególnie na obrazach pozyskanych w okresie zimowym. Wymagane jest w związku z tym wstępne przetwarzanie obrazu, czyli tzw. rozciągnięcie histogramu skutkujące zwiększeniem kontrastu. Rozdzielczość przestrzenna jest z kolei cechą charakterystyczną danego sensora i obrazu; więcej na ten temat można znaleźć w rozdziale 2.3.1.

Ostatnią z cech fotointerpretacyjnych obrazu jest efekt stereoskopowy. Jeśli mamy możliwość skorzystania z dwóch obrazów tego samego terenu, ale zarejestrowanych w trybie stereo (np. z sąsiednich orbit lub z tej samej przy różnym kącie *Off-nadir*), to część wspólną można oglądać przestrzennie (3D), co często znacznie zwiększa możliwości interpretacyjne obrazu.

Podstawowymi cechami fotointerpretacyjnymi obiektów zarejestrowanych na obrazach teledetekcyjnych są:

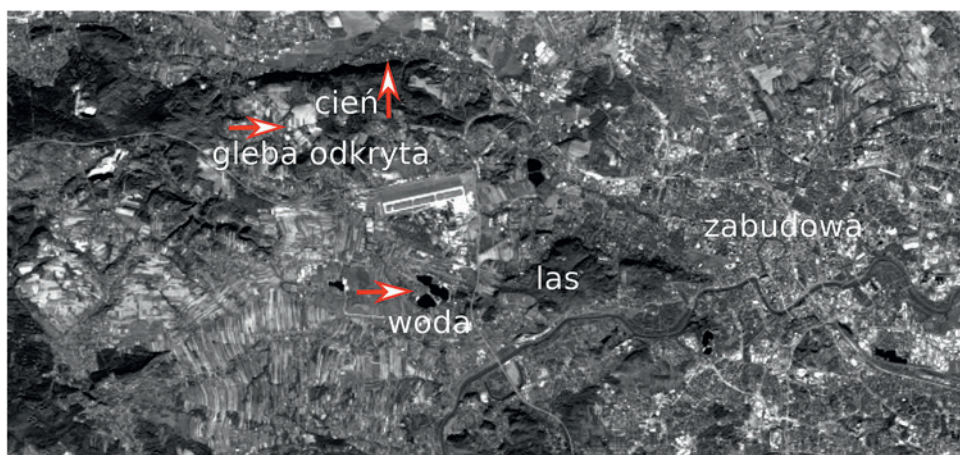
- ton, kolor,
- kształt,
- rozmiar,
- tekstura,
- struktura,
- cień,
- asocjacje.

Ton (w przypadku obrazów panchromatycznych), kolor (w przypadku kompozycji barwnych), a także kształt czy rozmiar nie wymagają chyba rozwinięcia w tym miejscu. Teksturą obiektu nazywamy jednorodność powierzchni obiektu, a strukturą – rozmieszczenie obiektów w przestrzeni. Cechy te zostaną szerzej omówione w dalszej części. Ostatnia z przedstawionych cech – tzw. asocjacje oznacza skojarzenie logiczne, jakie ma interpreter, identyfikując obiekt i próbując, np. rozpoznać jego funkcję lub kontekst jakiegoś zjawiska (np. cienie po północnej stronie wysokich obiektów).

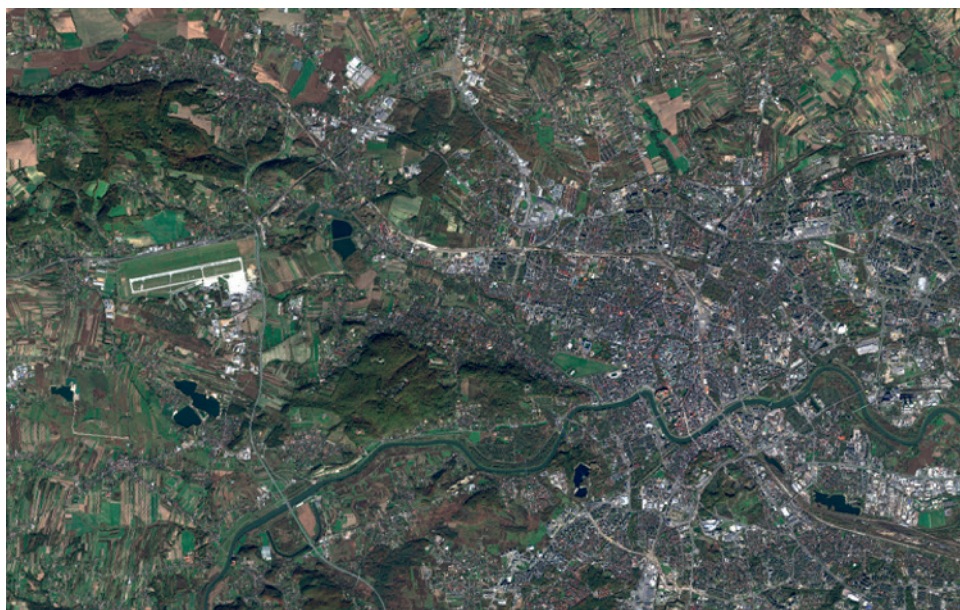
Wizualna interpretacja obrazów satelitarnych wymaga sporych zasobów zgromadzonej wiedzy i jest pewnego rodzaju sztuką. Obraz panchromatyczny wizualizujemy zwykle w skali szarości (ryc. 2.16). Woda jest czarna i możemy mieć czasem problem z odróżnieniem jej od cienia, roślinność jest w kolorze szarym, zabudowa w ciemnoszarym, a odkryta gleba w kolorze jasnoszarym.

Odczytanie treści obrazu odbywa się najczęściej na kompozycjach barwnych, w barwach naturalnych, ale też zafałszowanych (inaczej umownych). Im bardziej doświadczony interpreter, tym więcej informacji potrafi odczytać z różnych kompozycji obrazów. Prawidłowo utworzona kompozycja w barwach naturalnych (ryc. 2.17) to kompozycja barwna, w której kanał niebieski został przedstawiony w kolorze niebieskim, kanał zielony w kolorze zielonym, a kanał czerwony w kolorze czerwonym. Interpretacja tego obrazu jest bardziej intuicyjna niż obrazu PAN, ponieważ jesteśmy przyzwyczajeni do takiej wizualizacji. Dla porównania na rycinach 2.18 i 2.19 przedstawiono nieprawidłowo utworzoną kompozycję barwną, w której zamieniono miejscami kanał niebieski i czerwony, tzn. kanał niebieski jest przedstawiony w kolorze czerwonym, a kanał czerwony w kolorze niebieskim (jest to bardzo częsta pomyłka podczas wizualizacji obrazów wielospektralnych, kiedy użytkownik przypisuje kolory do kanałów, ponieważ na pierwszy rzut oka obie kompozycje wyglądają podobnie). Przykładowe kompozycje w barwach zafałszowanych znajdują się na rycinach 2.20 i 2.21.

W nauce fotointerpretacji obrazów satelitarnych bardzo pomocne są tzw. klucze interpretacyjne, które składają się z fragmentu obrazu i cech fotointerpretacyjnych obiektu (tabela 2.6).



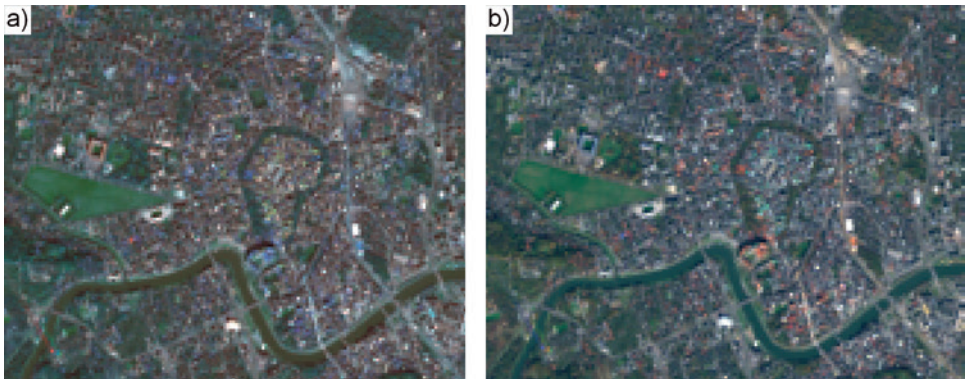
Ryc. 2.16. Obraz panchromatyczny (PAN) zarejestrowany przez Landsat 8 (data rejestracji: 27.10.2019) z zaznaczonymi podstawowymi typami pokrycia terenu



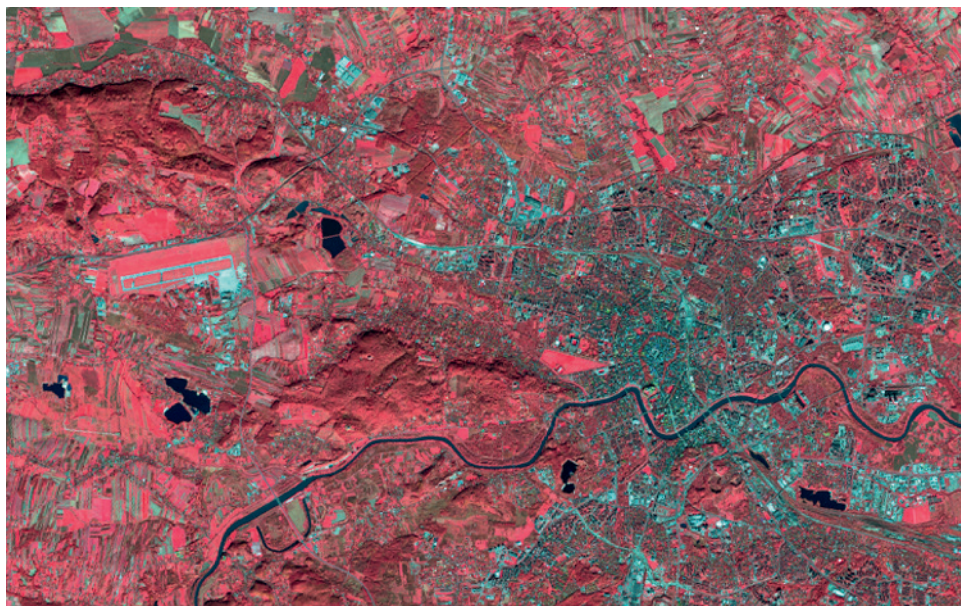
Ryc. 2.17. Prawidłowa kompozycja w barwach naturalnych, Landsat 8 (RGB 432)



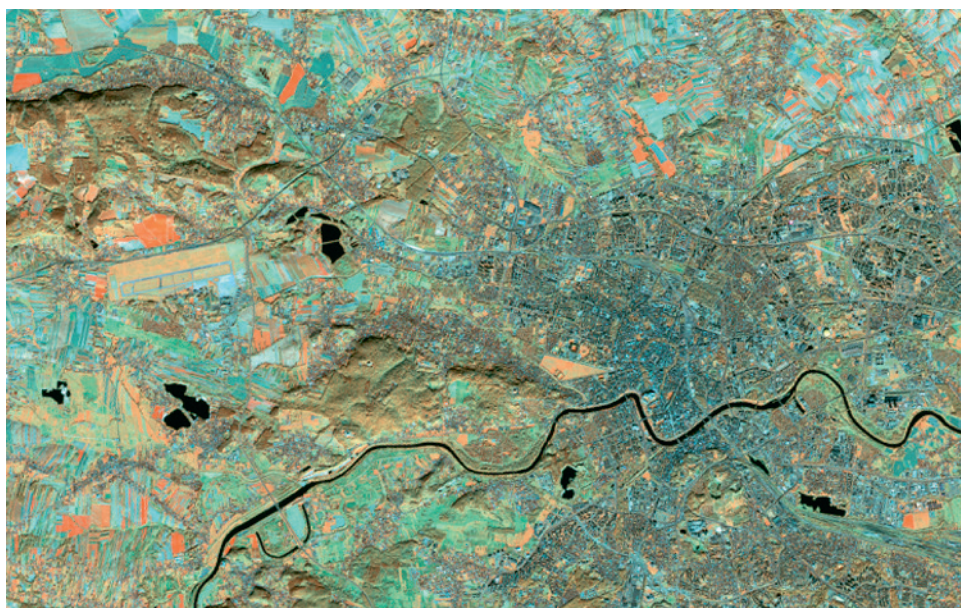
Ryc. 2.18. Błędnie utworzona kompozycja w barwach naturalnych Landsat 8 (RGB 234)



Ryc. 2.19. Porównanie błędnie utworzonej kompozycji barwnej (a) z prawidłowo utworzoną kompozycją w barwach naturalnych (b); prawidłowo przedstawione czerwone dachy (b) są zwizualizowane niepoprawnie w kolorze niebieskim (a)



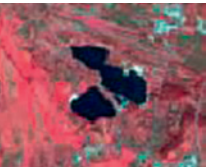
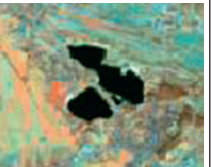
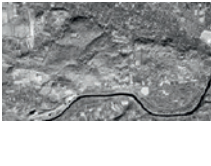








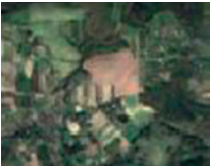








Ryc. 2.20. Kompozycja FCC Landsat 8 (RGB 543): kolory jasnoczerwone oznaczają obszary o dużej biomacie (użytki rolnicze lub lasy), ciemnoczerwone – lasy iglaste, brunatne / szarozielone – obszary pozbawione roślinności, zabudowa; ciemnoniebieskie, czarne – wody



Ryc. 2.21. Kompozycja utworzona z kanałów podczerwonych Landsat 8 (RGB 567): w kolorze pomarańczowym – użytki zielone, oliwkowym – lasy, niebiesko-zielonym – gleby odkryte, niebiesko-szarym – zabudowa, czarnym – woda

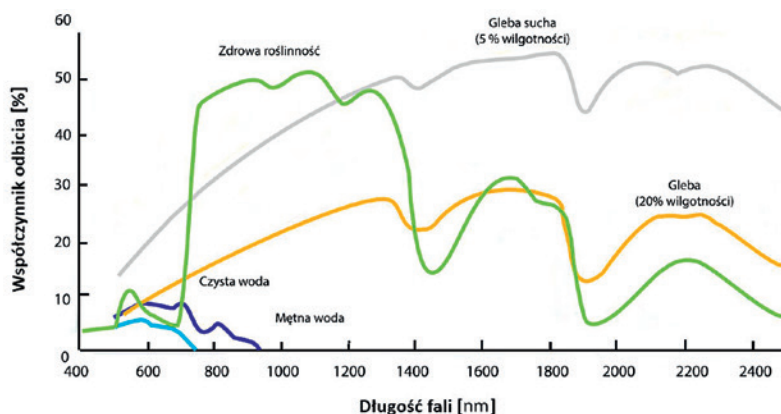
Tabela 2.6. Przykładowy klucz fotointerpretacyjny (opis: ton (kolor), tekstura)

	PAN Landsat 8	RGB Landsat 8 (RGB 432)	FCC Landsat 8 (RGB 543)	NIR, SWIR1, SWIR2 Landsat 8 (RGB 567)
Woda	 czarny, jednorodna	 niebieski, jednorodna	 czarny, jednorodna	 czarny, jednorodna
Las	 ciemny, barankowa	 ciemnozielony, barankowa	 ciemnoczerwony, barankowa	 ciemnozielony, barankowa
Zabudowa	 szary, niejednorodna	 fioletowy, niejednorodna	 niebiesko-zielony, niejednorodna	 niebieski, niejednorodna
Gleba odkryta	 jasnoszary, plamista	 jasnobrązowy, plamista	 jasnozielony, plamista	 jasnoniebieski, plamista
Roślinność trawiasta	 ciemnoszary, plamista	 zielony, plamista	 jasnoczerwony, plamista	 pomarańczowy, plamista

2.2.2. Krzywe spektralne, wskaźniki teledetekcyjne

Cezary Kaźmierowski, Beata Hejmanowska

Krzywe spektralne przedstawiają w sposób graficzny zależność współczynnika odbicia lub emisyjności od długości fali. Przykładowe krzywe spektralne przedstawiono w rozdziale 2.2.4. Spektralne zróżnicowanie obserwowanych powierzchni wynika z selektywnego odbicia promieniowania elektromagnetycznego, które do nich dociera. W przypadku analiz teledetekcyjnych gleb istotne jest ich uziarnienie, skład mineralogiczny, skład chemiczny, zawartość węgla organicznego czy nawet stopień uwilgotnienia. W przypadku powierzchni pokrytych żywą, zdrową roślinnością istotny wpływ na charakterystyki odbicia mają: gatunek rośliny, struktura komórkowa aparatu asymilacyjnego, wielkość biomasy, faza rozwojowa (fenologiczna), zawartość chlorofilu, skład chemiczny, stan nawodnienia, stopień pokrycia gleby, wartość LAI (Leaf Area Index) – wskaźnik powierzchni liści, czy nawet zróżnicowanie ekotypowe. Przykłady krzywych odbicia spektralnego różnych powierzchni przedstawiono poniżej (ryc. 2.22).



Ryc. 2.22. Krzywe spektralne różnych typów pokrycia terenu (źródło: Aggarwal, 2004)

Analizując krzywe spektralne poszczególnych obiektów, można zidentyfikować charakterystyczne zmiany w ich przebiegu, np. gwałtowny wzrost współczynnika odbicia dla zdrowej zielonej roślinności w zakresie ok. 700 nm. Takie charakterystyczne miejsca na krzywych spektrostrefowych pozwalają na opracowanie pewnych wskaźników, często nazywanych indeksami, które mogą być wykorzystywane w interpretacji obrazów. W dalszej części podręcznika pojawiają się różne wskaźniki przeznaczone dla specjalistycznych zastosowań. W niniejszym rozdziale omówiono tylko wybrane podstawowe wskaźniki.

W teledetekcji, szeroko stosowane wskaźniki spektralne obliczane są na podstawie wartości współczynnika odbicia dla zdefiniowanych przedziałów długości promieniowania elektromagnetycznego. Nazywamy je wskaźnikami wąskopasmowymi – w przypadku danych hiperspektralnych bądź szerokopasmowymi – w przypadku rejestrowania obrazu przez sensory wielospektralne z niskiego pułapu, pułapu lotniczego lub satelitarnego.

Wskaźniki spektralne stosowane są przede wszystkim w celu znormalizowania wpływu czynników zewnętrznych związanych ze zmiennymi warunkami oświetlenia i kątami obserwacji oraz niestabilnymi warunkami atmosferycznymi. Do tego dochodzi wpływ czynników wewnętrznych związanych z wilgotnością, zmiennością tła glebowego, stopniem zakrycia gleby, zróżnicowaniem pokrywy glebowej, udziałem roślinności niefotosyntetyzującej, nachyleniem wystawy stoku oraz odniesienia do specyficznych i mierzalnych parametrów gleb lub roślinności (np. wilgotności gleby, biomasy, LAI) oraz maksymalizowania czułości na zmienność tych parametrów w celu efektywnej kalibracji i zwiększenia zakresu warunków środowiskowych (Jensen, 2000).

Obrazy teledetekcyjne są wykorzystywane w monitoringu typów pokrycia/użytkowania terenu. Pokryciem terenu nazywa się naturalny stan powierzchni ziemi w odróżnieniu od typu użytkowania, rozumianego jako obszar powierzchni ziemi przekształcony/użytkowany przez człowieka. Taką informację przechowuje się na mapach użytkowania/pokrycia terenu (ang. *Land Use Land Cover*, LULC). Poziom szczegółowości map LULC zależy głównie od rozdzielczości przestrzennej i spektralnej obrazów teledetekcyjnych. Podstawowymi typami użytkowania/pokrycia terenu są:

- roślinność,
- zabudowa,
- gleby, grunty, skały odkryte,
- wody

i do ich badania opracowano różne wskaźniki.

Wskaźniki są obliczane na podstawie odpowiedzi spektralnej obrazów wielospektralnych. W wyniku korekcji radiometrycznej wartości DN w poszczególnych kanałach są przeliczane na wartości współczynnika odbicia (0–1). W poniższych wzorach oznaczenia literowe oznaczają wartość współczynnika odbicia w danym kanale (R – wartość współczynnika odbicia w kanale czerwonym, NIR – wartość współczynnika odbicia w kanale rejestrującym promieniowanie w bliskiej podczerwieni, itd.). Poniższe wzory mają charakter ogólny, nie są przypisane obrazom z konkretnych satelitów. Praktyczne obliczenie danego współczynnika wymaga każdorazowo podstawienia odpowiedniego dla danego satelity kanału rejestrującego wymagany zakres długości fali. Najczęściej są to proste formuły algebraiczne wypracowane przez lata badań naukowych, pozwalające uwypuklić jakiś typ pokrycia terenu, np. roślinnością i analizować jej kondycję. Najbardziej znany dla badań roślinności jest wskaźnik roślinności (ang. *Vegetation Index*, VI; wzór 2.16) oraz znormalizowany wskaźnik roślinności (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI; wzór 2.17).

$$VI = \frac{NIR}{R} \quad (2.16)$$

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2.17)$$

Dla obszarów zainwestowanych znany jest tzw. indeks zabudowy (ang. *Urban Index*, UI; wzór 2.18) oraz znormalizowany indeks zabudowy (ang. *Normalized Difference Built-up Index*, NDBI; wzór 2.19):

$$UI = \frac{SWIR2 - NIR}{SWIR2 + NIR} + 1 \quad (2.18)$$

$$NDBI = \frac{SWIR2 - NIR}{SWIR2 + NIR} \quad (2.19)$$

W celu wydzielenia gleb, gruntów odkrytych podaje się np. indeks powierzchni odkrytych (ang. *Normalized Difference Bare Land Index*, NBLI):

$$NBLI = \frac{R - TIR}{R + TIR} \quad (2.20)$$

W celu monitoringu wód popularny jest znormalizowany indeks wody (ang. *Normalized Difference Water Index*, NDWI) definiowany na dwa sposoby:

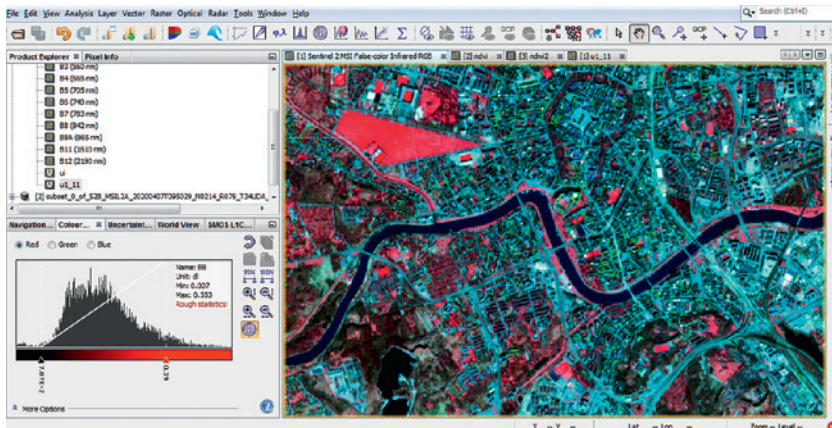
$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2.21)$$

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (2.22)$$

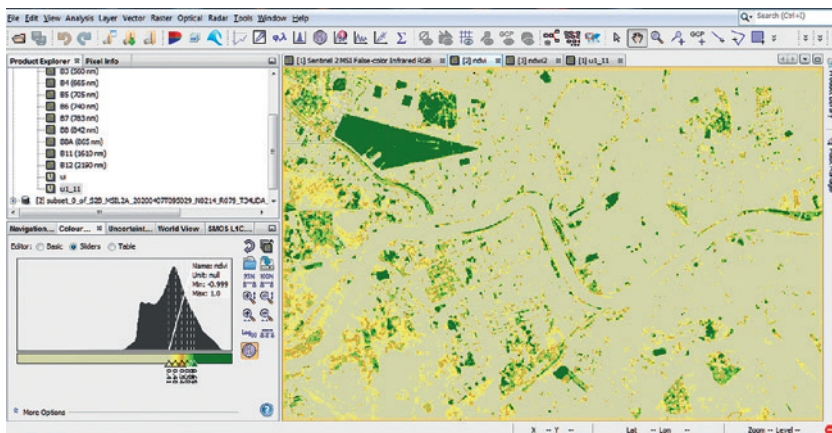
Analizując powyższe wskaźniki, można zauważyć pewną regułę, mianowicie prawie wszystkie mają w nazwie słowo znormalizowany. Informacja zarejestrowana na obrazie silnie zależy od szerokości geograficznej, pory roku i tłumienia PEM przez atmosferę. Żeby można było porównywać ze sobą różne obrazy (np. stanu upraw rolniczych w czasie) należy poddać je standaryzacji. Jedną z metod jest wstępne przetwarzanie obrazu w celu usunięcia wpływu powyższych czynników zakłócających. Drugim stopniem standaryzacji, czasem zamiennie wykonywanym, jest normalizacja, czyli iloraz różnicy wartości między kanałami spektralnymi (wielkości piksu) i ich sumy.

Na rysunkach poniżej (ryc. 2.24, 2.25, 2.26) zamieszczono przykładowe wizualizacje wskaźników: NDVI, NDWI oraz UI. Obrazy zostały wstępnie przetworzone w celu zwiększenia kontrastu, czyli poddane procedurze tzw. rozciągnięcia histogramu, aby uwypuklić typy pokrycia terenu: roślinność, wodę i zabudowę. Zakres, w jakim przeprowadzono rozciągnięcie histogramu, jest widoczny na ilustracjach na histogramie po lewej stronie u dołu (można przeanalizować zakres wartości, w jakim histogram został rozciągnięty). Wskaźniki są stosunkowo proste do obliczenia, gdyż gotowe formuły są dostępne w specjalnym oprogramowaniu teledetekcyjnym (np. SNAP) i umożliwiają wydobycie informacji o podstawowych typach pokrycia/użytkowania terenu.

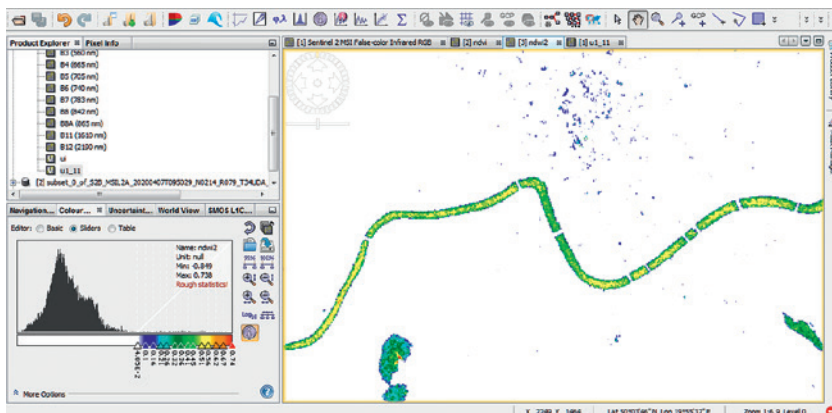
Wskaźniki zilustrowane poniżej (ryc. 2.23–2.26) zostały obliczone i zwizualizowane w oprogramowaniu SNAP.



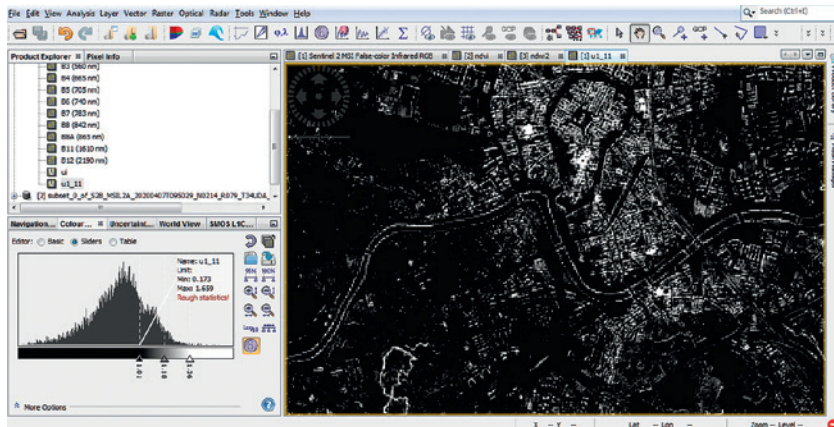
Ryc. 2.23. Kompozycja w barwach zafalszowanych FCC (CIR)



Ryc. 2.24. Przykład wizualizacji znormalizowanego wskaźnika roślinności (NDVI). Kolory ciemnozielone – roślinność o wysokiej biomasy i dobrej kondycji zdrowotnej



Ryc. 2.25. Wizualizacja wskaźnika wody (NDWI). Widoczne przerwy reprezentują mosty na Wiśle w centrum Krakowa (Landsat 8)



Ryc. 2.26. Wskaźnik zabudowy UI

Najbardziej znane i powszechnie stosowane w teledetekcji są wskaźniki spektralne wykorzystywane do diagnostyki wielkości biomasy i stanu uwilgotnienia. Wskaźniki roślinności często lepiej opisują cechy powierzchni szaty roślinnej niż oddzielnie analizowane wartości odbicia w poszczególnych kanałach spektralnych (Wanjura i Hatfield, 1987). W teledetekcji upraw rolniczych najczęściej stosowany jest znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności (NDVI; wzór 2.17). Analizy wieloczasowe tego wskaźnika pozwalają na ocenę zmian zawartości chlorofilu w roślinach (odpowiedzialnego za absorpcję światła czerwonego) oraz struktury komórkowej miększu gąbczastego (odbicie promieniowania w bardzo bliskiej podczerwieni). Wyższe wartości NDVI reprezentują większy wigor, zdolność do fotosyntezy i biomasę roślin. We wskaźniku NDVI pomijane jest tło glebowe, co może ograniczać wiarygodność opisu biomasy w sytuacji niewielkiego zwarcia szaty roślinnej i wysokiego albedo gleb.

Negatywny wpływ tła glebowego można zniwelować przy zastosowaniu wskaźnika roślinnego znanego pod akronimem SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index; wzór 2.23) (Huete, 1988), obliczanego na podstawie tych samych zakresów spektralnych jak przy NDVI, jednak z dodatkowym parametrem (L) przyjmującym wartości z przedziału 0–1 (najczęściej 0,5).

$$SAVI = \frac{(1+L)(NIR - R)}{NIR + R + L} \quad (2.23)$$

Wskaźnik NDVI słabiej reaguje na zmiany biomasy w późniejszych fazach jej wzrostu, stąd do szacowania zielonej biomasy przy dużym zagęszczeniu roślinności stosowany jest często wskaźnik VI (2.16). Bazuje on na założeniu, że zielona biomasa roślin odbija względnie więcej promieniowania w zakresie bardzo bliskiej podczerwieni (NIR) niż w zakresie czerwonym (R), a wraz z przyrostem biomasy stosunek NIR/R rośnie. Wskaźnik ten jest z kolei mało przydatny do opisu biomasy przy pokryciu gleby roślinnością poniżej 50%. W takich sytuacjach stosowany bywa też wskaźnik TVI (Transformed Vegetation Index) (Borge i Leblanc, 2001) uwzględniający zarówno zawartość chlorofilu, jak i biomasę roślin. Obliczany jest on na podstawie odbicia w trzech kanałach spektralnych (zielonym, czerwonym i bliskiej podczerwieni) jako obszar trójkąta definiowanego przez maksimum odbicia w zakresie światła zielonego, minimum odbicia w zakresie światła czerwonego (paśmie absorpcji chlorofilu) i maksimum odbicia w zakresie bli-

skiej podczerwieni. W przypadku korzystania z obrazów Sentinel-2 wskaźnik TVI można obliczyć ze wzoru 2.24. Należy zwrócić uwagę, że wskaźnik ten zawiera kanały o różnej rozdzielczości przestrzennej, które muszą zostać poddane przepróbkowaniu (ang. *re-sampling*) w celu użycia takiego samego rozmiaru piksela obrazu. Wykonywanie operacji algebraicznych jest możliwe na macierzach o takich samych rozmiarach, takiej samej liczbie wierszy i kolumn.

$$TVI = L \cdot [120(Band6 - Band3) - 200(Band4 - Band3)] \quad (2.24)$$

gdzie:

Band3 – skalibrowany współczynnik odbicia z kanału zielonego *Green* (np. Sentinel-2 jako produkt poziomu L2: kanał 3 środek zakresu 560 nm; GSD 10 m),

Band4 – skalibrowany współczynnik odbicia w kanale czerwonym *Red* (np. Sentinel-2 jako produkt poziomu L2: kanał 4; GSD 10 m; zakres 650–680 nm; środek zakresu 665 nm)

Band6 – skalibrowany współczynnik odbicia z kanału *RedEdge* (np. Sentinel-2: kanał 6 jako produkt poziomu L2: środek zakresu 740 nm; GSD 20 m),

Band8 – skalibrowany współczynnik odbicia w zakresie bliskiej podczerwieni *NIR* (np. Sentinel-2 jako produkt poziomu L2: kanał nr 8; GSD 10 m; zakresu 785–899 nm; środek zakresu 842 nm),

L – współczynnik uwzględniający wpływ tła glebowego (0,5).

Zarówno absorpcja światła przez chlorofil powodująca spadek odbicia w zakresie czerwonym (R), jak i obfitość tkanki liści powodująca zwiększenie odbicia w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR), zwiększa całkowitą powierzchnię trójkąta, a tym samym wartość wskaźnika TVI.

Do oceny stanu uwilgotnienia stosowany jest natomiast znormalizowany różnicowy wskaźnik wody NDWI (wzór 2.25), będący uszczegółowieniem wzoru 2.21, informujący o stanie (zmianach) zawartości wody (absorpcja w zakresie promieniowania SWIR) i miękiszu gąbczastego w tkance roślinnej (NIR). Na wielkość NDWI wpływa wysuszenie i wędnięcie roślinności, dzięki czemu jest on bardziej czułym wskaźnikiem monitorowania suszy niż NDVI.

$$NDWI = \frac{Band8A - Band12}{Band8A + Band12} \quad (2.25)$$

gdzie:

Band8A – skalibrowany współczynnik odbicia w zakresie bardzo bliskiej podczerwieni – kanał 8A Sentinel-2 (GSD 20 m; wartość zakresu 855–875 nm; środek zakresu 865 nm),

Band12 – skalibrowany współczynnik odbicia w zakresie podczerwieni – kanał 12 Sentinel-2 (GSD 20 m; wartość zakresu 2100–2280 nm; środek zakresu 2190 nm).

Stan suszy fizjologicznej zwykle występuje przy spełnieniu warunku przez wskaźniki: NDVI < 0,5 oraz NDWI < 0,3 (Gu i in., 2007). Intensywność suszy wyznaczyć można również na podstawie wartości progowych zaproponowanych przez Gulacsi i Kovacs (2015; tabela 2.7).

Informacje o stanie energetycznym (potencjale) wody w komórkach roślin i glebie przedstawia z kolei znormalizowany wskaźnik wody NWI (Normalised Water Index) (Prasad i in., 2007), którego wartość wzrasta wraz z nasileniem stresu wodnego i informuje o potencjalnej redukcji plonu.

Tabela 2.7. Klasyfikacja wskaźnika NDWI na potrzeby monitoringu suszy

NDWI	Klasa stanu suszy
> 0,4	Brak suszy
0,3–0,4	Lekko suszo
0,2–0,3	Umiarkowanie suszo
0,0–0,2	Bardzo suszo
< 0	Ekstremalnie suszo

Do diagnostyki stanu suszy stosowany jest także znormalizowany różnicowy wskaźnik suszy NDDI (Normalised Difference Drought Index) (Gu i in., 2007), którego wartość wzrasta wraz z nasileniem zjawiska suszy rolniczej, przy założeniu minimalnych kryteriów suszy $NDVI < 0,5$ oraz $NDWI < 0,3$ stan suszy wystąpi przy $NDDI > 0,25$.

$$NWI = \frac{Band9 - Band8A}{Band9 + Band8A} \quad (2.26)$$

gdzie:

Band8A – skalibrowany współczynnik odbicia w kanale 8A Sentinel-2 (GSD 20 m; wartość zakresu 855–875 nm; środek zakresu 865 nm),

Band9 – skalibrowany współczynnik odbicia w kanale 9 Sentinel-2 (GSD 60 m; wartość zakresu 925–965 nm; środek zakresu 945 nm).

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI} \quad (2.27)$$

gdzie:

NDVI – znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności,

NDWI – znormalizowany różnicowy wskaźnik wody.

Omówione powyżej wskaźniki są często wykorzystywane w teledetekcji z uwagi na nieskomplikowane formuły algebraiczne i w związku z tym łatwość ich praktycznej implementacji. Poza tym w większości przypadków mają postać funkcji normalizującej, usuwającej wpływ warunków oświetlenia (pory roku i położenia geograficznego), przez co umożliwiają przybliżone wieloczasowe analizy porównawcze. Przed obliczeniem wskaźników zaleca się jednak wykonanie korekcji radiometrycznej. Ponadto należy zwrócić uwagę, że obliczenie wskaźników jest możliwe tylko w przypadku obrazów o takim samym rozmiarze piksela.

2.3. Klasyfikacja obrazów satelitarnych

Beata Hejmanowska

Każdego dnia rejestrowane są ogromne ilości danych teledetekcyjnych, które wymagają ciągłych przetworzeń, aby je zanalizować. Na przykład jeden kanał obrazu Sentinel-2 w rozdzielczości terenowej GSD 10 m zapisywany jest jako macierz ok. 11 000 linii oraz 11 000 wierszy, co oznacza rejestrowanie sygnału przy wykorzystaniu 121 mln

pikseli. Jednorazowo sensor Sentinel-2 rejestruje aż 13 kanałów spektralnych, ale choć nie wszystkie w najwyższej rozdzielczości (10 m GSD), to i tak pojedynczy wielospektralny obraz zajmuje ok. 1,1 GB (scena (ang. *tile, granule*) o rozmiarze 100 km × 100 km).

W ciągu jednego tygodnia, przy dobrej, bezchmurnej pogodzie, dla powyżej wspomnianej misji Sentinel-2 dysponujemy dwoma lub trzema zobrazowaniami tego samego obszaru. Analiza takiej ilości danych jest dużym wyzwaniem zarówno dla sprzętu (przestrzenie dyskowe, procesory), jak i dla samego oprogramowania. W obecnych czasach nie tylko obrazy teledetekcyjne stanowią poważne wyzwanie dla analityków, ponieważ w wielu dziedzinach pojawiła się konieczność przetwarzania dużych ilości danych, co powodowało różne problemy i doprowadziło do powstania pojęcia: *Big Data*. Pozyskiwanie informacji z danych odbywa się z wykorzystaniem różnych technik, a proces ten nazywany jest eksploracją danych lub zamiennie ekstrakcją danych, czyli w zasadzie „wydobyciem” danych. Nauka o danych (ang. *data science*) jest pojęciem ogólnym, z pewnością multidyscyplinarnym i jest częścią odkrywania wiedzy w bazach danych (ang. *Knowledge Discovery in Databases, KDD*). Obejmuje ono różne, przenikające się wzajemnie, a czasem zwierające się w sobie podejścia i metody, takie jak: bazy danych, wizualizacje, statystykę, rozpoznawanie wzorców, neuro-obliczenia, maszynowe uczenie (ang. *Machine Learning, ML*), sztuczną inteligencję (ang. *Artificial Intelligence, AI*), czy eksplorację danych (ang. *Data Mining*).

W teledetekcji danymi są liczby zapisane w macierzach, odpowiadające jasnościom pikseli (*DN*). Wydobycie informacji zawsze polega na jakiejś klasyfikacji obrazu i właśnie różnym metodom klasyfikacji obrazów poświęcone zostały poniższe podrozdziały. Do procesu pozyskiwania informacji z obrazów, poza informacją spektralną, mogą być dołączane również inne dane, np. numeryczny model terenu lub dane kontekstowe wykorzystywane w klasyfikacji obiektowej GEOBIA (omówione w końcowym podrozdziale).

Obraz przedstawiający powierzchnię Ziemi może zostać poddany klasyfikacji, rozumianej ogólnie jako procedura transformacji informacji zawartej w obrazie na informację zrozumiałą przez użytkownika (często niebędącego specjalistą). W wyniku klasyfikacji musimy uzyskać informację jednoznaczną, tzn. niewymagającą interpretacji. Idea klasyfikacji polega na tym, że jest to procedura przypisania piksela lub grupy pikseli, w przypadku klasyfikacji obiektowej, do klasy. Klasyfikację można przeprowadzić manualnie, opierając się na wizualnej interpretacji obrazu, tzw. fotointerpretacji, wykorzystując cechy fotointerpretacyjne obrazu i obiektów (rozdział 2.2.1), automatycznie na podstawie analizy skupień, na podstawie wzorców lub wykorzystując proste modele regresji pozwalające np. na obliczanie mapy rozkładu chlorofilu w wodzie na podstawie indeksu wody. Pozyskiwanie informacji z wykorzystaniem teledetekcji może być bardziej złożone, jeśli wykorzystamy do tego celu model fizyczny jakiegoś zjawiska np. model SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer), w którym oprócz danych satelitarnych używa się szeregu innych danych.

Ogólnie rzecz biorąc, wszystkie metody klasyfikacji obrazu można podzielić na dwie grupy. Jedna z nich obejmuje metody przetwarzania tylko informacji znajdujących się na obrazie, co nie oznacza, że nie korzystamy z dodatkowej wiedzy na temat obiektów czy zjawisk będących przedmiotem analiz. Druga grupa metod zawiera bardziej złożone procedury klasyfikacyjne, które w trakcie przetwarzania danych obrazowych wykorzystują inne dane. Do zestawu danych obrazowych można dodać inne nieobrazowe warstwy rastrowe, np. NMT, obraz temperatur, rastrową mapę glebową itd. Innym przykładem bardziej złożonej klasyfikacji niepikselowej jest klasyfikacja obiektowa. W pierwszej części tego podrozdziału zostanie omówiona klasyfikacja pikselowa,

w której klasyfikacji podlegają wartości jasności pikseli zapisane w postaci zestawu macierzy (liczba macierzy odpowiada liczbie kanałów wybranych do klasyfikacji).

Analizując histogram obrazu (ryc. 2.27) można zauważyć, że niektórych wartości pikseli jest na obrazie więcej, a niektórych mniej, oraz że tworzą one grupy (piki pojawiające się w histogramie, spowodowane występowaniem większej liczby pikseli w danym przedziale jasności, w porównaniu z innymi wartościami jasności pikseli, zaznaczono na czerwono). Klasyfikację obrazu można przeprowadzić dzieląc histogram na klasy przez przyporządkowanie pikseli do poszczególnych przedziałów klas. Klasyfikacja przeprowadzona w ten sposób, często nazywana progowaniem (ang. *thresholding*), pozwala w stosunkowo łatwy sposób wydobyć pewne informacje, np. wydzielić klasę woda lub chmury (ryc. 2.28).

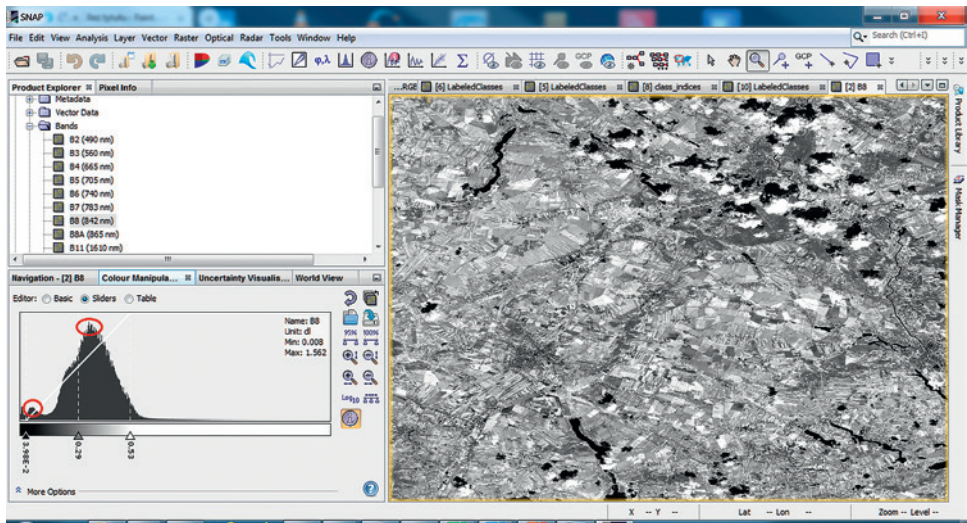
Jeśli dysponujemy większą liczbą klas, to możemy sporządzić wykres dwuwymiarowy (ang. *scatter plot*), na którym na jednej osi znajdują się wartości pikseli (DN) w jednym kanale (np. Red), a na drugiej odpowiadające im wartości jasności pikseli w drugim kanale (np. NIR). Przy okazji można zauważyć korelację pomiędzy kanałami; najbardziej skorelowane są ze sobą kanały widzialne (RGB) (przykładowo Sentinel-2 kanał 3 i 4, ryc. 2.29), a mniejsza korelacja występuje pomiędzy kanałami w zakresie widzialnym i podczerwonym (przykładowo Sentinel-2: kanały: 4 i 8, ryc. 2.30). Podobne wykresy można sporządzić i zwizualizować w postaci 3D, wybierając dowolny zestaw trzech kanałów. W przypadku większej liczby kanałów można sobie jedynie wyobrazić taki wykres, np. w 10 wymiarach, biorąc pod uwagę wszystkie kanały obrazu Sentinel-2 o rozdzielczości 10 i 20 m GSD.

Parametrami statystycznymi, które można obliczyć dla poszczególnych kanałów jest wartość średnia jasności i odchylenie standardowe. Informacje te można rozszerzyć, obliczając kowariancję między kanałami i tworząc macierz wariancyjno-kowariancyjną, w której na przekątnej znajduje się wariancja (kwadrat odchylenia standardowego) w poszczególnych kanałach, a poza przekątną kowariancje pomiędzy kanałami. Macierz ta może mieć też postać korelacji, gdzie na przekątnej znajdują się wartości korelacji kanałów samych ze sobą, czyli wartość 1,0, a poza przekątną korelacje pomiędzy poszczególnymi kanałami.

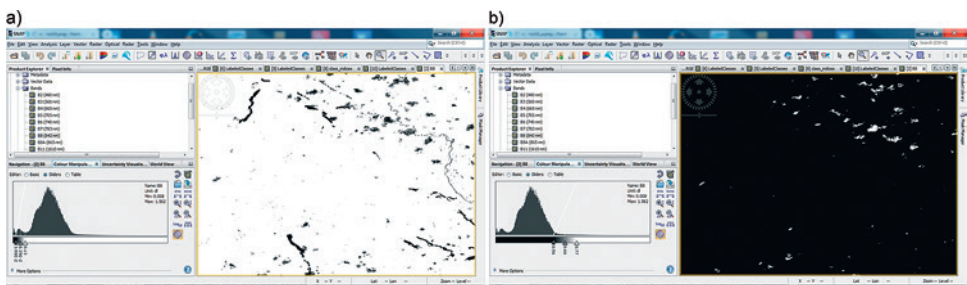
Analiza macierzy wariancyjno-kowariancyjnej pozwala na stwierdzenie, w jakim stopniu obrazy są ze sobą skorelowane, a tym samym ewentualnie na podjęcie decyzji o zredukowaniu liczby kanałów przed przystąpieniem do właściwej klasyfikacji. Zredukowanie liczby kanałów może przyspieszyć proces klasyfikacji, szczególnie jeśli mamy do czynienia z *Big Data*, czyli obrazami hiperspektralnymi lub przetwarzaniem obrazów na dużych obszarach. Dekorelację obrazów można przeprowadzić różnymi metodami np. głównych składowych (ang. *Principal Component Analysis*, PCA) czy liniowej analizy dyskryminacyjnej (ang. *Linear Discriminant Analysis*, LDA).

Etapy analizy wstępnej obrazu, rozciągania kontrastu, tworzenia kompozycji barwnych, progowania i dekorrelacji poprzedzają proces właściwej klasyfikacji obrazu, którego celem jest wydobyć z obrazu maksymalnie dużej liczby informacji z wykorzystaniem mniej lub bardziej zautomatyzowanego podejścia.

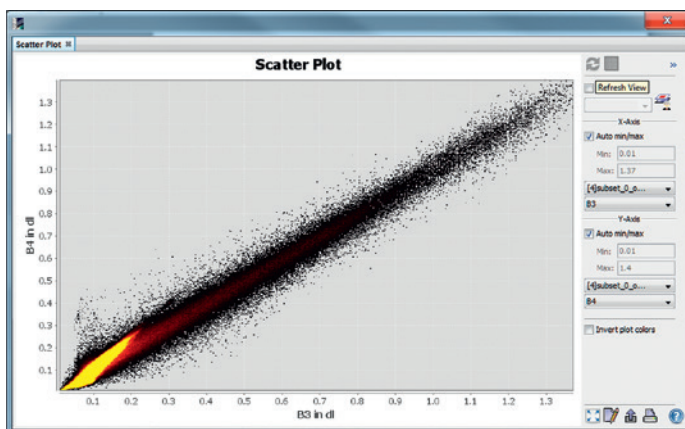
Metody automatycznej klasyfikacji obrazów można podzielić na dwie grupy, tj. na klasyfikację nienadzorowaną (ang. *unsupervised*) i nadzorowaną (ang. *supervised*). W klasyfikacji nienadzorowanej algorytm na podstawie analizy statystycznej jasności pikseli obrazu grupuje piksele w klasy. W metodzie klasyfikacji nadzorowanej użytkownik wskazuje tzw. pola treningowe (ang. *training sites*), które są wykorzystywane do tworzenia wzorców klas.



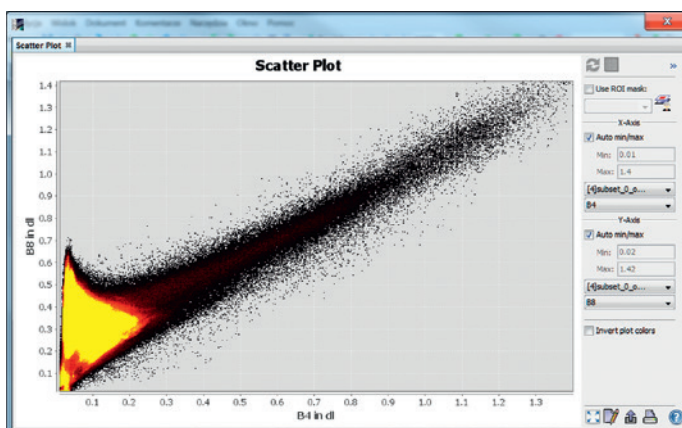
Ryc. 2.27. Przykładowy histogram obrazu (Sentinel-2, kanał 8)



Ryc. 2.28. Wynik prostej klasyfikacji obrazu metodą progowania, czyli wybrania z obrazu tylko interesujących wartości współczynnika odbicia
 a) niskie wartości – woda i cienie od chmur; b) wysokie wartości – chmury



Ryc. 2.29. Wykres przedstawiający rozkład pikseli: na osi odciętych DN z kanału zielonego (B03) Sentinel-2, na osi rzędnych z kanału czerwonego (B04) Sentinel-2



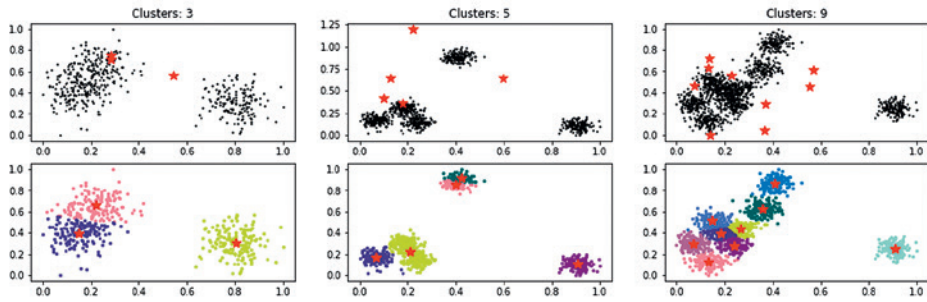
Ryc. 2.30. Wykres przedstawiający rozkład pikseli: na osi odciętych DN z kanału czerwonego (B04) Sentinel-2, na osi rzędnych z kanału bliskiej podczerwieni (B08) Sentinel-2

2.3.1. Klasyfikacja nienadzorowana

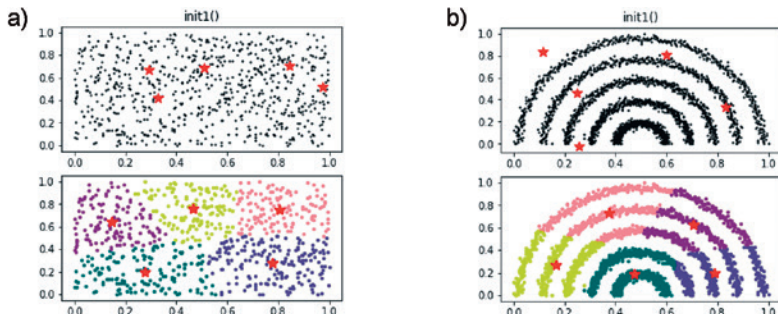
Klasyfikacja nienadzorowana polega na automatycznym podzieleniu pikseli na klasy. Najbardziej znanymi algorytmami tego typu klasyfikacji jest metoda *k*-średnich (ang. *k-means*). Klasyfikacja *k*-średnich przebiega następująco: początkowo środki klas, nazywanych w tej metodzie klastrami, są przypadkowo rozmieszczane w przestrzeni danych, następnie iteracyjnie przypisuje się piksele do klas przy użyciu techniki minimalnej odległości. Odległość jest obliczana w jednostkach jasności obrazu (DN), podobnie jak współrzędne pikseli czy środka klasy. W każdej iteracji obliczana jest średnia w klasach i ponownie klasyfikuje się piksele w odniesieniu do nowego położenia środków klas. Proces ten trwa, dopóki liczba pikseli w każdej klasie nie zmieni się o mniej niż wyznaczone wartości progowe lub osiągnięta zostanie maksymalna liczba iteracji. Liczba klastrów w metodzie ISODATA może się zmieniać, podczas kiedy w metodzie *k*-średnich jest ustalona *a priori*.

Przykład działania algorytmu *k*-średnich zaprezentowano na rysunku (ryc. 2.31). U góry widoczne są początkowe położenia środków klastrów, a u dołu końcowe, kolorami zaznaczono poszczególne klastry. Prezentowany przykład jest najprostszym, ponieważ klasyfikacji poddane zostały naturalne, widoczne gołym okiem skupiska, chociaż nie zawsze wynik automatycznej klasyfikacji pokrywa się z naszym wynikiem klasyfikacji wizualnej. Nie zawsze podział na klasy jest tak jednoznaczny, co ilustruje przykład, w którym nie występują naturalne skupiska (ryc. 2.32). Ograniczeniem metody *k*-średnich jest również kształt klas, co zostało zilustrowane na rysunku (ryc. 2.32, z prawej). Wydzielone przez algorytm *k*-średnich klasy, zaznaczone w różnych kolorach, odbiegają całkowicie od klas, które użytkownik wydzieliłby przez interpretację wizualną.

Przykładowy wynik klasyfikacji obrazu Sentinel-2 (ryc. 2.33), przy założeniu sześciu klas, zamieszczono na rysunku (ryc. 2.34). Klasyfikacja nienadzorowana przypisuje piksele do klas, bazując na naturalnych skupiskach, bez żadnych informacji na temat rzeczywistego pokrycia terenu. Dlatego zawsze po wykonaniu klasyfikacji trzeba dokonać interpretacji wizualnej utworzonych klas i przypisać je do danego pokrycia terenu. Bardzo często w jednej klasie mogą występować obiekty w rzeczywistości różne, jak np. grunt rolny pozbawiony roślinności oraz obiekty antropogeniczne, jak np. dachy budynków.



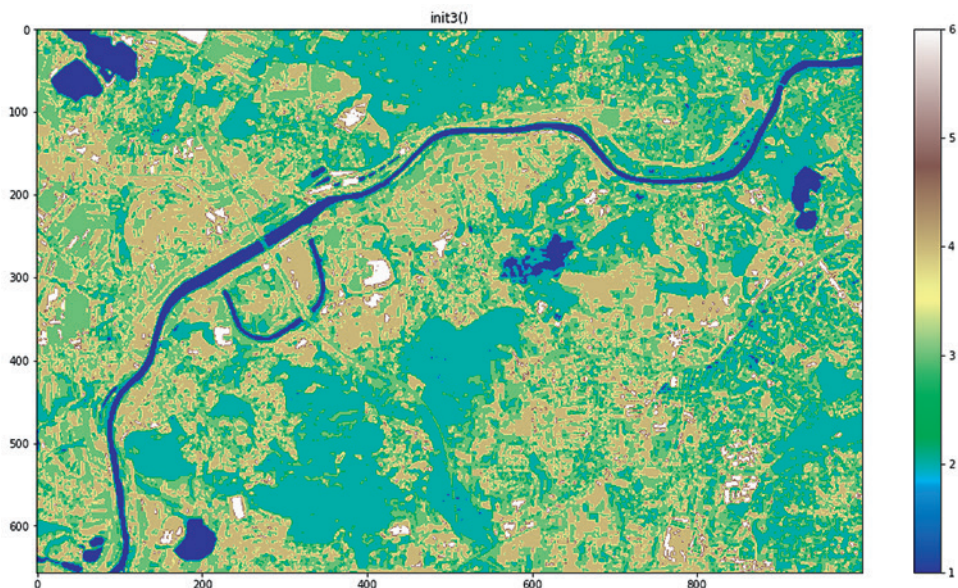
Ryc. 2.31. Przykład działania algorytmu *k-means*: u góry – początkowe położenia środków klas, u dołu – wynik końcowy, klasy oznaczono kolorami (źródło: imProc, 2020)



Ryc. 2.32. Przykład działania algorytmu *k-means* na danych, które nie mają naturalnych skupisk (a) oraz mających wyraźne klasy, których nie da się wydobyć metodą *k-means* (b) (źródło: imProc, 2020)



Ryc. 2.33. Fragment zobrazowania satelity Sentinel-2: kompozycja w barwach naturalnych (źródło: imProc, 2020)



Ryc. 2.34. Wynik klasyfikacji *k-means*: woda – kolor granatowy, lasy – kolor niebiesko-zielony, gleby – brązowy, roślinność trawiasta – zielony, grunt odkryty lub elementy antropogeniczne o bardzo wysokim współczynniku odbicia (bardzo jasne) – biały (źródło: imProc, 2020)

Metody nienadzorowane są w teledetekcji wykorzystywane z reguły w początkowej fazie pozyskiwania informacji z obrazów. Zgodnie z przyjętą regułą dostarczają one w prosty i szybki sposób obiektywne informacje o naturalnie występujących w obrazie klastrach, skupiskach pikseli czyli pikselach charakteryzujących się podobnymi właściwościami. Niestety, poszczególne klastry zawierają często obiekty z różnych klas zdefiniowanych przez użytkownika, a jedna klasa może zawierać się w kilku klastrach (np. drzewostan mieszany składający się z drzew liściastych oraz iglastych). Przypisanie klastrów do klas w metodzie *k-średnich* nie zawsze jest proste i praktycznie ogranicza się do podstawowych typów pokrycia terenu.

Niedoskonałość tego typu klasyfikacji obrazów powoduje, że często wykorzystuje się metody nadzorowane, które we wstępnej fazie wymagają zdefiniowania wzorców, czyli wyboru homogenicznych dla danej klasy pól treningowych.

Poniżej omówiono wybrane algorytmy najczęściej wykorzystywane w teledetekcji satelitarnej, które są zaimplementowane w różnych programach (np. SNAP bądź jako wtyczki rozszerzające funkcjonalność QGIS).

2.3.2. Klasyfikacja nadzorowana

Klasyfikacja nadzorowana polega w pierwszej fazie na wybraniu na obrazie tzw. pól treningowych, na podstawie których tworzone są wzorce klas, tj. podobnie jak w metodzie nienadzorowanej środki i zakresy klas. Dla pól treningowych liczone są szczegółowe statystyki obrazu (np. wartości DN: średnia, minimalna, maksymalna, odchylenia standardowego, wariancja). W następnym etapie następuje przypisanie pikseli do zdefiniowanych przez użytkownika klas (np. las, woda, zabudowa) za pomocą różnych al-

gorytmów klasyfikacyjnych. Proces ten nazywany jest klasyfikacją nadzorowaną, ponieważ użytkownik w pełni nadzoruje cały proces. Ewentualna edycja pól treningowych, czy zmiana parametrów algorytmu odbywa się w wyniku ingerencji operatora i pod jego nadzorem. Ostatnim etapem jest analiza wiarygodności klasyfikacji, którą przeprowadza się, wykorzystując podobny do pól treningowych, ale niezależnie od nich wyznaczony, zestaw pól testowych (nazywanych też polami kontrolnymi, ang. *control plots*).

W większości programów z zakresu teledetekcji (ENVI, PCI, QGIS i innych) proces klasyfikacji jest wyraźnie oddzielony od analizy dokładności klasyfikacji (ang. *Quality Assessment*, QA). W podejściu wykorzystującym stosunkowo nowe metody klasyfikacyjne obrazów oparte o maszynowe uczenie (ML), mamy do czynienia z pewną modyfikacją podejścia do analizy dokładności klasyfikacji (więcej szczegółów można znaleźć w podrozdziale 2.3.4.). Mianowicie z odpowiednio dużego zestawu pól treningowych wybierany jest zestaw danych uczących i zestaw danych testowych, na których sprawdzana jest efektywność (dokładność) uczenia. Przykład takiego podejścia można znaleźć w oprogramowaniu SNAP, w którym zaimplementowano go do wszystkich metod klasyfikacji. Metoda ta nie jest równoważna z podejściem tradycyjnym, bazującym na wykorzystaniu do uczenia wszystkich pikseli z pól treningowych i wykonaniu analizy dokładności (QA) na wszystkich pikselach z zestawu pól kontrolnych (testowych). Ponadto należy zauważyć, że w programie SNAP (czy innych programach wykorzystujących klasyfikację bazującą na nowoczesnych metodach ML) nawet nie da się przeprowadzić analizy dokładności w sposób tradycyjny. W tym celu zalecane jest np. skorzystanie np. z wtyczki SCP QGIS.

Jak już wspomniano powyżej, klasyfikacja obrazów jest procesem składającym się z kilku etapów. W pierwszym etapie wybierane są pola treningowe dla każdej z klas, a następnie obliczane są parametry statystyczne. Parametry te są wykorzystywane w procesie wyznaczenia wzorców, w trakcie którego można ponadto analizować histogramy, a w celu sprawdzenia separatywności klas – wykresy międzykanałowe (podobne do przedstawionych na rycinach 2.29 oraz 2.30).

Po utworzeniu wzorców klas następuje proces klasyfikacji, czyli przypisania pikseli obrazu do zdefiniowanych klas z wykorzystaniem wybranej metody (klasyfikatora).

2.3.2.1. Metody stosowane w klasyfikacji nadzorowanej

W teledetekcji od wielu lat do klasyfikacji nadzorowanej stosuje się następujące algorytmy: metodę równoległościaków, minimalnej odległości i maksymalnego prawdopodobieństwa. Stosunkowo nowymi metodami wykorzystywanymi do klasyfikacji obrazu są: lasy losowe, wektory nośne oraz głębokie uczenie.

Metoda równoległościaków

Metoda równoległościaków (ang. *Parallelepiped*) to klasyfikator obrazów wielospektralnych, który analizuje wartości jasności pikseli (DN) pól treningowych, wyznaczając wartość maksymalną i minimalną dla każdego wzorca. Piksel zostaje przyporządkowany do danej klasy, jeśli jego wartość jasności mieści się w wyznaczonym przedziale. Metoda ta jest mało skuteczna, ale nie wymaga dużej ilości obliczeń i nadaje się do klasyfikacji obiektów o bardzo dużych kontrastach DN (np. klasyfikacja chmur na tle oceanu).

Metoda najmniejszej odległości

Metoda najmniejszej odległości (ang. *Minimum Distance Classification*, MDC) to technika klasyfikacyjna, w której obliczane są średnie wartości jasności pikseli dla poszczególnych wzorców. Następnie w przestrzeni euklidesowej sprawdzana jest odległość badanego piksela do wartości średniej danego wzorca klasy. Piksel zostaje przyporządkowany do klasy, dla której odległość euklidesowa jest najmniejsza.

Metoda odległości Mahalanobisa

Metoda odległości Mahalanobisa (ang. *Mahalanobis Distance Classification*) jest uogólnieniem metody najmniejszej odległości (MDC), w której miara odległości jest niejako skalowana odchyleniem standardowym w kanałach i uwzględnia również korelację pomiędzy kanałami spektralnymi.

Metoda największego prawdopodobieństwa

Metoda największego prawdopodobieństwa (ang. *Maximum Likelihood Classification*, MLC) to metoda oparta na obliczeniu prawdopodobieństwa przynależności każdego piksela do określonej klasy. Piksel zostaje przyporządkowany do klasy, dla której prawdopodobieństwo przynależności jest największe. W metodzie zakłada się, że statystyki wzorców, używane do obliczenia wartości prawdopodobieństwa przynależności do danej klasy, mają rozkład normalny. Metoda dostarcza najdokładniejsze wyniki spośród wymienionych metod, ale jest najbardziej wymagająca obliczeniowo.

Dla lepszego zrozumienia wyżej wymienionych algorytmów klasyfikacji nadzorowanej wykonano klasyfikację obrazu satelitarnego w celu wydzielenia upraw rolniczych. Na rysunkach (ryc. 2.35) przedstawiono kompozycję w barwach zafałszowanych FCC z naniesionymi polami treningowymi, z których w oprogramowaniu SNAP wybranych zostało losowo 5000 pikseli treningowych i 5000 testowych. Wyniki klasyfikacji nadzorowanej metodą największego prawdopodobieństwa (MLC) i metodą najmniejszej odległości (MDC) zamieszczono na rysunku (ryc. 2.35b i d). Oprogramowanie SNAP oprócz wyniku klasyfikacji dostarcza informacji na temat dokładności produktu finalnego w pikselach testowych.

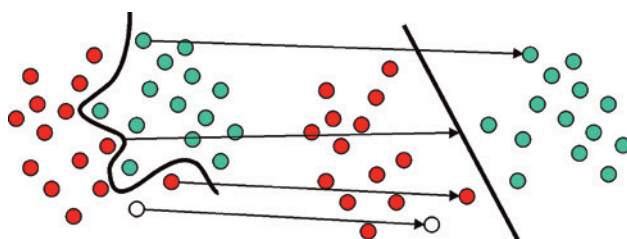
Z raportu wykonanej przykładowo klasyfikacji obrazu można odczytać procent poprawnie sklasyfikowanych pikseli, który w przypadku metody MLC wynosi 84,5%, a algorytmu MDL tylko 40,7%. Program SNAP pozwala także na utworzenie obrazu rozkładu przestrzennego dokładności klasyfikacji, który został przedstawiony na rysunku (ryc. 2.35c), na którym kolorem białym zaznaczone są piksele o dokładności klasyfikacji powyżej 90%. Wykorzystując oprogramowanie SNAP, należy zwracać uwagę na liczbę i wielkość pól treningowych, związaną z tym całkowitą liczbę pikseli przypadającą na pola treningowe oraz liczbę pikseli przyjętą do uczenia. Bardzo ważna jest homogeniczność pól treningowych. Parametry te bowiem determinują wiarygodność klasyfikacji, a wyniki analizy dokładności (QA) mogą znacząco się różnić w porównaniu do wyników uzyskiwanych w innym oprogramowaniu, nawet przy wykorzystaniu tych samych metod klasyfikacji i identycznych pól treningowych.

Analizując wyniki badań dotyczących klasyfikacji obrazów teledetekcyjnych publikowane w ostatnich dwóch latach, można zaobserwować tendencję wykorzystania do klasyfikacji obrazów bardziej zaawansowanych metod np. lasy losowe (ang. *Random Forest*, RF), wektory nośne (ang. *Support Vector Machine*, SVM) oraz głębokie uczenie (ang. *Deep Learning*, DL). Warto przytoczyć wyniki analiz porównawczych prowadzonych w tym zakresie, przedstawione wraz z kodem źródłowym w *R*, w podręczniku Tutorial ML RS (2020).

W dalszej części podrozdziału szerzej zaprezentowano wybrane bardziej zaawansowane metody w kontekście praktycznego ich zastosowania w klasyfikacji zobrażeń satelitarnych.

Jedną z metod, która pozwala na klasyfikację danych, z którymi ma problem metoda *k*-średnich (ich rozkład w dziedzinie DN przypomina pierścienie) jest metoda wektorów nośnych (SVM).

Żeby poprawnie sklasyfikować ten przypadek ryc. 2.32 lub przypadek na ryc. 2.36 potrzebna jest definicja granicy pomiędzy klasami w sposób bardziej skomplikowany niż za pomocą linii.



Ryc. 2.36. Przykład działania metody SVM (StatSoft, 2020)

Metoda wektorów nośnych

Idea wektorów nośnych (ang. *Support Vector Machine*, SVM) polega na tworzeniu linii podziału z wykorzystaniem tzw. hiperpłaszczyzn, a następnie transformacji oryginalnych danych do postaci separatywnych zbiorów. Biały element (ryc. 2.36) ma zostać przydzielony do klasy i za pomocą linii prostej nie można tego przeprowadzić na oryginalnych danych. Rozwiązaniem może być znalezienie linii podziału niebędącej linią prostą, która w sposób właściwy rozdzieli oba zbiory (ryc. 2.36 z lewej).

Metoda lasów losowych

Lasy losowe (ang. *Random Forest*, RF) to jeden z najbardziej skutecznych algorytmów stochastycznych, który wywodzi się z drzew decyzyjnych i ma na celu eliminację ich ograniczeń. Podstawą algorytmu jest założenie, że „większość ma zawsze rację”. Algorytm trenuje co najmniej kilkadziesiąt drzew zbudowanych na podstawie losowo wybranej części zmiennych, a ostateczny wynik podejmowany jest na podstawie głosowania na podstawie wyników wszystkich drzew. Minimalizuje to wpływ nieoptymalnych podziałów na początku każdego drzewa. Algorytm jest w pełni losowy, a każde kolejne drzewo jest niezależne od poprzednich.

Uczenie głębokie

Uczenie głębokie – sieci spłotowe (ang. *Deep Learning – convolution neural networks*, DL) opierają się na wielowarstwowym modelu sieci neuronowych, gdzie dla każdej kolejnej warstwy wydobywa się cechy wyższego rzędu przy pomocy algorytmów spłotowych (większość filtrów stosowanych w teledetekcji). Stosowane jest głównie dla danych uporządkowanych jak widma (1D), obrazy (2D) czy woksele (piksele typu 3D).

2.3.2.2. Proces tworzenia zbioru uczącego

Jarosław Jasiewicz

Rozmiar zbioru uczącego powinien być dostosowany do możliwości obliczeniowych sprzętu komputerowego i powinien obejmować od kilku tysięcy do miliona pikseli. Zbiór powinien być reprezentatywny, tj. obejmować proporcjonalnie wszystkie klasy. W przypadku, gdy dane obejmują więcej niż jedną scenę satelitarną, należy zadbać o wyrównanie zasięgów wartości w poszczególnych kanałach i rozłożenie zbioru treningowego na wszystkie sceny. Błędem jest trenowanie zbioru tylko na jednej scenie i przenoszenie klasyfikatora (algorytmu) na pozostałe analizowane dziesiątki, setki czy tysiące scen satelitarnych.

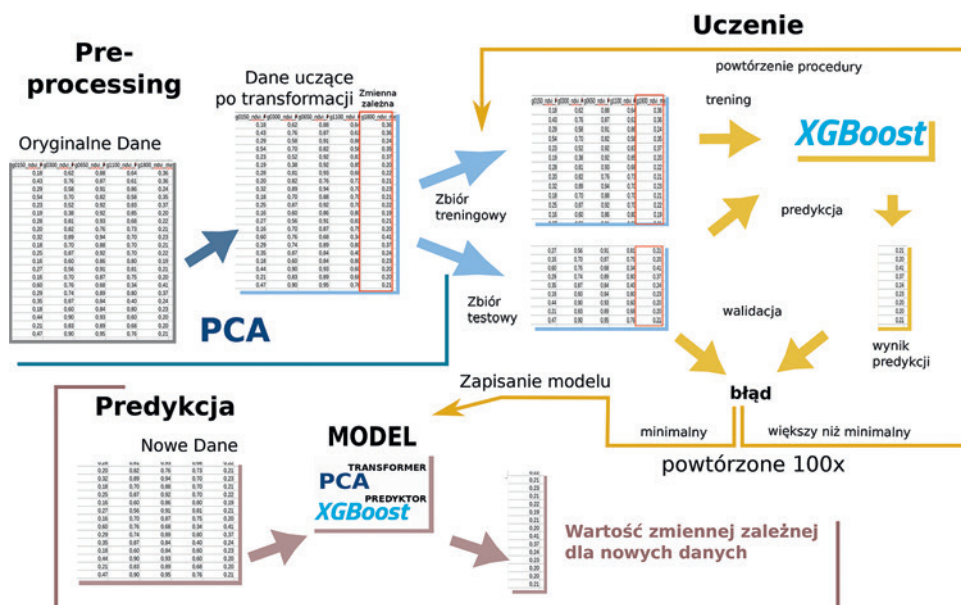
W przypadku stosowania klasyfikacji nienadzorowanej należy sprawdzić, czy stosowane algorytmy grupujące pozwalają na wytrenowanie klasyfikatora na mniejszym zbiorze danych, a następnie zastosować taki klasyfikator na cały planowany zbiór danych. Zarówno budowanie zbiorów treningowych, jak i interpretacja wyników grupowania może – i powinna – być wspomagana wizualną oceną wyników pracy klasyfikatora. Dane teledetekcyjne są często ze sobą skorelowane. W celu uproszczenia obliczeń oraz osłabienia wpływu zmiennych o małej istotności, dokonuje się redukcji wymiarowości albo przez analizę składowych głównych (PCA), albo przez ocenę ważności poszczególnych zmiennych, czyli wielokrotne losowanie podgrup zmiennych (ang. *bootstrap*) i badanie ich wpływu na ostateczną wydajność klasyfikatora.

Trening klasyfikatora

Ważnym aspektem procesu uczenia maszynowego jest optymalizacja parametrów modelu. Proces ten wykonujemy iteracyjnie przez wielokrotne trenowanie algorytmu i walidację wyników dla różnych wartości parametrów (hiperparametrów) klasyfikatora i tzw. regresora. Proces optymalizacji parametrów kończy się, gdy otrzymany zbiór parametrów prowadzi do najmniejszego błędu predykcji (ryc. 2.37).

Zarządzanie wartościami pustymi

Kolejną specyficzną cechą procesu uczenia maszynowego danych teledetekcyjnych jest zarządzanie wartościami pustymi (ang. *NoData*). Dane teledetekcyjne są uporządkowane w formie macierzy, niemniej jednak w obrębie danych znajdują się pustki wynikające z braku pomiaru lub są wymuszone (np. chmury). Większość algorytmów klasyfikacyjnych i regresyjnych wymaga wcześniejszego usunięcia wartości pustych. Należy to zrobić przy pomocy maskowania wartości pustych, tak aby po zakończeniu procesu predykcji odtworzyć oryginalną strukturę przestrzenną danych. Niektóre metody, np. lasy losowe (RF), pozwalają uwzględnić w procesie klasyfikacji puste wartości.

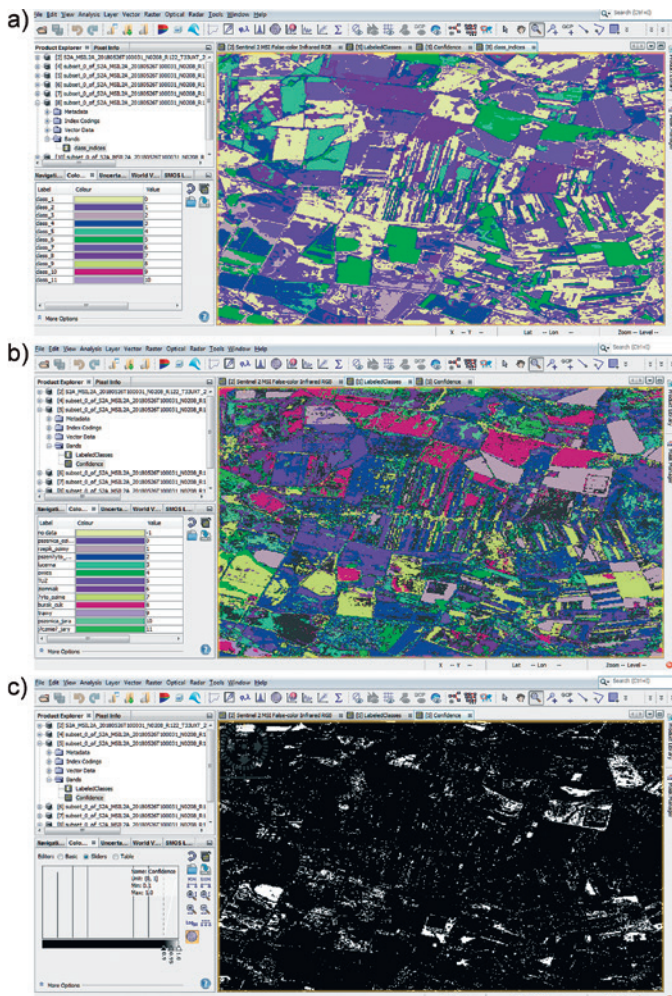


Ryc. 2.37. Standardowa procedura uczenia maszynowego z wykorzystaniem pakietu xgboost i minimalizacją błędów klasyfikatora

2.3.2.3. Przykład klasyfikacji metodami ML w SNAP

Beata Hejmanowska

W powyższym podrozdziale na rysunku (ryc. 2.35) zostały przedstawione przykładowe wyniki klasyfikacji metodami klasycznymi (MLC i MDC). Dla porównania, dla tego samego obrazu i tych samych pól treningowych, wykonano klasyfikację k-średnich oraz RF, których wyniki wraz z poziomem ufności dla RF znajdują się na rysunku (ryc. 2.38). W metodzie RF uzyskano całkowitą dokładność równą 91,3%, czyli wyższą niż poprzednio, która dla przypomnienia w metodzie MLC wynosiła 84,5% a w metodzie MDC – 40,7%. Należy jednak zwrócić uwagę na stosunkowo małą liczbę pikseli z poziomem ufności powyżej 0,9 (por. ryc. 2.35c i 2.38c).



Ryc. 2.38. Wyniki klasyfikacji metodami ML: a) wynik klasyfikacji k-średnich, b) wynik klasyfikacji RF, c) poziom ufności RF (na białe piksele o poprawności klasyfikacji powyżej 90%)

Porównanie metod uczenia maszynowego (ML) na potrzeby klasyfikacji map użytkownika/pokrycia terenu (LULC) można znaleźć w publikacji (Abdi, 2020), w której autor porównuje cztery metody ML: lasy losowe (RF), wektory nośne (SVM), Extreme Gradient boosting i głębokie uczenie, uzyskując dokładność na poziomie około 75% (SVM: $0,758 \pm 0,017$; Extreme Gradient boosting: $0,751 \pm 0,017$; RF: $0,739 \pm 0,018$; DL: $0,733 \pm 0,0023$).

Powyższe metody klasyfikacji są stosowane z powodzeniem do klasyfikacji wielospektralnych obrazów satelitarnych, które zawierają od kilku do kilkunastu obrazów. Liczba kanałów z czasem rośnie, nie mówiąc już o tzw. obrazach hiperspektralnych mających od 20 do 400 kanałów. Jeżeli liczba obrazów rośnie do kilkudziesięciu czy kilkuset, krzywe spektralne przypominają krzywe ze spektrometrów polowych. Naturalnym jest więc zastosowanie w analizach obrazów hiperspektralnych specjalnych

metod rozwijanych w innych dziedzinach np. w badaniach chemicznych spektroskopii laboratoryjnej. W związku z tym, że metody te nie są tak znane, jak tradycyjne metody klasyfikacji, zostały one szerzej omówione w następnym podrozdziale.

2.3.2.4. Metody przeznaczone do klasyfikacji obrazów hiperspektralnych

Ewa Głowienka

Ze względu na dużą liczbę kanałów tradycyjne metody klasyfikacji (np. MLC, MDC) stosowane dotychczas dla obrazów wielospektralnych (np. Landsat, SPOT, ASTER) nie przynoszą zadowalających wyników, a wręcz fałszują je (Głowienka, 2014). Standardowe metody klasyfikacji obrazowej mogą być wykorzystane dla obrazów hiperspektralnych (HS). Jednakże klasyfikacja tymi metodami danych o wysokiej rozdzielczości spektralnej, nie wykorzystuje w pełni głównej zalety obrazów, jaką jest dokładne spektrum dla każdego piksela.

Metody pozyskiwania informacji tematycznej z danych hiperspektralnych dzielimy na metody pikselowe i podpikselowe. Obie z nich wymagają jednak stosowania krzywych spektralnych, których liczba jest zależna od obiektów identyfikowanych (klas) na danym obrazie hiperspektralnym. Krzywe wzorcowe można uzyskać na podstawie pomiarów spektrometrycznych *in situ*, pomiaru laboratoryjnego, na podstawie danych obrazowych lub wykorzystując biblioteki krzywych spektralnych udostępniane np. przez USGS czy JPL.

Kształt i przebieg krzywych spektralnych można analizować w dwojaki sposób: przez badanie piku absorpcyjnego lub analizując i porównując łagodnie zmieniające się obszary w ogólnym kształcie krzywych. To rozróżnienie determinuje wybór metody porównywania krzywych obrazowych z krzywymi referencyjnymi.

Metoda normalizacji krzywych spektralnych (*continuum-removed*)

Analiza piku absorpcyjnego wymaga normalizacji krzywej spektralnej przez zastosowanie transformacji spektrum do tzw. continuum (ryc. 2.39). Transformacja ta polega na zidentyfikowaniu wszystkich maksimumów lokalnych danego spektrum i poprowadzeniu przez nie stycznej zwanej kontinuum (ang. *continuum*; Clark i Roush, 1984). Normalizację krzywej tzw. *continuum removed* uzyskuje się, dzieląc wartości spektralne oryginalnej krzywej spektralnej przez wyznaczoną styczną (kontinuum) według wzoru:

$$R'_{(\lambda,i)} = \frac{R_{c(\lambda,i)}}{R_{(\lambda,i)}} \quad (2.28)$$

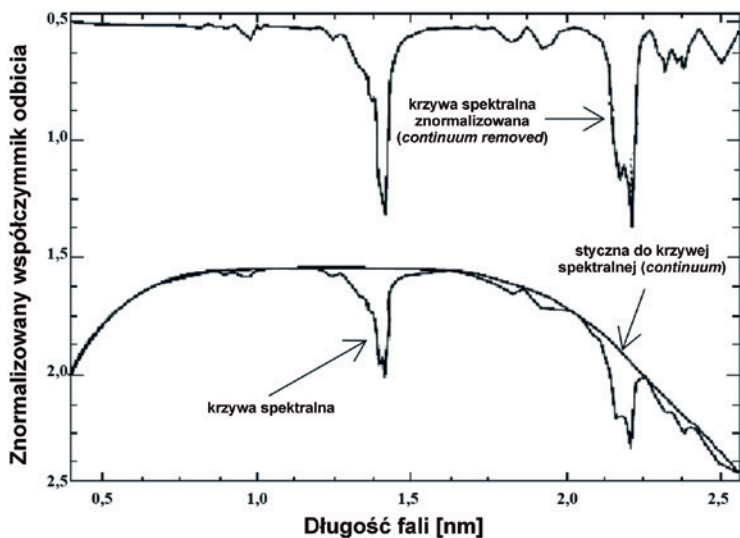
gdzie:

$R'_{(\lambda,i)}$ – wartość odbicia *continuum removed* dla długości fali

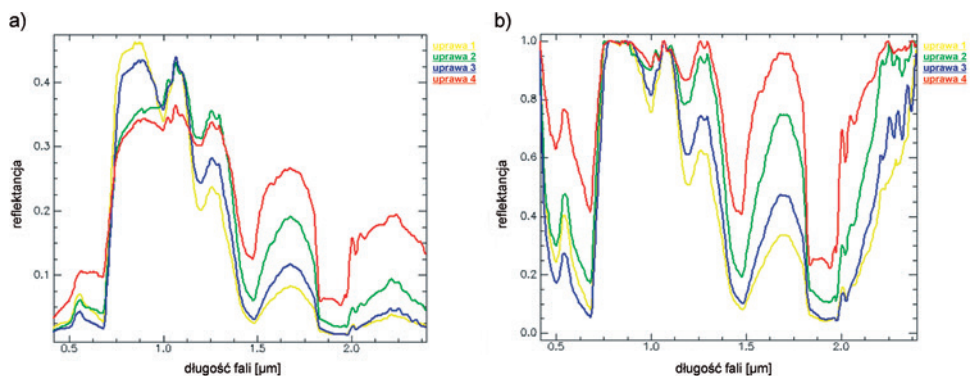
$R_{c(\lambda,i)}$ – wartość odbicia continuum dla długości fali

$R_{(\lambda,i)}$ – wartość odbicia spektrum dla długości fali

Transformacja do kontinuum pozwala na ujednoczenie pozyskanych w różny sposób krzywych spektralnych, a przez to umożliwia ich porównanie przez analizę głębokości pików absorpcyjnych (ryc. 2.39, 2.40).



Ryc. 2.39. Krzywa spektralna z wyznaczoną styczną (*continuum*) oraz krzywa spektralna znormalizowana (*continuum removed*) (źródło: Harris, 2020 – zmieniony)



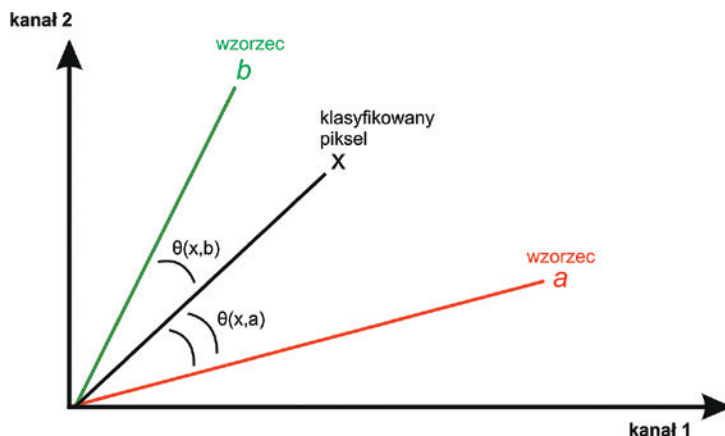
Ryc. 2.40. Przykład referencyjnych krzywych spektralnych (a) oraz krzywych referencyjnych po standaryzacji *continuum removed* (b)

Poniżej przedstawiono kilka wybranych metod wykorzystywanych w klasyfikacji danych hiperspektralnych.

Spectral Angle Mapping (SAM)

Spectral Angle Mapping (SAM) jest metodą automatycznego porównywania krzywych spektralnych uzyskanych z obrazu z krzywymi bibliotek spektralnych utworzonych na podstawie pomiarów terenowych, pomiarów laboratoryjnych i/lub czystych spektralnie krzywych obrazowych (tzw. *endmembers*; Kruse i in., 1993). Wartości odpowiedzi spektralnej dla piksela w n -kanałach można potraktować jako współrzędne wektora w przestrzeni n -wymiarowej (ryc. 2.41). W postaci wektora może również zo-

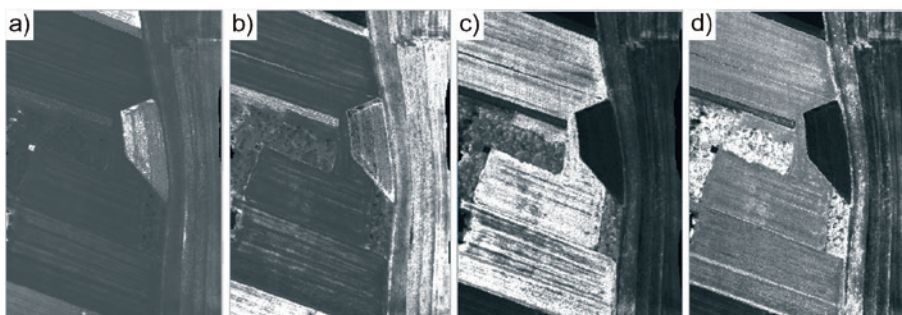
stać przedstawiona odpowiedź spektralna wzorca (w). Algorytm SAM oparty jest na porównaniu wektorów spektralnych dla każdego piksela (p) analizowanego obrazu z wektorami spektralnymi dla obiektów referencyjnych (w). Obliczany jest kąt (α) pomiędzy tymi wektorami. Ostateczna klasyfikacja następuje po porównaniu obliczonego kąta z określoną wartością graniczną.



Ryc. 2.41. Metoda SAM – zasada obliczania kąta (α) pomiędzy wektorami wzorca (w) i piksela (p) w przestrzeni n -wymiarowej

Metoda dopasowania krzywych spektralnych

Metoda dopasowania krzywych spektralnych (ang. *Spectral Feature Fitting*, SFF) to metoda wykorzystująca normalizację krzywej spektralnej za pomocą metody *continuum removed*. Procedura SFF polega na analizie porównawczej znormalizowanych krzywych: referencyjnej i krzywej z obrazu metodą najmniejszych kwadratów (Clark i in., 1990). W wyniku działania tej procedury uzyskuje się dwa obrazy: stopnia dopasowania (ryc. 2.42) i błędu dopasowania. Jasne obszary na obrazie stopnia dopasowania, które jednocześnie są ciemne na obrazie błędu dopasowania, mogą być interpretowane jako odpowiadające wzorcowi. Wartości stopnia dopasowania są w takim przypadku bliskie 1, a błędy bliskie 0. Występowanie wartości znacznie większych od 1 oznacza zupełnie rozbieżne charakterystyki wzorca i obrazu.



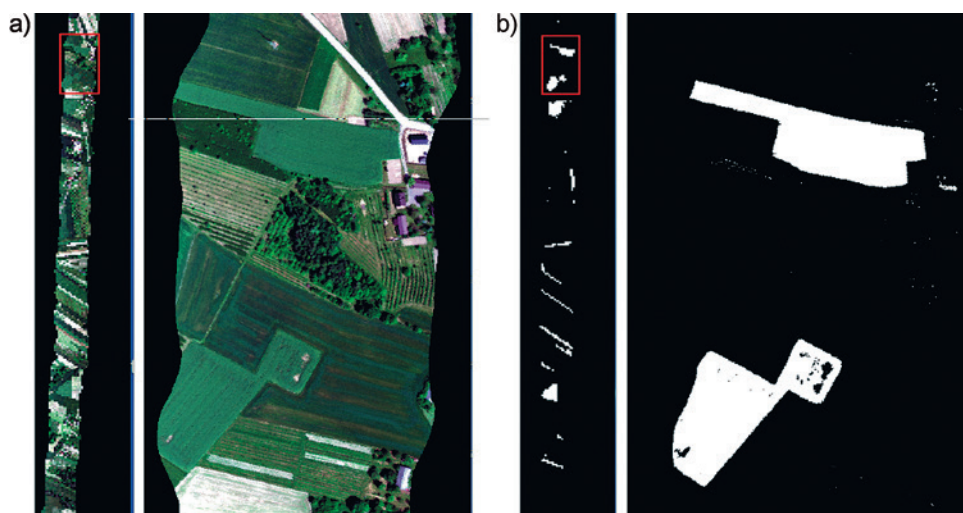
Ryc. 2.42. Przykład wyniku klasyfikacji metodą Spectral Feature Fitting (SFF) – obrazy stopnia dopasowania krzywych pikselowych do krzywych wzorcowych (kolor biały – 100% dopasowania, kolor czarny – 0% dopasowania): a) uprawa 1, b) uprawa 2, c) uprawa 3, d) uprawa 4

Metoda Matched Filtering

Metoda Matched Filtering (MF) jest jedną z metod analizy podpixelowej, w której dokonywana jest identyfikacja tylko tych obiektów, które zostały wybrane przez użytkownika jako przedmiot analizy (Boardman i in., 1995). Metoda MF pozwala na identyfikację zawartości szukanego obiektu za pomocą algorytmu częściowego rozmieszania spektralnego. Metoda ta maksymalizuje odpowiedź spektralną pochodzącą od krzywej wzorcowej i minimalizuje (zagłusza) odpowiedzi spektralne wszystkich obiektów stanowiących tło. Metoda MF umożliwia szybką detekcję specyficznych materiałów na podstawie porównania ich charakterystyk spektralnych z krzywymi wzorcowymi. Bardzo istotne jest to, że w sytuacji przeprowadzenia klasyfikacji za pomocą metody MF nie ma konieczności wykorzystania krzywych spektralnych dla pozostałych obiektów (tła) zarejestrowanych na obrazie (Harris, 2020). Obrazy wynikowe przedstawiają stopień dopasowania krzywych pikselowych do krzywych wzorcowych biblioteki spektralnej. Wartości pikseli w obrazie wynikowym są proporcjonalne do udziału w tworzeniu wartości poszczególnych pikseli przez te obiekty. Każdy piksel z wartością 0 lub mniejszą jest uznawany za tło.

Mixture Tuned Matched Filtering

Algorytm metody Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF) (Boardman, 1998) łączy metodę MF, czyli możliwość identyfikacji pojedynczego obiektu na podstawie jego charakterystyki spektralnej (bez konieczności wykorzystania wszystkich krzywych z biblioteki dla danej sceny) z jednoczesnym uwzględnieniem warunku, że wartość każdego piksela jest liniową kombinacją materiałów tworzących ten piksel. Dzięki temu metoda MTMF zwiększa możliwości rozpoznawania, tzw. fałszywych pozytywów, które często w metodzie MF błędnie wskazują na obecność wzorca w rzeczywistości niewystępującego w danym pikselu. Wynikiem metody jest zestaw dwóch obrazów dla każdego z wzorców: obraz dopasowania oraz obraz błędów. Pierwszy z nich zawiera piksele, których wartości przedstawiają szacunkowy udział wzorca w danym pikselu oraz stopień dopasowania jego spektrum do krzywej referencyjnej. Drugi z obrazów składa się z pikseli o wartościach fałszywie pozytywnych reprezentujących stopień prawdopodobieństwa zmieszania obiektu i tła. Jest to obraz obliczany na podstawie szumu i statystyki obrazu wejściowego. Wynik może być uznany za poprawny, jeżeli w wartości jasności piksela udział wzorca będzie większy od wartości uzyskanych dla tła (ryc. 2.43), natomiast dla obrazu błędów wartość piksela będzie niewielka.



Ryc. 2.43. a) Kompozycja barwna fragmentu obrazu hiperspektralnego (480 kanałów); b) w kolorze białym – wynik identyfikacji uprawy (rzepak ozimy) na podstawie automatycznej klasyfikacji metodą MTFM – stopień dopasowania krzywej wzorcowej 100%

2.3.3. Metody oparte na analizie obiektowej (GEOBIA)

Piotr Wężyk

Analiza obiektowa obrazu określana skrótem OBIA (Object Based Image Analysis) lub GEOBIA (Geographic OBIA) jest jedną z najbardziej innowacyjnych metod przetwarzania informacji obrazowej. W przeciwieństwie do klasycznej klasyfikacji tzw. pikselowej (ang. *pixel based*), w której analizie podlegają pojedyncze elementy obrazu (piksele) spełniające założone kryterium, statystyki ich cech spektralnych (jaskrawości, DN) – metoda GEOBIA analizuje obraz jako grupy (obiekty, segmenty) tworzone przez podobne do siebie piksele. W analizie OBIA nie wykorzystuje się w zasadzie informacji dotyczących pojedynczego piksela, ale tworzy się zaawansowane algorytmy automatycznie przeprowadzające segmentację (podział) warstwy rastrowej (np. pojedynczych kanałów spektralnych lub ich zestawów, a także warstw pochodnych). Algorytm segmentacji w swoim założeniu ma upodabniać swoje działanie do delineacji, jaką w tradycyjny sposób prowadziłby doświadczony operator podczas procesu interpretacji obrazu, posługując się różnymi barwnymi kompozycjami. Generowane przez algorytm segmenty są logiczne pod względem konceptualnym i znacznie lepiej odzwierciedlają obiekty świata rzeczywistego niż układy geometryczne pojedynczych pikseli (Benz i in., 2004; Aldred i Wang, 2007).

Zasada działania analizy OBIA utożsamiana jest ze współpracą oko – mózg, czyli procesami detekcji, rozpoznania i podejmowania decyzji na podstawie określonych cech obrazu, tj. bezpośrednich (np. kolor, kształt, wielkość, struktura, tekstura) oraz pośrednich (np. cień czy logicznych powiązań przestrzennych). Podejście do klasyfikacji w metodzie OBIA pozwala na przybliżenie algorytmicznego przetwarzania danych teledetek-

cyjnych do sposobu postrzegania obiektów na obrazie, czy też jednostek przestrzennych (np. krajobrazowych) przez ludzką percepcję. Dzięki zastosowaniu procesu segmentacji obrazu, a potem klasyfikacji uzyskanych segmentów, możliwe staje się intuicyjne tworzenie klas obiektów świata realnego, jakie zna i rozpoznaje operator (Blaschke i Strobl, 2001).

Dzięki metodzie OBIA nowo utworzony obiekt (segment) zawiera znacznie więcej użytecznych dla użytkownika informacji kontekstowych i logicznych niż pojedynczo sklasyfikowany piksel, co wydatnie podnosi jakość ostatecznych wyników klasyfikacji. Możliwość integracji cech spektralnych, geometrycznych (np. wysokości względnej z danych LiDAR), semantycznych, czy też danych kontekstowych w tej metodzie, pozwala w pełni wykorzystać wartość wysokorozdzielczych i wielospektralnych zobrazowań satelitarnych w połączeniu z innymi danymi teledetekcyjnymi (np. modele wysokościowe, rozkładu temperatury, opadu etc.) oraz danymi rastrowymi i wektorowymi GIS (np. mapy sieci drogowej, obrysów budynków z EGiB, etc.).

Wyniki interpretacji wzrokowej prowadzonej przez eksperta na obrazach teledetekcyjnych są najdokładniejsze, ale jednocześnie zawsze są obciążone jego subiektywnością. Sposób ten jest jednak niezmiernie pracochłonny i jest to najdroższa ze wszystkich znanych metod klasyfikacji obrazu. Przy obecnie istniejących oczekiwaniach dotyczących tempa przetworzeń lawinowo narastających ilości obrazów i danych teledetekcyjnych, drogę wzrokowej fotointerpretacji, niestety, należy ograniczyć do jednostkowych opracowań na niewielkich obszarach lub stosować w procesie kontroli jakości wyników klasyfikacji.

Metoda OBIA pozwala na połączenie zalet tradycyjnej eksperckiej interpretacji obrazów, z większym obiektywizmem automatycznej i szybkiej analizy danych, ściśle przestrzegającej zdefiniowanych reguł (Blaschke i in., 2014).

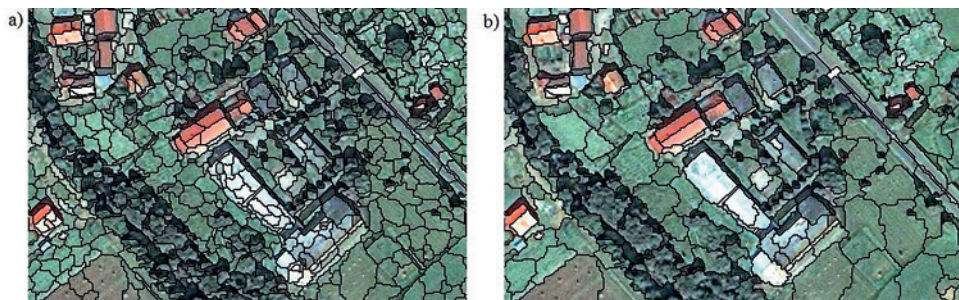
Do głównych atutów analizy GEOBIA należy zaliczyć:

- łączenie zalet ludzkiej fotointerpretacji obrazów, z większym obiektywizmem i tempem automatycznej interpretacji (delineacji) danych obrazowych,
- możliwość analizowania relacji pomiędzy obiektami w świecie rzeczywistym,
- możliwość przetwarzania (segmentacji) na różnych poziomach (segmentacja wielopoziomowa),
- możliwość tworzenia hierarchicznej sieci powiązań pomiędzy poziomami,
- kontrolę relacji topologicznych na analizowanym poziomie oraz w pionie (pomiędzy poziomami) hierarchii segmentów, co oznacza, że każdy segment obrazu posiada spójną granicę ze swym sąsiadem,
- podniesienie jakości analizy OBIA przez zdolność algorytmu do uczenia się,
- możliwość integracji wieloźródłowych i wieloskalowych danych przestrzennych (np. warstw wektorowych czy chmur punktów LiDAR),
- wykorzystywanie tzw. logiki rozmytej (ang. *fuzzy logic*) co oznacza, że segmenty mogą przyjmować wartości w zakresie od $<0;1>$ a nie tylko być równym 0 lub 1 (jak w systemie binarnym),
- uniwersalność – rozumiana jako możliwość przygotowanego zbioru poleceń (ang. *rule-set*) na innym podobnym zbiorze danych (np. kolejnych obrazach tego samego terenu lub nawet w innych miejscach przy jednakowym zestawie warstw wejściowych),
- możliwość automatycznej segmentacji i klasyfikacji obrazu bez tworzenia dodatkowych pól treningowych oraz pól testowych, z wykorzystaniem wyłącznie specyficznych własności segmentów/obiektów (np. wskaźników roślinności czy parametrów geometrii obiektów).

Analiza wielospektralnych zobrazowań satelitarnych metodą GEOBIA składa się z dwóch podstawowych etapów, jakimi są: segmentacja obrazu oraz klasyfikacja powstających segmentów. Od strony technicznej proces segmentacji polega na grupowaniu pikseli spełniających zdefiniowane warunki w większe segmenty (grupy pikseli). Podczas tego procesu minimalizowana jest wartość heterogeniczności wewnątrz wynikowych obiektów, co oznacza dążenie do jak największego wewnętrznego podobieństwa pikseli tworzących te segmenty. Przed połączeniem dwóch obiektów każdorazowo obliczane są nowe wartości heterogeniczności, będącej rezultatem fuzji i jeżeli nastąpi przekroczenie z góry założonego progu (zdefiniowanego parametru skali), połączenie segmentów nie zachodzi. Segmentacja obrazu powinna być prowadzona przy spełnieniu następujących warunków:

- segmenty muszą pokrywać cały zakres analizowanej sceny satelitarnej,
- segmenty nie mogą na siebie nachodzić ani nie może być miejsc niepokrytych segmentami (kontrola poprawności topologicznej),
- segmenty są wewnętrznie homogeniczne pod względem cechy, na podstawie której zostały wyodrębnione,
- pomiędzy segmentami występuje wyraźna, zdefiniowana przez operatora różnica homogeniczności (określonej cechy/cech),
- powierzchnia pojedynczych segmentów nie może przekraczać zdefiniowanej przez operatora wartości (parametr skali).

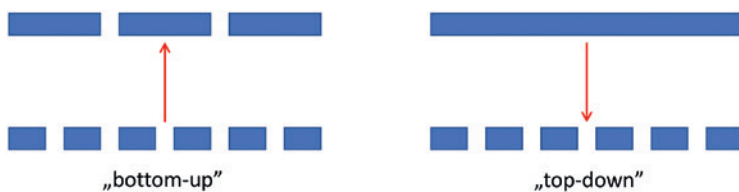
Segmenty uzyskane w trakcie procesu delineacji obrazu zawierają dużo informacji kontekstowych, co znacznie ułatwia ich interpretację oraz podnosi jakość ostatecznego produktu (ryc. 2.44).



Ryc. 2.44. Przykład wyniku procesu segmentacji obrazu WorldView-2 (GSD 0,5m pansharpened) z zastosowaniem parametru skali wynoszącej 8 (a) oraz 15 (b)

Proces segmentacji obrazu jest niewątpliwie trudnym krokiem analizy wymagającym udziału doświadczonego operatora odpowiedzialnego za odpowiedni dobór warstw rastrowych, wektorowych (w tym chmur punktów LiDAR) oraz dobranie parametrów (wagi: kształt/kolor oraz skala). Wyróżnia się dwa podstawowe kierunki segmentacji (ryc. 2.45):

- grupowanie mniejszych elementów w większe (ang. *bottom-up*),
- dzielenie elementów większych na mniejsze (ang. *top-down*).



Ryc. 2.45. Kierunki segmentacji stosowane w procesie GEOBIA
(źródło: Bajorek-Zydroń i Węzyk (red.), 2016)

W analizie GEOBIA można rozróżnić następujące typy segmentacji obrazu:

- segmentacja metodą tzw. szachownicy (ang. *chessboard segmentation*). Wydaje się najmniej skomplikowaną metodą segmentacji działającą na zasadzie podziału obrazu na obiekty o kształcie kwadratu, o boku definiowanym przez użytkownika;
- segmentacja metodą drzewa czwórkowego (ang. *quadtree based segmentation*) tworzy obiekty o kształcie wieloboku regularnego, których rozmiar jest określony przez typ obiektów. Poszczególne obiekty są tworzone przez dzielenie większych obiektów na cztery mniejsze, aż do momentu, gdy wszystkie wynikowe obiekty znajdą się w górnej granicy dozwolonej zmienności. Wartość ta definiowana jest za pomocą parametru skali segmentacji;
- segmentacja w wielu rozdzielczościach (ang. *multiresolution segmentation*) należy do najbardziej uznanych metod, w której obiekty (zaczynając od pojedynczych pikseli) są grupowane do momentu osiągnięcia przez nie wyznaczonego górnego progu definiowanego parametrem skali, czyli zakładaną maksymalną wielkością powstającego segmentu;
- segmentacja różnic spektralnych (ang. *spectral difference segmentation*) bazuje na algorytmie wykorzystywanym do łączenia wcześniej uzyskanych obiektów w celu uzyskania obiektów końcowych;
- segmentacja wieloprogowa (ang. *multi-threshold segmentation*) wykorzystuje algorytm do podziału domeny obiektów obrazu i klasyfikuje powstałe obiekty na podstawie zdefiniowanego progu wartości pikseli. Ten próg może być zdefiniowany przez użytkownika lub może być automatycznie dostosowywany, gdy jest stosowany w połączeniu z algorytmem automatycznego progu;
- segmentacja wododziałowa (ang. *watershed segmentation*) zaliczana jest do typu delineacji krawędziowej, a jej pochodzenie ma silny związek z analizami morfometrycznymi na modelach wysokościowych (wykrycie najniższych bezodpływowych zagłębień oraz krawędzi grzbietów i kierunku spływu). Choć metoda ta uważana jest za jedno z najlepszych narzędzi segmentacji obrazu, to często nie zapewnia uzyskania dokładnych wyników (szczególnie dla obiektów o słabym kontraście). Otrzymane na drodze segmentacji obiekty odzwierciedlające np. poszczególne klasy pokrycia terenu (np. lasy, pola, drogi, budynki, jeziora itp.) składają się z grup pikseli o zbliżonych wartościach spektralnych i/lub przestrzennych oraz mają przypisanych wiele cech, takich jak wartości zmienności: kształtu, tekstury, hierarchii, rozmiaru, stosunku powierzchni do obwodu czy też relacji z innymi obiektami. Zdefiniowane odpowiednio klasyfikatory pozwalają na przeprowadzenie etapu klasyfikacji, czyli procesu selekcji i przypisywania

segmentów do poszczególnych klas pokrycia i użytkowania terenu (np. budynków, lasów, dróg, wody i innych).

Do niewątpliwych wad klasyfikacji obiektowej (GEOBIA), przy wszystkich jej zaletach, należy wymóg posiadania przez operatora wyższego poziomu wiedzy merytorycznej z zakresu teledetekcji (np. klasyfikacji zbiorowisk roślinnych). W procesie GEOBIA to operator podejmuje arbitralne decyzje o wartościach wprowadzanych parametrów (np. o poziomie segmentacji, definiowaniu hierarchii klas, doborze klasyfikatorów, progu wartości zmiennych usuwania granic pomiędzy segmentami itp.).

Klasyfikacja GEOBIA umożliwia wykorzystanie danych obrazowych z zakresu optycznego (np. wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych), innego typu danych rastrowych (np. pochodnych z obrazów kanałów spektralnych, jak mapy wskaźników roślinności np. NDVI) oraz warstw wektorowych GIS (np. mapy działek ewidencyjnych czy dróg z baz danych referencyjnych), jak również modeli wysokościowych (rastrowych) oraz chmur punktów LiDAR. Te ostatnie są szczególnie użyteczne w procesie klasyfikacji, jeśli wykorzystujemy dane z lotniczego skanowania laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning*, ALS). Chmury punktów LiDAR dają możliwość wygenerowania warstw rastrowych pochodnych, takich jak odchylenia standardowego wysokości, liczby kolejnych ech sygnału czy poszczególnych percentyli, które przyczyniają się do poprawy procesu segmentacji i późniejszej klasyfikacji powstających obiektów. Doskonałym przykładem jest kartowanie tzw. zielonych dachów w zabudowie miejskiej i często występujący problem z ich klasyfikacją na wielospektralnych obrazach VHR. Właśnie wartość znormalizowanej wysokości na podstawie ALS LiDAR daje możliwość ich poprawnej detekcji. Dotychczas opublikowane prace wskazują, że klasyfikacja metodą obiektową przeprowadzana na cyfrowych, wysokorozdzielczych i wielospektralnych (R, G, B, NIR) ortofotomapach lotniczych, wspierana modelami wysokościowymi, prowadzi do uzyskania znacznie dokładniejszych wyników (Rottensteiner i in., 2005; Yu i in., 2010) szczególnie w przypadku trudno rozróżnialnych, bez udziału operatora, klas pokrycia terenu.

Analiza obiektowa GEOBIA stosowana była w przeszłości najczęściej do opracowywania map pokrycia i użytkowania terenu z wykorzystaniem danych o bardzo wysokiej rozdzielczości (Lewiński, 2006; Wężyk i in., 2007), ale w ostatnich latach również o średniej rozdzielczości jak Sentinel-2 (Osmólska i Hawryło, 2018). Analiza wykonywana cyklicznie na danym terenie (np. dla obszarów leśnych, aglomeracji miejskiej czy województwa) pozwala na określenie zmian pokrycia terenu na przestrzeni lat (de Kok i in., 2005; Wężyk i in., 2014, 2018). W ramach projektu MONIT-AIR analiza GEOBIA wykorzystana została do opracowania map pokrycia terenu miasta Krakowa i jego okolic na podstawie wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych WorldView-2, danych fotolotniczych (wysokorozdzielcze lotnicze ortofotomapy cyfrowe), chmur punktów z lotniczego skanowania laserowego ALS (ISOK) oraz danych wektorowych (bazy GIS, UM Kraków). Otrzymane wyniki pozwoliły na przeprowadzenie analiz przestrzennych GIS (np. udziału poszczególnych typów zieleni miejskiej w klasach LULC) zarówno dla całego obszaru administracyjnego, jak i poszczególnych dzielnic Krakowa (Bajorek-Zydroń i Wężyk, 2016).

2.3.4. Analiza dokładności klasyfikacji obrazu

Beata Hejmanowska, Anna Żądło

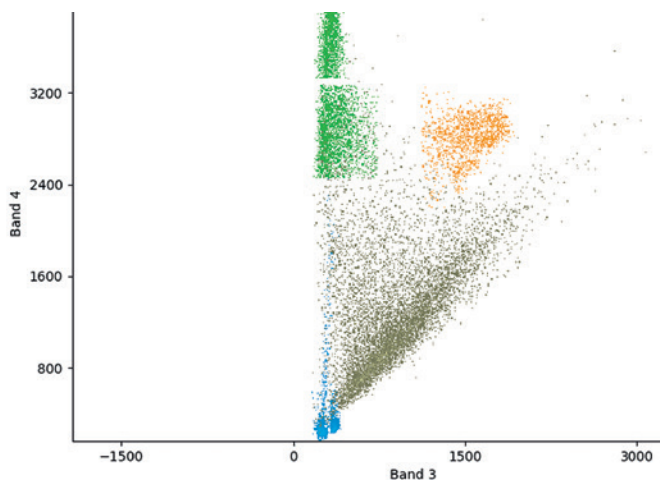
W wyniku przetwarzania obrazu, niezależnie od zastosowanej metody, uzyskuje się obraz sklasyfikowany, zgodnie z przyjętymi regułami. Przypisanie do klas nie oznacza, że obszar faktycznie należy do danej klasy. Użytkownik korzystający z wyniku klasyfikacji powinien mieć informacje o jej wiarygodności.

W przypadku klasyfikacji nadzorowanej pola treningowe służą do uczenia algorytmu klasyfikującego, a pola testowe do weryfikacji, czyli analizy dokładności wyniku klasyfikacji, przy czym jest ona różnie prowadzona w zależności od użytego oprogramowania. W podejściu wykorzystywanym od lat i zaimplementowanym w takich programach jak ENVI, PCI Geomatica, QGIS Semi-Automatic Classification i innych, użytkownik ma pełną kontrolę nad zestawem pól treningowych i testowych, ponieważ są one definiowane odrębnie. Inaczej jest w programie SNAP, w którym niezależnie od metody (*Maximum Likelihood* czy *Random Forest*) podaje się jeden zestaw wzorców oraz liczbę próbek określających liczbę pikseli uczących i jednocześnie taką samą liczbę pikseli testowych. Oba zestawy są losowo wybierane ze zbioru pikseli wzorcowych i użytkownik nie ma nad tym nie tylko kontroli, ale nawet wiedzy, które piksele zostały wybrane. Jest to podejście stosowane w metodach uczenia maszynowego. Podobnie analiza dokładności zaimplementowana w SNAP odbiega od podejścia znanego z innych programów wykorzystywanych w teledetekcji. Rozwiązanie dostępne w programie SNAP bazuje na podejściu wykorzystywanym, zwykle przy ocenie skuteczności testów, np. medycznych, gdzie podstawowymi parametrami są czułość i swoistość testu diagnostycznego (ang. *sensitivity and specificity*). Podejście to jest stosowane w uczeniu maszynowym i opiera się na wielkościach: TP – true positive, TN – true negative, FP – false positive, FN – false negative, z których obliczyć można np. dokładność i precyzję (ang. *accuracy, precision*) oraz procentową poprawność predykcji. Ze względu na losowanie pikseli treningowych i testowych w SNAP, a nie wykorzystanie wszystkich pikseli treningowych i testowych, jak to ma miejsce w powszechnie używanych programach do teledetekcji, zarówno wynik klasyfikacji, jak i analiza dokładności mogą znacząco różnić się od wyniku uzyskanego w innym oprogramowaniu.

Poniżej zaprezentowano tradycyjny sposób określania dokładności wyniku klasyfikacji, ponieważ jest on zaimplementowany w większości programów wykorzystywanych w teledetekcji. Analizując wyniki uzyskane w oprogramowaniu SNAP, należy zwracać uwagę na sposób klasyfikacji i analizy dokładności oraz wykorzystane parametry statystyczne. SNAP nie dostarcza tak pełnej informacji na temat dokładności jak inne programy, np. brak jest tzw. macierzy błędów (ang. *confusion matrix*), której nie da się obliczyć z wielkości TP – true positive, TN – true negative, FP – false positive, FN – false negative. Niektóre parametry dokładności są podane, choć noszą inne nazwy, np. całkowita dokładność klasyfikacji (ang. *overall accuracy*), która jest równa procentowej poprawności predykcji. Niektóre inne parametry można też obliczyć we własnym zakresie.

Dokładność klasyfikacji jest zależna m.in. od doboru pól treningowych, który wpływa na jakość wzorców poszczególnych klas. Sprawdzenie poprawności tych wzorców wykonać można za pomocą wykresów punktowych (ang. *scatter plot*). Na obu osiach przedstawione są wartości jasności w dwóch kanałach spektralnych, a wykres prezentuje rozrzut i częstość występowania pikseli z poszczególnych pól treningowych. Gdy

zakresy poszczególnych klas na siebie zachodzą, można się spodziewać niższej dokładności klasyfikacji. Na rysunku poniżej (ryc. 2.46) przedstawiono rozrzut pikseli pól treningowych z czterech klas (woda, gleba, roślinność i zabudowania) w kanale czerwonym (R) i podczerwonym (NIR).



Ryc. 2.46. Wykres punktowy pikseli reprezentujących wybrane klasy w kanale czerwonym i podczerwieni (woda – kolor niebieski, zabudowa – kolor szary, roślinność – kolor zielony, gleba odkryta – kolor brązowy)

Tradycyjna analiza dokładności wyniku klasyfikacji wykorzystuje macierz błędów. W macierzy tej porównywane są wyniki klasyfikacji z danymi o użytkowaniu terenu, które można uznać za bezbłędne (pola testowe).

Pola testowe powinny:

- być wybierane bardzo starannie – jeśli to możliwe poparte informacją z wywiadu terenowego, analizą dokładnych map lub zdjęć satelitarnych o wyższej rozdzielczości z tego samego okresu,
- być rozmieszczone równomiernie na obszarach klas pokrycia terenu – być reprezentatywne dla danej klasy obiektów terenowych,
- znajdować się poza obszarami pól treningowych wykorzystanych wcześniej do wykonania klasyfikacji.

Dobłą metodą jest wygenerowanie losowych pikseli i przypisanie im etykiet klas na podstawie fotointerpretacji. Innym sposobem jest ręczne zaznaczenie poligonów dla każdej klasy. Kolejnym krokiem jest wygenerowanie z obrazu przedstawiającego wynik klasyfikacji i obrazu zawierającego pola testowe tzw. macierzy krzyżowej (ang. *cross matrix*), na której w każdym pikselu są zapisane informacje z obu obrazów (ryc. 2.47). Dodatkowo można utworzyć tabelę (tabela 2.8) zawierającą informację o liczbie pikseli należących do poszczególnych klas macierzy krzyżowej.

B	B	C	D
A	A	C	D
A	A	C	C
B	C	D	A

S	S	S	S
R	R	S	S
T	R	S	T
T	R	T	T

BS	BS	CS	DS
AR	AR	CS	DS
AT	AR	CS	CT
BT	CR	DT	AT

Ryc. 2.47. Macierz krzyżowa (ang. *cross matrix*)

Tabela 2.8. Tabela przecięć – tabela zawierająca informacje na temat liczby pikseli należących do klas macierzy krzyżowej

dziedzina	mapa 1	mapa 2	liczba pikseli
$A \times R$	A	R	3
$A \times T$	A	T	2
$B \times S$	B	S	2
$B \times T$	B	T	1
$C \times R$	C	R	1
$C \times S$	C	S	3
$C \times T$	C	T	1
$D \times S$	D	S	2
$D \times T$	D	T	1

Macierz błędów (tabela 2.9) tworzona jest na podstawie tabeli przecięć. W kolumnach ujmuje się klasy przyjęte w klasyfikacji, natomiast wiersze to klasy pól weryfikacyjnych ułożone w takiej samej kolejności. Na przekątnej znajduje się liczba pikseli zaklasyfikowanych do tej samej klasy podczas procesu klasyfikacji i w polach weryfikacyjnych. Wartości poza przekątną reprezentują liczbę pikseli błędnie sklasyfikowanych. Elementy w wierszach poza przekątną reprezentują piksele z pól weryfikacyjnych, które zostały wykluczone z klas. Błędy te nazywane są błędami pominięcia (ang. *errors of omission*). Suma pikseli w jednym wierszu daje liczbę wszystkich pikseli z jednej klasy wyznaczoną z pól weryfikacyjnych. Analizowane elementy w kolumnach poza przekątną reprezentują piksele z pól weryfikacyjnych innych klas, które zostały uwzględnione w danej klasie klasyfikacji. Błędy te nazywane są błędami nadmiaru (ang. *errors of commission*). Suma pikseli w jednej kolumnie daje liczbę wszystkich pikseli, które zostały zaklasyfikowane do danej klasy w procesie klasyfikacji.

Według przykładu poniżej (tabela 2.9), 440 to liczba pikseli, która została przyporządkowana jako klasa „las” w procesie klasyfikacji oraz oznaczona jako „las” w obszarach pól weryfikacyjnych. Jest to liczba poprawnie zaklasyfikowanych pikseli w klasie „las”. Błędy pominięcia, to np. 30 pikseli, które zostały wykluczone z klasy „las” i przyporządkowane do klasy „grunt odkryty”. Błędy nadmiaru, to np. 100 pikseli zaznaczonych w polach weryfikacyjnych jako „zabudowa”, ale w procesie klasyfikacji przypo-

rządki jako „grunt odkryty”. Dla klasy „las” w polach weryfikacyjnych określono 530 pikseli, w wyniku klasyfikacji otrzymano 490 pikseli, z czego 440 w tych samych polach co pola weryfikacyjne.

Dodatkową klasę reprezentuje kolumna „nie skl.” zawierająca informacje o pikselach, które nie zostały sklasyfikowane.

Tabela 2.9. Macierz błędów (ang. *confusion matrix*)

		wynik klasyfikacji							ACC
		las	zadrzewienia	uprawy	zabudowa	grunt odkryty	woda	nie skl.	
wartości prawdziwe	las	440	40	0	0	30	10	10	0,83
	zadrzewienia	20	220	0	0	40	10	20	0,71
	uprawy	10	10	210	10	50	10	60	0,58
	zabudowa	20	0	20	240	100	10	40	0,56
	grunt odkryty	0	0	10	10	230	0	10	0,88
	woda	0	20	0	0	0	240	10	0,89
	REL	0,90	0,76	0,88	0,92	0,51	0,86		

Na podstawie macierzy błędów możliwe jest określenie parametrów opisujących dokładność klasyfikacji:

- całkowita dokładność klasyfikacji (ang. *Overall Accuracy*), która jest określana jako stosunek liczby pikseli sklasyfikowanych poprawnie (suma elementów na przekątnej) do liczby pikseli, które uwzględniono w ocenie dokładności (suma elementów w polach weryfikacyjnych). Dokładność klasyfikacji zawiera się w przedziale ufności zależnym od liczby pikseli weryfikacyjnych;
- współczynnik Kappa (ang. *kappa coefficient*) określający łączny błąd klasyfikacji i stopień zgodności pomiędzy porównywanymi obrazami. Przyjmuje wartość 0–1, gdzie 1 oznacza pełną zgodność, a 0 – zgodność na poziomie takim, jaki powstałby dla losowego rozłożenia danych;
- dokładność producenta (ang. *producer’s accuracy*) nazywana również po prostu „dokładnością”, która jest określana dla każdej klasy, jako stosunek prawidłowo sklasyfikowanych pikseli danej klasy (wartość na przekątnej) do sumy wszystkich pikseli tej klasy w polach weryfikacyjnych (sumy wiersza). W tabeli 2.9 przedstawiona jest jako kolumna ACC. Średnia wartość dokładności producenta liczona jest jako średnia z uzyskanych wartości dokładności każdej klasy;
- dokładność konsumenta (ang. *user’s accuracy*) nazywana także „wiarygodnością” – określana jest dla każdej klasy jako stosunek poprawnie sklasyfikowanych pikseli danej klasy (wartość na przekątnej) do liczby wszystkich pikseli danej klasy uzyskanych w wyniku klasyfikacji (sumy kolumn). W tabeli 2.9 przedstawiona jest jako wiersz REL. Średnia wartość dokładności konsumenta liczona jest jako średnia z uzyskanych wartości dla każdej klasy.

Informacje, jakie zostaną uzyskane z analizy macierzy błędów, mogą być użyte w celu poprawy procesu klasyfikacji, np. do ponownego określenia niektórych pól treningowych.

2.4. Inne metody pozyskiwania informacji z obrazów

Beata Hejmanowska

W niniejszym rozdziale zostały opisane odrębnie modele regresji oraz analizy serii wieloczasowych ze względu na to, że są one powszechnie stosowane w przypadku wykorzystywania obrazów teledetekcyjnych w monitoringu (określonych liczbowo) parametrów środowiska (np. zawartości chlorofilu w roślinach, czy w zbiornikach wodnych). W zastosowaniach regresyjnych często stosuje się podejście empiryczne i bazuje na analizie zależności pomiędzy wartościami jasności pikseli lub wybranymi wskaźnikami teledetekcyjnymi, a wartościami wielkości fizykochemicznych, mierzonymi bezpośrednio w terenie. Z kolei kilkudziesięcioletnia historia satelitarnego obrazowania Ziemi pozwala na szerokie analizy zmian zachodzących na powierzchni Ziemi przez wykorzystanie tzw. serii wieloczasowych.

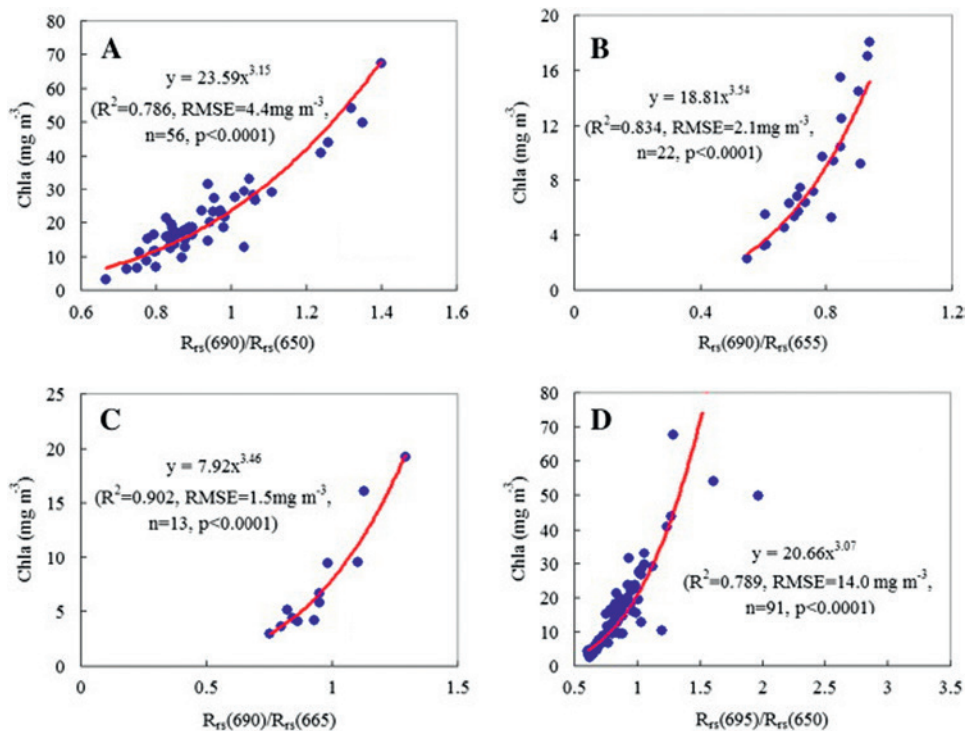
2.4.1. Metody wykorzystujące modele regresji

Beata Hejmanowska, Jarosław Jasiewicz

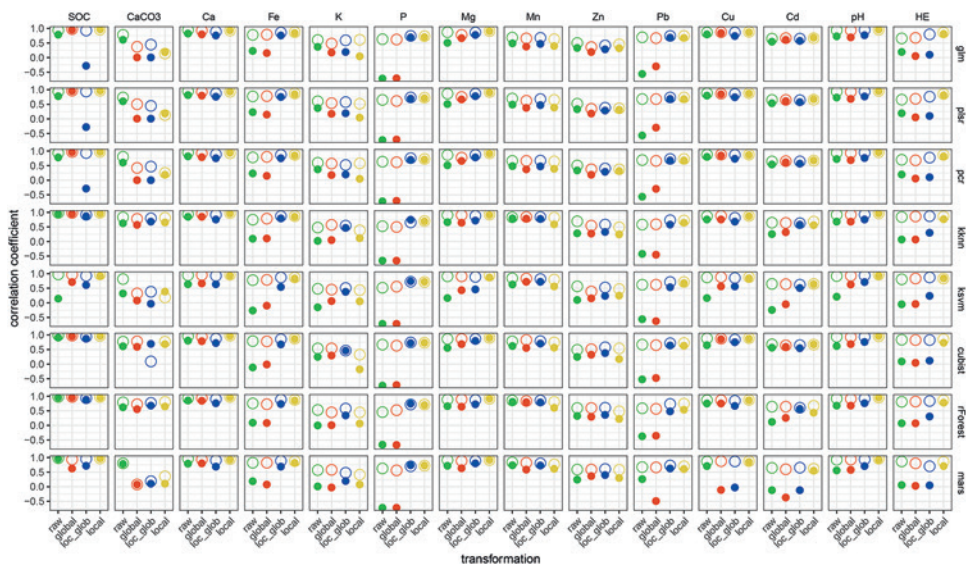
Analiza regresji polega na poszukiwaniu zależności pomiędzy zmiennymi, czego wynikiem jest zwykle funkcja, która opisuje tę zależność. Przykładami zastosowania metody regresji jest predykcja zawartości chlorofilu w organizmach żyjących w wodzie, wybranych wskaźników odżywczych w glebie czy wilgotności gleby – na podstawie punktowych pomiarów terenowych i oznaczeń laboratoryjnych. Analizę regresji możemy przeprowadzić manualnie, dobierając odpowiedni typ funkcji dopasowania (ryc. 2.48). Na podstawie pomiarów bezpośrednich, w tym przypadku chlorofilu i wskaźników roślinności zdefiniowanych jako ilorazy odbicia spektralnego w różnych zakresach spektralnych (odpowiednio: 660/650, 660/655, 660/665 i 695/650 nm), można przeprowadzić analizę regresji, wybrać najlepsze dopasowanie i ostatecznie przeliczyć wartość wskaźnika każdego piksela obrazu, uzyskując w ten sposób zawartość chlorofilu.

Można ten proces przeprowadzić automatycznie, wykorzystując techniki uczenia maszynowego (ryc. 2.49). W tym przypadku program wykonuje wielokrotne operacje dopasowania i wykorzystując właściwość samouczenia, sam dobiera najlepszą funkcję i parametry dopasowania. Na rycinie (ryc. 2.49) przedstawiono przykłady skuteczności predykcji wartości wskaźników odżywczych (zawartość węgla organicznego SOC (*Soil Organic Carbon*), CaCO_3 , Ca, Fe i inne) w glebie dla różnych metod regresji (*glm* – *generalized linear model*, *plsr* – *principal component multiple regression*, *pcr* – *principal component regression* i inne) i różnych metod transformacji danych (dane nieprzetworzone – *raw*, transformacja globalna, lokalna i mieszana – *loc_glob*).

W 2020 roku, na potrzeby monitorowania jakości wód, pojawiły się dwie aplikacje internetowe: Se2WaQ (Sentinel-2 Water Quality Script, wersja 1, 31.01.2020) (Se2WaQ, 2020) oraz Ulyssys Water Quality Viewer (UWQV). Aplikacje mają formę skryptów, które mogą być uruchamiane na platformach: EO-Browser i Sentinel-Hub Playground, zostały napisane w otwartym kodzie i udostępniają empiryczne wzory obliczania różnych parametrów wody, a mianowicie zawartości Chl_a , cyjanobakterii, kolorowej rozpuszczonej materii organicznej, rozpuszczonego organicznego węgla i parametru określającego kolor wody.



Ryc. 2.48. Badanie zawartości chlorofilu w wodzie dla różnych zbiorników – analiza regresji nieliniowej (źródło: Sun i in., 2014)



Ryc. 2.49. Przykłady skuteczności predykcji wartości wskaźników odżywczych w glebie dla różnych metod regresji i różnych metod transformacji danych: im znaczniki znajdują się wyżej na osi, tym metoda skuteczniejsza (źródło: Jasiewicz i in.)

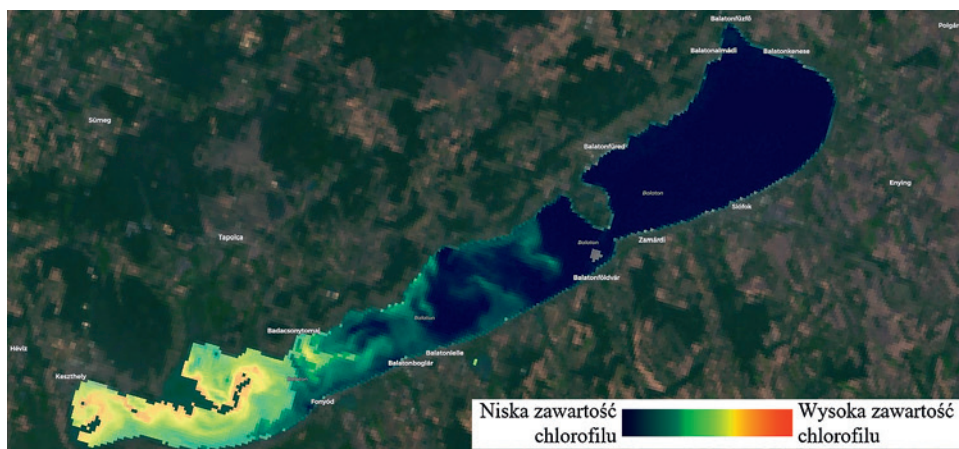
Przykładowo zawartość chlorofilu w wodzie jest w aplikacji Se2WaQ obliczana z wykorzystaniem kanałów Sentinel-2 (B03 oraz B01) na podstawie następującego wzoru empirycznego:

$$Chl_a = 4,26 \cdot \left(\frac{B03}{B04} \right)^{3,94} \quad (2.29)$$

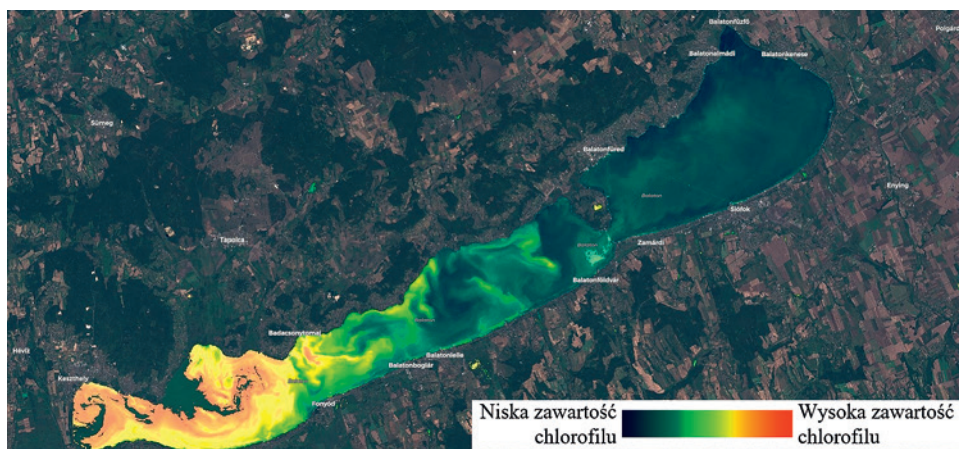
gdzie:

B03 i *B01* – kanały Sentinel-2.

W aplikacji UWQV obliczenia zawartości chlorofilu wykonywane są na podstawie innych wzorów i kanałów Sentinel-2 oraz przy wykorzystaniu obrazów Sentinel-3. Przykładową mapę rozkładu chlorofilu z 5 września 2019 roku utworzoną na bazie obrazu Sentinel-3 zaprezentowano na rycinie (ryc. 2.50), a z wykorzystaniem obrazu Sentinel-2 na rycinie (ryc. 2.51). Autorami skryptu UWQV są Węgrzy, dlatego Jezioro Balaton zostało przyjęte do testowania w pierwszej kolejności. Warto zauważyć wysokie stężenia chlorofilu w wodzie Balatonu.



Ryc. 2.50. Rozkład stężeń chlorofilu w wodach jeziora Balaton (5 września 2019, Sentinel-3)



Ryc. 2.51. Rozkład stężeń chlorofilu w wodach jeziora Balaton (5 września 2019, Sentinel-2)

Znane są również badania krajowe dotyczące wykorzystania teledetekcji, w tym obrazów hiperspektralnych, do określania wybranych parametrów fizyko-chemicznych wód (np. Osińska-Skotak, 2014; Jarocińska i in., 2015). Przykładowa mapa chlorofilu (Chl_a [mg/m^3]), uzyskana na podstawie lotniczych obrazów hiperspektralnych ze skanera AISA Eagle i wzoru empirycznego (Jarocińska i in., 2015, za: Osińska-Skotak, 2010):

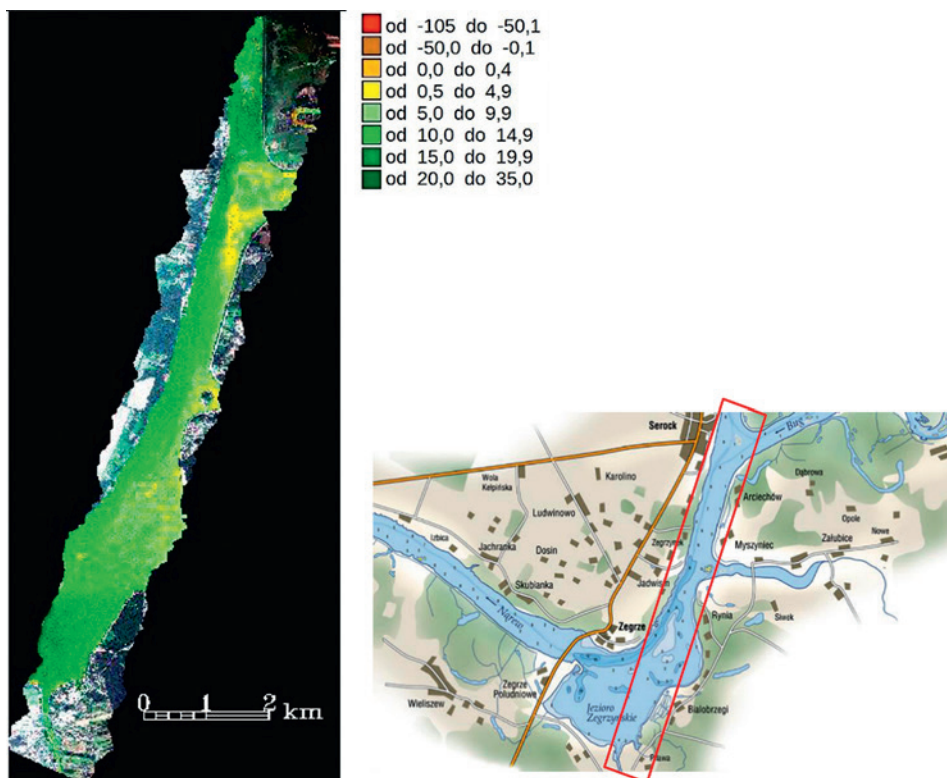
$$Chl_a = -51 \cdot \frac{R(699:705)}{R(670:777)} + 69 \quad (2.30)$$

gdzie:

$R(699:705)$ – współczynnik odbicia w zakresie fal: 699–705 nm,

$R(670:777)$ – współczynnik odbicia w zakresie fal: 670–777 nm,

znajduje się na rycinie (ryc. 2.52).



Ryc. 2.52. Rozkład chlorofilu w obrębie fragmentu Jeziora Zegrzyńskiego (Jarocińska i in., 2015, za: Osińska-Skotak, 2010)

Wykorzystanie hiperpektralnych obrazów lotniczych pozwala na uzyskanie wysokiej rozdzielczości przestrzennej, spektralnej i określanie parametrów różnych komponentów środowiska (np. wód), ale stanowi każdorazowo duże przedsięwzięcie i jest nieporównywalne z możliwością wykorzystania darmowych obrazów satelitarnych. Aplikacja internetowa Ulyssys Water Quality Viewer (UWQV) pozwala na śledzenie zmian chlorofilu wód w czasie, a ograniczeniem jest tylko zachmurzenie. Przykładowa mapa rozkładu chlorofilu

w wodzie Jeziora Zegrzyńskiego utworzona w aplikacji UWQA na podstawie obrazów Sentinel-2, zarejestrowanych 5 września 2019 roku znajduje się na rysunku (ryc. 2.53). Warto zauważyć znacznie mniejszą zawartość chlorofilu w porównaniu do Jeziora Balaton na Węgrzech, które jest bezodpływowe.

Jako przykład rozwiązania krajowego w tym zakresie, wykorzystującego obrazy Sentinel-2, można podać aplikację opracowaną w ramach projektu ESA – Monitoring jakości wody dla zbiorników śródlądowych (ang. *Automated Method for Measuring Eutrophication of Inland Water Using Remote Sensing*, AMMER) (AMMER, 2020), w ramach którego opracowano własne modele empiryczne na podstawie pomiarów terenowych. Projekt był kierowany przez firmę FP Space Consortium, partnerami projektu był Główny Instytut Górnictwa i Stowarzyszenie Naukowe im. St. Staszica. W ramach projektu opracowano empiryczne modele regresji dla siedmiu zbiorników w województwie śląskim (zbiorniki: Goczałkowice, Dzierżno Duże, Dzierżno Małe, Kozłowa Góra, Łąka, Pławniowice, Poraj), i trzech w województwie małopolskim (zbiorniki: Dobczyce, Rożnów, Czchów).



Ryc. 2.53. Rozkład chlorofilu – Jezioro Zegrzyńskie (5 września 2019, Sentinel-2)

2.4.2. Analiza serii wieloczasowych zobrazowań satelitarnych

Beata Hejmanowska

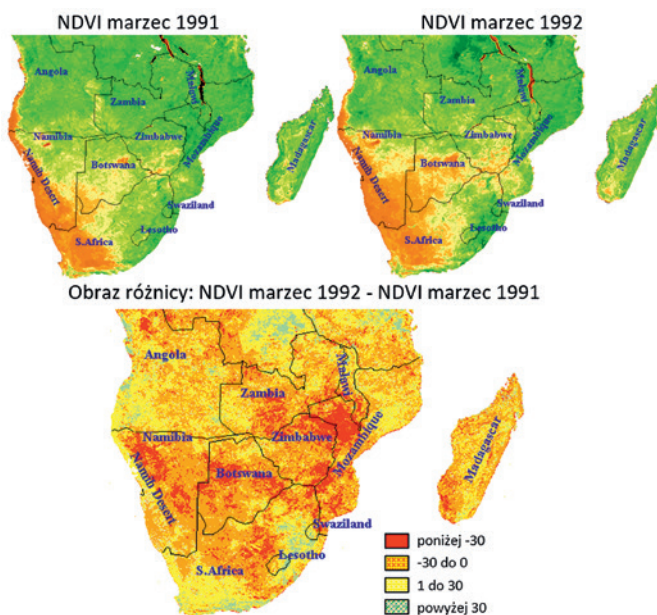
W czasach powszechnego dostępu do danych satelitarnych o coraz większej rozdzielczości przestrzennej i czasowej, oznaczającego rejestrację obrazów nawet każdego dnia, można przeprowadzać różnorakie analizy zmian zachodzących na powierzchni Ziemi. Zmiany mogą mieć różny charakter: krótkoterminowy (zmiana pogody), cykliczny (rozwój fenologiczny roślin), kierunkowy (rozwój zabudowy), wielokierunkowy (wylesienia/zalesienia) i powodowany katastrofami (pożary, powódzie). Wypracowano wiele metod, które można wykorzystać w analizach zmian z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych:

- manualna interpretacja obrazów,
- porównanie wyników niezależnie przeprowadzonych automatycznych klasyfikacji obrazów,
- równoczesna klasyfikacja obrazów wieloczasowych,
- algebra map (odejmowanie, dzielenie obrazów),
- liniowe transformacje (analiza składowych głównych PCA (Principal Component Analysis), Tasseled Cap),
- analiza wektora zmian CVA (Change Vector Analysis),
- obrazowa analiza regresji IR (Image Regression),
- wieloczasowa spektralna analiza zmieszania (ang. *Multi-temporal spectral mixture analysis*).

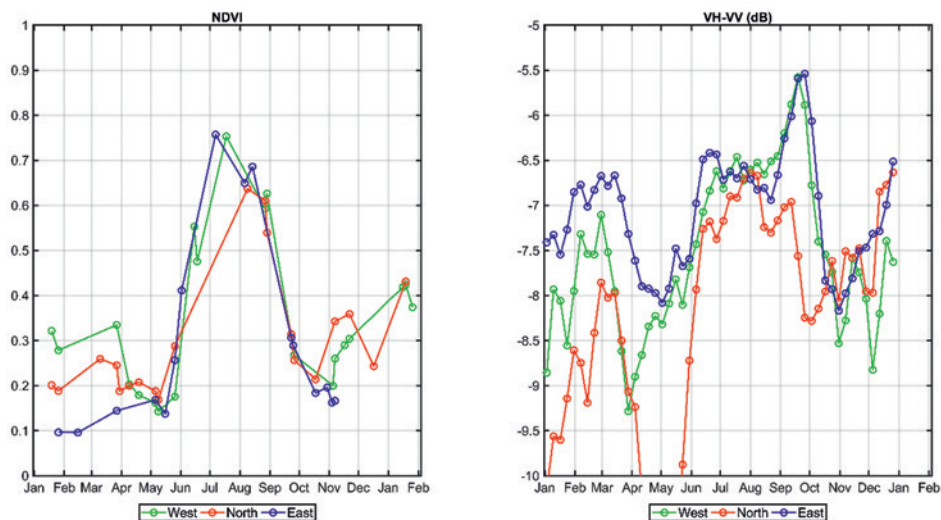
Wykorzystanie wzrokowej interpretacji obrazów jest żmudne i wymaga przeprowadzenia klasyfikacji klas pokrycia terenu metodą manualnej wektoryzacji ekranowej obrazów z serii wieloczasowych. Początkowo tak powstawała baza CORINE Land Cover. Z czasem metody automatycznej klasyfikacji obrazów stały się narzędziem wspierającym fotointerpretację. Niezależnie od zastosowanej metody, do porównania dwóch lub więcej stanów czasowych można wykorzystać mapy pokrycia terenu, przedstawiające interesującą treść, które niekoniecznie muszą być typowymi mapami LULC. Dwa stany czasowe, dwie mapy pokrycia mogą być od siebie odjęte, można je podzielić przez siebie lub obliczyć wskaźnik standaryzowany (podobny do NDVI).

W przypadku odejmowania uzyskujemy wartości ujemne, zero i dodatnie, w przypadku standaryzowanego dzielenia wartości w przedziale $<-1; 1>$. Wartość zero oznacza w obu przypadkach brak zmian, wartości ujemne z odejmowania i poniżej zera z dzielenia oznaczają zmniejszenie się wskaźnika, wartości dodatnie i większe od zera oznaczają zwiększanie się wskaźnika (ryc. 2.54, 2.57).

Zmiany czasowe NDVI oraz współczynnika wstecznego rozpraszania są wykorzystane w monitoringu upraw. Obecnie są opracowywane rekomendacje w tym zakresie na potrzeby kontroli w systemie dopłat bezpośrednich IACS (Integrated Administration Control System). Przykładowy wykres zmienności NDVI i sigma w czasie znajduje się poniżej (ryc. 2.55).

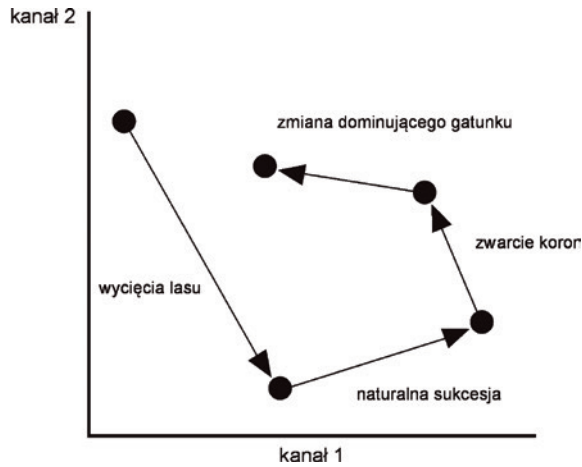


Ryc. 2.54. Przykład analizy wieloczasowej z wykorzystaniem wskaźnika NDVI: stan z marca 1991 i 1992 roku oraz różnica tych dwóch stanów: 1992–1991 (źródło: Herold, 2020)



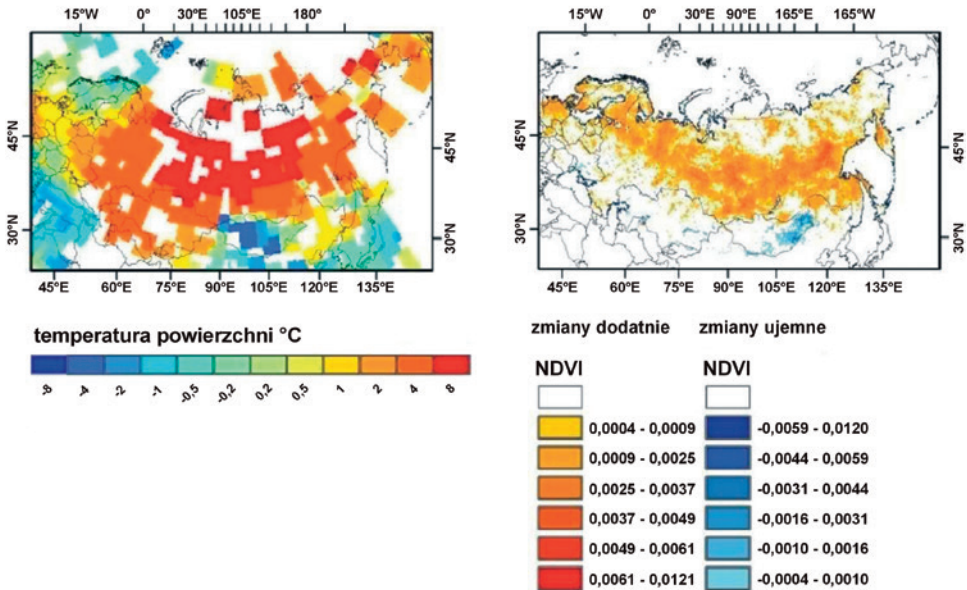
Ryc. 2.55. Porównanie zmian NDVI oraz współczynnika wstępnego rozpraszania dla przykładowej uprawy: ziemniaki (w różnych strefach; źródło: JRC TR, 2018)

Analiza wektorów zmian (CVA) jest wielowymiarowym rozszerzeniem algorytmów różnicowych i ilorazowych. Obrazy zmian są transformowane w celu otrzymania kierunku zmiany i jej intensywności (ryc. 2.56).



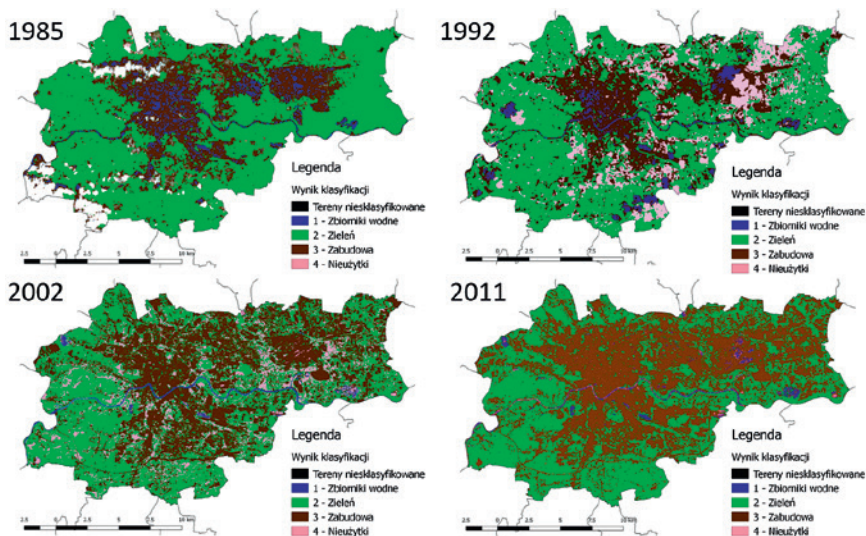
Ryc. 2.56. Analiza wektorów zmian (CVA) na przykładzie (źródło: Herold, 2020)

sierpień - listopad



Ryc. 2.57. Analiza korelacji pomiędzy zmiennością temperatury a wskaźnikiem NDVI (źródło: Herold, 2020)

Przykład analizy serii czasowej (1985–2011) obrazów Landsat dla aglomeracji krakowskiej zaprezentowano na rysunku (ryc. 2.58; Szkaradek, 2017). Wykorzystano w tym celu program QGIS z wtyczką *Semi-Automatic Classification (SCP)* – na licencji typu *open source* oraz archiwalne obrazy Landsat 5. Do porównania zmian w rozwoju zabudowy Krakowa wybrane zostały cztery obrazy z lat 1985, 1992, 2002 i 2011. Obrazy zostały poddane klasyfikacji nadzorowanej, a uzyskane mapy porównane ze sobą.

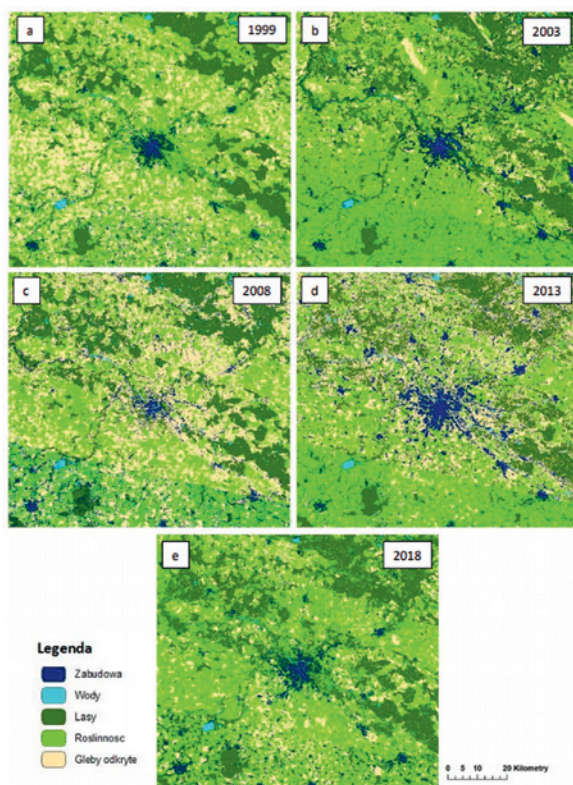


Ryc. 2.58. Analiza zmian LULC – w aglomeracji krakowskiej (źródło: Szkaradek, 2017)

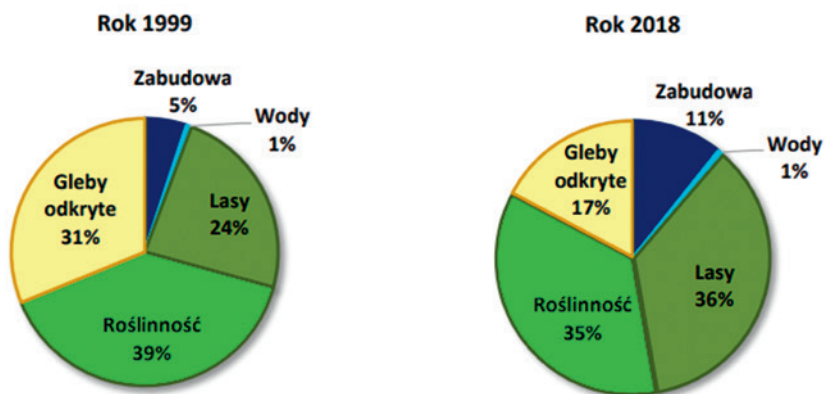
Inny przykład analizy wieloczasowej (Lesisz, 2019) można prześledzić dla aglomeracji wrocławskiej (ryc. 2.59), a graficzną ilustrację ilościowych zmian na rycinie 2.60. W przeprowadzonych badaniach:

- wykorzystane zostały zdjęcia satelitarne systemu Landsat 5, 7 i 8. Obrazy zostały tak dobrane, by objęty zobrazowaniem został cały przewidziany obszar. W tym celu konieczne było wykonanie mozaiki obrazów z dwóch szeregów;
- do analizy użyto obrazów satelitarnych z lat: 1999, 2003, 2008, 2013 i 2018;
- wykonana została klasyfikacja obrazów, różnymi metodami i różnymi algorytmami:
 - metoda klasyfikacji: klasyfikacja spektralna i klasyfikacja spektralno-teksturowa,
 - algorytmy: największego prawdopodobieństwa, SVM (wektorów nośnych);
- wykorzystano oprogramowanie:
 - ArcMap ArcGIS: przygotowanie danych, klasyfikacja spektralna;
 - ERDAS IMAGINE: ocena dokładności klasyfikacji, porównania obrazów;
 - BlueNote: generowanie map granulometrycznych.

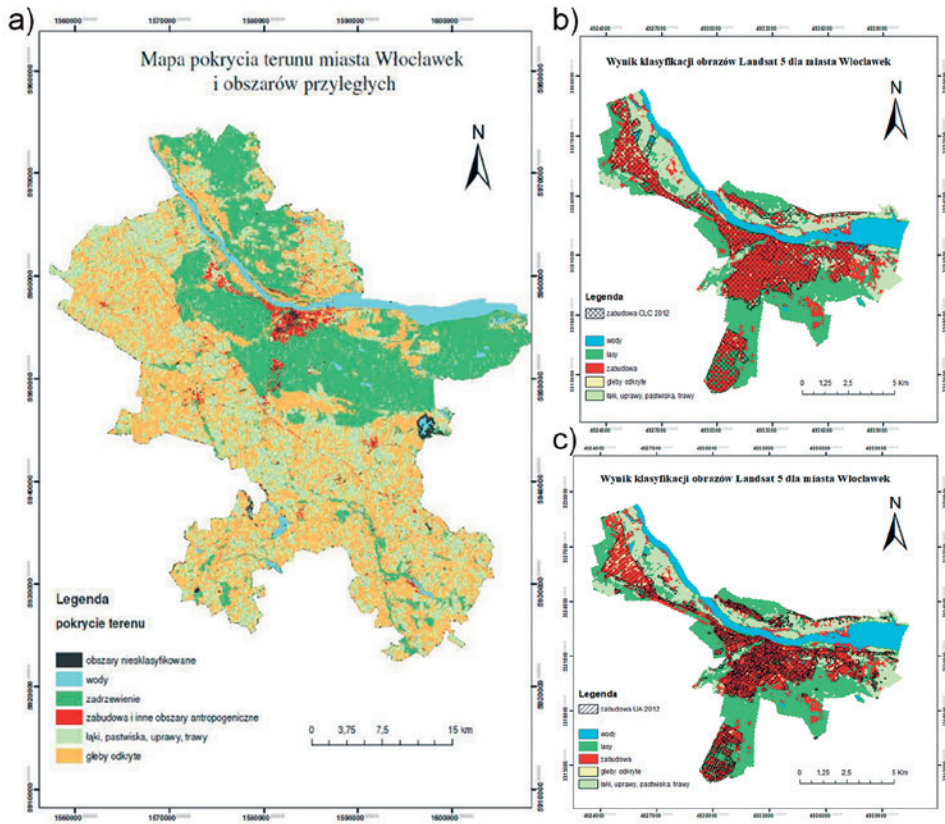
Trzeci przykład dotyczy obszaru Włocławka, dla którego przeprowadzono analizy możliwości aktualizacji baz danych LULC na przykładzie bazy Corine (CLC) i UA (Urban Atlas) z wykorzystaniem obrazów satelitarnych. W pierwszym etapie wykonano klasyfikacje obrazów archiwalnych z 2012 roku w celu sprawdzenia zgodności z bazami CLC 2012 i UA 2012 (ryc. 2.61), a następnie wykonano klasyfikację obrazu z 2019 roku na potrzeby aktualizacji (Puszyńska, 2019).



Ryc. 2.59. Rozwój aglomeracji wrocławskiej: a) 1999, b) 2003, c) 2008, d) 2013, e) 2018 (źródło: Lesisz, 2019)



Ryc. 2.60. Graficzne porównanie zmian zabudowy Wrocławia w okresie 1999–2018 (źródło: Lesisz, 2019)



Ryc. 2.61. LULC – Wrocław 2019: a) wynik klasyfikacji obrazu Landsat 5 z 2012 roku z nałożoną warstwą zabudowy, b) CLC 2013, c) UA 2012 (źródło: Puszyńska, 2019)

3. Misje obserwacji Ziemi

Misje obserwacji Ziemi zaprezentowane zostaną w sześciu podrozdziałach. Pierwszą, podstawową część stanowi opis dostępnych nieodpłatnych zobrazowań satelitarnych pochodzących z europejskiego programu Copernicus, tj. obrazów z misji Sentinel (pierwszy podrozdział), a także danych z serii Landsat (drugi podrozdział). Drugą grupę stanowią komercyjne obrazy satelitarne wysokiej i bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej (trzeci podrozdział). Jako trzecia omówiona została grupa satelitów meteorologicznych (czwarty podrozdział), zaś dwa ostatnie podrozdziały dotyczą zobrazowań hiperspektralnych oraz mikrofalowych (radarowych). Dodatkowo na końcu podręcznika została umieszczona tabela zbiorcza parametrów wybranych satelitów optycznych.

3.1. Program Copernicus

Urszula Cisko-Lesicka, zespół ProGea 4D

W grudniu 2012 roku Program Obserwacji Ziemi – Globalny Monitoring Środowiska i Bezpieczeństwa (ang. *Global Monitoring for Environment and Security*, GMES), zainicjowany jeszcze w końcu lat 90. XX w. przez Komisję Europejską (KE), otrzymał nową nazwę – Copernicus. Jest on zarządzany przez KE i realizowany przede wszystkim we współpracy z Europejską Agencją Kosmiczną i jest obecnie największym na świecie dostawcą danych obserwacji Ziemi. Głównym celem programu Copernicus jest opracowanie metod monitorowania stanu środowiska z pułapu satelitarnego, lotniczego oraz z wykorzystaniem obserwacji (pomiarów) naziemnych. Program zbudowany jest z trzech głównych komponentów:

- kosmicznego – infrastruktura kosmiczna pozwalająca na pozyskiwanie danych z pułapu satelitarnego,
- naziemnego – infrastruktura pomiarów naziemnych (urządzenia, instrumenty) oraz obsługa satelitów Sentinel (zarządzanie danymi misji Sentinel),
- usługowego – infrastruktura udostępniania danych (ustanowiona zgodnie z dyrektywą INSPIRE).

Dane pozyskiwane za pomocą satelitów oraz pomiarów naziemnych w ramach programu Copernicus przetwarzane są w celu świadczenia usług informacyjnych pozwalających na skuteczniejsze zarządzanie środowiskiem oraz poprawę bezpieczeństwa obywateli Unii Europejskiej (UE). Usługi programu Copernicus są nieodpłatne i dostępne zarówno dla obywateli UE jak i mieszkańców państw spoza Wspólnoty. Istnieje obecnie sześć serwisów programu Copernicus oferujących dostęp do różnych baz danych tematycznych zasilanych produktami przetworzeń danych satelitarnych. Należą do nich: atmosfera, środowisko morskie, obszary lądowe, zmiana klimatu, bezpieczeństwo i sytuacje kryzysowe. Dzięki serwisom Copernicus możliwe jest szybkie i sprawne reagowanie w przypadku katastrof naturalnych, efektywne korzystanie z zasobów naturalnych czy stały monitoring jakości i czystości wód, powietrza itd.

3.1.1. Polityka Komisji Europejskiej w zakresie pozyskiwania i wykorzystania danych satelitarnych

Chociaż Parlament Europejski już w 1979 roku zasygnalizował konieczność synchronizacji celów poprzedniczki Unii Europejskiej – Wspólnoty Europejskiej (WE) i Europejskiej Agencji Kosmicznej (ang. *European Space Agency*, ESA) oraz wsparcia dla koncepcji eksploracji przestrzeni kosmicznej przez państwa europejskie, to faktyczne zaangażowanie UE w obszarze badań przestrzeni kosmicznej nastąpiło dopiero w 1999 roku wraz z przyjęciem wspólnego raportu WE i ESA dotyczącego synergii między tymi dwiema instytucjami (Frankowski, 2016). Na przełomie XX i XXI w. Unia Europejska zaangażowała się zarówno w program obserwacji Ziemi GMES (obecnie pod nazwą Copernicus), jak i w określenie kształtu systemu nawigacji satelitarnej Galileo. W 2003 roku zostało zawarte porozumienie ramowe UE–ESA oraz została podjęta próba wprowadzenia polityki kosmicznej do katalogu polityk unijnych w Traktacie Konstytucyjnym i w następnym przyjęciu Traktatu z Lizbony, co stworzyło prawne podstawy do zaangażowania finansowego UE w politykę kosmiczną.

Podstawową wizję i strategię dla sektora kosmicznego określa kilka dokumentów, m.in. rezolucja Rady Unii Europejskiej z 21 maja 2007 roku dotycząca europejskiej polityki kosmicznej (2007/C 136/01), rezolucja Parlamentu Europejskiego z 20 listopada 2008 roku w sprawie europejskiej polityki kosmicznej: w jaki sposób przybliżyć przestrzeń kosmiczną do Ziemi (2010/C 16 E/11) oraz rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady z 6 czerwca 2018 roku ustanawiające program kosmiczny Unii i Agencję Unii Europejskiej ds. Programu Kosmicznego (COM(2018)447).

Zgodnie z założeniami strategii kosmicznej Unia Europejska ma zrealizować cztery zasadnicze cele, z których pierwszy dotyczy maksymalizacji korzyści związanych z eksploracją przestrzeni kosmicznej dla społeczeństwa i gospodarki unijnej. Z punktu widzenia użytkowników osiągnięcie tego celu jest bardzo istotne, gdyż jest on związany z rozpowszechnieniem wykorzystywania danych obserwacji Ziemi, pozyskiwanych w ramach programu Copernicus oraz z uruchomieniem wielu usług zaimplementowanych na platformach oferujących dostęp do dodatkowych zbiorów danych i możliwości przetwarzania online. Zgodnie z celami strategii kosmicznej UE przemysł europejski ma odgrywać wiodącą rolę w sektorze kosmicznym w skali globalnej oraz ma wzmocnić niezależność Europy. Z kolei z punktu widzenia rozwoju polityki kosmicznej, w celu zwiększenia unijnych zdolności do szybkiego reagowania w związku z kontrolą granic i nadzorem morskim za pomocą programu Copernicus i systemów Galileo/EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), szczególnie istotne jest umieszczenie w katalogu głównych działań Komisji dodatkowych usług związanych z bezpieczeństwem i obronnością (Frankowski, 2016). Odnosi się to do punktu 3.4 strategii dotyczącego wzmocnienia współdziałania między cywilną i wojskową działalnością związaną z przestrzenią kosmiczną.

Jednocześnie Komisja deklaruje wsparcie koordynacji między systemami kosmicznymi i systemami bezałogowych statków powietrznych BSP (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*, UAV), co realizowane jest przez europejski system łączności satelitarnej European Data Relay Satellite (EDRS), pozwalający na przesyłanie danych pomiędzy satelitami na orbicie geostacjonarnej, a satelitami na niskiej orbicie okołoziemskiej, statkami kosmicznymi, bezałogowymi statkami powietrznymi oraz stacjami naziemnymi.

Drugi cel strategiczny unijnej polityki kosmicznej jest związany z rozwijaniem euro-

pejskiego sektora kosmicznego konkurencyjnego i innowacyjnego w skali światowej, przez m.in. komercjalizację, stymulowanie badań czy generowanie popytu na dane satelitarne wśród jednostek publicznych.

Cel trzeci wskazany w strategii przewiduje wzmocnienie autonomii Unii Europejskiej w dostępie do przestrzeni kosmicznej oraz możliwości jej wykorzystania do realizacji celów polityki publicznej, polityki handlowej, a także polityki bezpieczeństwa i obrony. Jest to powiązane z czwartym celem strategii, zgodnie z którym Unia ma dążyć do wzmocnienia roli zasobów Wspólnoty i całej Europy, jako podmiotu o znaczeniu globalnym w dziedzinie bezpieczeństwa i obrony.

Warto zauważyć, że instytucje europejskie, takie jak: KE, EUMETSAT, ESA, GSA (EUSPA) i państwa członkowskie UE dysponują łącznie drugim co do wielkości na świecie budżetem na aplikacje i systemy kosmiczne. Zgodnie z danymi przedstawionymi w strategii jest to ponad siedem miliardów euro rocznie (Frankowski, 2016).

3.1.2. Rola ESA oraz PAK w realizacji europejskiej polityki kosmicznej, informacje o programie Copernicus

Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) jest organizacją międzyrządową, powołaną na mocy konwencji podpisanej 30 maja 1975 roku w Paryżu, do realizacji wspólnego europejskiego programu badania i wykorzystania przestrzeni kosmicznej oraz wspierania rozwoju nowoczesnego i konkurencyjnego przemysłu w państwach członkowskich. W skład ESA wchodzi obecnie 22 państwa członkowskie: Austria, Belgia, Czechy, Dania, Estonia, Finlandia, Francja, Grecja, Hiszpania, Irlandia, Luksemburg, Niderlandy, Niemcy, Norwegia, Polska (od listopada 2012 roku), Portugalia, Rumunia, Szwajcaria, Szwecja, Wielka Brytania, Włochy i Węgry. Na podstawie osobnej umowy w pracach ESA uczestniczy również Kanada. W 2019 roku w Sewilli (Hiszpania), na posiedzeniu Rady Ministerialnej Space 19+ Europejskiej Agencji Kosmicznej, państwa członkowskie ESA uzgodniły, że podniosą swoje składki, dzięki czemu Agencja będzie miała do dyspozycji do 2022 roku 14,4 mld euro (EURACTIV, 2019). To największy budżet w historii tej organizacji.

Zgodnie z konwencją, zadaniem Europejskiej Agencji Kosmicznej jest zapewnianie i promowanie, wyłącznie do celów pokojowych, współpracy pomiędzy państwami europejskimi w zakresie badań technologii kosmicznych i ich zastosowań w kosmosie z zamiarem ich wykorzystania do celów naukowych oraz operacyjnych systemów użytkowych (Ministerstwo Rozwoju, 2020). Cele strategii kosmicznej Unii Europejskiej realizuje w Polsce m.in. Polska Agencja Kosmiczna (PAK), która powstała na mocy ustawy z dnia 26 września 2014 roku. Polska Agencja Kosmiczna jest odpowiedzialna za przygotowanie i wdrożenie Krajowego Programu Kosmicznego (KPK), którego głównym celem jest zbudowanie systemu optymalnych narzędzi wsparcia doradczego, finansowego i edukacyjnego dla sektora kosmicznego (zarówno sektora prywatnego jak i dla jednostek naukowo-badawczych) oraz instytucji realizujących i wspierających polską politykę kosmiczną (administracja rządowa i samorządowa). Ważnym aspektem działań Agencji jest również działanie na rzecz rozwoju technik satelitarnych oraz dbałość o bezpieczeństwo państwa i jego obywateli, a także zwiększenie polskiego potencjału obronnego dzięki wykorzystaniu europejskich systemów satelitarnych.

Jednym z najważniejszych zadań Komisji Europejskiej w ramach strategii kosmicznej jest koordynowanie i zarządzanie programem Copernicus – unijnym programem ob-

serwacji Ziemi. Program realizowany jest we współpracy z państwami członkowskimi, ESA, EUMETSAT, Europejskim Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF*), agencjami Unii Europejskiej, m.in. z Europejską Agencją Środowiska (ang. *European Environment Agency, EEA*) i instytutem badawczym Mercator Océan. W ramach programu pozyskiwane i analizowane są dane satelitarne (komponent kosmiczny), uzupełnione o dane pochodzące z sensorów rozmieszczonych na lądzie, morzu i w powietrzu (komponent naziemny). Bardzo duże ilości globalnych danych z satelitów oraz z naziemnych, powietrznych i morskich systemów pomiarowych wykorzystuje się do przekazywania informacji, które mają pomóc usługodawcom, organom publicznym i innym organizacjom międzynarodowym w podnoszeniu jakości życia mieszkańców Europy. Użytkownicy mają nieodpłatny i otwarty dostęp do usług informacyjnych świadczonych w ramach programu (Copernicus, 2020a).

Na potrzeby programu Copernicus Europejska Agencja Kosmiczna opracowała i uruchomiła misje satelitów Sentinel, z uwzględnieniem tzw. misji wspomagających (Copernicus, 2020a):

- misja Sentinel obejmuje satelity: Sentinel-1, -2, -3 i -6 oraz -5P (prekursor satelity Sentinel-5) – satelity specjalistyczne oraz Sentinel-4 i -5 – instrumenty satelitów meteorologicznych EUMETSAT,
- misje wspomagające, obsługiwane przez organizacje krajowe, europejskie (w tym ESA) lub międzynarodowe, stanowiące dodatkowe źródło danych (około 30 trwających lub planowanych misji).

Dzięki infrastrukturze zbudowanej w ramach programu Copernicus, Unia Europejska zapewniła w czasie zbliżonym do rzeczywistego dostęp do danych na poziomie globalnym, które mogą być również wykorzystywane do zaspokajania potrzeb lokalnych i regionalnych.

Zbiory danych pochodzące z minionych lat można porównywać, dzięki czemu możliwe jest monitorowanie zmian, a co za tym idzie lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących na naszej planecie oraz zrównoważone zarządzanie środowiskiem. Na podstawie obrazów satelitarnych tworzy się mapy, wzorce i prognozy, określa anomalie oraz pozyskuje informacje statystyczne.

Z usług programu Copernicus korzystają głównie decydenci i organy publiczne, wykorzystując informacje z serwisów Copernicus przy opracowywaniu przepisów i polityki ochrony środowiska lub podejmowaniu kluczowych decyzji w przypadku sytuacji kryzysowych, takich jak klęska żywiołowa lub kryzys humanitarny.

Użytkownicy końcowi mogą wykorzystać informacje dostarczane w ramach usług programu Copernicus w wielu różnych dziedzinach. Są to m.in.:

- zarządzanie obszarami miejskimi,
- zrównoważony rozwój i ochrona przyrody,
- planowanie regionalne i lokalne,
- rolnictwo, leśnictwo i rybołówstwo,
- opieka zdrowotna, ochrona ludności,
- infrastruktura oraz turystyka.

Europejska Agencja Kosmiczna odpowiada w szczególności za obsługę satelitów Sentinel-1, Sentinel-2 i Sentinel-5P, dostarcza dane z misji dotyczącej obszarów lądowych prowadzonej przez satelitę Sentinel-3 oraz koordynuje dostarczanie danych z 30 satelitów, które należą do misji wspomagających.

3.1.3. Misja Sentinel-1

Sentinel-1 jest pierwszą z sześciu misji Europejskiej Agencji Kosmicznej przygotowanych dla programu Copernicus (ESA S-1, 2020). Obecnie w skład misji wchodzi dwa pierwsze satelity: Sentinel-1A (ryc. 3.1) i Sentinel-1B, które zostały umieszczone na orbicie odpowiednio w 2014 i w 2016 roku. W 2023 i w 2025 roku planowane jest umieszczenie dwóch kolejnych satelitów Sentinel-1C i -1D, które mają przedłużyć czas trwania misji do 20 lat. Celem misji jest zapewnienie długoterminowego pokrycia danymi radarowymi powierzchni całego świata: lądu, stref morskich, europejskich stref przybrzeżnych oraz oceanów. Interwał rejestracji obrazów dla tej samej „sceny” satelitarnej dla pojedynczego satelity wynosi 12 dni (nad równikiem), natomiast w przypadku dwóch satelitów Sentinel-1 – od dwóch do sześciu dni (w zależności od szerokości geograficznej).

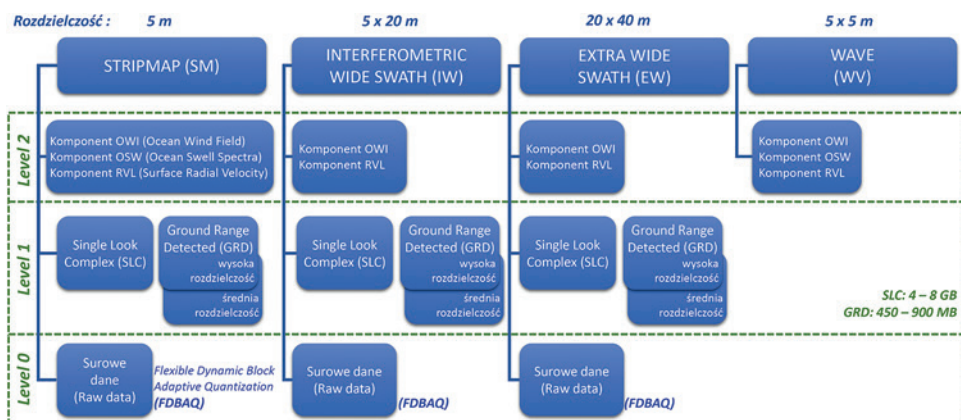


Ryc. 3.1. Satelita Sentinel-1 (źródło: ESA S-1, 2020)

Zarówno Sentinel-1A, jak i Sentinel-1B umieszczone są na wysokości 693 km (tabela 3.1), na wspólnej orbicie heliosynchronicznej (ang. *Sun-Synchronous Orbit, SSO*), co oznacza, że nad danym obszarem satelita przelatuje zawsze o tym samym czasie miejscowym. Satelity monitorują obszary lądowe, morskie oraz stan atmosfery, wykonując 14 okrążeń Ziemi w ciągu doby. Tryby pracy konstelacji Sentinel-1 zapewniają ciągłość pozyskiwania danych SAR w paśmie C z poprzednimi misjami takimi jak ERS-2 i Envisat. Satelity Sentinel-1 zostały zaprojektowane tak, aby działały operacyjnie przez minimum siedem lat („cykl życia”), z możliwością wydłużenia tego okresu o dodatkowe pięć lat przez zapewnienie odpowiedniego zasilania.

Sentinel-1 wykorzystuje radar z syntetyczną aperturą pracujący w paśmie C (ang. *C-Band Synthetic Aperture Radar, C-SAR*) o częstotliwości 5,045 GHz. Obserwacje wykonywane są zarówno w nocy, jak i w dzień, niezależnie od warunków pogodowych. Dane radarowe Sentinel-1 dostępne są na trzech poziomach przetworzenia (trzy rodzaje produktów Sentinel-1, ryc. 3.2):

- poziom 0 (dane podstawowe, nieobrazowe),
- poziom 1 (skalibrowane dane typu SLC (Single Look Complex) i GRD (Ground Range Detected)),
- poziom 2 – najwyższy stopień przetworzenia, który składa się z produktów geofizycznych uzyskanych z poziomu 1 (pole wiatrów nad oceanem, widma fal i prędkość radialna).



Ryc. 3.2. Produkty Sentinel-1

Dane z poziomu 1 to produkty przeznaczone dla większości użytkowników końcowych, które mogą być bezpośrednio wykorzystywane do celów kartograficznych, geodezyjnych, monitoringowych, itd. Dane poziomu 0 są wykorzystywane do przeprowadzenia syntezy SAR, czyli wytworzenia obrazów SLC przez zaawansowane centra przetwarzania danych radarowych lub wyspecjalizowane laboratoria.

Produkty SLC są to obrazy SAR uformowane w geometrii ukośnej (ang. *slant range*) czyli takiej, w jakiej są emitowane i odbierane impulsy. Rozdzielczość przestrzenna obrazów SLC w kierunku zasięgu i w kierunku azymutalnym nie jest taka sama. Ta pierwsza wynosi około 5 m, druga około 30 m. Każdy piksel obrazu jest przedstawiony w postaci liczby zespolonej, w której zapisane są w sposób niejawni wartości amplitudy i fazy sygnału.

Obrazy GRD mogą być utworzone z obrazów SLC (lub generowane bezpośrednio w centrach przetwarzania z danych poziomu 0) przez ich przepróbkowanie do jednakowej rozdzielczości przestrzennej w kierunku azymutalnym i w kierunku zasięgu (10×10 m), z jednoczesną zmianą geometrii ukośnej na geometrię powierzchni elipsoidalnej, czyli ich rzutowaniem na powierzchnię elipsoidy odniesienia. Dane GRD nie mają cech ortofotomapy i muszą być ponownie przepróbkowane z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu. Dopiero wtedy mogą być wykorzystane w systemach GIS. Jednocześnie przy transformacji obrazów SLC do GRD tracona jest informacja o fazie sygnału, pozostaje tylko wartość amplitudy. Dane GRD nie nadają się więc do aplikacji interferometrycznych.

Produkty Sentinel-1 GRD występują w trzech rozdzielczościach:

- pełna rozdzielczość (ang. *Full Resolution*, FR),
- wysoka rozdzielczość (ang. *High Resolution*, HR),
- średnia rozdzielczość (ang. *Medium Resolution*, MR).

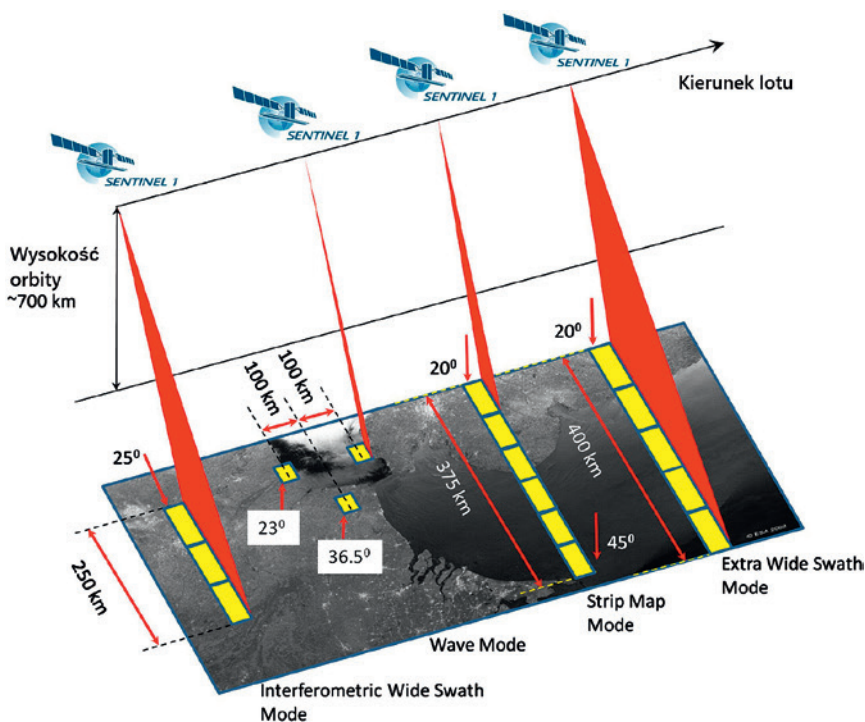
Objętość danych (pojedynczej sceny) Sentinel-1 zależy od rodzaju zastosowanej polaryzacji: pojedynczej lub podwójnej i wynosi odpowiednio 450–900 MB (GRD) i 4–8 GB (SLC) dla obrazów zarejestrowanych w trybie IW (Interferometric Wide Swath).

Dane z misji satelitarnej Sentinel-1 rejestrowane są w czterech trybach (ryc. 3.3):

- Stripmap (SM) – rejestruje dane o pasie 80 km przy rozdzielczości przestrzennej w kierunku zasięgu nieco lepszej niż 5 m. Pas jest oświetlany ciągłą sekwencją impulsów, podczas gdy wiązka anteny ma w przybliżeniu stały kąt padania. Tryb

ten wykorzystywany jest tylko na potrzeby zarządzania kryzysowego i nie jest dostępny bez zgody Komisji Europejskiej.

- Interferometric Wide Swath (IW) – rejestruje dane w pasie o szerokości 250 km przy rozdzielczości przestrzennej $5 \times 20\text{--}30$ m dla pojedynczego impulsu (ang. *single look*), w tzw. trybie TOPSAR. Scena Sentinel-1 w tym trybie składa się z trzech pasów, a każdy z nich jest podzielony jeszcze na osiem lub dziewięć fragmentów (ang. *bursts*). Jest to podstawowy tryb obrazowania tego systemu.
- Extra-Wide Swath (EW) – tryb ten wykorzystuje technikę TOPSAR do zbierania danych dla pasa o szerokości aż 400 km, kosztem słabszej rozdzielczości 20×40 m. Wykorzystywany jest przede wszystkim do monitorowania stref polarnych i niektórych obszarów morskich, w szczególności do monitorowania lodu i wycieków ropy. Podobnie jak IW, tryb EW może być również używany do interferometrii.
- Wave (WV) – dane pozyskiwane są w winiętach 20×20 km, przy rozdzielczości przestrzennej 5×5 m co 100 km wzdłuż orbity, naprzemiennie pod dwoma różnymi kątami padania między bliskim a dalekim zasięgiem. Tryb stosowany jest na ogół na otwartych oceanach.



Ryc. 3.3. Tryby obrazowania Sentinel-1 (Źródło: ESA S-1, 2020)

Do głównych zastosowań Sentinel-1 zalicza się monitorowanie powierzchni Ziemi (np. deformacje i przemieszczenia terenu, kartowanie pokrycia terenu), monitorowanie obszarów morskich (np. przemieszczanie kry lodowej, ruch żeglugowy) i wspieranie służb ratowniczych (np. planowanie pomocy humanitarnej, kartowanie klęsk żywiołowych).

Tabela 3.1 przedstawia krótkie podsumowanie informacji dotyczących konstelacji Sentinel-1.

Tabela 3.1. Specyfikacja konstelacji Sentinel-1

Data umieszczenia na orbicie	Sentinel-1A – 3 kwietnia 2014 roku Sentinel-1B – 25 kwietnia 2016 roku
Orbita	heliosynchroniczna, wysokość 693 km
Instrumenty	radar SAR działający w paśmie C
Rozdzielczość przestrzenna	<ul style="list-style-type: none"> • 5 m, pas 80 km (Stripmap Mode, SM) • 5 × 20 m, pas 250 km (Interferometric Wide Mode, IW) • 20 × 40 m, pas 400 km (Extra Wide Swath Mode, EW) • 5 m, winiety 20 km co 100 km (Wave Mode, WM)
Rozdzielczość czasowa	<ul style="list-style-type: none"> • 12 dni (1 satelita) • 2–6 dni (2 satelity)
Zastosowanie	<ul style="list-style-type: none"> • zarządzanie kryzysowe (powodzie) • plamy oleju na oceanach • deforestacja • rozpoznanie upraw • deformacje powierzchni z dużą dokładnością i na rozległych obszarach

3.1.4. Misja Sentinel-2

Sentinel-2 jest drugą misją Komisji Europejskiej realizowaną operacyjnie przez ESA w ramach programu Copernicus. Misja Sentinel-2 dostarcza wielospektralne zobrazowania powierzchni Ziemi w zakresie promieniowania widzialnego (VIS), czerwieni krwędziowej (RE) oraz bliskiej i średniej podczerwieni (NIR, SWIR), dzięki czemu możliwe jest uzyskanie informacji na temat pokrywy roślinnej, gleb, wód śródlądowych i obszarów przybrzeżnych, obserwacja klęsk żywiołowych oraz wsparcie w planowaniu i organizacji pomocy humanitarnej. Głównym celem misji Sentinel-2 jest pozyskanie danych wielospektralnych z dużą częstotliwością. Dzięki pięciodniowemu cyklowi takiego obrazowania, stosunkowo dużej rozdzielczości przestrzennej i globalnemu zasięgowi, misja zapewnia znakomite źródło wielospektralnych obrazów satelitarnych.

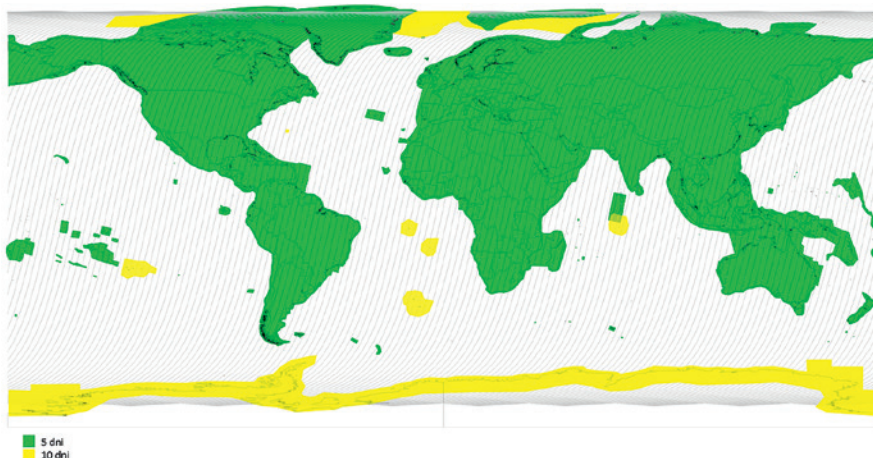


Ryc. 3.4. Satelita Sentinel-2 (źródło: ESA, 2015)

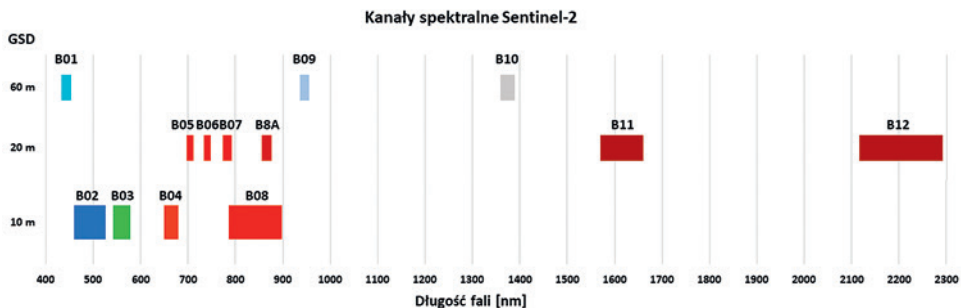
Konstelacja satelitów Sentinel-2 składa się z dwóch bliźniaczych satelitów, z których pierwszy – Sentinel-2A (ryc. 3.4) został wyniesiony 23 czerwca 2015 roku, zaś drugi, Sentinel-2B, 7 marca 2017 roku. Odpowiednio w 2024 i 2027 roku planowane jest umieszczenie dwóch kolejnych satelitów Sentinel: -2C i -2D, które mają przedłużyć czas trwania misji do 20 lat. Satelity Sentinel-2 są przesunięte względem siebie o 180 stopni i poruszają się po orbicie heliosynchronicznej, na wysokości 799 km (tabela 3.2). Okres rewizyty obu bliźniaczych satelitów Sentinel-2 wynosi pięć dni (nad równikiem) i wzrasta wraz ze wzrostem szerokości geograficznej do dwóch–trzech dni (na średnich szerokościach geograficznych). Pojedynczy satelita obrazuje ponownie ten sam teren po 10 dniach (ryc. 3.5). Ich rozdzielczość przestrzenna w zależności od zarejestrowanego zakresu promieniowania elektromagnetycznego to 10, 20 i 60 m. Oba satelity Sentinel-2 wyposażone są w skaner wielospektralny MSI (MultiSpectral Instrument) obrazujący powierzchnię Ziemi w 13 kanałach spektralnych (tabela 3.3, ryc. 3.6).

Tabela 3.2. Specyfikacja konstelacji Sentinel-2

Data umieszczenia na orbicie	Sentinel-2A – 23 czerwca 2015 roku Sentinel-2B – 7 marca 2017 roku
Orbita	heliosynchroniczna, wysokość 799 km
Instrumenty	wielospektralny (MultiSpectral Instrument, MSI)
Rozdzielczość przestrzenna	GSD: 10 m/20 m/60 m
Rozdzielczość spektralna	13 kanałów (VIS/RE/NIR/SWIR)
Rozdzielczość czasowa	<ul style="list-style-type: none"> • 10 dni (1 satelita) • 5 dni (2 satelity)
Zastosowanie	<ul style="list-style-type: none"> • monitorowanie roślinności, produkcji rolniczej • monitorowanie powierzchni lasów • monitorowanie zmian w użytkowaniu terenu, planowanie przestrzenne • ocena wpływu zmian klimatu na roślinność • opracowanie map dla sektora zarządzania kryzysowego



Ryc. 3.5. Zasięg i czas rewizyty Sentinel-2 (źródło: ESA S-2 User Guide, 2020a)

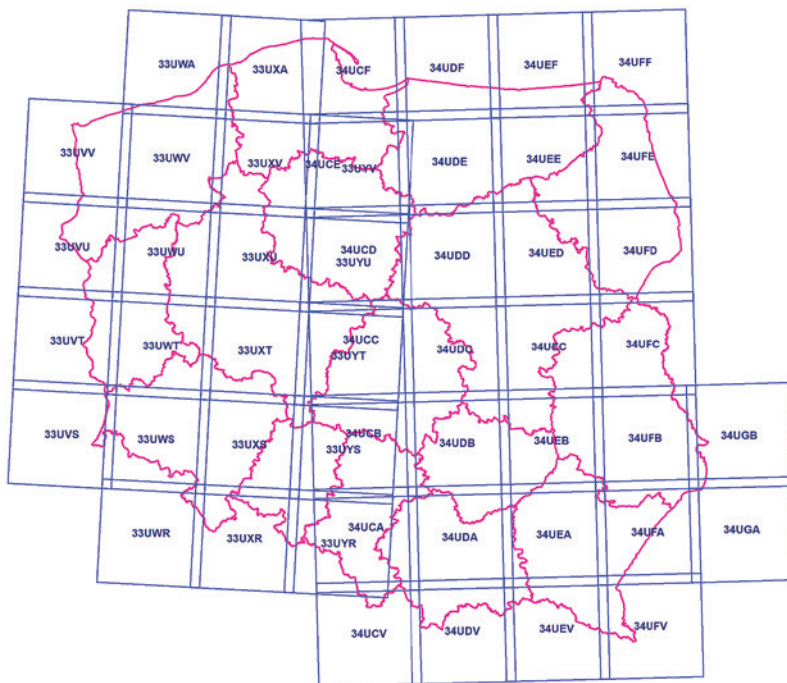


Ryc. 3.6. Kanały spektralne Sentinel-2

Satelity Sentinel-2 pozyskują obrazy w różnych rozdzielczościach przestrzennych w zależności od zakresu spektralnego (tabela 3.3). Dla zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni obrazy pozyskiwane są z pikselem o rozmiarze 10 m. Kanały z zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni przepróbkowane są również do rozdzielczości GSD 20 i 60 m, aby mogły być wykorzystane np. do obliczania wskaźników teledetekcyjnych wykorzystujących także kanały średniej podczerwieni o GSD 20 m. Z rozdzielczością przestrzenną GSD 20 m pozyskiwane są również obrazy w zakresie czerwieni krawędziowej. Z kolei kanały Coastal Aerosol, Water Vapour i Cirrus mają piksel o rozmiarze 60 m. Satelity Sentinel-2 dostarczają również dodatkowe dane tj.: Aerosol Optical Thickness (AOT), kompozycję w barwach naturalnych True Color Image (TCI), warstwę Scene Classification Map (SCL, ryc. 3.7) w rozdzielczości przestrzennej GSD 10, 20 i 60 m.

Tabela 3.3. Kanały spektralne satelitów Sentinel-2

Nr	Nazwa kanału	Zakres spektralny [nm]	GSD [m]	Zastosowanie kanału
B01	Coastal Aerosol	433–453	60	korekcja wpływu aerozoli
B02	Blue	458–523	10	korekcja wpływu aerozoli rejestracja powierzchni Ziemi
B03	Green	543–578	10	rejestracja powierzchni Ziemi
B04	Red	650–680	10	rejestracja powierzchni Ziemi
B05	Vegetation RedEdge	698–713	20	rejestracja powierzchni Ziemi
B06	Vegetation RedEdge	733–748	20	rejestracja powierzchni Ziemi
B07	Vegetation RedEdge	773–793	20	rejestracja powierzchni Ziemi
B08	NIR	785–900	10	korekcja wpływu pary wodnej rejestracja powierzchni Ziemi
B8A	NIR	855–875	20	korekcja wpływu pary wodnej rejestracja powierzchni Ziemi
B09	Water Vapour	935–955	60	korekcja wpływu pary wodnej
B10	Cirrus	1360–1390	60	detekcja chmur cirrus
B11	SWIR	1565–1655	20	rejestracja powierzchni Ziemi
B12	SWIR	2100–2280	20	korekcja wpływu aerozoli rejestracja powierzchni Ziemi



Ryc. 3.8. Pokrycie obszaru Polski scenami Sentinel-2

3.1.5. Misja Sentinel-3

Obecnie w skład misji Sentinel-3 wchodzi dwa satelity: Sentinel-3A (ryc. 3.9) i Sentinel-3B, które umieszczono na orbicie odpowiednio w lutym 2016 i kwietniu 2018 roku. W planach jest uzupełnienie misji o kolejne dwa satelity: Sentinel-3C i Sentinel-3D, z których Sentinel-3C ma zostać umieszczony na orbicie w 2021 roku. Konstelacja Sentinel-3 znajduje się na heliosynchronicznej, polarnej płaszczyźnie orbitalnej na wysokości 800 km (najwyższa z uruchomionych misji Sentinel). Posiada ona dwudziestosiemiodniową autonomię operacyjną, podczas której nie jest konieczna żadna interwencja ze strony operatora naziemnego. Pozyskuje zobrażenia niskorozdzielcze o GSD od 300 m do ponad 1 km (tabela 3.5).

Celem misji Sentinel-3 jest optyczne obrazowanie powierzchni lądu i radarowe obrazowanie temperatury, monitorowanie powierzchni mórz i oceanów, w tym wysokości fal oraz prądów morskich a także topografii pokrywy lodowej, temperatury powierzchni morza i wysokiej dokładności obrazowania kolorów oceanu (monitorowanie zanieczyszczeń, fitoplanktonu). Misja Sentinel-3 zapewnia kontynuację pomiarów satelity Envisat. Dane pozyskane przez satelity Sentinel-3 wykorzystywane są w trzech serwisach programu Copernicus: Serwisie Monitorowania Obszarów Lądowych (ang. *Copernicus Land Monitoring Service, CLMS*), Serwisie Monitorowania Środowiska Morskiego (ang. *Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS*) oraz w Serwisie Monitorowania Zmian Klimatu (ang. *Copernicus Climate Change Service, C3S*).



Ryc. 3.9. Satelita Sentinel-3 (źródło: ESA S-3, 2020)

Tabela 3.5. Specyfikacja konstelacji Sentinel-3

Data umieszczenia na orbicie	Sentinel-3A – 16 lutego 2016 roku Sentinel-3B – 25 kwietnia 2018 roku
Orbita	heliosynchroniczna, wysokość 814 km
Instrumenty	OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) SRAL (Synthetic Aperture Radar Altimeter) MWR (MicroWave Radiometer)
Rozdzielczość przestrzenna/rozdzielczość spektralna	GSD: od 300 m do 1,2 km (OLCI)/21 kanałów (VIS/SWIR) GSD: 500 m (SLSTR)/9 kanałów (VIS/NIR/SWIR) GSD: ~300 m (Synergy)/26 kanałów 300 m (SAR along-track), 1,64 km (SAR across-track)
Rozdzielczość czasowa	4 dni
Zastosowanie	<ul style="list-style-type: none"> • badanie koloru wody (monitorowanie zanieczyszczenia, fitoplanktonu) • monitorowanie temperatury • monitorowanie wysokości fal • monitorowanie prądów morskich • badanie topografii pokrywy lodowej • monitorowanie zmian pokrycia terenu na obszarach globalnych

Sentinel-3 jest pierwszą misją programu Copernicus, w której na pokładzie statku kosmicznego znajduje się kilka instrumentów. Na pokładzie satelity Sentinel-3 umieszczono cztery instrumenty pomiarowe: OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), służący do badania fizyki oceanu, SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) – radiometr mierzący temperaturę lądów i oceanów, SRAL (Synthetic Aperture Radar

Altimeter) – wysokościomierz radarowy oraz radiometr mikrofalowy – MWR (Micro-Wave Radiometer). Dodatkowo zamontowane są urządzenia nawigujące, w tym odbiornik GNSS (umieszczony w przestrzeni kosmicznej), odbiornik DORRIS (umieszczony na Ziemi) oraz laserowe zwierciadło śledzące (tabela 3.5). W zależności od zastosowanych instrumentów dostępne są cztery rodzaje zobrazowań: OLCI, SLSTR, Synergy (połączenie produktów OLCI i SLTR) oraz Altimetria (połączenie instrumentów topograficznych). Produkty dostępne są na dwóch poziomach przetworzeń. Poziom 1 to skalibrowane dane posiadające georeferencję. Na poziomie drugim dostępne są produkty przetworzone, takie jak dane geofizyczne dotyczące lądu czy oceanów, obliczona temperatura powierzchni lądów, mórz i oceanów, czy produkty zapewniające ciągłość produktów misji SPOT (tabela 3.6).

Zwiększone możliwości oprzyrządowania zapewniają szerszy zakres i wyższą jakość danych w zakresie monitorowania skutków zmian klimatu i zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa. Nacisk na monitorowanie obszarów morskich przyczynia się do tworzenia kompletniejszej, globalnej bazy danych obserwacji Ziemi w porównaniu do misji Sentinel-2.

Główne zastosowania Sentinel-3:

1. Monitoring mórz i oceanów:

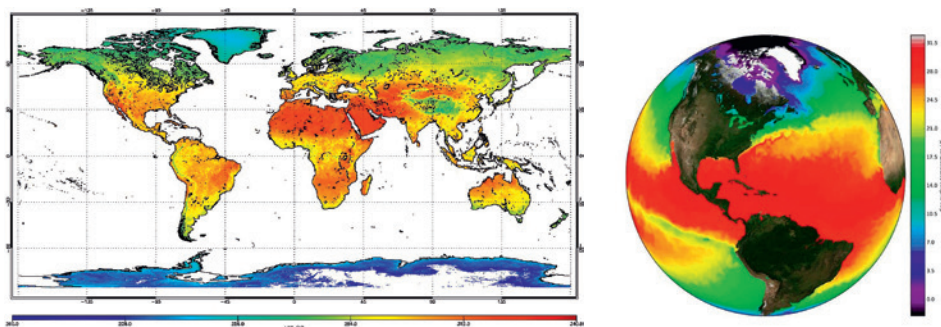
- wysokość poziomu morza (ang. *Sea Surface Height, SSH*),
- temperatura powierzchni morza (ang. *Sea Surface Temperature, SST*) (ryc. 3.10),
- temperatura powierzchni kry (ang. *Sea-Ice Surface Temperature, IST*),
- kolor oceanu,
- prędkość wiatrów nad powierzchnią oceanów i wysokość fali,
- twory lodowe.

2. Monitoring lądów:

- stan roślinności,
- temperatura powierzchni śniegu i lodu,
- twory lodowe.

3. Monitoring atmosfery:

- pomiary zawartości aerozoli nad lądem i oceanem,
- pomiar zawartości pary wodnej nad lądem i oceanem.



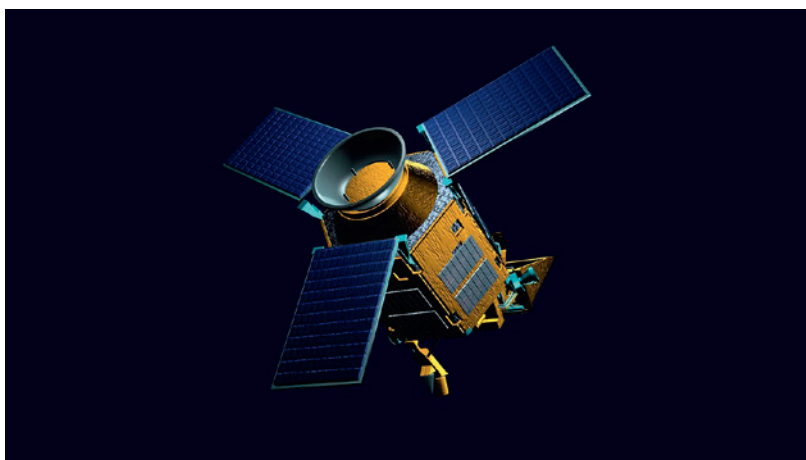
Ryc. 3.10. Mapa temperatury lądów i oceanów na podstawie danych zarejestrowanych przez instrument Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) (źródło: ESA Missions, 2020)

Tabela 3.6. Produkty satelity Sentinel-3

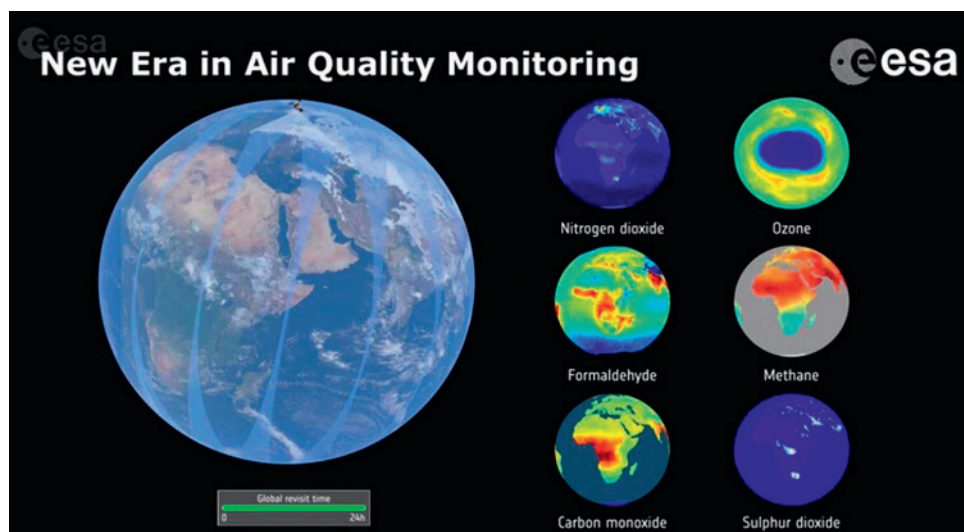
Nazwa	Instrument OLCI	Nazwa	Instrument SLSTR	Nazwa	Instrument Synergy	Nazwa	Instrument Altimetry
Level-1B	<ul style="list-style-type: none"> współczynnik odbicia na poziomie powyżej atmosfery (TOA) korekcja geometryczna (UTM/WGS84) 	Level-1B	<ul style="list-style-type: none"> współczynnik odbicia na poziomie powyżej atmosfery (TOA) korekcja geometryczna (UTM/WGS84) 	SY_1_MISR	nie dystrybuowany	Level-1A	zgeolokalizowane i skalibrowane echo
						Level-1B	zgeolokalizowane i w pełni skalibrowane echo w wysokiej rozdzielczości
						Level-1B-S	w pełni przetworzony SAR i skalibrowane echo w pełnej rozdzielczości
Level-2 Land	dane geofizyczne dot. lądu obliczone dla pełnej i zmniejszonej rozdzielczości	Level-2 LST	temperatura powierzchni lądu (ang. <i>Land Surface Temperature</i>)	SY_2_SYN	współczynniki odbicia powierzchni dla wszystkich kanałów SYN i parametrów aerozoli nad lądem	SR_2_WA	produkty dot. wód opracowane przez Centrum Morskie ESA
Level-2 Water	dane geofizyczne dot. mórz i oceanów obliczone dla pełnej i zmniejszonej rozdzielczości	Level-2 WST	temperatura powierzchni mórz i oceanów (ang. <i>Sea Surface Temperature</i>)	SY_2_VGK	nie dystrybuowany	SR_2_LAN	produkty dot. wód opracowane przez Centrum Morskie ESA
		Level-2 FRP	moc promieniowania pożarów (ang. <i>Fire Radiative Power</i>)	SY_2_VGP	produkty ciągłości SPOT zapewniające odbicia TOA		
		Level-2 AOD	głębina optyczna aerosoli (ang. <i>Aerosol Optical Depth</i>)	SY_2_VG1	produkty ciągłości SPOT zapewniające maksymalną wartość NDVI w ciągu 1 dnia		
				SY_2_V10	produkty ciągłości SPOT zapewniające maksymalną wartość NDVI w ciągu 10 dni		

3.1.6. Misja Sentinel-5P

Kolejnym satelitą rodziny Sentinel umieszczonym na orbicie okołoziemskiej jest Sentinel-5P (ryc. 3.11), będący prekursorem satelity Sentinel-5. Sentinel-5P został wystrzelony na orbitę 13 października 2017 roku. Podstawowym celem misji jest utrzymanie ciągłości gromadzenia danych atmosferycznych, a precyzyjniej mówiąc, uzupełnienie luki w danych pomiędzy kończącymi swoją misję satelitami Envisat i Aura a planowaną misją Sentinel-5. Sentinel-5P ma na pokładzie instrument pomiarowy – TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), pozwalający na pomiar stężenia aerozoli oraz gazów: dwutlenku azotu, ozonu, formaldehydu, dwutlenku siarki, metanu oraz czadu (ryc. 3.12).



Ryc. 3.11. Satelita Sentinel-5P (źródło: ESA S-5P, 2014)



Ryc. 3.12. Przykłady obrazów zarejestrowanych przez Satelitę Sentinel-5P (źródło: ESA S-5P ArabNubia, 2018)

Detektory umieszczone na satelicie monitorują warunki atmosferyczne z dość niską rozdzielczością przestrzenną (GSD 5,5 km) i szybką częstotliwością rewizyty (jeden dzień). Dane pozyskiwane są w systemie codziennym, a na ich podstawie opracowywane są prognozy zanieczyszczenia powietrza z wykorzystaniem modelu ENSEMBLE zbudowanym na bazie siedmiu zweryfikowanych numerycznych modeli jakości powietrza. Pozycjonowanie i synchronizację orbitalną wybrano w taki sposób, aby korespondowały z satelitą meteorologicznym Suomi-NPP amerykańskiej agencji NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Uzyskane dane wspierają Serwis Monitorowania Stanu Atmosfery (ang. *Copernicus Atmosphere Monitoring Services*, CAMS) oraz Serwis Monitorowania Zmian Klimatu (C3S).

Sentinel-5P umieszczony jest na heliosynchronicznej orbicie, na wysokości 824 km i został zaprojektowany na siedmioletni okres pracy. Znajdujący się na pokładzie satelity wielospektralny sensor obrazowania TROPOMI składa się z czterech dwupasmowych spektrometrów obrazujących w zakresie: ultrafioletu (UV), światła widzialnego (VIS), bliskiej podczerwieni (NIR) i średniej podczerwieni (SWIR) (tabela 3.7, 3.8).

Tabela 3.7. Specyfikacja satelity Sentinel-5P

Data umieszczenia na orbicie	13 października 2017 roku
Orbita	heliosynchroniczna, wysokość 824 km
Instrumenty	TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument)
Rozdzielczość przestrzenna	5,5 km
Rozdzielczość spektralna	7 kanałów (UV/VIS/NIR/SWIR)
Rozdzielczość czasowa	1 dzień

Tabela 3.8. Specyfikacja kanałów instrumentu TROPOMI

Nr	Nazwa kanału	Zakres spektralny [nm]	Rozdzielczość przestrzenna GSD [km]	Zasięg sceny [km]
B1	UV	270–320	6,7	7 × 28
B2				7 × 3,5
B3	UVIS	320–500	2,5	
B4				
B5	NIR	675–775	2,8	
B6				
B7	SWIR	2305–2385	2,5	7 × 7
B8				

Sentinel-5P oferuje wiele produktów na dwóch poziomach przetworzeń. Poziom 1B (Level-1B) stanowią produkty skorygowane radiometrycznie w zakresie promieniowania od UV po średnią podczerwień. Natomiast produkty poziomu 2 (Level-2), to różnego rodzaju georeferencyjne dane o stanie atmosfery w danym miejscu i czasie (tabela 3.9).

Tabela 3.9. Produkty satelity Sentinel-5P

Poziom	Opis poziomu przetworzenia	Opis produktu
Level-1B	współczynnik odbicia na poziomie powyżej atmosfery (TOA) korekcja radiometryczna i geometryczna	wartości radiometryczne (radiancja) w zakresie promieniowania UV, światła widzialnego oraz bliskiego ultrafioletu (UVIS), krótkiej podczerwieni (NIR) i średniej podczerwieni (SWIR) oraz irradiancja w zakresie promieniowania ultrafioletu, promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni (UVN) oraz irradiancja w zakresie średniej podczerwieni (SWIR)
Level-2	korekcja geometryczna	georeferencyjne dane atmosferyczne: kolumny ozonowe, dwutlenek siarki, dwutlenek azotu, tlenek węgla, formaldehyd i metan; georeferencyjne: kolumny troposferyczne ozonowe, profile pionowe ozonu, informacje o chmurach i aerozolu (np. wskaźnik pochłaniania aerozolu i wysokość warstwy aerozolu)

Sentinel-5P ma na celu wykrywanie potencjalnych źródeł zanieczyszczeń atmosfery oraz określanie czynników mogących minimalizować to zjawisko. Produkty misji stanowią wsparcie w prognozowaniu jakości powietrza i są wykorzystywane przez instytucje publikujące ostrzeżenia o złym stanie atmosfery.

Główne zastosowania Sentinel-5P to monitorowanie stanu atmosfery, w tym m.in.: określanie składu chemicznego atmosfery, monitorowanie ozonu, promieniowania UV i gazów cieplarnianych oraz wspomaganie zarządzania kryzysowego, np.: prognozy pogody i świadczenie usług dla Serwisu Monitorowania Stanu Atmosfery (CAMS), czy monitorowanie erupcji wulkanicznych.

3.1.7. Planowane misje

Wśród planowanych misji programu Copernicus realizowanych przez Europejską Agencję Kosmiczną są misje służące monitorowaniu stanu atmosfery oraz mórz i oceanów (Sentinel-4, -5 i -6).

Misja Sentinel-4

Głównym celem misji będzie pozyskiwanie danych o warunkach atmosferycznych i jakości powietrza w Europie i Afryce Północnej. Sentinel-4 w przeciwieństwie do poprzedników, umieszczony będzie na orbicie geostacjonarnej. Nowy typ orbity i instrumentów pomiarowych pozwoli na codzienne pomiary śladów gazu w troposferze w godzinnych odstępach. Instrumenty misji Sentinel-4 zostaną umieszczone na satelitach Meteosat trzeciej generacji Sounder (MTG-S). W satelitach MTG-S używany będzie spektrometr obejmujący widmo promieniowania elektromagnetycznego w zakresie od ultrafioletu do bliskiej podczerwieni (UVN) oraz sondę promieni podczerwonych (ang. *InfraRed Sounder*, IRS). Umieszczenie satelitów MTG-S na orbicie planowane jest na rok 2023 (MTG-S1) oraz 2031 (MTG-S2).

Misja Sentinel-5

Głównym celem misji będzie wsparcie Serwisu Monitorowania Stanu Atmosfery (CAMS) przez dostarczanie z dużą częstotliwością pomiarów stężenia gazów atmosferycznych oraz aerozoli z rozdzielczością GSD 7 km. Dane z Sentinel-5 będą głównie wykorzystane do określenia zależności pomiędzy jakością powietrza i składem atmosfery

a klimatem. Sentinel-5 będzie dokonywał codziennej rejestracji całego globu z rozdzielczością przestrzenną 7×7 km za pomocą spektrometrów w różnych kanałach spektralnych (UV-1 (270-300 nm), UV-2 (300-370 nm), VIS (370-500 nm), NIR-1 (685-710 nm), NIR-2 (745-773 nm), SWIR-1 (1590-1675 nm) i SWIR-3 (2305-2385 nm)). Umieszczenie satelitów na orbicie zaplanowano na 2020 i 2021 rok.

Misja Sentinel-6

Głównym celem misji będzie monitorowanie oceanów. W ramach misji zostaną wyniesione dwa satelity: Sentinel-6A Michael Freilich i Sentinel-6B. Podstawowym oprzyrządowaniem na pokładzie serii będzie POSEIDON-4 – wysokościomierz radarowy o ulepszonej konstrukcji i zoptymalizowanym zapisem impulsu w porównaniu do poprzednich misji topo-oceanicznych oraz wieloczęstotliwościowy radiometr mikrofalowy AMR-C. Misja ta będzie się opierać na współpracy międzynarodowej między CNES, ESA, EU, EUMETSAT, NASA i NOAA. Satelita Sentinel-6A Michael Freilich ma wystartować w listopadzie 2020 roku, a Sentinel-6B w 2025 roku.

Poza wymienionymi nowymi misjami Sentinel Komisja Europejska planuje sześć misji o wysokim priorytecie, które mają zapełnić luki w potrzebach użytkowników programu Copernicus oraz rozszerzyć obecne możliwości komponentu kosmicznego Copernicus. Misjami wysokiego priorytetu UE są:

- CHIME (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission): misja ma dostarczać obserwacje hiperspektralne w celu wsparcia nowych i ulepszonych usług w zakresie zrównoważonego zarządzania różnorodnością rolniczą i bioróżnorodnością a także ma umożliwić badanie właściwości gleby (uzupełnienie danych Sentinel-2 do zastosowań takich jak opracowanie map pokrycia terenu),
- CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer): misja ma zapewnić obserwacje temperatury powierzchni morza, stężenia lodu morskiego i innych jego parametrów oraz zasolenia powierzchni morza,
- CO2M (Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring): misja ma zapewnić pomiar atmosferycznego dwutlenku węgla, zwiększenie wiarygodności szacowania emisji dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych w skali krajowej i regionalnej,
- CRISTAL (Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter): kolejna misja zapewniająca pomiar i monitorowanie grubości lodu morskiego i głębokości śniegu, monitorowanie zmiany wysokości pokrywy lodowej i lodowców na całym świecie,
- LSTM (Copernicus Land Surface Temperature Monitoring): misja ma zapewnić ciągłą obserwację temperatury powierzchni Ziemi i jej pochodnej ewapotranspiracji, aby wspierać zrównoważoną produkcję rolną w czasach rosnącego niedoboru wody, pomagać w rozwiązywaniu problemów związanych z degradacją gruntów i zagrożeń naturalnych. Dane mają również służyć do celów gospodarki wodnej przybrzeżnej i śródlądowej oraz do monitorowania miejskich wysp ciepła,
- ROSE-L (L-band Synthetic Aperture Radar): misja wykorzystująca radar SAR w paśmie L, którego dłuższy sygnał może przenikać przez wiele naturalnych materiałów, takich jak roślinność, suchy śnieg oraz lód i dzięki temu dostarczać informacji na potrzeby gospodarki leśnej, monitorowania osiadania gruntów i wilgotności gleby oraz do rozróżniania rodzajów upraw pod kątem precyzyjnego rolnictwa i bezpieczeństwa żywności. Ponadto misja przyczyniłaby się do monitorowania pokrywy lodowej i czap lodowych, zasięgu lodu morskiego w regionie polarnym oraz sezonowego śniegu.

3.2. Program Landsat

Program Landsat prowadzony przez NASA (National Aeronautics and Space Administration) i USGS (United States Geological Survey) jest najdłużej działającym programem, spośród tych, których celem jest dostarczanie zobrazowań satelitarnych powierzchni Ziemi. Stanowi cenne źródło danych do badań nad globalnymi zmianami pokrycia terenu i ma zastosowanie w takich obszarach jak rolnictwo, kartografia, geologia, leśnictwo, planowanie przestrzenne oraz edukacja.

Tabela 3.10. Charakterystyka satelitów programu Landsat

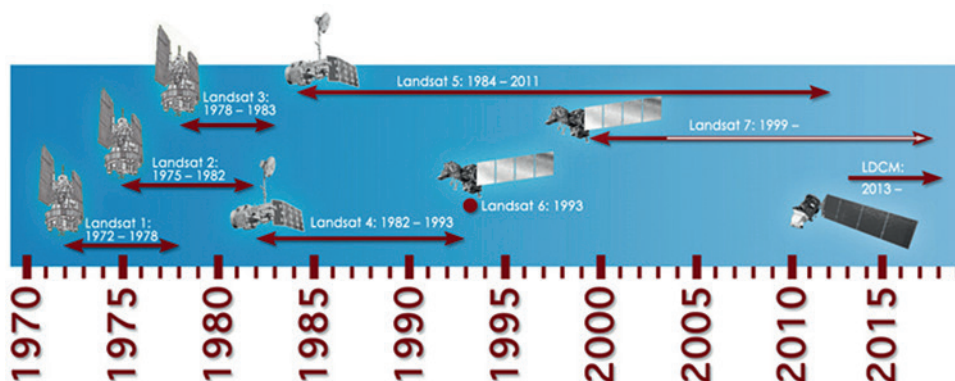
Satelita	Data umieszczenia na orbicie	Data zakończenia pracy	GSD	Rozdzielczość czasowa	Uwagi
Landsat 1	23.07.1972	06.07.1978	RBV: 80 m MSS: 60 m	18 dni	instrument Return Beam Vidicon (RBV); skaner wielospektralny (MSS)
Landsat 2	21.01.1975	25.02.1982	RBV: 80 m MSS: 60 m	16 dni	instrument Return Beam Vidicon (RBV); skaner wielospektralny (MSS)
Landsat 3	05.03.1978	21.03.1983	RBV: 40 m (PAN) MSS: 80 m (MS)	16 dni	instrument Return Beam Vidicon (RBV); skaner wielospektralny (MSS)
Landsat 4	16.07.1982	14.12.1993	MSS: 80 m (MS) TM: 30 m (MS), 120 m (IR)	16 dni	skaner wielospektralny (MSS) + Thematic Mapper (TM); w 1993 roku przestał zbierać dane naukowe, został wycofany dopiero w 2001 roku
Landsat 5	01.03.1984	2013	MSS: 80 m (MS) TM: 30 m (MS), 120 m (IR)	16 dni	skaner wielospektralny (MSS) + Thematic Mapper (TM); najdłuższa misja satelitarna EO
Landsat 6	06.10.1993	–	ETM: 15 m (PAN), 30 m (MS), 120 m (IR)	–	nigdy nie osiągnął orbity docelowej
Landsat 7	15.04.1999	nadal funkcjonuje	ETM+: 15 m (PAN), 30 m (MS), 60 m (IR)	16 dni	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+); w maju 2003 roku uległ awarii jeden z elementów instrumentu ETM+; obraz posiada braki danych
Landsat 8 (LDCM)	11.02.2013	nadal funkcjonuje	OLI: 15 m (PAN), 30 m (MS, IR) TIRS: 100 m	16 dni	funkcjonuje prawidłowo

3.2.1. Historia programu Landsat oraz możliwości wykorzystania archiwalnych zobrazowań Landsat

Program Landsat rozpoczął się w 1966 roku i pierwotnie funkcjonował pod nazwą ERTS (Earth Resources Technology Satellite) – Satelita Ziemijskich Zasobów Technologicznych. Landsat 1 (początkowo ERTS-1) został umieszczony na orbicie w 1972 roku i był pierwszym cywilnym ziemskim satelitą obserwacyjnym, który zapoczątkował półwieczną, nieprzerwaną misję gromadzenia danych o Ziemi z przestrzeni kosmicznej.

Do tej pory opracowano osiem misji satelitarnych Landsat, z czego siedem wystartowało z powodzeniem. Po pierwszych pięciu udanych misjach i 25 latach monitorowania Ziemi, nie powiodło się uruchomienie satelity Landsat 6 w 1993 roku. Satelita Landsat 6 nie wszedł na orbitę z powodu pęknięcia podajnika komory spalania, co uniemożliwiło dostarczanie paliwa do silnika. Kolejne misje Landsat 7 i 8 z powodzeniem weszły na orbitę i kontynuują pozyskiwanie danych. Chociaż w maju 2003 roku awarii uległ jeden z elementów instrumentu ETM+ satelity Landsat 7 obrazy nadal są pozyskiwane, choć z pewnymi brakami danych (ryc. 3.15). W planach jest także Landsat 9, którego uruchomienie jest przewidziane na rok 2021. Trwają również prace koncepcyjne nad misją Landsat 10. Do tej pory najdłużej działającą misją był Landsat 5 pracujący nieprzerwanie przez 29 lat (tabela 3.10; ryc. 3.13).

Od 2008 roku dane Landsat 7 i Landsat 5 dostępne są bezpłatnie, a od 2013 roku również dane Landsat 8 zostały objęte polityką nieodpłatnego dostępu.



Ryc. 3.13. Historia satelitów Landsat (źródło: NASA Landsat, 2020)

3.2.2. Aktywne satelity Landsat

Z siedmiu udanych misji, dwa satelity pozostają nadal w użyciu: Landsat 7 i Landsat 8.

Landsat 7 (ryc. 3.14) został wyniesiony w kwietniu 1999 roku. Do startu został dopuszczony już w 1998 roku, ale wbudowany sensor ETM+ wymagał napraw, które uniemożliwiły wcześniejsze uruchomienie. Landsat 7 jest drugą najdłużej trwającą misją, z dwudziestojednoletnim stażem gromadzenia danych. W lutym 2018 roku rozpoczął się ostatni etap działalności operacyjnej tego satelity. W 2021 roku ma zostać wycofany z eksploatacji oraz zastąpiony przez Landsat 9. Satelita Landsat 7 porusza się po orbicie

biegunowej na wysokości 705 km z szesnastodniowym powtarzalnym cyklem. Dysponuje instrumentem pomiarowym EMT+ (tabela 3.11).



Ryc. 3.14. Satelita Landsat 7 (źródło: NASA SIC, 2020)

Tabela 3.11. Charakterystyka satelity Landsat 7

Data umieszczenia na orbicie	15 kwietnia 1999 roku
Orbita	okołobiegunowa, heliosynchroniczna, wysokość 705 km
Instrumenty	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)
Rozdzielczość przestrzenna	15 m (PAN)/30 m (MS)/60 m (IR)
Rozdzielczość spektralna	8 kanałów (VIS/NIR/SWIR/TIR/PAN)
Rozdzielczość czasowa	16 dni
Zastosowanie:	<ul style="list-style-type: none"> • rolnictwo, leśnictwo • zarządzanie regionalne • kartografia • geologia • bezpieczeństwo narodowe i wiele innych

Głównym celem misji Landsat 7 jest zapewnienie ciągłości danych satelitarnych w zakresie pasm spektralnych rejestrowanych przez sensor TM (Thematic Mapper), zapoczątkowane przez L4 w 1982 roku w postaci częstych, pozbawionych chmur obrazów Ziemi o zasięgu globalnym oraz zapewnienie wysokiej jakości kalibracji (5%), mogącej służyć jako standard kalibracji krzyżowej (ang. *cross calibration*) dla innych satelitów teledetekcyjnych¹.

¹ Zapewnienie jakości i dokładności danych obrazowych pochodzących z detektora krążącego na orbicie Ziemi przez cały okres jego eksploatacji wymaga regularnego monitorowania jego parametrów radiometrycznych i geometrycznych. W celu monitorowania odpowiedzi sensora i odpowiedniego dostosowania współczynników kalibracji, po uruchomieniu sensora teledetekcyjnego wykonywane są kolejne kalibracje radiometryczne. Kalibracje te można przeprowadzić w sensie absolutnym (tj. wyprowadzając poprawki w trakcie przeliczenia wielkości radiancji do współczynnika odbicia na poziomie powyżej atmosfery (TOA)) lub w sensie względnym w odniesieniu do dobrze skalibrowanego sensora odniesienia (metoda kalibracji krzyżowej). Obecnie za najdokładniej skalibrowany instrument, często wykorzystywany do kalibracji krzyżowej dla innych sensorów, uważa się skaner wielospektralny Operational Land Imager (OLI) umieszczony na pokładzie satelity Landsat 8.

Możliwość wykrywania i unikania chmur pozwala Landsat 7 zapobiegać gromadzeniu zbędnych danych, dzięki czemu uzyskane produkty zapewniają pokrycie jednej czwartej powierzchni lądów co 16 dni.

Pierwotnie satelita ten posiadał ulepszony sensor Thematic Mapper Plus, zaawansowaną wersję sensorów Landsat 4–5 TM z absolutną kalibracją. Niestety w dniu 31.05.2003 roku awaria korektora linii skanowania, tj. aparatury SLC (Scan Line Corrector) odpowiedzialnej za usunięcie zygzakowatego zapisu danych (wpływ ruchu obrotowego ziemi i prędkości przelotu satelity) spowodowała pojawienie się braku danych w obrazie (ryc. 3.15). Próby naprawienia sensora nie powiodły się, niemniej jednak satelita ten nadal dostarcza dane o wysokiej jakości geometrycznej i radiometrycznej.



Obraz przed korekcją SLC (03.03.2000)

Obraz po korekcji SLC (20.09.2003)

Ryc. 3.15. Landsat 7, obraz z i bez korektora linii skanu (ang. *Scan Line Corrector*, SLC) (źródło: Tetrault, 2006)

Satelita Landsat 7 pozyskuje obrazy w ośmiu zakresach spektralnych: sześciu kanałach multispektralnych (VIS, NIR, SWIR-1 i -2) o GSD 30 m, jednym kanale panchromatycznym (ang. *panchromatic*, PAN) o GSD 15 m i jednym kanale termalnym o GSD 60 m (tabela 3.14, ryc. 3.18). Sceny zebrane przez Landsat 7 są dostępne w archiwum tzw. Landsat Collection 1 na trzech poziomach przetworzenia:

- poziom 1 (Level 1) to obrazy po korekcji geometrycznej i radiometrycznej,
- poziom 2 (Level 2) to obrazy poziomu 1 z uwzględnioną korekcją atmosferyczną (*Landsat 7 Surface Reflectance*),
- poziom 3 (Level 3) to produkty pochodne wygenerowane na podstawie danych Landsat 7, np. mapy występowania i stanu wód powierzchniowych (ang. *Dynamic Surface Water Extent*, DSWE).

Produkty Landsat 7 na poziomie 1 (Level 1) mają dodatkowe oznaczenia określające dokładność korekcji geometrycznej obrazów:

- poziom Tier 1 (T1) to najwyższej jakości precyzyjne dane po korekcji geometrycznej (zastosowany model L1TP, RMSE < 12 m) i radiometrycznej wykorzystywane do analizy szeregów czasowych,
- poziom Tier 2 (T2) to obrazy niespełniające kryteriów dokładnościowych T1, ale

obrazy z tego poziomu mogą mieć zastosowanie do aplikacji specyficznych dla użytkownika,

- poziom Real Time (RT), to nowo zebrane sceny, które po przetworzeniu zostają odpowiednio przypisane do wyższych poziomów, a następnie są usuwane.

Misja satelity Landsat 7 może być przedłużona wraz z wprowadzeniem misji NASA OSAM-1 (kiedyś pod nazwą Restore-L). Celem misji OSAM-1 jest stworzenie urządzenia serwisującego, które ma zostać wypuszczone w przestrzeń kosmiczną w 2023 roku. Zadaniem tego robota – satelity, będzie wykonanie prac serwisowych na satelicie Landsat 7 polegających na uzupełnieniu paliwa i zmianie pozycji satelity. Dodatkowo paliwo może umożliwić przekształcenie Landsat 7 w radiometr transferowy lub przyrząd kalibracyjny, jak również potencjalnie rozszerzyć cele naukowe misji Landsat 7. Będzie to pierwsze w historii tankowanie satelity w kosmosie.

Landsat 8 (ryc. 3.16), wcześniej nazywany Landsat Data Continuity Mission (LDCM), to najnowszy satelita misji Landsat. Został umieszczony na orbicie w lutym 2013 roku i jest pierwszym satelitą misji Landsat wyposażonym w instrument optyczny OLI (Operational Land Imager) oraz termalny sensor promieniowania podczerwieni TIRS (Thermal InfraRed Sensor).



Ryc. 3.16. Satelita Landsat 8 (źródło: NASA Landsat, 2020)

Landsat 8 krąży po heliosynchronicznej orbicie okołobiegunowej na wysokości 705 km z szesnastodniowym cyklem powtarzania. Rozdzielczość przestrzenna danych wynosi 15 m dla kanału panchromatycznego, 30 m dla ośmiu kanałów multispektralnych i 100 m dla dwóch kanałów termalnych (tabela 3.12, 3.13; ryc. 3.18).

Głównym celem misji Landsat 8, podobne jak Landsat 7, jest zapewnienie globalnych zobrazowań powierzchni Ziemi. Dodatkowym celem, związanym z udziałem Europejskiej Agencji Kosmicznej, jest szybkie rozpowszechnianie danych Landsat wśród europejskich użytkowników. NASA kontynuuje nieograniczone i bezpłatne rozpowszechnianie danych z satelity wśród użytkowników.

Landsat 8 został zaprojektowany na pięcioletni okres pracy z możliwością przedłużenia o dodatkowe pięć lat użytkowania. Ze względu na ograniczenia czasowe, instrument pokładowy TIRS został zaprojektowany na trzyletni okres żywotności.

W ramach programu Landsat 8 w archiwum Landsat Collection 1 dostępne są dane na trzech poziomach przetworzenia. Od najmniej przetworzonych, tylko wstępnie skalibrowanych – poziom 1, przez skalibrowane i skorygowane o wpływ atmosfery –

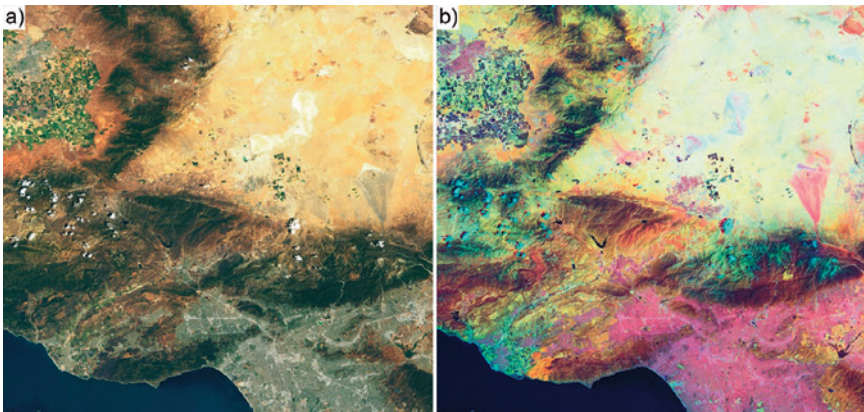
Tabela 3.12. Charakterystyka satelity Landsat 8

Data umieszczenia na orbicie	Landsat 8 (Landsat Data Continuity Mission, LDCM) – 11 lutego 2013 roku
Orbita	okołobiegunowa, heliosynchroniczna, wysokość 705 km
Instrumenty	OLI (Operational Land Imager) + TIRS (Thermal InfraRed Sensor)
Rozdzielczość przestrzenna	15 m (PAN)/30 m (MSI)/100 m (TIRS)
Rozdzielczość spektralna	1 kanał PAN + 8 kanałów (VIS/NIR/SWIR) + 2 kanały (TIRS)
Rozdzielczość czasowa	16 dni
Zastosowanie	<ul style="list-style-type: none"> • rolnictwo, leśnictwo • zarządzanie regionalne • kartografia • geologia • bezpieczeństwo narodowe i wiele innych

poziom 2 (Surface Reflectance), po poziom 3, który oferuje zaawansowane produkty pochodne oryginalnych obrazów, jak mapa pokrywy śnieżnej czy mapa klasyfikacji pożarów (tabela 3.13).

Pod koniec 2020 roku USGS planuje udostępnić dane Landsat w archiwum Landsat Collection 2, gdzie zostaną zamieszczone obrazy misji Landsat przetworzone z większą dokładnością. Dane Landsat zostaną ponownie skorygowane (geometrycznie, radiometrycznie i atmosferycznie) z wykorzystaniem bardziej precyzyjnych modeli terenu oraz najnowszych metod i algorytmów. Dane w Landsat Collection 1 mają pozostać dostępne przez co najmniej rok po udostępnieniu danych Landsat Collection 2.

Obrazy Landsat dzięki długiej historii misji i globalnemu zasięgowi znajdują bardzo szerokie zastosowanie w rolnictwie (ryc. 3.17), leśnictwie, zarządzaniu regionalnym, w kartografii, geologii, w sektorze bezpieczeństwa narodowego i w wielu innych dziedzinach.



Ryc. 3.17. Zobrazowanie Landsat 8 w barwach naturalnych (a) i w barwach fałszywych (b): kanał TIR jako składowa czerwona, kanał SWIR jako składowa zielona i kanał zakresu promieniowania zielonego jako składowa niebieska. Kompozycja w barwach fałszywych dobrze oddaje zróżnicowanie pokrywy roślinnej (na obrazie w kolorach naturalnych dzika roślinność ma prawie jednolicie oliwkowy kolor, a na kompozycji w barwach fałszywych widzimy rozróżnienie między zarośniętymi brzoskwiniami, mahoniowymi lasami, itd.).

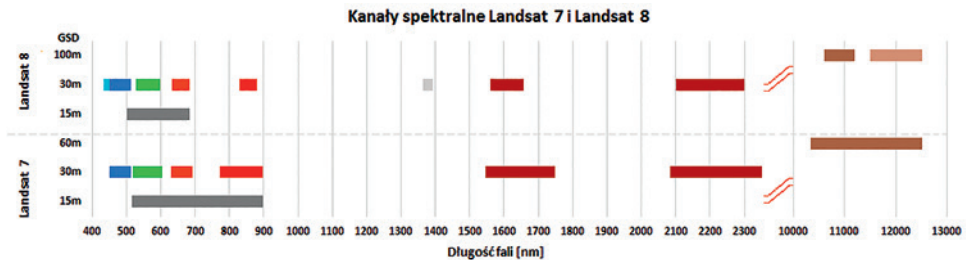
Los Angeles, USA (źródło: NASA L8, 2020)

Tabela 3.13. Charakterystyka produktów Landsat 8

Poziom	Nazwa		Opis produktu	GSD [m]	Zasięg sceny [km]	Objętość danych
1	Level-1	Landsat 8 OLI/TIRS Collection 1	<ul style="list-style-type: none"> Tier-1 (TP) – najwyższej jakości dane odpowiednie do analizy szeregów czasowych (korekcja radiometryczna i geometryczna) Tier-2 (T2) – sceny niespełniające kryteriów poziomu T1 Real-Time (RT) – nowo pozyskane sceny Landsat 8, wstępnie skalibrowane 	15/30/100	185 × 185	1,8 GB
2	Level-2	Surface Reflectance Level-2 Data Products	współczynnik odbicia powierzchni (SR) (bez kanałów termalnych i panchromatycznego)	30	185 × 185	1,8 GB
3	ARD	Landsat Analysis Ready Data Level-2 Data Product	współczynnik odbicia w górnej części atmosfery (TOA), temperatura górnej części atmosfery (BT), współczynnik odbicia powierzchni (SR), tymczasowa temperatura powierzchni (ST) oraz dane dotyczące oceny jakości (QA)	30	5 × 5	650 MB
	DSWE	Landsat Level-3 Dynamic Surface Water Extent	występowanie i stan wód powierzchniowych oraz wszystkich kanały pośrednie użyte do stworzenia tego produktu	30	150 × 150	25 MB
	fSCA	Landsat Level-3 Fractional Snow Covered Area Science Product	mapa pokrywy śnieżnej, maska chmur	30	150 × 150	10 MB
	BA	Landsat Level-3 Burned Area	mapa klasyfikacji pożarów	30	150 × 150	5 MB

Tabela 3.14. Charakterystyka kanałów Landsat 7 i Landsat 8

Landsat 7 ETM+ (nm)				Landsat 8 OLI i TRIS (nm)			
Nr	Nazwa kanału	Zakres spektralny [nm]	GSD [m]	Nr	Nazwa kanału	Zakres spektralny [nm]	GSD [m]
				1	Costal Aerosol	433–453	30
1	Blue	450–515	30	2	Blue	450–515	30
2	Green	525–605	30	3	Green	525–600	30
3	Red	630–690	30	4	Red	630–680	30
4	NIR	775–900	30	5	NIR	845–885	30
5	SWIR-1	1550–1750	30	6	SWIR-1	1560–1660	30
6	TIR	10400–12500	60				
7	SWIR-2	2080–2350	30	7	SWIR-2	2100–2300	30
8	PAN	520–900	15	8	PAN	500–680	15
				9	Cirrus	1360–1390	30
				10	TIRS-1	10600–11200	100
				11	TIRS-2	11500–12500	100



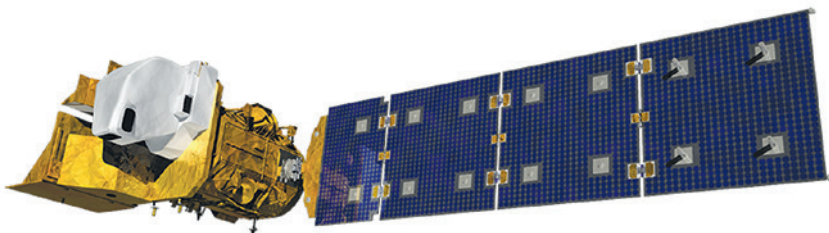
Ryc. 3.18. Zakresy spektralne rejestrowane w poszczególnych kanałach przez detektory na satelitach Landsat 7 i Landsat 8

3.2.3. Planowane misje Landsat

NASA we współpracy z USGS ma w planach wyniesienie w 2021 roku kolejnego satelity na orbitę. Misja Landsat 9 będzie kontynuować cele poprzednich programów skupiając się na zapewnieniu ciągłości w prawie pięćdziesięcioletnim okresie nieprzerwanego zbierania danych. Ponadto Landsat 9 skupiać się będzie na dostarczaniu informacji pomocnych w ocenie wpływu zmian klimatycznych na zasoby środowiska.

Satelita Landsat 9 (ryc. 3.19) wyposażony zostanie w dwa instrumenty pomiarowe: skaner obrazujący OLI-2 (Operational Land Imager 2) oraz TIRS-2 (Thermal InfraRed Sensor 2) – sensor pracujący w podczerwieni termalnej. Oba sensory stanowią zmodernizowaną wersję detektorów zamontowanych na pokładzie Landsat 8. W porównaniu do Landsat 8, nowa misja dostarczać będzie dane o wyższej jakości obrazowania oraz

zapewni lepszą rozdzielczość radiometryczną w porównaniu do poprzednich misji. Instrument OLI-2 dostarczy dane w zakresie widzialnym oraz bliskiej i średniej podczerwieni (VNIR/SWIR) zgodne z poprzednimi właściwościami spektralnymi, przestrzennymi, radiometrycznymi i geometrycznymi satelity.



Ryc. 3.19. Model satelity Landsat 9 (źródło: NASA L9, 2020)

Różnica polega na tym, że Landsat 9 będzie zapewniał większą rozdzielczość radiometryczną (14 bitów w porównaniu do 12 bitów Landsat 8). Pozwoli to m.in. na dostarczenie dodatkowych informacji dla ciemnych obszarów, np. gęstych lasów. TIRS-2 będzie rejestrował promieniowanie termalne (TIR) analogicznie do TIRS (Landsat 8), będzie to jednak ulepszona wersja poprzednika m.in. pod względem możliwości redukcji światła rozproszonego. Instrument TIRS-2 ma zostać wyposażony w dwuzakresowy sensor termowizyjny zapewniający dwa pasma widmowe o maksymalnej rozdzielczości przestrzennej (GSD) wynoszącej 100 m dla obu pasm, zarówno wzdłuż jak i w poprzek toru lotu satelity.

Landsat 9 pracować będzie w szesnastodniowym cyklu z przesunięciem o osiem dni w stosunku do Landsata 8, w celu umożliwienia rejestracji tego samego obszaru co tydzień. Misja Landsat 9 będzie również zapewniała nieodpłatny dostęp do danych, dzięki czemu Landsat 9 umożliwi wsparcie decyzji w takich kluczowych obszarach jak:

- zmiany klimatyczne,
- globalna dynamika zmian powierzchni lasów, w tym deforestacja lasów tropikalnych,
- rozwój aglomeracji miejskich,
- racjonalne zarządzanie zasobami wodnymi,
- przeciwdziałanie skutkom kataklizmów i klęsk żywiołowych w celu ratowania życia.

W fazie koncepcji jest również misja Landsat 10, w ramach której planuje się zwiększyć rozdzielczość czasową i przestrzenną danych Landsat (do 10 m), aby zwiększyć kompatybilność z danymi Sentinel-2.

3.3. Wybrane komercyjne optyczne systemy satelitarne o dużej i bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej

Obecnie najwyższą rozdzielczość przestrzenną jaką bezpłatnie oferują wielospektralne systemy satelitarne jest GSD 10 m (Sentinel-2 w zakresie spektralnym VIS i NIR). Takie średniorozdzielcze dane satelitarne z powodzeniem nadają się do wykorzystania w regionalnej i globalnej obserwacji powierzchni Ziemi, np. w klasyfikacji pokrycia i użytkowania terenu, w obserwacji globalnej biomasy lasów, analizie rozwoju aglome-

racji miejskich, czy szacowaniu skutków klęsk żywiołowych i zmian klimatu. Niestety rozdzielczość ta może być niewystarczająca do szczegółowych analiz niewielkich obiektów (np. bardzo wąskich działek rolnych), dla których wymagana jest duża dokładność geometryczna opracowania. W takich przypadkach, i gdy analizie ma podlegać stosunkowo duży obszar opracowania, trudny do objęcia przy użyciu zobrazowań lotniczych (z samolotów lub z niskiego pułapu, za pomocą bezałogowych statków powietrznych), wykorzystuje się wysoko- i bardzo wysokorozdzielcze dane satelitarne, które są oferowane na rynku komercyjnym.

3.3.1. Wybrane komercyjne misje wysokorozdzielczych optycznych systemów satelitarnych

Wysokorozdzielcze dane satelitarne (GSD 1–5 m) stosuje się głównie w obserwacji stosunkowo niewielkich obszarów (np. województw, miast, terenów lokalnych zagrożeń czy lokalnych obszarów niebezpiecznych, lotnisk itd.). Poniżej opisano wybrane misje wysokorozdzielczych optycznych systemów satelitarnych: SPOT, EROS, Cartosat-1, PlanetScope i Gaofen, których parametry zamieszczono w tabeli 3.15.

SPOT

Program SPOT został uruchomiony już w 1978 roku przy współpracy Belgii i Szwecji przez francuską organizację CNES (Centre National d'Études Spatiales), mającą charakter agencji rządowej. Z początku misję stanowiły cztery satelity średniorozdzielcze (SPOT-1, -2, -3 i -4). Pierwszym satelitą wysokorozdzielczym misji, umieszczonym na orbicie w 2002 roku, był satelita SPOT-5 wyposażony w sensor HRG (High Resolution Geometric) wysokiej rozdzielczości 2,5 m obrazujący w kanale PAN oraz sensorem HRS (High Resolution Stereoscopic) do obrazowania w trybie stereo. Czas rewizyty SPOT-5 wynosił dwa–trzy dni. Kolejne satelity SPOT-6 i SPOT-7 umieszczono na orbicie odpowiednio w 2012 i w 2014 roku. W trybie Super mode pozyskują dane panchromatyczne o rozdzielczości przestrzennej GSD 1,5 m, a w zakresie VIS i NIR w rozdzielczości przestrzennej GSD 6 m z rozdzielczością czasową nawet jednego dnia.

EROS-A

EROS-A to pierwszy wysokorozdzielczy satelita misji EROS należących do Israel Aerospace Industries, która swoje doświadczenie zbudowała na produkcji satelitów szpiegowskich Orfeq. EROS-A został umieszczony na orbicie w 2000 roku i dostarczał zobrazowań o rozdzielczości przestrzennej GSD 1,9 m w zakresie panchromatycznym do 2015 roku.

CARTOSAT-1

Pierwszy wysokorozdzielczy satelita CARTOSAT-1 z serii indyjskich satelitów obsługiwanych przez Indian Space Research Organisation (ISRO) został umieszczony na orbicie w 2005 roku. Wyposażono go w dwie kamery umożliwiające wykonywanie zdjęć pod różnymi kątami. CARTOSAT-1 posiada wyłącznie kanał panchromatyczny o rozdzielczości przestrzennej GSD 2,5 m.

PlanetScope

Nowatorskim wysokorozdzielczym systemem satelitarnym jest system firmy Planet

Labs składający się z satelitów o wysokiej rozdzielczości przestrzennej: PlanetScope (Dove i nowszej generacji SuperDove) oraz RapidEye, który pozyskiwał zobrazowania do lutego 2020 roku. System PlanetScope stanowi największą na świecie konstelację satelitów – aktualnie na orbicie znajduje się około 150 działających nanosatelitów Dove, a z początkiem 2020 roku wyniesiono 26 satelitów SuperDove. Satelity PlanetScope charakteryzują się wyjątkowo małymi rozmiarami, co jest dużą innowacją w branży kosmicznej. Dostarczają zobrazowania w czterech kanałach spektralnych (VIS i NIR) o rozdzielczości przestrzennej GSD 3,0 m, a czas rewizyty wynosi jeden dzień. Dane archiwalne pozyskane przez satelitę RapidEye są dostępne w pięciu kanałach spektralnych (VIS, NIR, RedEdge) w rozdzielczości przestrzennej GSD 5,0 m. Planet Labs w ramach polityki otwartego dostępu do danych udostępnia internetowy portal Planet Explorer, za pomocą którego możliwe jest przeglądanie zobrazowań PlanetScope, SkySat i RapidEye oraz obrazów Sentinel.

Gaofen

Gaofen-1 to satelita należąca do Chińskiej Narodowej Agencji Kosmicznej. Został wystrzelony w 2013 roku w ramach cywilnego programu HDEOS (High-Definition Earth Observation Satellite). Satelita Gaofen rejestruje obraz panchromatyczny o rozdzielczości przestrzennej GSD 2,0 m oraz czterokanałowe obrazy wielospektralne (VIS i NIR) o rozdzielczości przestrzennej GSD 8,0 m. W kolejnych latach program ma być rozszerzany o nowe satelity i nowe zadania. Cała seria urządzeń ma się znaleźć na orbicie w 2020 roku. Ich misja została zaplanowana na około pięć do ośmiu lat.

Tabela 3.15. Parametry wybranych satelitów wysokorozdzielczych

Satelita	Status misji	Rozdzielczość przestrzenna [m]			Kanały spektralne	Czas rewizyt	Wysokość orbity [km]
		PAN	MS	SWIR			
SPOT-5	2002–2015	2,5	10	20	PAN + 3 MS (G/R/NIR) + SWIR	2–3 dni	832
SPOT-6	2012–	1,5	6	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	1 dzień	694
SPOT-7	2014–	1,5	6	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	1 dzień	694
EROS-A	2000–2015	1,9	–	–	PAN	4,5 dnia	530
CARTOSAT-1	2005–	2,5	–	–	PAN	5 dni	617
RapidEye	2008–2020	–	5	–	4 MS (VIS/NIR) + RE	5,5 dnia	630
PlanetScope	2014–	–	3	–	4 MS (VIS/NIR)	1 dzień	475
Gaofen-1	2013–	2	8	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	≤ 4 dni	654

3.3.2. Wybrane komercyjne misje bardzo wysokorozdzielczych optycznych systemów satelitarnych

Dane bardzo wysokorozdzielcze ($GSD < 1$ m) stosuje się, podobnie jak wysokorozdzielcze obrazy satelitarne, głównie w obserwacjach małych obszarów lub kiedy wymagana jest duża dokładność geometryczna opracowania (np. w kartografii cyfrowej (mapy topograficzne 1: 10 000), w badaniach użytkowania terenu, dla potrzeb kontroli dopłat w rolnictwie w krajach UE, wykrywania nielegalnej zabudowy, obozów uchodźców, samolotów, okrętów bądź łodzi imigrantów itp.). Do systemów satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej zaliczamy: IKONOS-2, QuickBird-2, EROS-B, KOMPSAT, WorldView, GeoEye, CARTOSAT, Pleiades, i SkySat. Poniżej przedstawiono opis wybranych komercyjnych misji bardzo wysokorozdzielczych optycznych systemów satelitarnych, których parametry zamieszczono w tabeli 3.16.

IKONOS-2 i QuickBird-2

Pierwszym satelitą pozyskującym obrazy panchromatyczne o rozdzielczości przestrzennej GSD poniżej 1,0 m był satelita IKONOS-2 (Space Imaging), którego sensor optyczny posiadał rozdzielczość kanału PAN 0,82 m GSD , a kanałów wielospektralnych (MS) 3,2 m GSD . Obrazował on powierzchnię Ziemi z wysokości 681 km (orbita LEO) od 1999 do 2015 roku. Największym jego konkurentem umieszczonym na orbicie 430 km, niespełna dwa lata po jego starcie, okazał się QuickBird-2 (DigitalGlobe). Charakteryzował się on identyczną rozdzielczością spektralną (cztery kanały spektralne RGB+NIR), ale znacznie wyższą rozdzielczością przestrzenną: 0,65 m GSD PAN oraz 2,62 m GSD MS.

EROS

W 2006 roku misja EROS (Israel Aerospace Industries) została rozbudowana o satelitę EROS-B, który pozyskuje zobrazowania panchromatyczne o bardzo wysokiej rozdzielczości 0,65 m. Aktualnie urządzenie wykorzystywane jest do monitorowania irańskiego programu jądrowego pod kątem potencjalnych zagrożeń dla bezpieczeństwa Izraela. W 2019 roku izraelska misja satelitów wojskowych została rozbudowana o nowego satelitę bardzo wysokorozdzielczego EROS-C, który pozyskuje obrazy panchromatyczne z rozdzielczością przestrzenną GSD 0,38 m (w nadirze) i GSD 0,76 m w zakresie multispektralnym (VIS i NIR). Konstelacja satelitów EROS wykorzystuje zaawansowane możliwości sztucznej inteligencji do automatycznego pozyskiwania danych, dzięki czemu satelity EROS cechuje szybki czas reakcji (poniżej 90 minut) dla wykonania całego cyklu misji od etapu jej planowania, przez zadania satelitarne, aż po akwizycję obrazu w trybie na żądanie (ang. *on demand*).

KOMPSAT

Misja koreańskich satelitów KOMPSAT (ang. *Korea Aerospace Research Institute, KARI*) rozpoczęła się od umieszczenia na orbicie w 1999 roku niskorozdzielczego satelity KOMPSAT-1. W 2006 roku na orbicie został umieszczony pierwszy z serii satelita o bardzo wysokiej rozdzielczości KOMPSAT-2 pozyskujący obrazy panchromatyczne z pikselem o rozmiarze 1,0 m, a obrazy wielospektralne z pikselem 4 m. W 2012 roku konstelacja została powiększona o kolejnego satelitę pozyskującego obrazy o bardzo wysokiej rozdzielczości: 0,7 m (PAN) i 2,6 m (MS). W nadchodzących latach przewidziane jest wzmocnienie misji przez umieszczenie na orbicie kolejnego satelity KOMPSAT-6.

Tabela 3.16. Parametry wybranych satelitów bardzo wysokorozdzielczych

Satelita	Status misji	Rozdzielczość przestrzenna [m]			Kanały spektralne	Czas rewizyt	Wysokość orbity [km]
		PAN	MS	SWIR			
IKONOS-2	1999–2014	0,82	3,2	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	3 dni	682
QuickBird	2001–2014	0,62	2,4	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	2–12 dni	450
EROS-B	2006–	0,65	–	–	PAN	5–6 dni	520
EROS-C	2019	0,38	0,78	–	PAN + 4 MS	bd.	520
KOMPSAT-2	2006–	1,0	4,0	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	3,5 dnia	685
KOMPSAT-3	2012–	0,7	2,6	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	3,5 dnia	685
WorldView-1	2007–	0,46	–	–	PAN	1,7–4,5 dni	496
WorldView-2	2009–	0,46	1,85	–	PAN + 8 MS (VIS/NIR/RE)	1,1–3,7 dnia	770
WorldView-3	2014–	0,31	1,24	3,7	PAN + 8 MS + 8 SWIR + 12 CAVIS (30 m)	1 dzień	617
WorldView-4 (GeoEye-2)	2016–2019	0,31	1,24	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	1,1–4,5 dnia	617
GeoEye-1	2008–	0,41	1,65	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	1,1–3,7 dnia	681
CARTOSAT-2	2008–	0,8	–	–	PAN	4 dni	635
CARTOSAT-2A	2008–	0,8	–	–	PAN	4 dni	635
CARTOSAT-2B	2010–	0,8	–	–	PAN	4 dni	630
CARTOSAT-2C	2014–	0,6	–	–	PAN	bd.	505
CARTOSAT-2D	2017–	0,6	2,0	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	4 dni	505
CARTOSAT-2E	2017–	0,6	2,0	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	7 dni	505
CARTOSAT-2F	2018–	0,6	2,0	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	7 dni	505
CARTOSAT-3	2019–	0,25	1,3	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	bd.	509
Pleiades-HR 1A	2011–	0,7	2,8	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	1 dzień	694
Pleiades-HR 1B	2012–	0,7	2,8	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	1 dzień	694
SkySat	2014–	0,72	1,0	–	PAN + 4 MS (VIS/NIR)	4–5 dni	575

WorldView i GeoEye

Misje bardzo wysokorozdzielczych satelitów serii WorldView (WV) rozpoczęły się w 2007 roku od umieszczenia przez firmę DigitalGlobe satelity WorldView-1 na orbicie 496 km nad Ziemią. Obrazował on powierzchnię Ziemi jedynie w kanale panchromatycznym (PAN), ale za to z rozdzielczością przestrzenną GSD 0,46 m w pasie szerokości 17,6 km. Kolejny satelita nowej generacji WorldView-2 (WV-2), został wyposażony w skaner wielospektralny rejestrujący w ośmiu kanałach spektralnych (1,86 m GSD w nadirze). Poza standardowymi kanałami RGB oraz NIR1 pojawiły się takie jak RedEdge, Coastal, Yellow oraz NIR2. Kanał PAN obrazował z rozdzielczością 0,46 m. Rozdzielczość przestrzenna w kanale PAN została poprawiona do 0,31 m GSD w przypadku sensora WorldView-3 (WV-3). W zasadzie jest to najwyższa obecnie rozdzielczość obrazu oferowana przez dostawców obrazów komercyjnych użytkownikom cywilnym, choć w listopadzie 2020 roku firma MAXAR (obecny właściciel konstelacji WorldView) opublikowała informacje o dostępności przetworzonych zobrazowań WV-3 do rozdzielczości terenowej 0,15 m GSD. Kanały spektralne tego satelity zostały rozbudowane z 8 (GSD 1,24 m jak w przypadku WV-2) do kolejnych 8 rejestrujących w zakresie SWIR (3,7 m GSD) oraz 12 kanałów CAVIS (30 m GSD).

Ostatni z serii satelitów WorldView-4 (DigitalGlobe, obecnie Maxar) został wyniesiony w 2016 roku. Był on wyposażony w bardzo podobny sensor jak WV-3 (PAN 0,31 m GSD/MS 1,24 MS) i obrazował w czterech kanałach spektralnych z orbity 617 km. Szerokość rejestrowanego pasa zobrazowania wynosiła 13 km. Satelita miał, podobnie jak cała reszta serii WV, możliwość uchylenia sensora i rejestracji w trybie stereo. Na początku 2019 roku doszło do uszkodzenia żyroskopu satelity WorldView-4, w efekcie czego niemożliwe było kontrolowanie orientacji satelity w przestrzeni kosmicznej, a tym samym pozyskiwanie przez niego dalszych zobrazowań. Firma Maxar zapowiada zbudowanie nowej, innowacyjnej konstelacji satelitów obserwacji Ziemi – WorldView Legion.

Wysokorozdzielczy satelita serii GeoEye-1 (GeoEye, obecnie Maxar) już od 2008 roku pozyskuje obrazy panchromatyczne o rozdzielczości przestrzennej 0,41 m GSD i wielospektralne 1,65 m GSD.

Seria satelitów WorldView i GeoEye, oprócz zwiększenia rozdzielczości przestrzennej i spektralnej, zwiększyła również częstotliwość pozyskiwania obrazów (nawet do jednego razu dziennie), w stosunku do wcześniejszych bardzo wysokorozdzielczych misji komercyjnych.

CARTOSAT

Seria indyjskich satelitów CARTOSAT (ang. *Indian Space Research Organisation, ISRO*) przez umieszczenie na orbicie pierwszego satelity z serii CAROSAT-2, przekształciła się od 2007 roku w serię satelitów bardzo wysokiej rozdzielczości. Seria tych satelitów wykorzystywana jest głównie do monitorowania zasobów Ziemi oraz w branży obronnej. Pierwsze cztery sensory CARTOSAT-1, -2A, -2B i -2C posiadają wyłącznie kanał panchromatyczny o rozdzielczości przestrzennej GSD 0,8 m. Trzy kolejne satelity CARTOSAT-2D, -2E i -2F posiadają dodatkowo cztery kanały wielospektralne (VIS i NIR) o rozdzielczości spektralnej 2,0 m. W 2019 roku na orbicie LEO umieszczono satelitę CARTOSAT-3, który charakteryzuje się rozdzielczością 0,25 m GSD, jednak jego obrazy jeszcze nie są dystrybuowane.

Pleiades

W 2011 roku CNES uruchomił program Pléiades, który stanowi integralną część włosko-francuskiego systemu satelitarnego ORFEO (Optical & Radar Federated Earth Observation). W ramach programu na tej samej orbicie co SPOT-6 i -7 umieszczono dwa

satelity Pléiades-HR 1A i 1B o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej (0,7 m GSD) kanału PAN i czterech kanałach spektralnych o GSD 2,8 m. Dane z tej serii satelitów mogą być wykorzystywane m.in. w zakresie kartowania topograficznego, rolnictwa, gospodarki przestrzennej, obronności, hydrologii lub w leśnictwie. Na przełomie 2020 i 2021 roku planowane jest umieszczenie na orbicie nowej generacji satelitów Pléiades Neo oraz CO3D (Constellation Optique 3D). Cztery identyczne satelity Pléiades Neo będą wyposażone w sensor rejestrujący kanały PAN (GSD 0,3 m) oraz MS (GSD 1,2 m) od zakresu widzialnego, przez czerwień krawędziową, po bliską podczerwień. Z kolei konstelacja CO3D, składać się będzie z czterech identycznych satelitów, które mają być umieszczone na orbicie w końcu 2022 roku. Będą one dostarczały dane optyczne w trybie pokrycia stereoskopowego GSD 0,5 m dla całego globu. Zebrane obrazy mają posłużyć do wygenerowania mapy 3D Ziemi.

SkySat

SkySat (Planet Labs) to konstelacja satelitów (dawne satelity Terra Bella) o rozdzielczości przestrzennej 0,72 m GSD (MS: RGB NIR, PAN), służących do obserwacji Ziemi, które oprócz obrazów satelitarnych zapewniają również usługi obrazowania wideo i analizy w bardzo wysokiej rozdzielczości oraz dane 3D (tryb stereo). Od 2013 do 2018 roku na orbicie zostało umieszczonych już 15 satelitów SkySat, a kolejne trzy zostały wyniesione w czerwcu 2020 roku. Kilka satelitów Skysat w roku 2020 deorbitowano (obniżono wysokość orbity) przez co uzyskano wyższą rozdzielczość przestrzenną obrazu (0,5 m GSD) w zakresie 4 kanałów spektralnych.

3.4. Wybrane systemy o średniej rozdzielczości

Urszula Cisło-Lesicka

Sensory średniorozdzielcze (GSD 10–100 m) wykorzystywane są do pozyskiwania danych satelitarnych w skali globalnej i regionalnej. Ich główne przeznaczenie to: klasyfikacji pokrycia i użytkowania terenu (angl. *Land Use Land Cover*, LULC), monitorowanie upraw, obserwacja globalnej biomasy lasów, analiza rozwoju metropolii, ochrona środowiska, szacowanie skutków klęsk żywiołowych i zmian klimatu. Poza danymi najpopularniejszych obecnie misji średniorozdzielczych Sentinel-2 (GSD 10–60 m) i Landsat (GSD 15–100 m) dostępne są również dane opisanych niżej systemów średniorozdzielczych jak SPOT (dane archiwalne 1986–2013) i ASTER, których parametry zamieszczono w tabeli 3.17.

SPOT

Jedną z pierwszych misji komercyjnych średniorozdzielczych systemów satelitarnych był SPOT realizowany głównie przez mającą charakter agencji rządowej francuską organizację CNES. Jak już wspomniano w podrozdziale 3.3 misja SPOT została uruchomiona już w 1978 roku przy współpracy Belgii i Szwecji. Pierwszy satelita SPOT-1 zbudowany całkowicie przez CNES został umieszczony na orbicie w 1986 roku. Po nim na orbicie umieszczano kolejno SPOT-2 oraz SPOT-3. Posiadały one po dwa identyczne skanery optoelektryczne HRV (High Resolution Visible), które działały jednocześnie lub indywidualnie. Pasma panchromatyczne SPOT charakteryzowało się rozdzielczością przestrzenną GSD 10 m, a trzy pasma wielospektralne (G, R, NIR) posiadały GSD 20 m. Scena miała powierzchnię 3600 km² a rozdziel-

czość czasowa, dzięki odchyleniu osi optycznej od nadiru, wynosiła od jednego do trzech dni w zależności od szerokości geograficznej. Kolejny satelita SPOT-4 działał jedynie cztery lata dokonując ważnych rejestracji wieloczasowych obszarów zbliżonych do terenów, dla których obecnie dostarczane są dane Sentinel-2 (rewizyta co pięć dni).

ASTER

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) to jeden z sensorów satelitarnych o średniej rozdzielczości przestrzennej znajdujący się na pokładzie satelity Terra, umieszczonego na orbicie przez NASA w 1999 roku. ASTER posiada 14 kanałów spektralnych (4 kanały MS (VIS i NIR), 6 kanałów SWIR, 5 kanałów TIR) o zmiennej rozdzielczości przestrzennej GSD: 15 m dla kanałów widzialnych i kanałów NIR, 30 m dla kanałów SWIR i 90 m dla kanałów TIR. Te parametry czynią ASTER urządzeniem o najwyższej rozdzielczości przestrzennej na pokładzie satelity Terra, które jest przystosowane do monitorowania powierzchni Ziemi w skali nie tylko globalnej ale i lokalnej. ASTER został zaprojektowany jako wspólny projekt USA (NASA) i Japonii (METI i J-spacesystems), mający na celu dostarczanie szczegółowych danych dotyczących rzeźby terenu, wysokości ładu, odbiciu i temperaturze powierzchni terenu. Może być także wykorzystywany do wykrywania zmian, kalibracji, walidacji i badań powierzchni terenu, badań nad dynamiką wegetacji roślinności, monitorowania zagrożeń i wszelkiego rodzaju zmian pokrycia terenu. Od 2016 roku cały katalog danych ASTER jest dostępny bezpłatnie w serwisie USGS Earth Explorer (EarthExplorer, 2020) i NASA Earthdata Search (Earthdata Search, 2020).

Tabela 3.17. Parametry wybranych satelitów średniorozdzielczych

Satelita	Status misji	Rozdzielczość przestrzenna [m]			Kanały spektralne	Czas rewizyt	Wysokość orbity [km]
		PAN	MS	SWIR			
SPOT-1	1986–2003	10	20	–	PAN + 3 MS (G+R+NIR)	1–3 dni	832
SPOT-2	1990–2009	10	20	–	PAN + 3 MS (G+R+NIR)	1–3 dni	832
SPOT-3	1993–1996	10	20	–	PAN + 3 MS (G+R+NIR)	1–3 dni	832
SPOT-4	1998–2013	10	20	20	PAN + 3 MS (G+R+NIR) + SWIR	5 dni	832
ASTER	1999–	15	30	30	4 VNIR + 6 SWIR + 5 TIR	16 dni	705

3.5. Wybrane systemy o niskiej rozdzielczości

zespół ProGea 4D

Sensory niskorozdzielcze (GSD > 100 m) wykorzystywane są do pozyskiwania danych satelitarnych w skali globalnej. Ich główne przeznaczenie to: badanie składu atmosfery, monitorowanie zjawisk pogodowych, monitorowanie oceanów i pokrywy lodowej, monitoring biomasy oraz dynamiki zmian użytkowania Ziemi w skali globalnej.

3.5.1. Wybrane niskorozdzielcze misje NASA i NOAA

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) to amerykańska instytucja rządowa zajmująca się prognozowaniem pogody oraz ostrzeganiem przed zagrożeniami związanymi z ekstremalnymi zjawiskami meteorologicznymi. Do NOAA należą takie urządzenia jak: GOES-S, GOES-16/GOES East, Jason-3, Suomi-NPP, DSCOVR, NOAA 20, COSMIC-2. NOAA operuje obecnie 19 satelitami przeznaczonymi do długoterminowego monitorowania i prognozowania pogody. Urządzenia należące do NOAA zapewniają codzienne globalne pokrycie zobrazowaniami. Satelity zarządzane przez agencję NOAA można sklasyfikować według następujących kryteriów:

- operacyjne satelity środowiskowe na orbicie okołobiegunowej (ang. *Polar Operational Environmental Satellite*, POES) – stanowią główne źródło danych dla monitorowania warunków pogodowych i środowiskowych w ostatnich dziesięcioleciach,
- geostacjonarne operacyjne satelity środowiskowe (seria R (GOES i GOES-S)) – seria satelitów, które rozpoczęły monitoring Stanów Zjednoczonych (i Hawajów), a następnie półkuli zachodniej; w planach jest objęcie obserwacją także większej części półkuli południowej,
- misja badania topografii powierzchni oceanu (seria Jason) – stanowi międzynarodowy projekt monitorujący globalne warunki oceaniczne i morskie,
- Deep Space Climate Observatory (DSCOVR) – stacjonuje na orbicie L1 DSCOVR i służy do podstawowego monitorowania i ostrzegania w przypadku wystąpienia wiatru słonecznego, powodującego zaburzenia w warunkach okołoziemskich; zapewnia stałe pokrycie obrazami nasłonecznionej części Ziemi,
- Meteorological Satellite Program (DMSP) – zapewnia aktualne prognozowanie pogody, a także opracowuje prognozy we współpracy z siłami lotniczymi U.S. Air Force.

Z kolei amerykańska agencja rządowa NASA dysponuje m.in. satelitami obserwacyjnymi Terra i Aqua, na pokładzie których znajduje się teledetekcyjny sensor niskiej rozdzielczości MODIS.

Poniżej przedstawiono charakterystykę wybranych systemów satelitarnych niskiej rozdzielczości należących do agencji NOAA (Suomi-NPP, GOES i NOAA) i NASA (MODIS), których parametry zamieszczono w tabeli 3.18.

Suomi-NPP

Satelita meteorologiczny Suomi-NPP obsługiwany przez NOAA jest częścią systemu POES. Został nazwany na cześć zmarłego Vernera E. Suomi, fińsko-amerykańskiego naukowca uważanego za ojca meteorologii satelitarnej. Satelita posiada na pokładzie cztery zaawansowane sensory, w tym radiometr pracujący w podczerwieni termalnej (ang. *Clouds and the Earth's Radiant Energy System*, CERES) oraz pakiet Radiometer Suite (ang. *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*, VIIRS), sondę w podczerwieni Cross-Track (ang. *Cross-track Infrared Sounder*, CrIS), grupę obrazujących spektrometrów do pomiaru ozonu Profiler (ang. *Ozone Mapping and Profiler Suite*, OMPs), zaawansowaną technologicznie sondę mikrofalową oraz radiometr pracujący w zakresie mikrofal (ang. *Advanced Technology Microwave Sounder*, ATMS). Suomi-NPP ma niemal globalny zasięg, jednak niską rozdzielczość przestrzenną sięgającą 400 m.

GOES

System amerykańskich (NOAA) satelitów meteorologicznych GOES, składający się z serii satelitów GOES i GOES-R obecnie posiada na orbicie sześć satelitów: GOES-R, GOES-S, GOES-16, GOES-15 oraz dodatkowe GOES-13 i GOES-14 będące urządzeniami zapasowymi. System GOES zapewnia spójne monitorowanie zachodniej półkuli pod kątem klimatu, pogody i pomocy w sytuacjach awaryjnych. Od pierwszego uruchomienia w 1975 roku, dzięki ewolucji technologii obrazowania i sensorów, system GOES znacznie się rozwinął. Kolejne urządzenia z serii GOES-R, które zostaną wprowadzone na rynek w 2024 roku, obejmą satelity GOES-T i GOES-U. Trzecia generacja GOES-R różni się od poprzednich wdrożeniem Geostationary Lightning Mapper (GLM). Inne urządzenia na pokładzie rodziny GOES-R obejmują Advanced Baseline Imager (ABI), Solar Ultra Violet Imager (SUVI), Extreme Ultra Violet, urządzenie do rejestracji promieniowania rentgenowskiego (EXIS), Space Environmental In-Situ Suite (SEISS) oraz MagnetoMeter (MAG).

NOAA

Seria satelitów amerykańskiej agencji NOAA znajdujących się na orbicie polarnej rozpoczęła swoją działalność w 1979 roku. Najnowsza wersja urządzenia z rodziny NOAA, NOAA-20, została umieszczona na orbicie w 2017 roku. NOAA-20 był wówczas pierwszym satelitą nowej generacji okołobiegunowych satelitów orbitujących w systemie Joint Polar Satellite System (JPSS). Satelity NOAA niosą na swoim pokładzie m.in. urządzenie AVHRR/3 (Advanced Very High Resolution Radiometer), które zapewnia pozyskanie obrazów z rozdzielczością przestrzenną GSD około 1 km i rozdzielczością spektralną sześciu kanałów (VIS/NIR/IR) 2 razy dziennie (jeden satelita) i do 14 razy dziennie (wszystkie aktywne satelity NOAA). Dane z satelitów NOAA wykorzystywane są m.in. w codziennym obrazowaniu chmur i powierzchni terenu, granic lądu i wody, detekcji śniegu i lodu oraz monitorowaniu temperatury powierzchni mórz i oceanów.

MODIS

MODIS to spektrometriometr obrazujący o niskiej rozdzielczości przestrzennej, obsługiwany przez NASA. MODIS posiada 36 kanałów spektralnych o rozdzielczości przestrzennej 1 km, 500 i 250 m. Jest najważniejszym sensorem znajdującym się na pokładzie satelitów Terra (Proto Flight Model, PFM) i Aqua (Flight Model 1, FM1). Aqua obsługuje urządzenia: AIRS, AMSU, AMSR-E, CERES. Terra obsługuje dodatkowo: ASTER, CERES, MISR, MOPITT. Oba satelity poruszają się wokół Ziemi po orbicie polarnej. Cała powierzchnia globu jest obrazowana co jeden do dwóch dni, w celu lepszego zrozumienia globalnych procesów środowiskowych na lądzie, oceanie i w atmosferze. Satelita Terra koncentruje się na procesach zachodzących na lądzie, podczas gdy Aqua koncentruje się głównie na obserwacji cyklu hydrologicznego.

3.5.2. Wybrane niskorozdzielcze misje ESA i EUMETSAT

Europejskie agencje kosmiczne: ESA i EUMETSAT, również dysponują satelitami obserwacyjnymi niskiej rozdzielczości mającymi możliwość ciągłego monitorowania powierzchni całego globu ziemskiego. Poniżej przedstawiono charakterystykę wybranych systemów satelitarnych niskiej rozdzielczości należących do ESA i EUMETSAT: Meteosat (ESA, EUMETSAT) i MetOp (EUMETSAT), których parametry zamieszczono w tabeli 3.18.

Meteosat

Meteosat to misja podzielona na dwie generacje. Obsługiwana jest przez ESA i EUMETSAT. Misja ma służyć badaniom publicznym nad prognozowaniem meteorologicznym. Obecnie w skład misji wchodzi cztery satelity drugiej generacji MSG (Meteosat Second Generation), które od 2002 roku znajdują się na orbicie geostacjonarnej, zapewniając 5–15 minutowe obrazowanie nad Europą, Afryką i Oceanem Indyjskim. Satelity MSG wyposażone są w dwa przyrządy: Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) oraz Geostationary Earth Radiation Budget (GERB). SEVIRI zapewnia dwunastokanałowe zobrazowania o rozdzielczości przestrzennej 1–3 km, natomiast GERB zobrazowania dwukanałowe, o rozdzielczości przestrzennej 45 km.

Celem drugiej generacji satelitów MSG (Meteosat Second Generation) jest kontynuacja misji satelitów Meteosat (pierwszej generacji MFG (Meteosat First Generation)), w ramach której od 1977 roku umieszczono na orbicie siedem satelitów (ostatni z nich zakończył pozyskiwanie danych w 2016 roku). Zadania satelitów MSG obejmują: wielospektralne obrazowanie chmur, monitorowanie meteorologiczne i klimatologiczne, szybkie przekazywanie danych użytkownikom. Satelity te zapewniały również wsparcie w sytuacjach awaryjnych satelitom pierwszej generacji MFG. Od 2022 roku planowane jest umieszczanie na orbicie geostacjonarnej sześciu kolejnych satelitów misji Meteosat – satelitów trzeciej generacji MTG (Meteosat Third Generation). Będą one wyprodukowane w dwóch wersjach przez międzynarodowe konsorcjum, którym kieruje francusko-włoska firma Thales Alenia Space:

- MTG-I (Imaging) – cztery satelity wyposażone w urządzenia obrazujące: Flexible Combined Imager (FCI), Lightning Imager (LI), Data Collection System (DCS), Search and Rescue (GEOSAR),
- MTG-S (Sounding) – dwa satelity wyposażone w urządzenia sondujące: Infrared Sounder (IRS), Ultra-violet, Visible and Near-infrared Sounder (UVN), stanowiące część planowanej misji Sentinel-4.

Pełna konfiguracja operacyjna satelitów Meteosat trzeciej generacji MTG zapewni obrazowanie Europy co 2,5 minuty, a Afryki co 10 minut.

MetOp

Satelity MetOp są częścią systemu polarnego EUMETSAT (EUMETSAT Polar System, EPS), posiadającego trzy satelity poruszające się po orbitach biegunowych. Pierwsze urządzenie z tej serii, MetOp-A, zostało wprowadzone na orbitę w 2006 roku, a najnowszy, MetOp-C w 2018 roku. Seria zapewniła 14 lat udanego obrazowania i gromadzenia danych wspierających badania meteorologiczne. Misja jest wspólnym projektem kilku organizacji: EUMETSAT, NOAA, ESA i CNES.

W skład serii MetOp wchodzi 12 urządzeń, w tym m.in. podczerwony interferometr sondowania atmosferycznego (ang. *Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*, IASI), mikrofalowa sonda do pomiaru wilgotności (ang. *Microwave Humidity Sounder*, MHS), odbiornik globalnego systemu nawigacji satelitarnej do sondowania atmosferycznego (ang. *Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding*, GRAS), zaawansowany skaterometr (ang. *Advanced SCATterometer*, ASCAT), eksperymentalne urządzenie do globalnego monitorowania ozonu (GOME-2), zaawansowane mikrofalowe urządzenia sondujące (AMSU-A1 i AMSU-A2), wysokiej rozdzielczości sonda promieniowania podczerwonego (HIRS/4), zaawansowany radiometr bardzo wysokiej

rozdzielczości (AVHRR/3), spektrometr do badania strumienia promieniowania słonecznego Space Environmental Monitor (SEM-2) oraz system Search and Rescue Processor (SARP-3/SARR) do odbierania i przetwarzania sygnałów alarmowych z samolotów i statków znajdujących się w niebezpieczeństwie.

Rozdzielczość przestrzenna sensorów na pokładzie waha się od około 1 do 50 km. Detektory znajdujące się na pokładzie satelitów MetOp zapewniają wyższą rozdzielczość i większą dokładność niż poprzednie misje satelitarne o celach meteorologicznych. Kolejnym krokiem w misji MetOp będzie wystrzelenie satelitów MetOp drugiej generacji (MetOp-SG-A i -B) kolejno w 2021 i 2022 roku.

Tabela 3.18. Parametry wybranych satelitów niskiej rozdzielczości

Satelita	Liczba sensorów	Sensory	Sensor najwyższej rozdzielczości przestrzennej	Rozdzielczość przestrzenna GSD	Wysokość orbity [km]
Misje agencji NOAA					
Suomi-NPP	6	ATMS, CERES, CrIMSS, CrIS, OMPS, VIIRS	VIIRS (GSD 400 m)	400 m–250 km	824
GOES-R series	6	ABI, SUVI, EXIS, GLM, SEISS, MAG	ABI (GSD 500 m)	500 m–14 km	35 786
NOAA 5 th Gen POES	5	AMSU-A, AMSU-B, AVHRR/3, HIRS/3, SBUV/2	AVHRR/3 (1,1 km)	1,1–48 km	833
Misje agencji NASA					
Terra	4	CERES, MISR, MODIS, MOPITT	MODIS (250 m)	250 m–22 km	705
Aqua	6	AIRS, AMSR-E, AMSU, CERES, HSB, MODIS	MODIS (250 m)	250 m–75 km	705
Misja agencji ESA i EUMETSAT					
Meteosat 2 nd Gen	2	SEVIRI, GERB	SEVIRI (1 km)	1–45 km	35 786
Misja agencji EUMETSAT					
MetOp	11	A-DCS, AMSU-A, ASCAT, AVHRR/3, GOME-2, GRAS, HIRS/4, IASI, MHS, SARSAT, SEM	AVHRR (1,1 km)	1,1–48 km	827

3.6. Wybrane systemy hiperspektralne

Ewa Głowienka

Rejestracja obrazów w wielu kanałach spektralnych (od kilkudziesięciu do kilkuset) dostarcza znacznie więcej informacji niż rejestracja wielospektralna. Zwiększenie rozdzielczości spektralnej (liczby kanałów) jest obecnie tendencją, którą można zaobserwować w różnych systemach satelitarnych. Obrazy Sentinel-2, podobnie jak Worldview-2, mają dodatkowe, w porównaniu do Landsata, kanały w zakresie przejścia

między kanałem czerwonym i podczerwonym (tzw. *RedEdge*, RE). Ponadto w ramach programu Copernicus w planach jest misja hiperspektralna – CHIME, o rozdzielczości przestrzennej 20–30 m, rejestracji w zakresie (400–2500 nm), rozdzielczości spektralnej większej niż 10 nm i czasie rewizyt 10–15 dni. Umożliwi ona bardziej szczegółowe analizy w obszarach zrównoważonego rolnictwa, bezpieczeństwa związanego z produkcją żywności (np. prognozowanie plonów, identyfikacja typów upraw, monitoring gleb, zanieczyszczeń roślinności np. zawartości metali ciężkich w liściach) czy zarządzania surowcami naturalnymi (np. wspieranie prac poszukiwawczych, określanie składu mineralogicznego, chemicznego, monitorowanie zanieczyszczeń gleb, wód, powietrza, wspieranie procesów rekultywacyjnych).

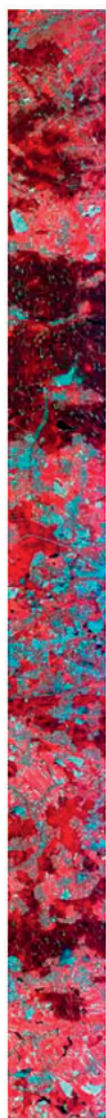
Planowane są również nanosatelity hiperspektralne, także rejestracja lotniczych obrazów hiperspektralnych staje się coraz bardziej powszechna (obecnie w parkach narodowych). Warto więc przedstawić dwa satelitarne systemy hiperspektralne: Hyperion EO-1 i CHRIS/PROBA.

Hyperion

Pierwszym hiperspektralnym sensorem satelitarnym, umieszczonym w 2000 roku przez NASA na platformie EO-1 (Earth Observing 1) był Hyperion. Misja została zakończona w marcu 2017 roku. Archiwalne dane zarejestrowane przez sensor Hyperion (również dla obszaru Polski) są udostępniane nieodpłatnie przez USGS (United State Geological Survey) (EarthExplorer, 2020). Hyperion rejestrował promieniowania elektromagnetyczne w 242 kanałach (70 kanałach VNIR oraz 172 kanałach SWIR) z rozdzielczością spektralną około 10 nm. Rozdzielczość przestrzenna obrazów zarejestrowanych przez satelitę Hyperion wynosiła 30 m. Wielkość rejestrowanej sceny to 180 km × 7,7 km lub 42 km × 7,7 km (tabela 3.20; ryc. 3.20). Sensor został zaprojektowany jako instrument testowy, w celu zademonstrowania i sprawdzenia możliwości ciągłej rejestracji sygnałów dla określonego zakresu fal z pułapu satelitarnego. Dane są nieodpłatne i dostępne w serwisie Earth Explorer. Użytkownik może pobrać zestaw 242 kanałów zarejestrowanych w długim, wąskim pasie jak przedstawiono na rycinie 3.20.

CHRIS/PROBA-1

CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) to satelitarny sensor hiperspektralny należący do Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), który w 2001 roku został umieszczony na platformie PROBA-1 (tabela 3.20). Z uwagi na wielki sukces, początkowo zaplanowany na jeden rok program demonstracyjnej misji PROBA-1/CHRIS został przedłużony w celu pełnego wykorzystania możliwości jakimi dysponuje. Sensor CHRIS posiada unikalne możliwości programowania zakresów spektralnych, które dobierane są adekwatnie do obiektów badań oraz dostarcza obrazy w pięciu różnych modułach w zależności od celu badań (tabela 3.19). Dane z sensora CHRIS są pozyskiwane jako zestaw pięciu obrazów dla tego samego obszaru pod różnymi kątami: 0°, +36°, -36°, +55°, -55° (ryc. 3.21). CHRIS to kompaktowy spektrometr obrazowy o wysokiej rozdzielczości, który rejestruje scenę o wielkości 13 km². Obrazy o rozdzielczości przestrzennej 17 m pozyskiwane są w 18 wybranych przez użytkownika kanałach spektralnych w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni (400–1050 nm). Sensor CHRIS może być również skonfigurowany do rejestracji 63 kanałów spektralnych w rozdzielczości przestrzennej około 34 m (tabela 3.19). Konstrukcja CHRIS jest w stanie zapewnić do 150 kanałów w zakresie VNIR.



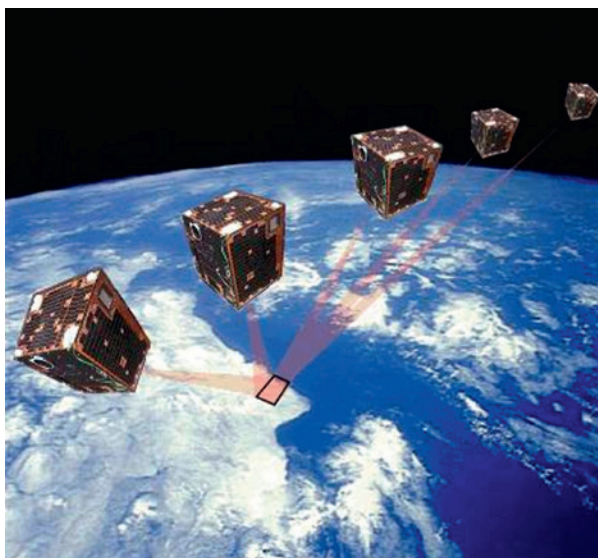
Data Set Attribute	Attribute Value
Entity ID	EO1H1890252015156110KF_SG1_01
Acquisition Date	2015/06/05
Cloud Cover	0
Orbit Path	187
Orbit Row	25
Target Path	189
Target Row	25
Station	SG1
Processing Level	L1T Product Available
Scene Start Time	2015:156:08:01:23.232
Scene Stop Time	2015:156:08:01:38.232
Sun Azimuth	116.305168
Sun Elevation	48.084273
Satellite Inclination	97.89
Look Angle	-16.275
Date Entered	2015/06/05
Center Latitude	50°16'04.03"N
Center Longitude	18°50'06.17"E
NW Corner Lat	50°39'56.22"N

Ryc. 3.20. Przykładowa scena zarejestrowana przez sensor Hyperion wraz z metadanymi (źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu EarthExplorer)

Inne wybrane systemy hiperspektralne

HySI (Hyper Spectral Imager) to indyjska misja rozpoczęta w 2008 roku, a od 2018 roku przemianowana na HySIS (HyperSpectral Imaging Satellite). HySIS dostarcza dane hiperspektralne (64 kanały, GSD 80 m; tabela 3.20) dla wielu zastosowań w rolnictwie, leśnictwie, analizach geograficznych w strefach przybrzeżnych i śródlądowych drogach.

HJ-1A (wraz z satelitą HJ-1B tworzy misję HJ (*Huan Jing* – oznacza środowisko)), to pierwszy chiński satelita, działający od 2008 roku, dostarczający dane hiperspektralne (128 kanałów, GSD 100 m; tabela 3.20). Główne obszary zastosowań misji HJ to monito-



Ryc. 3.21. Ilustracja sekwencji obserwacji pod wieloma kątami PROBA-1 (źródło: ESA, 2018)

rowanie środowiska, monitorowanie odpadów stałych, monitorowanie i przewidywanie katastrof (powodzie, susze, tajfuny, trzęsienia ziemi, pożary, itp.) oraz monitorowanie szkód rolniczych.

PRISMA (Hyperspectral Precursor of the Application Mission) to misja finansowana przez Włoską Agencję Kosmiczną (wł. *Agenzia Spaziale Italiana*, ASI), która jest systemem łączącym obrazy hiperspektralne z panchromatycznymi średniej rozdzielczości. Zaletą tego rozwiązania jest zwiększenie rozdzielczości przestrzennej danych hiperspektralnych (ponad 237 kanałów spektralnych o GSD 30 m; tabela 3.20). Satelita PRISMA działa od 2019 roku, a dane które pozyskuje znajdują wiele zastosowań w dziedzinie monitorowania środowiska, zarządzania zasobami, klasyfikacji upraw, kontroli zanieczyszczeń, bezpieczeństwa, itp.

HSI/EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program) to planowana niemiecka satelitarna misja hiperspektralna, której celem będzie monitorowanie środowiska w skali globalnej. Obecnie jest ona w fazie rozwoju „D”, czyli gotowy jest segment naziemny i trwają prace związane z koordynacją z segmentem satelitarnym. HSI ma udostępniać dane hiperspektralne w 228 kanałach o rozdzielczości przestrzennej GSD 30 m (tabela 3.20).

Tabela 3.19. Modele rejestracji sensora CHRIS

Moduł	Liczba kanałów	Rozdzielczość przestrzenna [m]	Szerokość pasa skanowania [%]	Zastosowanie
1 (A)	62	34	100	aerozole
2 (W)	18	17	100	woda
3 (L)	18	17	100	powierzchnia Ziemi
4 (C)	18	17	100	chlorofil
5 (H)	37	17	50	powierzchnia Ziemi

Tabela 3.20. Charakterystyka wybranych hiperspektralnych sensorów satelitarnych

Sensor (misja)	Status misji	Liczba kanałów	Zakres spektralny [nm]	Rozdzielczość spektralna [nm]	Rozdzielczość przestrzenna [m]
Hyperion (EO-1)	2000–2017	242	400–2500	10	30
Chris (PROBA-1)	2001–	19 lub 63	415–1050	1,3–12	17 lub 34
HySI (Chandrayan-1)	2008–	64	450–950	15	80
HJ-1A (HJ)	2008–	128	450–950	5	100
PRISMA (PRISMA)	2013–	> 237	400–2500	≤ 12	30
HSI (EnMAP)	planowana	228	420–2450	5–10	30

3.7. Wybrane systemy radarowe

Natalia Ostrowska

Początkowo rozwój systemów radarowych w latach 50. i 60. był zdominowany przez badania prowadzone dla celów militarnych (zwiadowczych). W latach 70. i 80. opracowano kilka systemów lotniczych do zastosowań cywilnych w zakresie pozyskiwania geoinformacji, a równocześnie testowania rozwiązań możliwych do wykorzystania na platformach satelitarnych. Umieszczenie na orbicie w 1978 roku satelity SEASAT, pierwszego cywilnego satelity z radarem z syntetyczną aperturą – SAR (podrozdział 1.4.2), a także postęp w teleinformatyce przyspieszyły rozwój tej technologii. W latach 80. i 90. opracowano techniki SAR, takie jak polarymetria do badania szaty roślinnej czy interferometria do budowy modelu 3D powierzchni Ziemi oraz interferometria różnicowa do pomiaru przemieszczeń i deformacji terenu.

Poniżej opisano wybrane systemy radarowe, których parametry zamieszczono w tabeli 3.21.

ERS

Po sukcesie krótkotrwałej misji SEASAT i impulsie uzyskanym dzięki pozytywnym wynikom otrzymanym z satelity, Europejska Agencja Kosmiczna uruchomiła pierwszą misję satelitarną, w ramach której wyniesiono na orbitę dwa satelity ERS-1 oraz ERS-2. Satelity zostały wyposażone w instrument SAR rejestrujący dane w paśmie C o częstotliwości 5,3 GHz, altimetr radarowy oraz inne instrumenty. Misja ERS-1 zakończyła się 10 marca 2000 roku, a misja ERS-2 5 września 2011 roku. Europejska Agencja Kosmiczna postanowiła na pewien czas połączyć satelity w tandem, który działał przez dziewięć miesięcy i umożliwił pozyskiwanie danych interferometrycznych z dwudziestoczęstotliwościowym interwałem.

PALSAR-2/ALOS-2

System ALOS (Advanced Land Observation Satellite) został utworzony jako kontynuacja programu JERS-1 (Japanese Earth Resource Satellite) i ADEOS (Advanced Earth

Observation Satellite). Satelita ALOS został wyposażony w instrument optyczny do pozyskiwania danych stereo (PRISM), radiometr rejestrujący w paśmie widzialnym i bliskiej podczerwieni (AVNIR-2) oraz system SAR (PALSAR) obrazujący w paśmie L (ALOS, 2020).

Wyniesiony w 2014 roku na orbitę satelita ALOS-2 posiada na pokładzie instrument PALSAR-2, radar z syntetyczną aperturą, nadający i odbierający mikrofałe w paśmie L z możliwością rejestrowania danych w jednym, dwóch i czterech kanałach polaryzacji. Promieniowanie w paśmie L może dotrzeć do Ziemi częściowo przenikając przez roślinność.

PALSAR-2 przez zwiększenie mocy transmisji stał się wyjątkowym i bardzo przydatnym instrumentem, osiągającym wysoką rozdzielczość, dużą szerokość pasa obrazowania i dobrą jakość obrazu.

Envisat

Envisat był kontynuacją programu ERS. 1 marca 2002 roku został umieszczony na orbicie satelita wyposażony w system SAR obrazujący w paśmie C z możliwością pozyskiwania danych w kilku alternatywnych kombinacjach polaryzacji VV+VH, VV+HH, HH+HV, altimetr radarowy oraz radiometry służące do pomiaru temperatury. Instrumenty tej misji zapewniły kontynuację obserwacji prowadzonych przez ERS. Misja zakończyła się 8 kwietnia 2012 roku z powodu problemów technicznych.

RADARSAT-1/2 i RCM

Wprowadzony na orbitę w listopadzie 1995 roku, RADARSAT-1 opracowany pod kierownictwem Kanadyjskiej Agencji Kosmicznej (ang. *Canadian Space Agency, CSA*) we współpracy z jednostkami publicznymi i sektorem prywatnym, dostarczał obrazy Ziemi zarówno do celów naukowych, jak i gospodarczych. Od marca 2013 roku satelita RADARSAT-1 został uznany za nieoperacyjny i nie gromadzi już danych. W ramach partnerstwa pomiędzy CSA, a firmą MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. (MDA) powstał RADARSAT-2, który został umieszczony na orbicie w grudniu 2007 roku. Zarówno RADARSAT-1 jak i RADARSAT-2 zostały wyposażone w instrument SAR, rejestrujący obrazy Ziemi w paśmie C (Canadian Space Agency, 2020).

Następcą misji RADARSAT-2 jest RADARSAT Constellation Mission (RCM) składający się z wyniesionych na orbitę w czerwcu 2019 roku trzech małych stateczków kosmicznych, z potencjałem zwiększenia ich liczby do sześciu. RCM jest rozwinięciem programu RADARSAT z ulepszonym operacyjnym wykorzystaniem danych SAR i poprawioną niezawodnością systemu. Ogólnym celem RCM jest zapewnienie ciągłości dostarczania danych SAR w paśmie C dla użytkowników RADARSAT-2, a także rozszerzenie zastosowania danych satelitarnych SAR dla wsparcia nadzoru morskiego, zarządzania w czasie katastrof czy monitoringu ekosystemów, a także wsparcia bezpieczeństwa narodowego, dzięki wykorzystaniu zalet konstelacji (Gunter's Space Page, 2020).

TerraSAR-X i TanDEM-X

TerraSAR-X/TanDEM-X to niemiecka konstelacja satelitarna SAR przeznaczona do zastosowań naukowych i komercyjnych. Projekt jest wspierany przez BMBF (Niemieckie Ministerstwo Edukacji i Nauki) i zarządzany przez Niemiecką Agencję Kosmiczną (niem. *Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt, DLR*). W czerwcu 2007 roku został wyniesiony na orbitę satelita TerraSAR-X, a w czerwcu 2010 roku dołączył do niego bliźniaczy TanDEM-X. TerraSAR-X i TanDEM-X pracują w trybie tandem, nazywanym też formacją. W odległości około 500 m od siebie rejestrują obrazy o bardzo dobrych parametrach

interferometrycznych, co umożliwiło utworzenie wysokiej jakości Globalnego Numerycznego Modelu Terenu (WorldDEM). Zarówno TerraSAR-X, jak i TanDEM-X są wyposażone w SAR pracujący w paśmie X, rejestrujący obrazy w wielu trybach, od ScanSAR (nominalna rozdzielczość przestrzenna 40 m) do Spotlight (rozdzielczość przestrzenna 0,25 m). Większość trybów jest również dostępna w pojedynczej lub podwójnej polaryzacji. TerraSAR-X obok COSMO-SkyMed oferuje najlepszą rozdzielczość przestrzenną spośród obrazów dostępnych obecnie na rynku. Celem naukowym misji jest udostępnienie danych pasma X w wielu trybach i wysokiej rozdzielczości dla szerokiego spektrum zastosowań w takich dziedzinach, jak: hydrologia, geologia, klimatologia, oceanografia, monitorowanie środowiska i katastrof (Geospatial Intelligence, 2020).

COSMO-SkyMed

Konstelacja COSMO-SkyMed (Co constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation) składa się z czterech cywilno-wojskowych satelitów utrzymywanych przez włoskie ministerstwa – nauki i obrony oraz agencję kosmiczną ASI (Agenzia Spaziale Italiana). Satelity zostały wyposażone w instrumenty SAR obrazujące w paśmie X o wysokiej rozdzielczości. System był wdrażany etapami. Pierwsze dwa satelity zostały umieszczone na orbicie w czerwcu i grudniu 2007 roku, trzeci w październiku 2008 roku, a czwarty w listopadzie 2010 roku (Instytut Geodezji i Kartografii, 2020; Leonardo Company, 2020).

Program COSMO-SkyMed drugiej generacji (CSG) przewiduje uruchomienie dwóch dodatkowych satelitów. Pierwszy z nich został umieszczony na orbicie w grudniu 2019 roku. Rozwój konstelacji zapewni dalszą poprawę wydajności usług i przedłużenie żywotności systemu. Nowe satelity konstelacji zapewnią użytkownikowi usługi wyższej jakości, większą ilość zobrażeń, wyższą jakość danych (szerszy zasięg, wyższą rozdzielczość przestrzenną i radiometryczną) oraz wszystkie tryby polarymetrycznego obrazowania. Drugi satelita z serii zostanie umieszczony na orbicie na początku 2021 roku. Dzięki tej konstelacji można uzyskać obrazy radarowe tego samego obszaru co 12 godzin, a każdy satelita jest w stanie pozyskać dziennie 450 obrazów (Telespazio Leonardo and Thales Company, 2020). Warto nadmienić, że w 2014 roku polskie Ministerstwo Obrony Narodowej podpisało wieloletnią umowę dotyczącą udostępnienia Polsce danych z konstelacji COSMO-SkyMed, co pozwala siłom zbrojnym na korzystanie w nieograniczony sposób z danych radarowych dowolnych rejonów Ziemi.

PAZ

Satelita PAZ, wcześniej znany jako SEOSAR, w lutym 2018 roku został umieszczony na tej samej orbicie co niemieckie satelity TerraSAR-X i TanDEM-X, tworząc z nimi spójną konstelację. Misja PAZ to inicjatywa ministerstwa obrony Hiszpanii. Jest to system cywilno-wojskowy, zbudowany na platformie TerraSAR-X. Parametry instrumentu SAR są właściwie identyczne jak instrumentu satelity TerraSAR.

NovaSAR-1

NovaSAR-1 reprezentuje nową koncepcję obserwacyjnych satelitów Ziemi. Został opracowany przez firmę Surrey Satellite Technology (SSTL). Jest to niewielki radar z syntetyczną aperturą (SAR) pracujący w paśmie S. Do jego budowy wykorzystano wiele elementów gotowych technologii elektronicznych dostępnych na rynku, bez potrzeby konstruowania ich specjalnie do budowy satelity. Jest pierwszym satelitą SAR produkowanym w Wielkiej Brytanii. NovaSAR-1 został opracowany jako tania i znacznie mniejsza

wersja radarów SAR, dostarczająca dane o średniej rozdzielczości i szerokim pasie obrazowania (CSIRO, 2020).

Tandem-L

Tandem-L to propozycja DLR wysoce innowacyjnej radarowej misji satelitarnej do monitorowania dynamicznych procesów na powierzchni Ziemi z niedostępną dotąd jakością i rozdzielczością. Ważnymi celami misji są: szacowanie biomasy leśnej w skali globu i jej zmienności w czasie dla lepszego zrozumienia cyklu węglowego, systematyczne monitorowanie deformacji powierzchni Ziemi w skali milimetrowej, badania glaciologiczne (topnienie lodowców w regionach polarnych), dokładny pomiar zmian wilgotności gleby przy powierzchni, a także obserwacje dynamiki powierzchni oceanów i dryfu lodu.




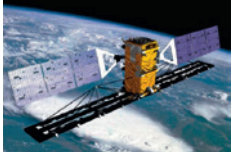
Koncepcja misji Tandem-L opiera się na sukcesie TanDEM-X i wykorzystuje formację dwóch satelitów radarowych działających w paśmie L umożliwiających systematyczne pozyskiwanie danych wysokiej rozdzielczości. Ponadto długość fali zastosowana w Tandem-L (23,6 cm) spełnia wymagania do tomograficznego obrazowania trójwymiarowej struktury roślinności i mas lodowych, a także do systematycznego pomiaru z milimetrową precyzją odkształceń wielkopowierzchniowych. Aby zapewnić regularne obserwacje w krótkich odstępach czasu Tandem-L zastosuje najnowocześniejszą technologię radarową opartą na najnowszych technikach cyfrowego kształtowania wiązki, które pozwalają na obrazowanie bardzo szerokich pasów terenu o wysokiej rozdzielczości w kierunku azymutalnym. Tandem-L stanowi ogromną szansę na rozwój nowatorskich aplikacji naukowych i usług komercyjnych.

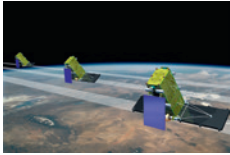



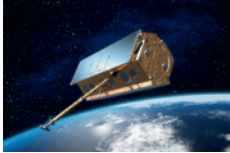
Konstelacja ICEYE




Firma ICEYE wystrzeliła swojego pierwszego satelitę SAR – ICEYE-X1 w styczniu 2018 roku. Rejestruje on dane o rozdzielczości 10×10 m, będąc jednocześnie pierwszym na świecie satelitą SAR o masie startowej poniżej 100 kg. Konstelacja jest stale rozwijana, a celem firmy jest stworzenie operacyjnej konstelacji 18 satelitów o czasie rewizyty poniżej kilku godzin.

Satelity obrazują w paśmie X, dane pozyskiwane są w trybie Spotlight o rozdzielczości 1×1 m oraz w trybie Stripmap o rozdzielczości 3×3 m. Tryb ScanSAR o rozdzielczości 20×20 m jest w fazie rozwoju. Produkty obejmują dane zespolone SLC oraz amplitudowe GRD. Konstelacja niewielkich satelitów zapewnia wielokrotne obrazowanie w ciągu doby określonego obszaru zainteresowania pod różnymi kątami padania wiązki. Użytkownicy mogą uzyskać bardzo szczegółowe informacje dotyczące zmian, przeprowadzić bardziej dokładną klasyfikację obiektów i śledzić coraz mniejsze obiekty z orbity.

Tabela 3.21. Charakterystyka wybranych satelitów radarowych

	Pasmo obrazowania	Tryb obrazowania	Rozdzielczość przestrzenna [m]	Przykłady produktów
ERS				
 Źródło: ESA ERS-2, 2020	5,3 GHz (Pasmo C)	StripMap	25	<ul style="list-style-type: none"> • Single Look Complex (SLC) • Precision Image (PRI)
PALSAR-2/ALOS-2				
 Źródło: eoPortal ALOS-2, 2020	1,27 GHz (Pasmo L)	ScanSAR StripMap Spotlight	100/60 3/6/10 1 × 3	<ul style="list-style-type: none"> • Single Look Complex (SLC)
Envisat				
 Źródło: ESA Envisat, 2020	5,3 GHz (Pasmo C)	Image Mode WideScan	30 50	<ul style="list-style-type: none"> • ASAR Image Mode • ASAR Alternating Polarisation
RADARSAT-2				
 Źródło: ESA RADARSAT-2, 2020	5,405 GHz (Pasmo C)	Spotlight Ultra-Fine Wide Ultra-Fine Extra-Fine Multi-Look Fine Wide Multi-Look Fine Ship Detection Fine Wide Fine Fine Quad-Pol Wide Fine Quad-Pol Standard Quad-Pol Wide Standard Quad-Pol Standard Wide Extended High Extended Low ScanSAR Narrow ScanSAR Wide Ocean Surveillance	1 3 3 5 8 8 zmienna 8 8 12 12 25 25 25 25 25 25 60 50 100 zmienna	<ul style="list-style-type: none"> • Single Look Complex (SLC) • Path Image (SAR Georeferenced Fine – SGF) • Map Image (SAR Systematic Geocorrected – SSG) • Precision Map Image (SAR Precision Geocorrected – SPG)

RCM				
	5,405 GHz (Pasma C)	Low Resolution Medium Resolution Medium Resolution Medium Resolution High Resolution Very High Resolution Low Noise Ship Detection Spotlight Quad-Polarization	100 50 30 16 5 3 100 zmienna – –	<ul style="list-style-type: none"> • Single Look Complex (SLC) • Path Image Plus (SAR Georeferenced Extra – SGX) • ScanSAR • ScanSAR Fine (SCF) • Precision Map Image (SAR Precision Geocorrected – SPG)
Źródło: MDA, 2020				
TerraSAR-X i TanDEM-X				
	9,65 GHz (Pasma X)	Staring SpotLight High Resolution SpotLight SpotLight StripMap ScanSAR Wide ScanSAR	0,25 1 2 3 18,5 40	<ul style="list-style-type: none"> • Single Look Slant Range Complex (SSC) • Multi Look Ground Range Detected (MGD) • Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC)
Źródło: Zehentner, 2017				
COSMO-SkyMed				
	9,6 GHz (Pasma X)	Spotlight StripMap HIMAGE Ping Pong ScanSAR Wide Region Huge Region	1 3 15 30 100	<ul style="list-style-type: none"> • Single-Look Complex Slant (SCS) • Detected Ground Multilook (MDG) • Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC) • Geocoded Terrain Corrected (GTC)
Źródło: SpaceNews, 2019				
Konstelacja (CSG)				
	9,6 GHz (Pasma X)	Spotlight-2A Spotlight-2B Stripmap Pingpong Quadpol ScanSAR-1 ScanSAR-2	0,35×0,48/0,55 0,63 × 0,63 3 × 3 12 × 5 3 × 3 20 × 4 40 × 6	<ul style="list-style-type: none"> • Single-Look Complex Slant (SCS) • Detected Ground Multilook (MDG) • Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC)
Źródło: ESA, 2009				
PAZ				
	9,65 GHz (Pasma X)	Stripmap ScanSAR Spotlight High Resolution Spotlight	3,3; 6,6 18,5 1,7; 3,4 1,1; 2,2	<ul style="list-style-type: none"> • Single Look Slant Range Complex (SSC) • Multi Look Ground Range Detected (MGD) • Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC) • Enhanced Ellipsoid Corrected (EEC)
Źródło: ESA SAR, 2020				

NovaSAR-1				
 <p>Źródło: Gunter's Space, 2019</p>	3,1-3,3 GHz (Pasma S)	ScanSAR Maritime Surveillance Stripmap ScanSAR Wide	20 $6 \times 13,7$ 6 30	<ul style="list-style-type: none"> • Single Look Complex (SLC)
Tandem-L				
 <p>Źródło: eoPortal Tandem-L, 2020</p>	1,27 GHz (Pasma L)	3-D structure mode Deformation mode	– 7	<ul style="list-style-type: none"> • Single-Look Slant Range Complex (SSC) • Coregistered Bistatic SSC (CoBiSSC) • Multi look Ground Range Detected (MGD)
Konstelacja ICEYE				
 <p>Źródło: eoPortal ICEYE-X1, 2020</p>	9,65 GHz (Pasma X)	Spotlight StripMap ScanSAR	1×1 3×3 20×20	<ul style="list-style-type: none"> • Single Look Complex (SLC) • Ground Range Detected (GRD)

3.8. Misje wykorzystujące technologię satelitarnego skanowania laserowego

Piotr Wężyk

Technologia skanowania laserowego, czyli LiDAR (Light Detection And Ranging), realizowana ze statków poruszających się na orbitach okołoziemskich, określana jest akronimem SLS (Satellite Laser Scanning). Erę SLS rozpoczęła w 2003 roku, trwająca niemal 7 lat, misja ICESat-1 (NASA), a od końca 2018 roku operują już dwa nowe systemy SLS stworzone przez NASA. Pierwszy z nich (ICESat-2) wykorzystuje technologię SLS polegającą na zliczaniu fotonów w zakresie widzialnym PEM odbitych od obiektów na Ziemi (Dubayah i in., 2020), a drugi system o akronimie GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) – bazuje na pomiarach i analizie kształtu tzw. fali pełnej (ang. *full waveform*) energii lasera rejestrowanej w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR) (Popescu i in., 2018).

Misja ICESat-1

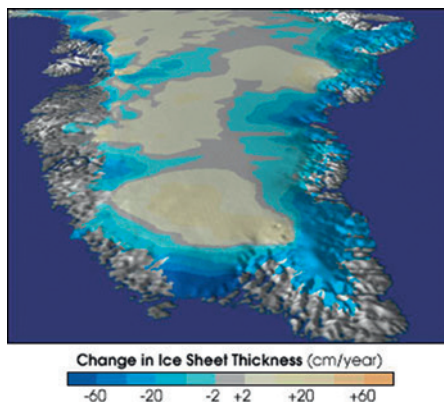
Pierwszym instrumentem SLS obserwującym Ziemię z orbity okołoziemskiej był altimetr GLAS (Geoscience Laser Altimeter System; ryc. 3.22). Został on umieszczony na satelicie ICESat-1 (Ice-Cloud and Land Elevation Satellite-1, NASA) 13 stycznia 2003 roku, a jego niemal polarna i kołowa orbita znajdowała się 600 km nad powierzchnią Ziemi.

Umożliwiało to prowadzenie obserwacji Ziemi przez ICESat-1 pomiędzy szerokościami geograficznymi: 86° N a 86° S. Altimetr GLAS wykorzystywał do wysyłania i rejestracji odbić (ech sygnału laserowego) dwa zakresy promieniowania elektromagnetycznego – światło zielone (G, długość 532 nm) oraz bliską podczerwień (NIR, długość 1064 nm).



Ryc. 3.22. Wizualizacja satelity ICESat-1 (źródło: EO NASA, 2003)

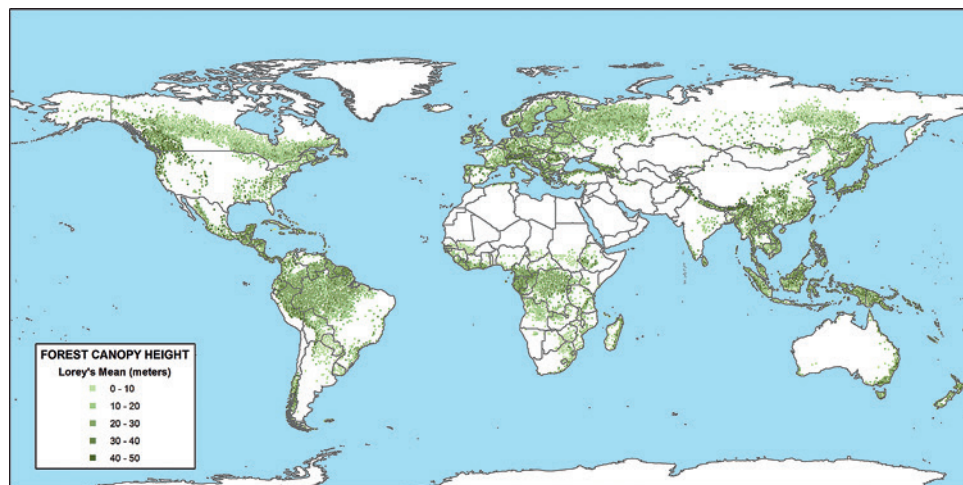
Instrument GLAS zbudowany był z trzech jednakowych laserów wymiennie emitujących wiązki fotonów. Pomiar odległości obiektów na Ziemi od instrumentu GLAS umieszczonego na satelicie, wykonywany był na podstawie pomiaru czasu wędrowki impulsów wysyłanego promieniowania lasera (ToF). Instrument GLAS emitował impulsy lasera z częstotliwością 40 Hz, które docierały do powierzchni Ziemi jako plamki (ang. *laser footprint; beam*) o średnicy około 70 m. Odbity sygnał był rejestrowany wzdłuż trajektorii przelotu, w odstępach co 170 m od siebie. Dokładne powtórzenie trajektorii przelotu satelity ICESat-1 i pozycji śladu plamki lasera na obiektach, następowało co kolejne 183 dni. Dokładność pozioma (XY) położenia środka plamki lasera, w zależności od ukształtowania terenu, wynosiła około 5–15 m. Błąd pomiaru wysokości (Z) obiektów (np. wysokości drzewostanu) w obszarze plamki lasera, NASA określiła na poniżej 1,0 m. Misja ICESat-1 dostarczyła pierwsze w historii ludzkości precyzyjne dane wysokościowe umożliwiające m.in. określenie bilansu topnienia lodowców na Grenlandii (ryc. 3.23), walidację informacji o zachmurzeniu, wygenerowanie globalnej mapy wysokości roślinności (ryc. 3.24) czy weryfikację modeli wysokościowych SRTM (C-Band) oraz ASTER Global DEM. Misja ICESat-1 została oficjalnie zakończona w sierpniu 2010 roku



Ryc. 3.23. Mapa zmian grubości lodowców na Grenlandii (cm/rok) opracowana na podstawie danych ICESat-1 (źródło: EO NASA, 2003)

z powodu awarii instrumentu GLAS. Łącznie w ciągu całej misji ICESat-1 zgromadzono około dwóch miliardów pomiarów technologią SLS.

Dane z misji ICESat-1 (NASA) zebrano w 15 tematycznych zbiorach, które udostępniono nieodpłatnie w zasobach Narodowej Bazy Danych o Śniegu i Lodzie (ang. *National Snow & Ice Data Center, NSIDC*), w formacie binarnym oraz HDF, obsługiwanych m.in. przez oprogramowanie MATLAB (NSIDC, 2020).

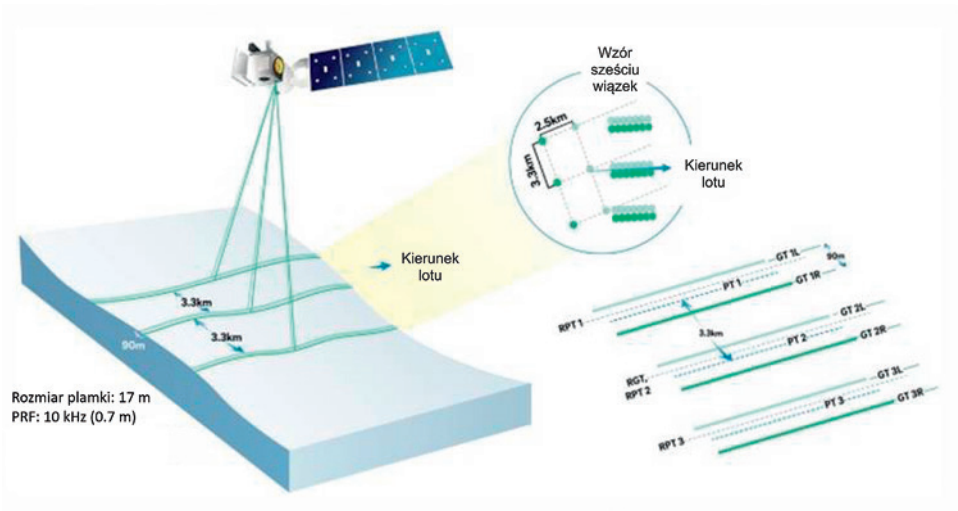


Ryc. 3.24. Mapa wysokości biomów leśnych Ziemi wykonana w oparciu o analizy danych wysokościowych (> 12 mln pomiarów) instrumentu GLAS umieszczonego na satelicie ICESat-1 (NASA) w latach 2004–2008 (źródło: Healey i in., 2015)

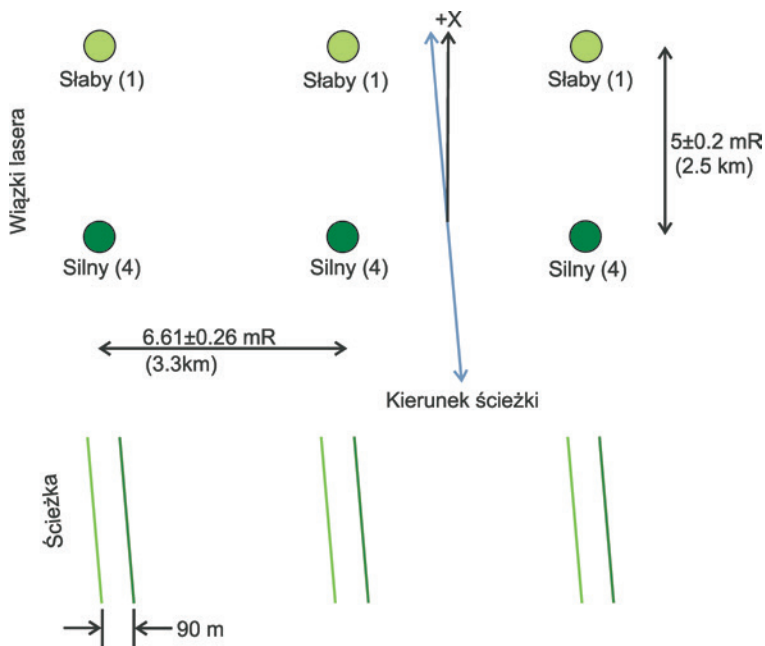
Misja ICESat-2

Satelita ICESat-2 (Ice-Cloud and Land Elevation Satellite-2) został umieszczony przez NASA na orbicie okołobiegunowej 15 września 2018 roku. Misja ta była kontynuacją pozyskiwania precyzyjnych danych wysokościowych Ziemi, rozpoczętą przez satelitę ICESat-1. Misja ICESat-2 poświęcona jest obserwacjom zmieniającej się pokrywy (zasięgu i wysokości) lodu na Ziemi, szczególnie pod kątem badań zmian klimatu, topnienia lodowców i podnoszenia się poziomu oceanów, ale również globalnej obserwacji biomasy oraz walidacji istniejących modeli wysokościowych. Misja ICESat-2 może dostarczać precyzyjne pomiary ruchów mas ziemnych następujących w wyniku trzęsień Ziemi jak również wynikających z topnienia tzw. wiecznej zmarzliny w obszarach podbiegunowych.

Na satelicie ICESat-2 zamontowano zaawansowany technologicznie altimetr laserowy ATLAS, który dzięki dwóm laserom (głównemu i zapasowemu) wysyła w kierunku powierzchni Ziemi około 10 000 impulsów na sekundę. Emitowane promieniowanie lasera przez altimetr ATLAS ma długość 532 nm (podobnie w przypadku ICESat-1) i odpowiada zakresowi jasnozielonemu (ang. *green*). Jest ono wysyłane w sześciu wiązkach, tj.: trzy silne promienie (ang. *strong*) oraz trzy słabsze (ang. *weak*). Poszczególne trzy pary (duety) plamek lasera odległe są od siebie na obiektach o około 3,3 km przy zachowaniu 90 m separacji plamek w duecie (para: *strong/weak*) wzdłuż ścieżki (ang. *track*; ryc. 3.25, 3.26) 90 m przelotu. W zależności od odległości obiektu na powierzchni Ziemi od sensora ATLAS (decyduje wysokość nad poziomem morza i wysokość samego obiektu), wielkość średnicy plamki lasera na obiekcie szacuje się na około 17 m.



Ryc. 3.25. Próbkowanie powierzchni Ziemi przy użyciu 3 par plamek lasera altimetru ATLAS (źródło: Smith i in., 2019)



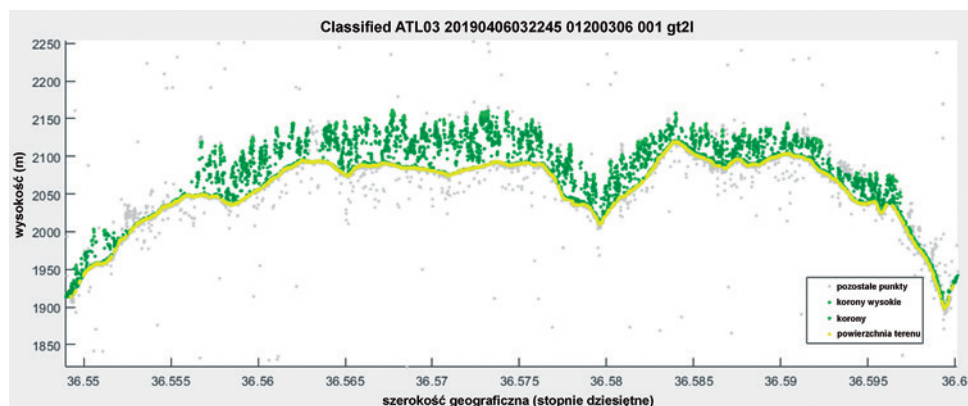
Ryc. 3.26. Układ trzech par plamek (sygnał silny – *strong* i słaby – *weak*) lasera altimetru ATLAS (źródło: Thorsten i in., 2017)

Orbita okołobiegunowa ICESat-2 znajduje się 500 km nad powierzchnią Ziemi, a trajektoria powtarza się co 91 dni, co oznacza, że powierzchnia całego globu może być monitorowana co trzy miesiące. ICESat-2 przemieszcza się po orbicie z prędkością 6,9 km/s, a do generowania wiązek lasera system potrzebuje dużo energii, która jest

produkowana przez pokażne panele słoneczne. Półprzewodnikowy rejestrator danych ICESat-2 przechowuje do 580 GB danych, które są cyklicznie odbierane przez stacje naziemne: Svalbard (Norwegia) oraz Wallops Island (Wirginia; USA) z wykorzystaniem 220 MB łącza radiowego (pasmo X).

ICESat-2 wyposażony w niezwykle precyzyjny instrument ATLAS może dokonywać pomiaru zmian grubości lodu z dokładnością około 5 cm. Wykonywanie pomiarów w gęstej siatce dla obszarów biegunowych umożliwia stały monitoring zmian pokrywy lodowej. Umożliwia to naukowcom, zajmującym się tematyką topnienia lodowców i zmianami klimatu, modelowanie dynamiki wzrostu poziomu mórz i oceanów. Pierwsze dane pomiarowe ICESat-2 udostępniono już jesienią 2019 roku. Analiza danych dowiodła, że altimetr ATLAS pracujący w zakresie światła zielonego (ang. *green laser*), może prowadzić pomiary batymetryczne, czyli kartować dno w czystych wodach jezior i pobrzeża morskiego, nawet do głębokości około 20–30 m.

Z kolei w obszarach leśnych, dzięki chmurom punktów generowanym przez altimetr ATLAS, można nie tylko rejestrować wierzchołki drzew górnego piętra drzewostanów, ale dzięki możliwościom docierania do gruntu promieni lasera, można również określić precyzyjnie wysokość względną drzew. Tym samym naukowcy otrzymali wspaniałe możliwości modelowania biomasy nadziemnej w skali regionalnej i globalnej (ryc. 3.27).



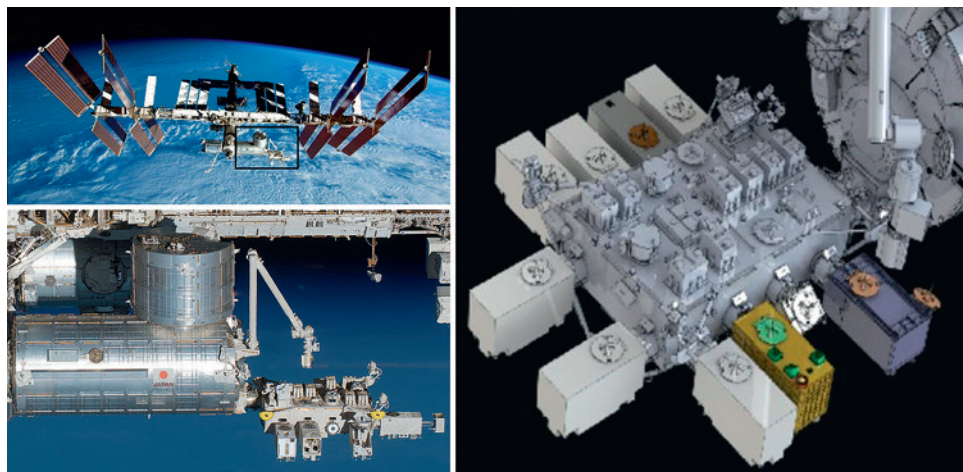
Ryc. 3.27. Profil podłużny przez zalesiony obszar chroniony w Parku Narodowym Yellowstone. W kolorach ciemnozielonych zaprezentowano odbicia lasera (altimetr ATLAS) od koron drzew, natomiast w kolorze jasnozielonym – odbicie od gruntu. W kolorze szarym zaznaczono szumy sygnału SLS (źródło: NASA FB, 2019)

Dane pozyskiwane w ramach misji ICESat-2 stanowią istotny materiał do oceny globalnych zasobów leśnych w wielu skalach przestrzennych. Testy modelu statystycznego biomasy nadziemnej (ang. *Above Ground Biomass*, AGB) opartego na danych SLS ICESat-2, wykazały bardzo wysoką korelację ($R^2 = 0,79$) z danymi referencyjnymi (naziemne pomiary w ramach inwentaryzacji lasów) przy wartościach pierwiastka średniego błędów kwadratowego (ang. *Root Mean Square Error*, RMSE) na poziomie 19,16 Mg/ha (Narine i in., 2019).

Ilość danych zebranych przez ATLAS (ICESat-2) tylko w pierwszym tygodniu tej misji odpowiada wszystkim danym zebranych przez GLAS w trakcie trwania misji ICESat-1. Obserwacje misji ICESat-2 gromadzone są w bazach NSIDC w Distributed Active Archive Center (DAAC) utrzymywanych przez NASA. Do maja 2020 roku zostało udostępnionych publicznie (ICESat, 2020) ponad trylion nowych precyzyjnych pomiarów wysokościowych Ziemi zrealizowanych przez altimetr ATLAS.

Misja GEDI

Instrument badawczy GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation, EVI-2; ryc. 3.28) został w 2014 roku wybrany przez NASA jako ładunek użyteczny (ang. *payload*) dla misji Earth Ventures Instrument (EVI). Projekt GEDI jest realizowany wspólnie przez Uniwersytet Maryland oraz NASA Goddard Space Flight Center w ramach programu NASA – Earth System Science Pathfinder (ESSP), który przewiduje serię nowych, naukowych, konkurencyjnych i niedrogich misji, które zapewnią możliwość lepszego zrozumienia obecnego stanu ekosystemów Ziemi oraz umożliwią ciągłe doskonalenie predykcji zmian klimatu.

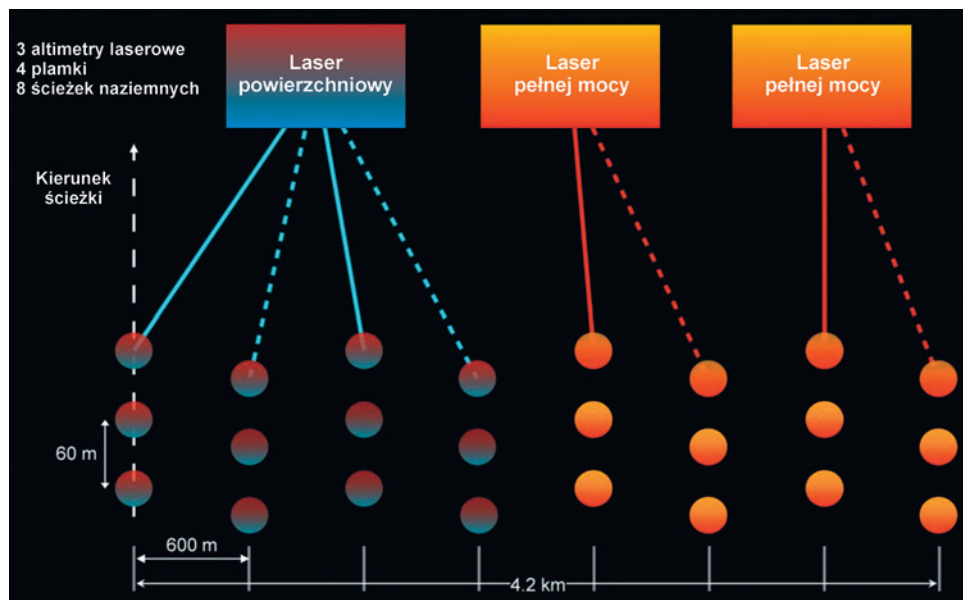


Ryc. 3.28. Instrument GEDI przycumowany do japońskiego modułu JEM-EF na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) (źródło: GEDI, 2020)

Misja umieszczenia instrumentu GEDI na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS; wysokość orbity około 400 km) zakończyła się powodzeniem 5 grudnia 2018 roku (SpaceX CRS-16, rakieta Falcon 9), przez zainstalowanie go na japońskim module eksperymentalnym (JEM-EF). Przez kolejne dwa lata instrument GEDI będzie próbkować powierzchnię Ziemi, co w efekcie pozwoli na zgromadzenia danych SLS dla około 4% jej powierzchni. Łącznie w ciągu 48 miesięcy NASA planuje pozyskać około 10 mld pomiarów dla obszarów Ziemi przy bezchmurnym niebie.

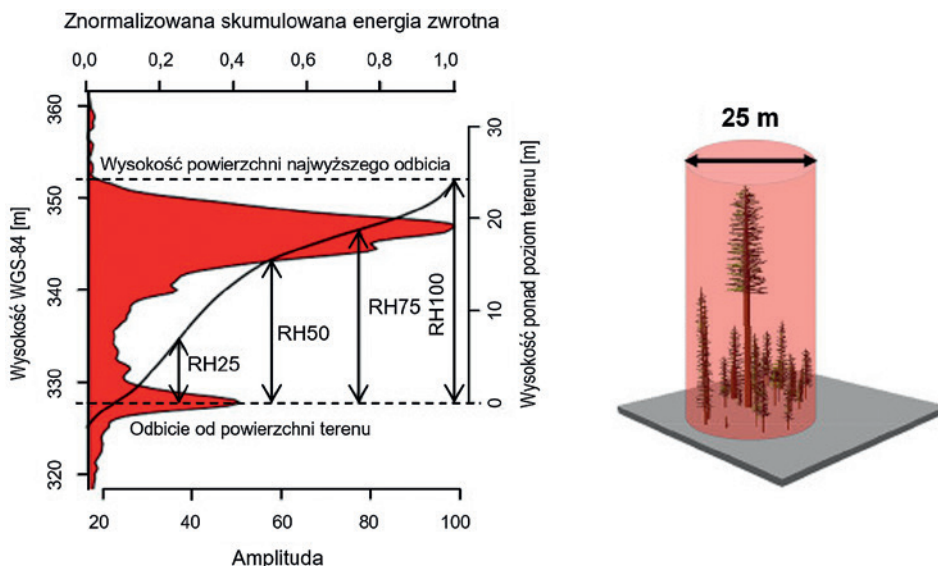
Precyzyjne pomiary GEDI wysokości drzewostanów, ich struktury pionowej oraz klasyfikacja gruntu, znacznie zwiększą możliwości szczegółowego poznania globalnych procesów obiegu węgla i wody oraz rozpoznania bioróżnorodności siedlisk. Obserwacje GEDI służą także monitorowaniu zasięgu pokrywy lodowej, zmienności profili wysokościowych pokrywy lodowej w czasie, rejestracji topografii terenu (modele NMT) oraz określeniu nadziemnej biomasy roślinnej w skali globalnej. Dane GEDI w celu wykorzystania ich pełnego potencjału informacyjnego powinny być wykorzystywane wspólnie (fuzja danych) z danymi mikrofalowymi uzyskiwanymi z satelitów: TerraSAR-X, TanDEM-X, NISAR, Sentinel-1 i BIOMASS oraz danymi optycznymi: Landsat 8, Sentinel-2 i MODIS.

Instrument GEDI posiada system LiDAR klasy geodezyjnej składający się z trzech laserów, które wytwarzają cztery plamki w ośmiu równoległych ścieżkach obserwacji na powierzchni Ziemi (ryc. 3.29). Każdy laser emituje 242 impulsy w ciągu jednej sekundy



Ryc. 3.29. Instrument GEDI i układ generowanych na powierzchni Ziemi plamek lasera (źródło: GEDI, 2018)

generując plamki (ang. *laser beam*) o średnicy 25 m (ryc. 3.30). Układ plamek lasera na powierzchni obiektów na Ziemi, jest liniowy, co około 60 m wzdłuż trajektorii ruchu ISS, przy czym odległość między ścieżkami obserwacji wynosi około 600 m (GEDI, 2020). Zakłada się, że instrument GEDI wygeneruje około 10 mld obserwacji w ciągu dwudziestoczteromiesięcznej misji.



Ryc. 3.30. Plamka lasera (GEDI) o średnicy 25 m oraz pionowy profil znormalizowanej wysokości roślinności (źródło: Dubayah i in., 2020)

Pomiary SLS GEDI są wykonywane dla obszarów Ziemi położonych pomiędzy szerokościami geograficznymi 51,6° N a 51,6° S, co wynika z nachylenia orbity ISS. Instrument GEDI może być obracany na module JEM o maksymalnie 6°, co pozwala na wychylenie laserów maksymalnie o dodatkowe 40 km po obu stronach trajektorii naziemnej ISS.

Analizy fali pełnej LiDAR (ang. *full waveform*) rejestrowane przez GEDI pozwalają na ilościowe określenie rozkładu pionowego roślinności dzięki rejestracji ciągłej energii lasera odbijanego przez poszczególne frakcje drzewa i drzewostanu (wierzchołkowe części, koronę, gałęzie i konary; drugie piętro drzewostanu; podrost) na różnych wysokościach (ryc. 3.30). Z kształtów fali można wyodrębnić cztery typy informacji o strukturze topografii powierzchni (NMT), informacji o wysokości okapu koron drzew, zwarciu poziomym koron a także różne metryki opisujące strukturę pionową drzewostanu (np. 95 percentyl wysokości). Dzięki penetracji okapu drzewostanu przez promienie lasera GEDI, detekcja gruntu w obszarach leśnych może okazać się dużo lepsza niż w przypadku systemów mikrofalowych (np. misja SRTM).

Dostępne dla użytkowników są następujące poziomy danych GEDI (NASA):

- Poziom 1: dane nieprzetworzone, ale z geolokalizacją (L1A) – posiadają geolokalizację na podstawie obserwacji gwiazd przez GEDI (ang. *Star Tracker*).
- Poziom 2: wysokość drzewostanu oraz metryki profilu wysokościowego – L2A. Dla danych z poziomu L2B obliczane są różne metryki zwarcia, w tym procent pokrycia powierzchni, wskaźnik całkowitej powierzchni liści (LAI) i profil zmian LAI w pionie.
- Poziom 3: wskaźniki wysokości drzewostanu i jego zmienności w postaci rastrowej.
- Poziom 4: aproksymowane dane powierzchni gruntu oraz gęstości nadziemnej biomasy (AGBD) w siatce 1 km.

Podsumowując powyższy rozdział należy stwierdzić, że badania naukowe nad obiegiem węgla i wody na Ziemi, postępującymi zmianami klimatu oraz wynikającymi z tego faktu przemianami środowiska naturalnego wymagają niezmiernie precyzyjnych informacji i to nie tylko 2D (np. wielospektralne zobrazowania wysokorozdzielcze), ale przede wszystkim 3D (np. SLS). Do tych ostatnich można zaliczyć m.in. obserwacje na temat tempa topnienia pokrywy lodowej na biegunach, lodowców w górach czy struktury pionowej (m.in. wysokość, zwarcie koron) szaty roślinnej a tym samym jej biomasy (sekwestracja węgla). Tak szczegółowe informacje przestrzenne w skali globalnej mogą być realizowane jedynie z przestrzeni okołoziemskiej z wykorzystaniem technologii satelitarnego skanowania laserowego (SLS) i wymagają podejmowania i kontynuacji wieloletnich międzynarodowych programów misji kosmicznych.

4. Dostęp do satelitarnych danych teledetekcyjnych

W przeszłości satelitarne dane obrazowe były udostępniane głównie za pomocą różnego rodzaju nośników: magnetycznych, optycznych lub magnetyczno–optycznych. Od niedawna obrazy są udostępniane na serwerach dostawców, a ich pozyskiwanie polega na pobieraniu ich z serwera i nagrywaniu na własny dysk. Obecnie coraz częściej można korzystać z danych w aplikacjach internetowych. Dostępne są funkcje przeglądania danych z różnych dat rejestracji oraz różne narzędzia eksploracji obrazów umożliwiające np. odczytywanie współczynnika odbicia we wskazanym punkcie, analizowanie krzywej spektralnej wraz z analizą sugerowanego przez aplikację typu pokrycia terenu. Do dyspozycji są funkcje analizy szeregów czasowych obrazów wraz z możliwością nagrywania wideo. Ponadto pojawiła się tendencja tworzenia serwisów internetowych przez uruchamianie na platformie internetowej własnych skryptów umożliwiających pracę na obrazach teledetekcyjnych, bez konieczności ich pobierania czy kopiowania.

4.1. Platformy i aplikacje do wyszukiwania, przeglądania i pobierania danych

Piotr Kramarczyk

W niniejszym podrozdziale omówiono platformy przeznaczone do pobierania danych, takie jak Copernicus Open Access Hub, EarthExplorer, EO Browser i Landsat Explorer.

4.1.1. Copernicus Open Access Hub

Copernicus Open Access Hub jest to serwis internetowy umożliwiający „pełny, bezpłatny i otwarty dostęp do danych” (Copernicus, 2020b), takich satelitów jak:

- Sentinel-1,
- Sentinel-2,
- Sentinel-3,
- Sentinel-5P.

Poprzednio serwis znany był pod nazwą Sentinels Scientific Data Hub i z taką nazwą można się jeszcze często spotkać. Dostęp do danych oferowanych przez Copernicus Open Access Hub wymaga utworzenia konta użytkownika. Wyszukiwanie i pobieranie danych może odbywać się z wykorzystaniem interfejsów graficznych użytkownika (GUI) lub interfejsu programistycznego. Serwis Copernicus Open Access Hub oferuje cztery sposoby dostępu do danych:

- Open Hub – graficzny interfejs użytkownika (Data Hub Graphical User Interface), umożliwiający dostęp do danych Sentinel za pomocą wyszukiwarki internetowej (Open Hub, 2020),
- API Hub – interfejsy programistyczne OData i OpenSearch (OData and OpenSearch APIs), umożliwiające dostęp do danych Sentinel za pomocą skryptów,
- S-5P Pre-Ops – interfejs graficzny, umożliwiający dostęp do przedoperacyjnych

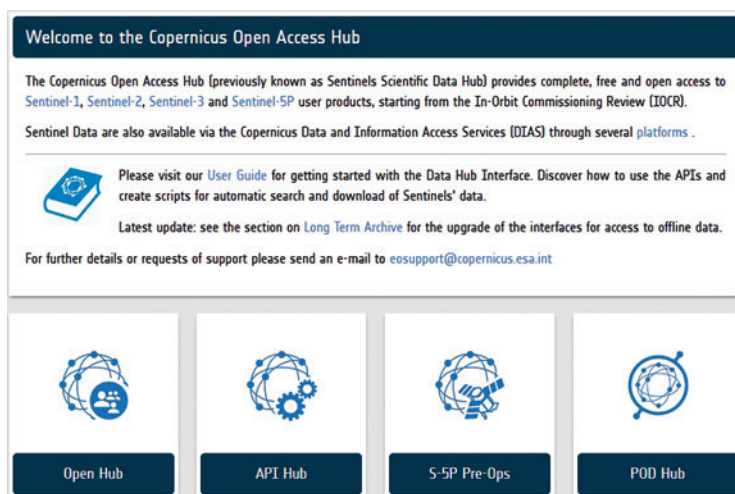
danych satelity Sentinel-5P L1B i L2,

- POD Hub – interfejs graficzny, umożliwiający dostęp do przedoperacyjnych danych satelity Sentinel-1, -2 i -3.

Serwisy Open Hub i API Hub oferujące dostęp do obrazów Sentinel-1, -2 i -3 wymagają innego rodzaju konta użytkownika niż serwisy S-5P Pre-Ops i POD Hub udostępniające dane przedoperacyjne misji Sentinel.

Open Hub Graphical User Interface

Interfejs graficzny użytkownika Open Hub Graphical User Interface umożliwia najprostszy dostęp do obrazów satelitarnych przez intuicyjną obsługę strony (formularza) wyświetlonej na ekranie. Wyświetlenie GUI odbywa się przez wybranie opcji pokazanej na poniższym rysunku (ryc. 4.1).

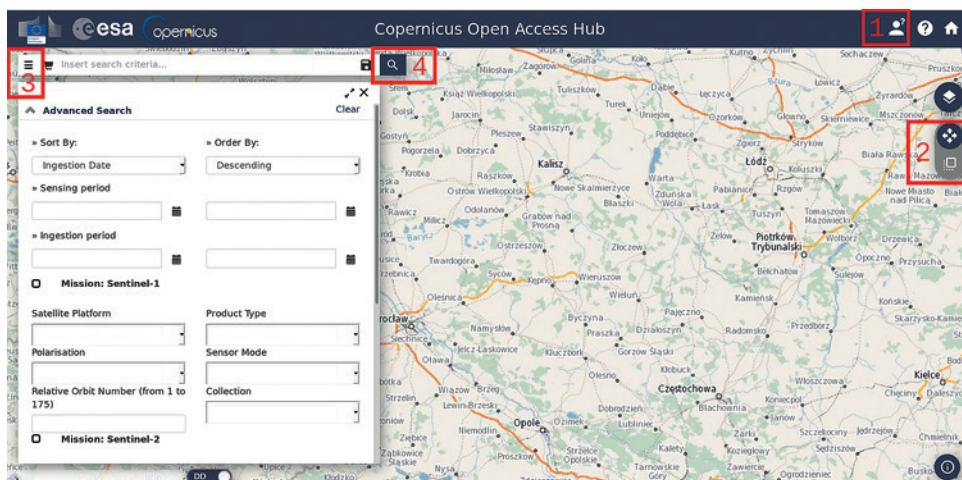


Ryc. 4.1. Wybór interfejsu graficznego użytkownika GUI (źródło: Copernicus Hub, 2020)

Po wybraniu Open Hub na ekranie wyświetlone zostaje okno mapy pokazane na rysunku (ryc. 4.2). Okno to pozwala na określenie obszaru zainteresowania oraz na wpisanie kryteriów wyszukiwania (data, misja, typ produktu) po rozwinięciu okna formularza. Obsługa interfejsu jest intuicyjna i sprowadza się do wyboru odpowiednich ikon oznaczonych numerami, zgodnie z rysunkiem (ryc. 4.2):

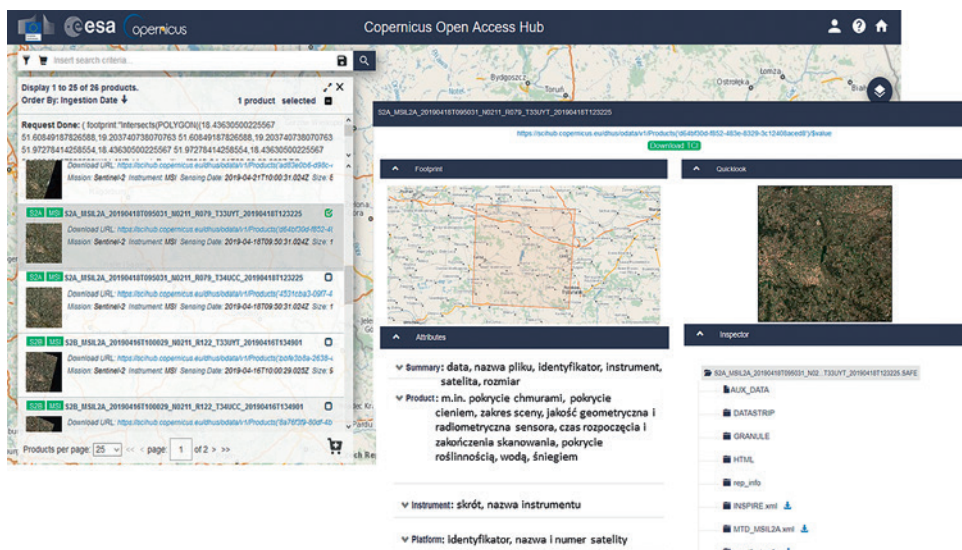
- *Login* (1): logowanie do usługi wyszukiwania i pobierania danych Sentinel po wcześniejszej rejestracji w serwisie Copernicus Open Access Hub,
- *Navigation Mode/Area Mode* (2): przełączanie między trybem nawigacji a trybem zaznaczania (umożliwia użycie myszki do zaznaczenia na mapie obszaru zainteresowania),
- *Advanced Search* (3): wyświetlenie okna formularza wyboru kryteriów wyszukiwania i wpisywania odpowiednich wartości,
- *Search* (4): uruchomienie wyszukiwania zgodnie z zadanymi kryteriami.

Wynikiem wyszukiwania jest lista obrazów spełniających zadane kryteria (ryc. 4.3). W podglądzie wybranej sceny dostępne są szczegółowe informacje o danej scenie, jak np. data pozyskania, identyfikator produktu, rodzaj satelity i instrumentu, rozmiar sce-



Ryc. 4.2. Open Hub (źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu Copernicus Open Hub)

ny, pokrycie chmurami, pokrycie cieniem, jakość geometryczna i radiometryczna sensora, pokrycie roślinnością, wodą, śniegiem, itd. (ryc. 4.3). Interfejs Open Hub nakłada ograniczenia co do liczby pobieranych zobrazowań, możliwe jest pobieranie jednocześnie tylko dwóch obrazów.



Ryc. 4.3. Lista wyników wyszukiwania i podgląd wybranej sceny (źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu Copernicus Open Hub)

API Hub (Odata, OpenSearch)

API Hub (Odata, OpenSearch) to interfejsy umożliwiające dostęp do danych z poziomu programów zewnętrznych, takich jak przeglądarki internetowe, narzędzia do pobierania plików czy innych programów. Interfejsy te przeznaczone zostały do wyszu-

kiwania i pobierania obrazów z wykorzystaniem skryptów – przetwarzanie wsadowe. Ograniczeniem jest limit liczby pobieranych obrazów, który jest taki sam jak w przypadku Open Hub GUI.

Zawartość materiałów w obu serwisach API Hub i Open Hub jest taka sama.

Wyszukiwanie i pobieranie danych opiera się na sformułowaniu zapytania zawierającego odpowiednie słowa kluczowe i odpowiadające im wartości. Dokładny opis wykorzystania skryptów przedstawiony został w rozdziale ósmym podręcznika *User Guide* zatytułowanym *Batch Scripting* (SciHubUserGuide, 2020). Fragment instrukcji przedstawia poniższy obraz (ryc. 4.4).

Download via wget

The `wget` can also be used to download products.

Single products, identified by their own Data Hub universally unique identifier (UUID), can be downloaded using an OData URI

```
• wget --content-disposition --continue --user={USERNAME} --password={PASSWORD}
  "https://scihub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('{UUID}')/\$value"
```

Please note that the `--content-disposition` option allows to save the product with its own filename, without the need to specify it (i.e. by using the `'-O'` option).

Ryc. 4.4. Linia polecenia do pobierania obrazów przez 'wget',
(źródło: SciHubUserGuide, 2020)

S-5P Pre-Ops

S-5P Pre-Ops to interfejs graficzny, podobny do Open Hub GUI, dający dostęp do preoperacyjnych danych z misji Sentinel-5P poświęconej monitoringowi atmosfery, w tym m.in.: określanie składu chemicznego atmosfery, monitorowanie ozonu, promieniowania UV i gazów cieplarnianych oraz wspomaganie usług reagowania kryzysowego, np.: prognozy pogody i usługi tymczasowe dla Serwisu Monitorowania Stanu Atmosfery (ang. *Copernicus Atmosphere Monitoring Services*, CAMS), czy monitorowanie erupcji wulkanicznych.

POD Hub

Z kolei POD Hub to interfejs graficzny, również podobny do Open Hub GUI, ale dający dostęp do danych „Precise Orbit Determination (POD)” dla Sentinel-1A, -1B, -2A, -2B, -3A i -3B. Serwis dostarcza dane, takie jak: informacja o wysokości i położeniu satelity, dane nawigacyjne, czy dodatkowe informacje pomocnicze (np. współrzędne punktu odniesienia anteny GPS, przesunięcia i zmiany środka fazy anteny), które mogą być wykorzystywane przez użytkowników do precyzyjnych obliczeń orbity satelity.

4.1.2. EarthExplorer

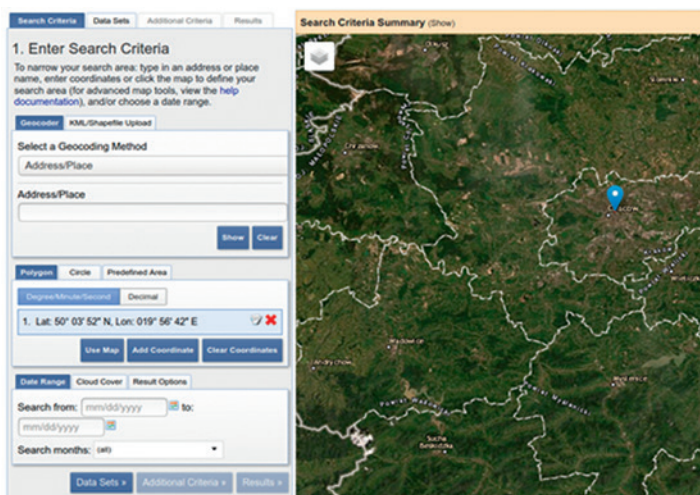
EarthExplorer (EE) to interfejs klient/serwer, który zapewnia dostęp do zasobów amerykańskiego centrum obserwacji i nauki o Ziemi – United State Geological Survey (USGS) i Earth Resources Observation and Science (EROS). Archiwum EROS przechowuje dane teledetekcyjne, które obejmują okres ponad siedemdziesięcioletni dla terenu USA i ponad pięćdziesięcioletni dla pozostałych obszarów Ziemi.

Serwis EarthExplorer (EarthExplorer, 2020) udostępnia dane z różnych satelitów,

zarówno programów publicznych, jak i komercyjnych. Korzystanie z serwisu i danych Landsat i Sentinel-2 jest bezpłatne (typ dostępu do danych – *public domain*).

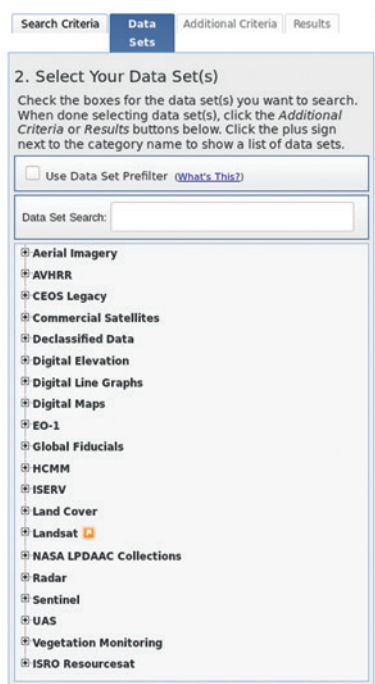
Na rycinie 4.5 przedstawiono okno wyszukiwania obrazów w serwisie EarthExplorer, które uruchamiane jest po podaniu parametrów wyszukiwania według trzech kryteriów:

- obszar i zakres dat,
- rodzaj danych – portal jest przeznaczony do wyszukiwania obrazów dla całego globu, obrazów Landsat, numerycznych modeli terenu z misji SRTM oraz innych danych, np. niektórych obrazów Sentinel-2 i różnych innych danych z obszaru USA (ryc. 4.6),
- dodatkowe kryteria – identyfikator konkretnego obrazu (ang. *Landsat Product Identifier*) lub identyfikatory orbity (ang. *Path, Row*) – ten krok jest opcjonalny.



Ryc. 4.5. EarthExplorer (źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu EarthExplorer)

Obsługa interfejsu graficznego jest intuicyjna i polega na wypełnieniu odpowiednich pól formularza.



Ryc. 4.6. EarthExplorer – rozwijalna lista wyboru źródła danych (źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu EarthExplorer)

4.1.3. EO Browser

Przeglądarka EO Browser udostępnia w jednym miejscu kompletne archiwa:

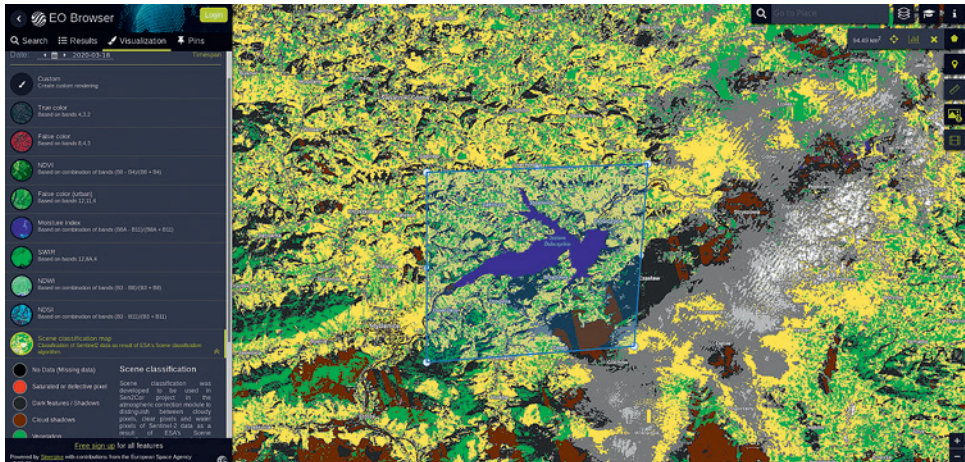
- Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3,
- Landsat 5, 7 i 8,
- globalny zasięg produktów Envisat (MERIS), Proba-V i MODIS.

Korzystanie z aplikacji EO Browser jest bezpłatne do użytku niekomercyjnego oraz do wykorzystywania w mediach. Eksport danych z przeglądarki jest licencjonowany na warunkach licencji CC BY 4.0, która wymaga powoływania się na Sentinel Hub EO Browser.

Możliwości przeglądarki:

- jednoczesne wyszukiwanie obrazów we wszystkich dostępnych zasobach – po wpisaniu kryteriów wyszukiwania uzyskane wyniki zawierają dane ze wszystkich wskazanych zasobów,
- wyszukiwanie w zdefiniowanych oknach czasowych,
- analizy statystyczne wybranych obrazów i możliwość przeprowadzania podstawowych operacji matematycznych,
- wizualizacja danych:
 - predefiniowane kompozycje (ryc. 4.7),
 - wybrane wskaźniki roślinności, np. NDVI (ryc. 4.8),
 - tworzenie własnych kompozycji użytkownika,

- możliwość ustawiania różnych parametrów jak np. kontrast, korekcja atmosferyczna, luminancja,
- możliwość pobierania obrazów przyciętych do narysowanego wcześniej poligonu,
- możliwość pobierania obrazów w różnych formatach i z różną rozdzielczością,
- tworzenie animacji z obrazów wieloczasowych (wizualizacja szeregów czasowych).



Ryc. 4.7. EO Browser – predefiniowana mapa klasyfikacji (źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu EO Browser)



Ryc. 4.8. EO Browser – kompozycja NDVI z zaznaczonym obszarem analiz (ang. *Area Of Interest*, AOI) (źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu EO Browser)

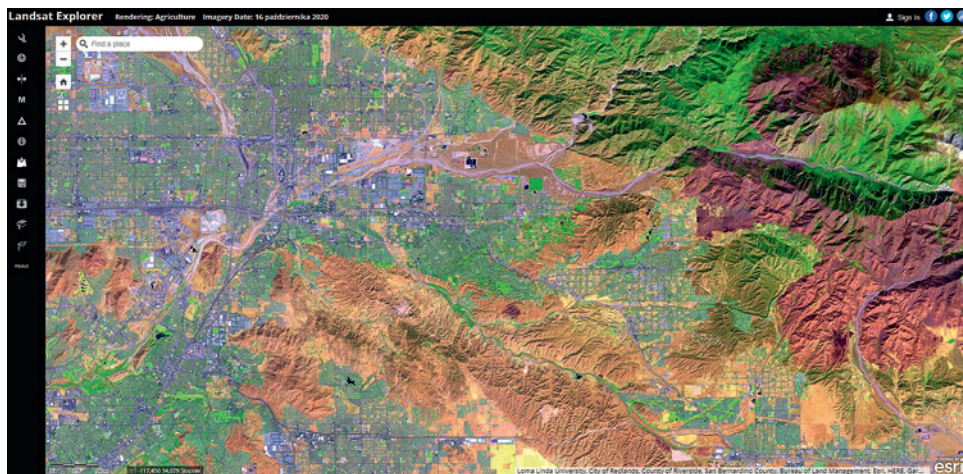
4.1.4. Landsat Explorer

Aplikacja Esri Landsat Explorer oferuje dostęp do obrazów Landsat z okresu ostatnich 40 lat, umożliwiając wykonywanie różnych wizualizacji. W Landsat Explorer można między innymi:

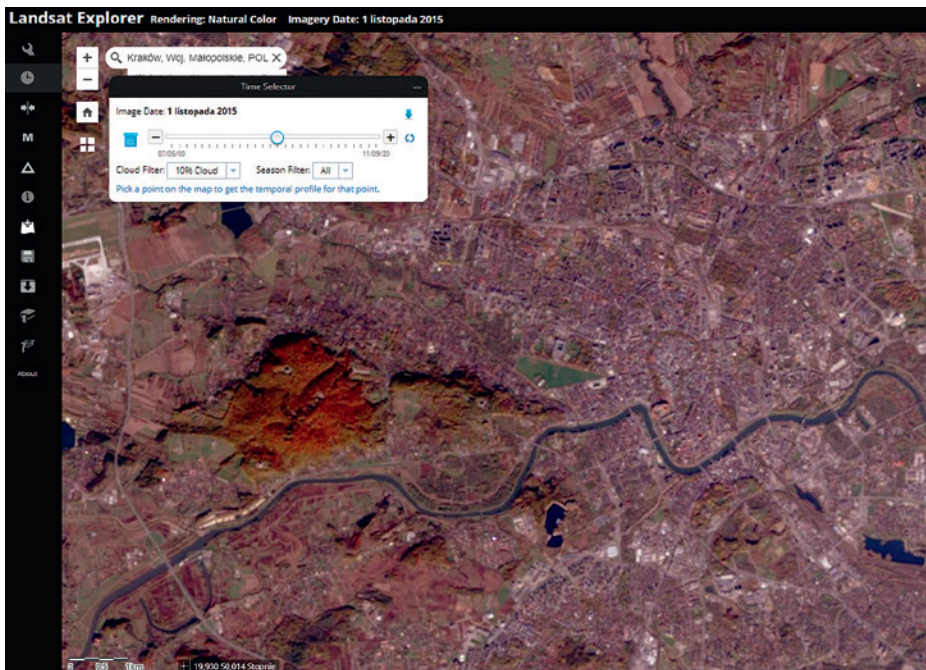
- wyszukiwać miejsca przez wpisywanie nazw geograficznych,
- określać daty wykonania zobrażeń i zachmurzenie,
- wyświetlać predefiniowane i własne wskaźniki oraz kompozycje barwne,
- wyświetlać przebiegi czasowe indeksów we wskazanych punktach,
- pobierać wyświetlane obrazy: kompozycje barwne lub wskaźniki spektralne.

Korzystanie z aplikacji jest bezpłatne i nie wymaga posiadania konta użytkownika. Program oferuje integrację z oprogramowaniem ArcGIS w zakresie pobierania i wgrywania danych. Wgrywanie danych wymaga posiadania konta użytkownika w serwisie ArcGIS Online.

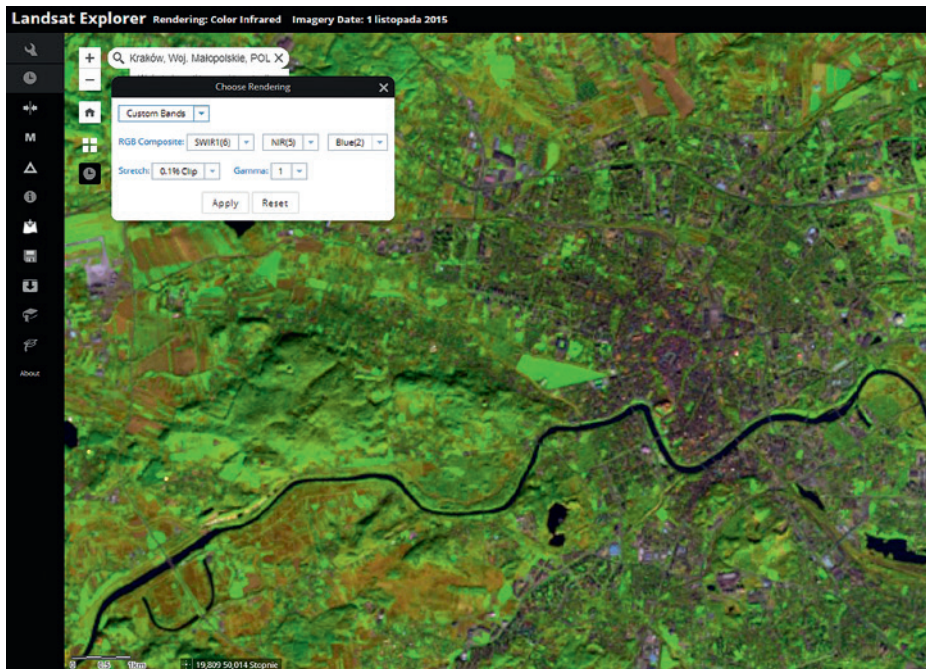
Wygląd okna aplikacji po jej uruchomieniu przedstawia poniższy rysunek (ryc. 4.9). Z kolei na kolejnym rysunku (ryc. 4.10) przedstawiono okno wyszukiwania po dacie pozyskania obrazu (dostępne po kliknięciu ikony zegara). Po wybraniu obrazu można go zwizualizować wybierając odpowiednią kompozycję barwną (ryc. 4.11). Ciekawa jest również funkcjonalność pozwalająca na analizę zmienności wybranych parametrów (np. NDVI) w czasie (ryc. 4.12).



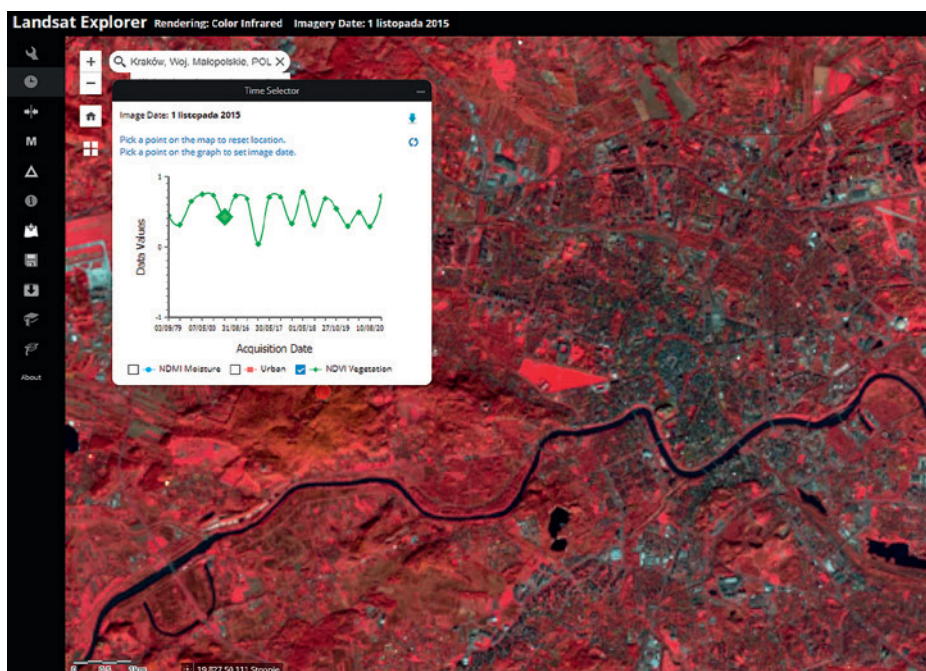
Ryc. 4.9. Wygląd okna aplikacji Landsat Explorer po uruchomieniu (źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu Landsat Explorer)



Ryc. 4.10. Landsat Explorer – wyszukiwanie
(źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu Landsat Explorer)



Ryc. 4.11. Landsat Explorer – tryby wyświetlania
(źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu Landsat Explorer)



Ryc. 4.12. Landsat Explorer – NDVI w czasie, kompozycja CIR
(źródło: opracowano z wykorzystaniem serwisu Landsat Explorer)

4.2. Dostęp do danych i usług przetwarzania w chmurze obliczeniowej

Urszula Cisło-Lesicka

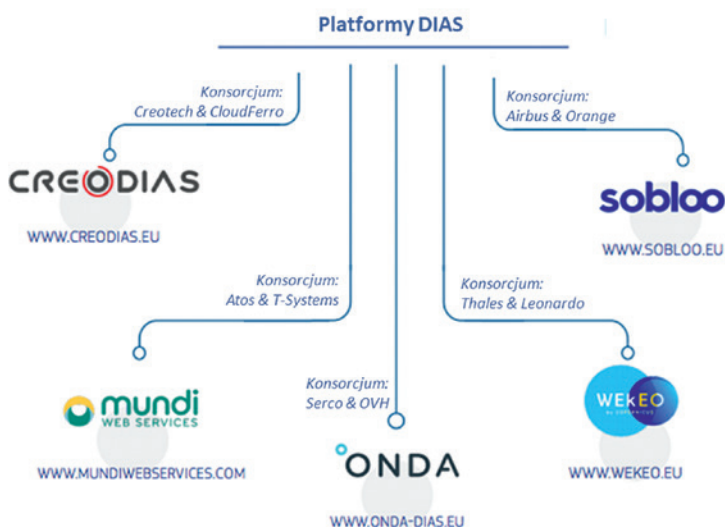
Szeroki dostęp do danych satelitarnych daje ogromne możliwości i korzyści w zarządzaniu zasobami naturalnymi, ale pobieranie i zapisywanie tych danych jest dużym logistycznym wyzwaniem. Aby w pełni swobodnie korzystać z danych satelitarnych niezbędna jest odpowiednia infrastruktura informatyczna zapewniająca transfer danych (szybkie łącze internetowe) oraz odpowiednia moc obliczeniowa i przestrzeń dyskowa. Rozwiązaniem tego problemu są tu narzędzia i przestrzeń dyskowa udostępniane na zewnętrznych serwerach i serwisach internetowych, które oprócz dostępu do danych satelitarnych dają możliwość wykorzystania bardzo wydajnej zewnętrznej infrastruktury teleinformatycznej.

4.2.1. Usługi DIAS: CREODIAS, MUNDI, SOBLOO, WEKEO, ONDA

Ogromne zainteresowanie danymi satelitarnymi programu Copernicus spowodowało, że Komisja Europejska zdecydowała się na sfinansowanie przeniesienia rynku usług opartych na danych obserwacji Ziemi na nowy, wyższy poziom przez rozwój europejskich usług dostępu do informacji i przetwarzania danych w chmurze obliczenio-

wej. Pod koniec 2017 roku Europejska Agencja Kosmiczna (ESA) podpisała umowy na stworzenie narzędzi i usług dostępowych do danych programu Copernicus, tzw. systemów DIAS (Copernicus Data and Information Access Services). W ramach tych umów cztery konsorcja opracowały w 2018 roku następujące systemy DIAS: Creodias, sobloo, ONDA i Mundi (ryc. 4.13). W pierwszej połowie 2019 roku uruchomiono piąty system DIAS – WEkEO (ryc. 4.13).

Celem systemów DIAS jest ułatwienie dostępu do danych misji Sentinel oraz wykonywania analiz. Technologia chmury obliczeniowej pozwala na korzystanie z danych satelitarnych bez konieczności ponoszenia dużych kosztów związanych z budową i utrzymaniem własnej infrastruktury i oprogramowania.



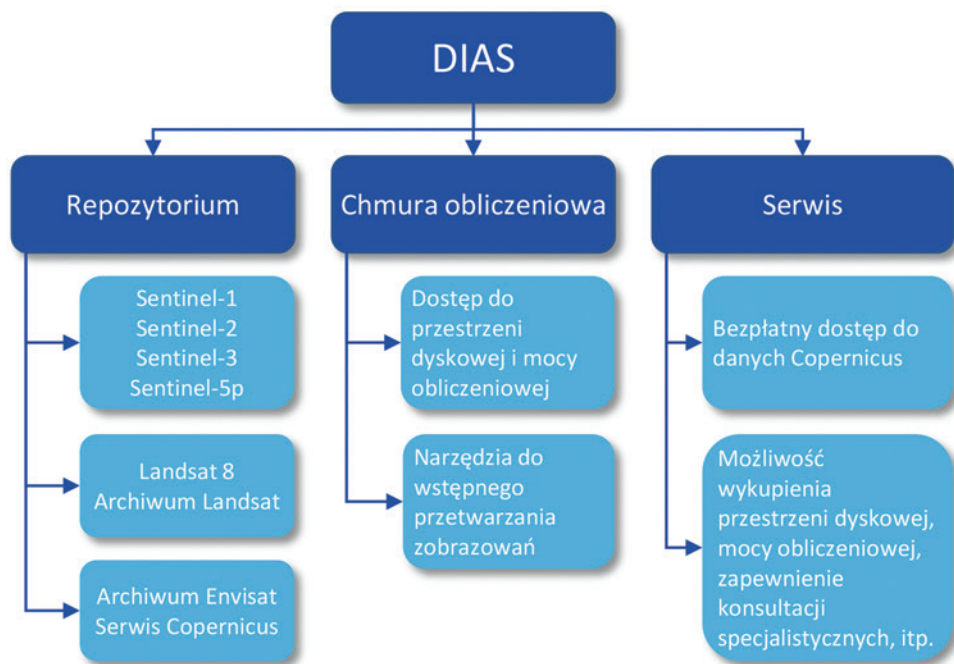
Ryc. 4.13. DIAS (źródło: za ESA DIAS, 2020)

Platformy DIAS zapewniają nieograniczony, bezpłatny, pełny dostęp do danych i informacji programu Copernicus, a w ograniczonym (czasowo i przestrzennie) zakresie również do innych danych obserwacji Ziemi (np. misje Landsat, Envisat, SMOS). Dodatkowo zapewniają (odpłatnie) środowisko obliczeniowe i magazynowe (serwery) dla stron trzecich, jak również dostęp (odpłatny) do wybranych satelitarnych zobrazowań wysoko- i bardzo wysokorozdzielczych. Firmy zewnętrzne mogą oferować za pomocą systemów DIAS zaawansowane usługi przez dodawanie własnych danych i narzędzi. W rezultacie DIAS to system dla dostawców innowacyjnych usług i zainteresowanych użytkowników.

System zapewnia użytkownikom otwarty i wydajny dostęp do zasobów DIAS (dane, informacje, oprogramowanie, przechowywanie, przetwarzanie) oraz gwarantuje konkurencyjną strukturę kosztów i jasne warunki dostępu do zasobów na podstawie umowy o gwarantowanym poziomie usług.

DIAS jest otwarty dla wszystkich użytkowników i umożliwia bezpłatny dostęp do repozytorium danych programu Copernicus. Płatny natomiast jest dostęp do przestrzeni dyskowej i mocy obliczeniowej w miesięcznym lub rocznym abonamencie, gdzie koszt jest uzależniony od ilości wykorzystanej przestrzeni i mocy serwerów.

Każdy DIAS posiada trzy podstawowe komponenty (ryc. 4.14).



Ryc. 4.14. Elementy systemu DIAS (źródło: za ESA DIAS, 2020)

Pierwszym z nich jest repozytorium przechowujące dane satelitarne z programu Copernicus i ich pochodne oraz inne bezpłatne dane satelitarne, jak np. dane z programu Landsat, czy Envisat. Drugi element to chmura obliczeniowa, w której jest możliwe przechowywanie danych i produktów przetworzeń oraz korzystanie z istniejących lub tworzenie własnych specjalistycznych narzędzi do przetwarzania danych satelitarnych. Ostatni element systemu DIAS to serwis dający dostęp do danych, przestrzeni dyskowej oraz mocy obliczeniowej, a także umożliwiający specjalistyczne konsultacje pomiędzy użytkownikami.

Obecnie jedną z najpopularniejszych platform DIAS jest serwis CreoDIAS (CreoDIAS, 2020), którego repozytorium zawiera:

- pełne repozytorium danych Sentinel-1, -2, -3 i -5P,
- archiwum i aktualne dane programu Landsat dla obszaru Europy od 1984 roku (Landsat 5, 7, 8),
- globalne dane programu Envisat (MERIS) od 2002 do 2012 roku,
- globalne dane programu SMOS (MERIS) od 2010 roku,
- mapę pokrycia terenu Europy z projektu Sentinel-2 Global Land Cover 2017 (S2GL),
- dane serwisów: CAMS (Atmosphere), CEMS (Emergency), CLMS (Land), CMEMS (Marine),
- globalny numeryczny model terenu (SRTM) z 2000 roku oraz dane Jason-3 (Alltimeter),
- bardzo wysokorozdzielcze dane satelitarne chińskiego satelity Jilin-1 (GSD: PAN

0,72 m, MSI 2,88 m, VIDEO 0,92 m, czas rewizyty 3–4 dni) oraz kazachskiego satelity KazEOSat (GSD: PAN 1 m, MSI 4 m, czas rewizyty 3 dni).

Repozytorium to zawiera obecnie ponad 18 petabajtów danych satelitarnych (dane na sierpień 2020 roku), zasób jest cały czas powiększany. Dostęp do danych z obserwacji Ziemi można uzyskać za pośrednictwem kilku interfejsów, w tym interfejsu obiektowego S3 zgodnego ze standardem Amazon S3. Dostęp do danych satelitarnych jest darmowy (poza danymi komercyjnymi, bardzo wysokorozdzielczymi), odpłatna jest natomiast usługa dostępu do chmury obliczeniowej (obliczanie i przechowywanie danych na serwerach CreoDIAS) oraz dane komercyjne, bardzo wysokorozdzielcze. Serwis udostępnia następujące narzędzia:

- CreoDIAS EO Browser: darmowe narzędzie do przeglądania danych w repozytorium, umożliwiające również tworzenie online kompozycji barwnych i prostych obliczeń na rastrach (kalkulator rastra),
- CreoDIAS EO Finder: darmowe narzędzie do wyszukiwania i pobierania danych dostępnych w repozytorium (po uprzedniej rejestracji); posiadające możliwość wyszukiwania po dacie, rodzaju sensora, stopniu zachmurzenia, lokalizacji określonej przez nazwę, narysowany w przeglądarce lub załadowany z pliku KML lub GeoJSON poligon,
- CreoDIAS Cloud Dashboard: narzędzie do odpłatnej usługi dostępu do chmury obliczeniowej,
- CreoDIAS JupyterHub: platforma umożliwiająca pisanie i przechowywanie skryptów Python, R, czy Julia, za pomocą których można tworzyć własne narzędzia przetwarzania danych obserwacji Ziemi (dostępna nieodpłatnie dla wszystkich zarejestrowanych użytkowników CreoDIAS).

Platforma sobloo (Sobloo, 2020) w swoim repozytorium posiada obecnie:

- repozytorium danych Sentinel-1, -2, -3 i -5P,
- dane serwisów: CAMS (Atmosphere), CEMS (Emergency), CLMS (Land), CMEMS (Marine),
- dane tematyczne projektu MUSCATE francuskiej agencji kosmicznej opracowane na podstawie danych Sentinel-2,
- dane o uprawach z projektu soCAP (dostęp odpłatny),
- odpłatnie dostępne wysokorozdzielcze zobrazowania Pléiades (GSD: PAN 0,5 m, MSI 2,8 m, codzienne pozyskanie).

Na platformie sobloo możliwy jest odpłatny dostęp do przestrzeni dyskowej oraz mocy obliczeniowej na serwerach. Serwis ten oferuje również odpłatną usługę przetwarzania danych w locie (ang. *on-the-fly*), np. integrowanie danych z różnych źródeł, radiometryczną i geometryczną korekcję danych, detekcję obiektów na powierzchni terenu czy wody oraz analizy statystyczne.

Z kolei platforma ONDA (Onda, 2020) umożliwia dostęp do:

- repozytorium danych Sentinel-1, -2, -3 (pełne archiwum i aktualne dane) oraz dane Sentinel-5P od maja 2019 roku,
- danych satelitarnych Landsat 8 od kwietnia 2018 roku,
- danych programu Envisat (2008–2010),
- danych serwisów: CAMS (Atmosphere), CLMS (Land), CMEMS (Marine),
- odpłatnie – wysokorozdzielczych zobrazowań optycznych KOMPSAT-2, -3, -3A

(GSD PAN od 0,4 m, MSI od 1,6 m) i radarowe KOMPSAT-5, pozyskiwanych codziennie,

- odpłatnie – wysokorozdzielczych zobrazowań Deimos-2 (GSD PAN od 0,75 m, MSI od 3 m, czas rewizyty 2 dni).

Oprócz dostępu do danych satelitarnych platforma ONDA umożliwi również odpłatne przechowywanie i przetwarzanie danych satelitarnych w chmurze obliczeniowej, gdzie dostępne są również różne narzędzia przetwarzania danych satelitarnych (np. SNAP, QGIS, Orfeo ToolBox) oraz oprogramowanie do zarządzania i tworzenia własnych narzędzi (np. Anaconda/Jupyter, biblioteki GDAL, R, Apache Maven).

W serwisie Mundi (Mundi, 2020) dostępne są:

- dane Sentinel-1, -2, -3 i -5P,
- dane satelitarne Landsat 8,
- dane programu Envisat (2008–2010),
- dane serwisów Copernicus EMS (Emergency) i CLMS (Land).

Dodatkowo, od 2020 roku planowane jest dodanie do repozytorium wysokorozdzielczych danych satelitarnych oraz map dróg opracowanych na podstawie danych COSMO-SkyMed. Jak każdy komponent DIAS serwis Mundi umożliwi również odpłatne przechowywanie i przetwarzanie danych satelitarnych w chmurze obliczeniowej, gdzie dostępne są również różne narzędzia przetwarzania danych satelitarnych (np. SNAP, czy Orfeo ToolBox) oraz oprogramowanie do zarządzania i tworzenia własnych narzędzi (np. biblioteki GDAL).

Najnowsza platforma DIAS – WEkEO (Wekeo, 2020) bezpłatnie udostępnia dane misji Sentinel-1, -2, -3 i -5P oraz dane serwisów Copernicus: CAMS (Atmosphere), C3S (Climate), CLMS (Land), CMEMS (Marine). Zgodnie z założeniem działania systemu DIAS WEkEO umożliwia odpłatny dostęp do mocy obliczeniowych w chmurze obliczeniowej i przestrzeni dyskowej, gdzie użytkownicy wykorzystując narzędzie Jupyter Notebooks mogą tworzyć własne skrypty i za ich pomocą wykonywać różne przetworzenia danych satelitarnych bez konieczności inwestowania we własną infrastrukturę.

4.2.2. Amazon Web Services

Elżbieta Jędrzejczak, Urszula Cisło-Lesicka

Amazon Web Service jest jednym z największych na świecie dostawców chmury obliczeniowej. Zapewnia on wiele produktów i rozwiązań przeznaczonych do różnorodnych zastosowań. Wśród nich znajduje się m.in. serwis umożliwiający kontrolę i pobieranie danych satelitarnych bezpośrednio z satelity (AWS Ground Station). Posiadając dostęp do AWS Ground Station można korzystać również z globalnej infrastruktury AWS, np. Amazon S3 przeznaczonego do przechowywania plików, Amazon Kinesis Data Streams do zarządzania dużymi zbiorami danych, czy Amazon SageMaker do uczenia maszynowego. W większości przypadków usługi Amazon są odpłatne tylko w czasie korzystania z nich, bez długoterminowych zobowiązań. Schemat działania AWS Ground Station przedstawiono na rysunku poniżej (ryc. 4.15).

Zalety AWS Ground Station:

- możliwość korzystania z mocy obliczeniowej Amazon, co pozwala na przetwarzanie dużych zbiorów danych,



Ryc. 4.15. Schemat działania AWS Ground Station (źródło: za Amazon AWS, 2020)

- możliwość zapisu i przechowywania danych bezpośrednio w serwisie Amazon,
- bezpośredni dostęp do zobrazowań satelitarnych, dostęp do produktów NOAA, DigitalGlobe Open Data Program, Open City Model, modelu terenu i wielu innych lokalnych i globalnych produktów za pomocą platformy Earth on AWS.

Platforma Earth on AWS (Amazon Earth, 2020) zawiera obecnie następujące zestawy danych:

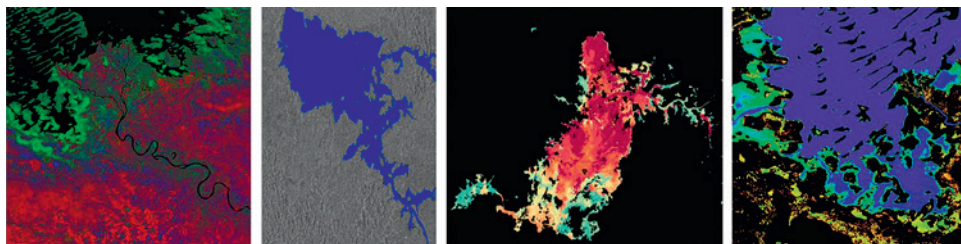
- obrazy NAIP (National Agriculture Imagery Program) – zdjęcia lotnicze wykonywane podczas poszczególnych sezonów uprawy rolnej na terenie kontynentalnych Stanów Zjednoczonych (GSD około 1 m),
- dane o wysokości terenu,
- GDELT (Global Database of Events, Language and Tone) – globalną bazę danych społeczeństwa – monitoruje m.in. światowe wiadomości telewizyjne, prasowe i internetowe,
- dane satelitarne Landsat 8 – dostępne dla każdego za pośrednictwem Amazon Simple Storage Service (S3),
- dane pochodzące z radaru pogodowego NEXRAD – sieć 160 radarów dopplerowskich o wysokiej rozdzielczości, które wykrywają opady atmosferyczne i ruch atmosferyczny (umożliwia przewidywanie silnych sztormów i jest wykorzystywany przez naukowców i przedsiębiorstwa komercyjne do badania i reagowania na wpływ pogody w wielu sektorach).

Ponadto na platformie znajdują się: narzędzie uczenia maszynowego SpaceNet i NASA Earth Exchange (NEX) – platforma ułatwiająca dostęp i przetwarzanie danych z zakresu nauk o Ziemi, w tym globalnych wskaźników roślinności obliczonych na podstawie danych MODIS (produkt MOD13Q1) oraz danych Landsat Global Land Survey.

Oprócz dostępu do chmury obliczeniowej i danych dostępnych na platformie, Earth on AWS Amazon oferuje również wsparcie finansowe na realizację różnych projektów badawczych i wdrożeniowych. Instytucje badawcze i agencje rządowe mogą się ubiegać o środki finansowe na realizację projektów środowiskowych i rozwojowych, np. w zakresie ograniczania ryzyka klęsk żywiołowych czy zrównoważonego rozwoju. Użytkownicy Amazon AWS mogą liczyć również na wsparcie od społeczności GEO (Group on Earth Observations) i ekspertów AWS w celu udoskonalenia i wdrażania projektów.

Przykładem projektu dotowanego przez Amazon jest aplikacja ARDC (African Regional Data Cube) umożliwiająca pięciu krajom Afryki kontrolowanie zmian zachodzących na ich terytoriach przez ostatnie 35 lat. Zadaniem projektu jest sprostanie kluczowym

wyzwaniom rozwojowym tych regionów, w tym bezpieczeństwu żywności i zarządzaniu ryzykiem klęsk żywiołowych (ryc. 4.16).



Ryc. 4.16. Przykładowe dane z aplikacji ARDC, najbardziej od lewej: pokrycie terenu roślinnością, wykrywanie wody za pomocą danych radarowych Sentinel-1, mapa jakości wody w całkowitej zawiesinie, mapa zasięgu wody (źródło: GEO, 2018)

4.2.3. Google Earth Engine (GEE)

Urszula Cisło-Lesicka

Google Earth Engine (GEE) to internetowa platforma stworzona przez firmę Google umożliwiająca wizualizację i analizę danych geoprzestrzennych w skali globalnej. Przeznaczona jest dla pracowników ośrodków akademickich, organizacji non-profit, agencji rządowych, jak również przedstawicieli biznesu. Platforma może być użytkowana bezpłatnie do celów badawczych, edukacyjnych i niekomercyjnych, a w przypadku komercyjnego wykorzystania oferowane licencje są płatne.

Google Earth Engine (GEE, 2020) zarządza danymi satelitarnymi, które przechowywane są w publicznych archiwach. Baza zawiera aktualne obrazy, jak również zobrażenia archiwalne zbierane przez ponad 40 lat. Użytkownik dostaje także łatwy dostęp do innych danych geoprzestrzennych w formacie gotowym do analizy. Katalog danych jest połączony ze skalowalną mocą obliczeniową wspieraną przez centra danych Google i elastyczne interfejsy API. Dzięki temu możliwe są różnorodne analizy zmian pokrycia terenu, użytkowania terenu czy też oceny zdrowotności roślinności dla wielkopowierzchniowych obszarów.

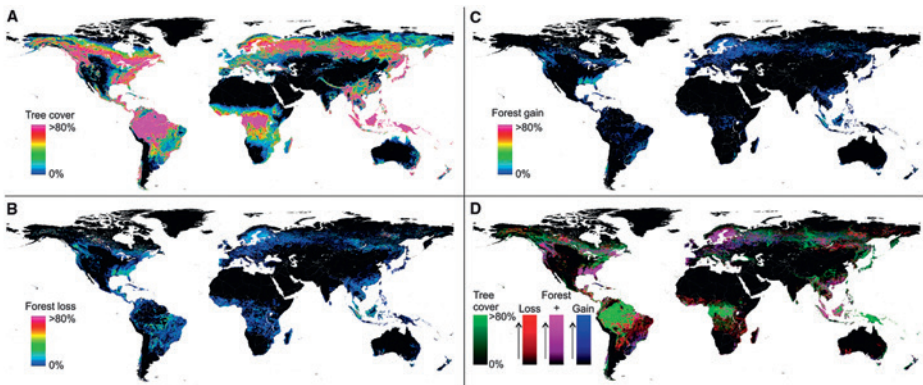
W zasobach GEE znajdują się katalogi danych, m.in.: Landsat, EROS, dane MODIS, Sentinel-1, NAIP (National Agriculture Imagery Program) oraz dane klimatyczne, tj. CHIRPS, wielkość opadów, temperatury powierzchni morza i dane dotyczące wysokości. Użytkownicy GEE mogą również dodawać do katalogu własne dane.

Korzyści wynikające z pracy na platformie Google Earth Engine:

- dostęp z jednego miejsca do bezpłatnych i otwartych zestawów danych, w tym historycznych, wykonanych przez satelity Sentinel, Landsat, MODIS oraz danych klimatycznych,
- brak konieczności pobierania i przechowywania lokalnie danych źródłowych,
- skrócenie czasu potrzebnego do wykonania analiz,
- udostępnianie danych już skalibrowanych, gotowych do wykorzystania,
- bezpłatna licencja do celów testowych, edukacyjnych, badawczych,
- przyjazny interfejs użytkownika, możliwość zarządzania geometrią, wgrywania własnych danych i wizualizacji warstw w oknie mapy,

- łatwe udostępnianie danych i skryptów bezpośrednio z edytora kodu,
- szybkie uruchamianie procesów wstępnego przetwarzania obrazu,
- aktywna i rosnąca społeczność użytkowników i programistów.

Przykładem wykorzystania platformy GEE mogą być analizy zmian globalnej pokrywy drzew na przestrzeni lat 2000–2012 (ryc. 4.17) wykonane przez zespół z Uniwersytetu Maryland we współpracy z informatykami Google (Hansen i in., 2013). Jest to pierwsza tego typu mapa, która z jednej strony cechuje się spójnością w skali globalnej, a jednocześnie, z uwagi na wysoką rozdzielczość przestrzenną (Landsat 7, 30 m) może być wykorzystana do analiz na poziomie lokalnym. Przeprowadzenie tak obszarowo rozległej analizy możliwe było jedynie dzięki wykorzystaniu zaplecza sprzętowego i algorytmów Earth Engine.



Ryc. 4.17. Mapy opracowane przy pomocy narzędzi Google Earth Engine. a) zasięg lasów, b) ubytek powierzchni lasów, c) wzrost powierzchni lasów, d) mapa zbiorcza (źródło: Hansen i in., 2013)

4.2.4. Microsoft Azure

Anna Żądło, Urszula Cisko-Lesicka

Microsoft Azure (wcześniej znany pod nazwą Azure Services Platform, Windows Azure) jest internetową platformą stworzoną przez firmę Microsoft, która pozwala przechowywać (Windows Azure Storage, SQL Azure) oraz przetwarzać (Windows Azure Compute) duże zbiory danych. Użytkownicy mają dostęp do mocy obliczeniowej i przestrzeni dyskowej Azure, co pozwala na przetwarzanie nawet bardzo dużych zbiorów danych rastrowych, a także mają dostęp do usług geoprzestrzennych, interfejsów API i zestawów SDK (Software Development Kit) na platformie Azure.

Produkt nie jest dystrybuowany jako system lub gotowa aplikacja dla użytkownika, lecz jako usługa stworzona w celu przechowywania danych i tworzenia własnych aplikacji. Platforma Windows Azure może być wykorzystywana przez aplikacje uruchamiane lokalnie na komputerach użytkowników lub przez aplikacje uruchamiane w chmurze obliczeniowej. Zapewnia dużą swobodę w wyborze technologii jakie mogą być wykorzystane do budowy aplikacji, np.: .NET (technologia referencyjna dla chmury obliczeniowej Windows Azure) i Java oraz języka programowania np. PHP, C/C++, Python.

W 2017 roku powstał projekt AI for Earth (Microsoft, 2020), który jest przeznaczony dla naukowców oraz organizacji zajmujących się badaniem środowiska. Jego celem jest połączenie techniki sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego w badaniach nad środowiskiem, w szczególności w sektorach zajmujących się klimatem, rolnictwem, obszarami bioróżnorodnymi i wodą. Na chwilę obecną dla AI for Earth Microsoft udostępnia trzy API umożliwiające:

- tworzenie map pokrycia terenu (Land Cover Mapping) na podstawie obrazów satelitarnych (ryc. 4.18),
- rozpoznanie i klasyfikację gatunków roślin i zwierząt (Species Classification),
- przetwarzanie zdjęć w celu detekcji zwierząt (Camera Trap Image Processing).

Każdy z dostępnych API umożliwia podgląd jego działania w wersji demo, dostępny jest kod (przy pomocy GitHub) oraz dokumentacja API na zasadach otwartych (ang. *open source*).



Ryc. 4.18. Widok interfejsu API przeznaczonego do tworzenia map pokrycia terenu w oparciu o dane satelitarne – wersja demo (źródło: Microsoft, 2020)

W celu poprawienia dokładności modeli dla uczenia maszynowego, w ramach usług Microsoft Azure udostępnione są bazy danych, wśród których znajdują się także dane satelitarne jak: MODIS, NOAA (Global Forest System), NOAA (NEXRAD Level II), Landsat 8 i Sentinel-2 oraz zdjęcia lotnicze: NAIP (National Agricultural Imagery Program). Dostęp do nieodpłatnych baz danych możliwy jest na zasadach obowiązujących dla usług Azure. Program AI for Earth oferuje, podobnie jak Amazon, dotacje wspomagające prowadzenie badań i realizację projektów naukowym na całym świecie. Dotacja może być realizowana w formie finansowania projektu badawczego lub w postaci wsparcia specjalistów AI for Earth. Obecnie zrealizowane zostało 508 grantów, opisy niektórych z nich, kody źródłowe oraz aplikacje demonstracyjne są dostępne do wglądu na serwerach Microsoft Azure.

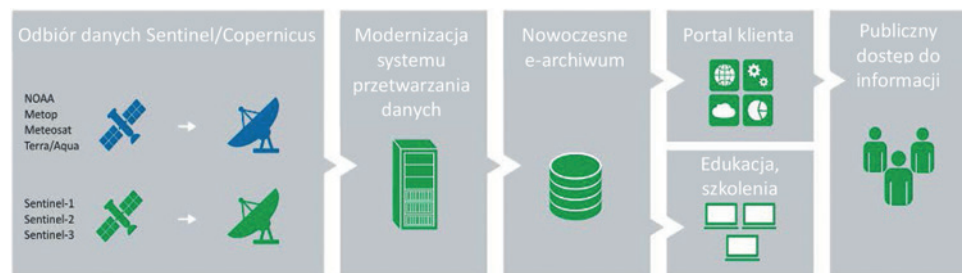
4.3. Sat4Envi

Urszula Cisło-Lesicka

Pod koniec 2017 roku rozpoczęła się realizacja projektu „System operacyjnego gromadzenia, udostępniania i promocji cyfrowej informacji satelitarnej o środowisku – Sat4Envi”. Projekt Sat4Envi realizowany jest przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB) we współpracy z Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Akademickim Centrum Komputerowym Cyfronet Akademii Górniczo-Hutniczej (ACK Cyfronet AGH) oraz Polską Agencją Kosmiczną (PAK). Projekt ma na celu rozbudowę istniejącej infrastruktury IMGW-PIB wykorzystywanej w celach odbioru, przetwarzania, dystrybucji oraz przechowywania danych pochodzących z satelitów środowiskowych, meteorologicznych, jak i pochodnych produktów satelitarnych (IMGW, 2020). Cele projektu Sat4Envi są spójne z celami Programu Operacyjnego Polska Cyfrowa, Strategii Europa 2020, obwieszczenia Komisji Europejskiej (2014/C 240/01) dotyczącego m.in. kategorii danych sektora publicznego i pierwszeństwa ich uwolnienia oraz Polskiej Strategii Kosmicznej i wpisują się w Krajowe Inteligentne Specjalizacje (KIS).

Zadania, które zostały postawione przed wykonawcami projektu Sat4Envi to (ryc. 4.19):

- rozbudowa stacji odbioru i przetwarzania danych z satelitów okołobiegunowych,
- budowa nowoczesnego archiwum danych satelitarnych,
- stworzenie centrum szkoleniowego nowych technologii satelitarnych,
- stworzenie centrum udostępniania informacji naukowej dla użytkowników.



Ryc. 4.19. Infrastruktura projektu Sat4Envi (źródło: PAK, 2019)

System Sat4Envi ma zapewniać możliwość ciągłego gromadzenia oraz przetwarzania danych satelitarnych (satelitów środowiskowych i meteorologicznych), a także udostępnienia ich do celów naukowych, strategicznych oraz dla celów zarządzania kryzysowego i zapewnienia bezpieczeństwa państwa. W efekcie realizacji projektu powstały m.in. następujące produkty (IMGW, 2020):

1. Cyfrowa informacja satelitarna udostępniona publicznie na potrzeby monitorowania:
 - powierzchni Ziemi,
 - pogody i zagrożeń meteorologicznych,
 - atmosfery.

2. Archiwum – wieloletnie dane dostępne w łatwej do pozyskania formie, służące badaniom i opracowaniom naukowym.
3. System obsługi klienta obejmujący Web Map Serwer oraz system obsługi danych archiwalnych pozwalający na automatyzację dostępu (API).
4. Stacja odbioru i przetwarzania danych z satelitów Sentinel pozwalająca na ich gromadzenie w czasie rzeczywistym.

Dzięki realizacji projektu, dane dostępne dla Polski, m.in. w ramach programu Copernicus realizowanego przez Komisję Europejską, będą mogły być wykorzystywane w szczególności przez:

- administrację publiczną,
- jednostki naukowe,
- służby państwowe (policja, straż pożarna, służby wojskowe),
- instytucje i centra zarządzania kryzysowego,
- obywateli i podmioty prywatne – do tworzenia usług komercyjnych.

Głównym użytkownikiem systemu Sat4Envi jest administracja publiczna, której działania związane z realizacją zadań statutowych ze szczególnym uwzględnieniem m.in. ochrony środowiska, planowania przestrzennego, rozwoju urbanizacji i sieci transportowych, mogą być wspierane przez dane satelitarne udostępniane właśnie przez krajowy punkt dostępowy – Sat4Envi. Budowa systemu zapewni liczne korzyści, m.in.:

- zapewnienie nieodpłatnego dostępu do zasobów naukowych w zakresie tele-detekcji satelitarnej oraz interaktywnych usług elektronicznych dla obywateli, studentów, naukowców, przedsiębiorców i administracji publicznej,
- usprawnienie i przyspieszenie realizacji wybranych zadań administracji publicznej,
- zwiększenie efektywności działań prewencyjnych i pomocowych związanych z naturalnymi zagrożeniami i klęskami żywiołowymi dzięki stałemu dostępowi do informacji wspomagających przewidywanie zagrożeń i zdarzeń niebezpiecznych oraz ochronę przed ich skutkami,
- wykreowanie popytu na dane satelitarne i związane z nimi usługi ze strony administracji publicznej, który może przyczynić się do intensywniejszego rozwoju rynku usług komercyjnych,
- modernizacja i efektywniejsze wykorzystanie istniejących zasobów IMGW-PIB, CBK PAN i ACK Cyfronet AGH.

Jak już wspomniano, głównym celem projektu Sat4Envi jest udostępnienie satelitarnych danych programu Copernicus oraz danych pochodzących z innych satelitów środowiskowych i meteorologicznych. W 2017 roku decyzją ministra środowiska krajowym operatorem danych Copernicus został IMGW, którego zadaniem jest zapewnienie dostępu do danych satelitarnych:

- misji Sentinel,
- misji współpracujących w ramach programu Copernicus udostępnianych przez ESA oraz EUMETSAT.

Zasady udostępniania danych satelitarnych przez krajowego operatora danych (2018–2019) są następujące (Łapeta i Struzik, 2018):

- udostępnianie, w ramach inicjatywy współpracującego segmentu naziemnego, danych satelitarnych z konstelacji satelitów Sentinel oraz innych danych udostępnianych przez ESA wszystkim zarejestrowanym i zweryfikowanym podmiotom,

- dane są udostępniane za pomocą infrastruktury teleinformatycznej,
- dane obejmują całe terytorium Polski oraz powierzchnię krajów graniczących na odległość 500 km od granic Polski (również w kierunku Morza Bałtyckiego),
- obowiązek udostępniania dotyczy danych satelitarnych poziomu 1, czyli skalibrowanych radiometrycznie i posiadających georeferencję,
- obowiązek rejestracji i weryfikacji użytkowników, którym udostępniane są dane satelitarne spoczywa na MNiSW,
- pierwszeństwo w dostępie do danych mają organy władzy publicznej oraz służby państwowe realizujące zadania statutowe w sytuacjach kryzysowych (o dostępie do danych dla pozostałych użytkowników decyduje kolejność wystąpień o udostępnienie danych),
- dane satelitarne objęte obowiązkiem udostępniania są przechowywane i operacyjnie udostępniane przez krajowego operatora danych przez jeden miesiąc od momentu ich pozyskania,
- dostęp do danych Meteosat jest realizowany zgodnie z polityką danych EUMETSAT (dane nie starsze niż trzy godziny wymagają dodatkowej licencji EUMETSAT),
- starsze dane są udostępniane na zamówienie, którego termin realizacji będzie zależał od wielkości zamówienia.

We wstępnych założeniach projektu Sat4Envi dane satelitarne miały być przechowywane w formie tzw. archiwum kroczącego (ang. *rolling archive*). Oznaczało to, że otwarte repozytorium danych dostępnych online miało być regularnie aktualizowane i miało obejmować ostatnie pięć lat zbioru danych gromadzonych w systemie Sat4Envi (starsze dane miały być usuwane). Obecnie jednak IMGW-PIB (instytucja odpowiedzialna za infrastrukturę Sat4Envi) zdecydowała, że zebrane dane są tak cenne z uwagi na wieloletnie obserwacje zjawisk, że w systemie Sat4Envi będą przechowywane wszystkie dane (przykładowo archiwalne dane Sentinel-1 dostępne będą aż od 2014 roku).

W celu zasilenia inicjalnego systemu Sat4Envi dane z misji Sentinel-1 i Sentinel-2 pobierane były bezpośrednio z systemu Collaborative Data Hub Service. Docelowo dla satelity Sentinel-1 dane będą pozyskiwane bezpośrednio z orbity. Dane Sentinel-1 i -2 pobierane są na poziomie 1 (GRDH, SLC i GRDM – Sentinel-1, L1C – Sentinel-2) i zapisane są w oryginalnym formacie SAFE wraz z metadanymi (m.in. informacje o nazwie satelity, czasie rejestracji, trybie pracy przyrządu, obszarze geograficznym) wraz z uproszczonym obrazem (ang. *quick look*).

Z kolei dane Sentinel-3 pobierane są na bieżąco za pośrednictwem systemu satelitarnego EUMETCast i zapisywane w oryginalnym formacie NetCDF skompresowanym do TAR, wraz z metadanymi i prezentacją graficzną. Oprócz danych Sentinel-3 poziomu 1, w ramach projektu Sat4Envi, pobierane są również produkty dostępne w systemie EUMETCast. Wszystkie pobierane dane i produkty Sentinel-3 obejmują swoim zasięgiem tylko Europę.

Natomiast dane Sentinel-5P oraz Sentinel-4 i -5 będą pobierane po uruchomieniu ich udostępniania użytkownikom przez instytucję odpowiedzialną za utrzymanie tych systemów satelitarnych. Dane planuje się zapisywać w oryginalnym formacie poziomu 1 wraz z produktami dostępnymi w systemie EUMETCast.

Cyfrowe dane satelitarne programu Copernicus oraz dane pochodzące z innych satelitów środowiskowych udostępniane są za pomocą tworzonych w ramach projektu Sat4Envi portalu klienta (strona www) oraz przygotowanego API (automatyczne pobieranie danych).

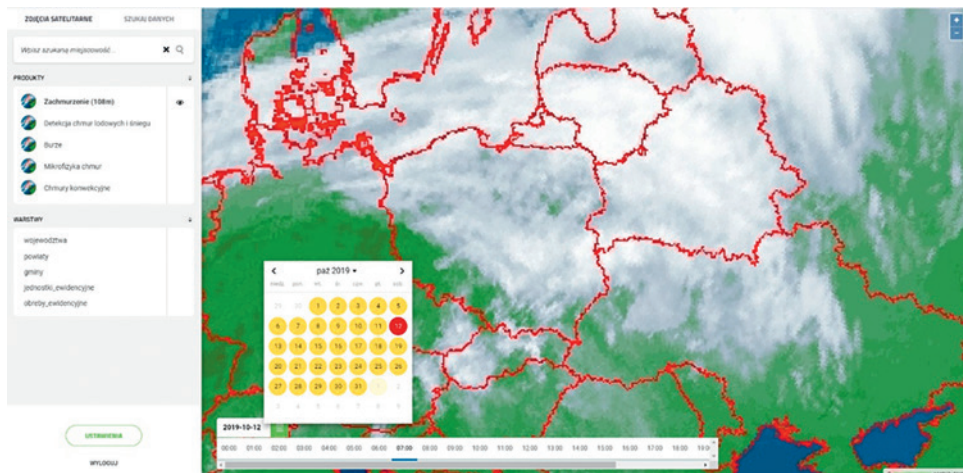
Po roku 2020, za pośrednictwem portalu klienta, będzie można pobierać dane gro-

madzone przez narodowego operatora danych satelitarnych. Przygotowano interfejs przeglądarki, w którym możemy znaleźć dwie zakładki. Jedna z nich służy przeglądaniu produktów pochodnych danych satelitarnych, takich jak:

- intensywność i suma opadów,
- informacja o zachmurzeniu (na wysokości 108 m) (ryc. 4.20),
- detekcja chmur lodowych i śniegu,
- lokalizacja zjawisk burzowych (wyładowania atmosferyczne),
- mikrofizyka chmur,
- chmury konwekcyjne (ryc. 4.21),
- wilgotność gleby,
- pył w atmosferze.

W tej zakładce jest również możliwość wyszukania danej lokalizacji oraz wyświetlenie granic administracyjnych na kilku poziomach:

- województwa,
- powiaty,
- gminy,
- jednostki ewidencyjne,
- obręby ewidencyjne.

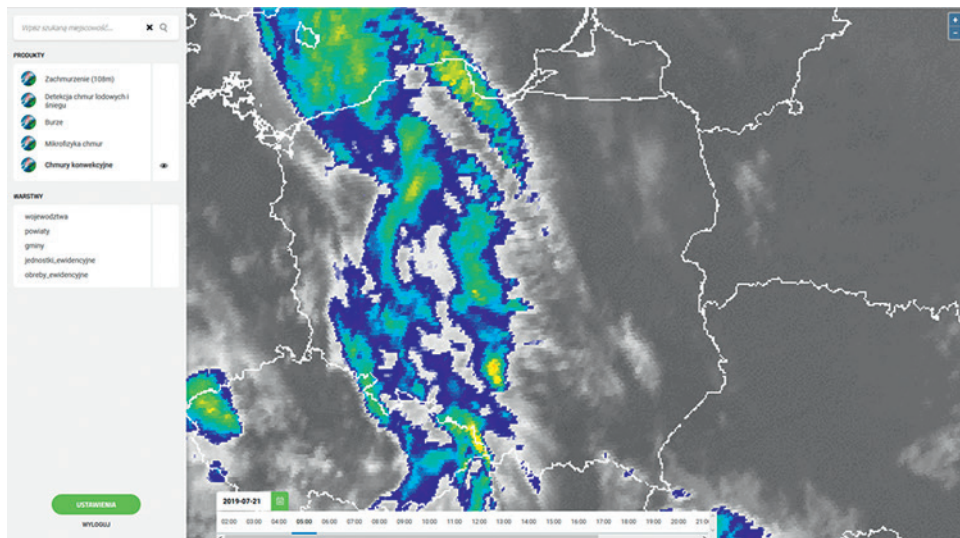


Ryc. 4.20. Zachmurzenie (108 m) – przykładowy produkt portalu klienta Sat4Envi (źródło: IMGW Sat4Envi, 2020)

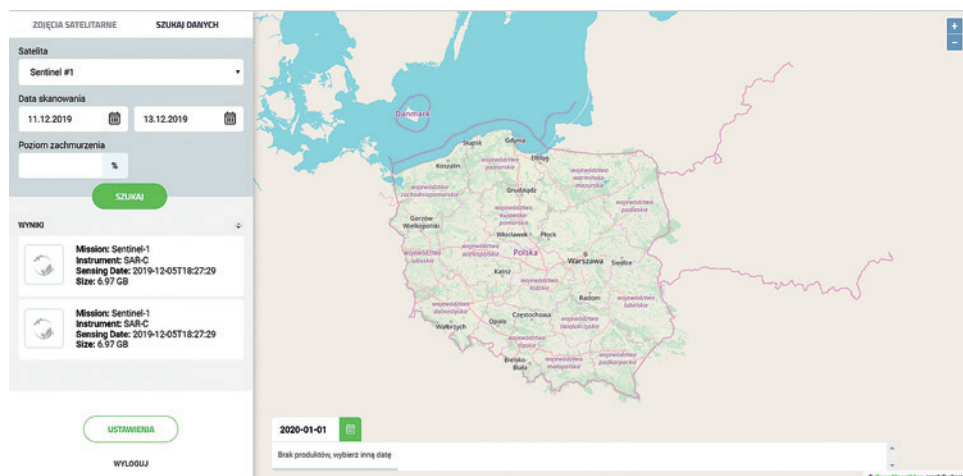
W drugiej zakładce portalu klienta Sat4Envi znajdziemy prostą wyszukiwarkę danych satelitarnych Sentinel, z możliwością ograniczenia wyników wyszukiwania przez wybranie typu satelity, filtr czasu oraz zachmurzenia (ryc. 4.22).

Interfejs mapowy portalu klienta Sat4Envi został stworzony na podkładzie Open Street Map. Ponadto, oprócz samych danych, mapa poglądowa będzie umożliwiać wyświetlanie warstw wektorowych dla podziału administracyjnego Polski lub innych dodatkowych danych zdefiniowanych przez użytkownika.

W ramach usługi portalu klienta Sat4Envi przewidziano również utworzenie różnych poziomów dostępu do danych i możliwości przeglądarki dla użytkowników, mniej i bardziej zaawansowanych, o różnych kompetencjach cyfrowych i stopniu przygotowania.



Ryc. 4.21. Chmury konwekcyjne – przykładowy produkt portalu klienta Sat4Envi (źródło: IMGW Sat4Envi, 2020)



Ryc. 4.22. Widok wyszukiwarki danych Sentinel portalu klienta Sat4Envi (źródło: IMGW Sat4Envi, 2020)

5. Wybrane oprogramowanie do przetwarzania danych teledetekcyjnych

Beata Hejmanowska, Piotr Wężyk

W rozdziale przedstawione zostało wybrane specjalistyczne oprogramowanie wykorzystywane do przetwarzania zobrazowań i danych teledetekcyjnych. W pierwszej części rozdziału omówiono funkcjonalność wybranych przykładów tzw. wolnego oprogramowania (ang. *open software*), tj. SNAP, QGIS, SAGA GIS, ImageJ, MultiSpec, ORFEO, a także języków programowania: R, Python czy aplikacji Google Earth Engine (GEE). W drugiej części rozdziału opisano przykłady komercyjnego oprogramowania, w tym: ArcGIS ArcMap, GeoMedia, ENVI, ERDAS IMAGINE, PCI Geomatica oraz eCognition.

Cechą wspólną opisywanego oprogramowania jest jego funkcjonalność w zakresie przetwarzania danych przestrzennych, w tym integracji danych rastrowych (przykładowo obrazów satelitarnych w formacie GeoTIFF, modeli wysokościowych z misji SRTM w formacie HGT, czy innych plików rastrowych zapisanych np. w formacie ASCII – ASCII Grided XYZ, czy ARC/Info ASCII Grid), danych wektorowych (np. Shapefile ESRI, GeoJSON, czy GML) czy specyficznych formatów danych, jak np. LiDAR (np. chmur punktów w formacie LAS ASPRS lub LAZ Rapidlasso). Jednocześnie obserwowany jest trend do rozszerzania przez twórców oprogramowania obszarów jego implementacji do fotogrametrii cyfrowej, teledetekcji oraz Systemów Informacji Geograficznej (ang. *Geographic Information Systems*, GIS). Jeśli chodzi o fotogrametrię dotyczy to głównie generowania ortofotomap 2D, tworzenia modeli wysokościowych NMT i NMPT czy obiektów 3D na podstawie dopasowania zdjęć (ang. *matching*). W przypadku teledetekcji wymienić można algorytmy do przeprowadzenia korekcji radiometrycznych czy zwiększania funkcjonalności, tj. automatycznej detekcji obiektów (np. segmentacji) na drodze analizy obrazu (np. GEOBIA) lub wykorzystania sieci neuronowych oraz uczenia maszynowego w procesie klasyfikacji treści obrazu. Systemy Informacji Geograficznej pozwalają natomiast na integrację danych przestrzennych: wektorowych, rastrowych, chmur punktów LiDAR, opisowych oraz pozwalają na przetwarzanie danych przestrzennych w celu wspomagania procesu podejmowania decyzji.

Należy zwrócić uwagę, że każdy z wymienionych programów został opracowany dla realizowania konkretnych celów, jak np. teledetekcji satelitarnej, czego przykładem mogą być: SNAP, ENVI, Erdas Imagine czy PCI Geomatica. Ich pewnego rodzaju niedoskonałością jest ograniczona funkcjonalność w zakresie GIS. Z kolei typowe oprogramowanie z tego właśnie zakresu (np. ArcGIS, QGIS czy SAGA GIS) nie posiada zwykle pełnej funkcjonalności w zakresie przetwarzania danych satelitarnych, choć niektóre z nich oferują pewne rozszerzenia w tym kierunku (np. *Semi-Automatic Classification Plugin* – wtyczka (ang. *plug-in*) do QGIS). Należy wyróżnić także wysoko wyspecjalizowane oprogramowanie przeznaczone do analizy obiektowej (GEOBIA), przykładem którego jest eCognition (Trimble Geospatial). Ostatnią grupę z omawianych rozwiązań informatycznych tworzą narzędzia programistyczne działające jako wersja desktop (na komputerze PC: R czy Python), bądź w chmurze obliczeniowej (GEE) o szerokich możliwościach implementacji w procesach przetwarzania danych przestrzennych, w tym satelitarnych.

W tabeli 5.1 zestawiono cechy omawianego oprogramowania pod kątem rodzaju zaimplementowanych modułów:

- fotogrametrycznych (kolumna FOTO): korekcja geometryczna (proste wpasowanie obrazu na układ współrzędnych, tworzenie ortofotomap), pomiar na modelu stereoskopowym, automatyczne tworzenie, edycja i korekcja modeli NMPT/NMT, generowanie chmury punktów (ang. *Image Point Cloud*, IPC), generowanie modeli wysokościowych z chmur punktów LiDAR, tworzenie modeli 3D, zaawansowane wizualizacje 3D itp.;
- teledetekcyjnych (kolumna TELED): korekcja radiometryczna, atmosferyczna, transformacje obrazu (np. PCA), filtracje, klasyfikacja pikselowa i obiektowa, analiza dokładności klasyfikacji, analizy zmian itp.;
- analiz rastrowych (kolumna RASTER): tworzenie, edycja, reklasyfikacja, algebra map, operacje algebraiczne, logiczne itp., interpolacja, analizy NMT (mapy spadków, ekspozycji, nasłonecznienia, cieniowany relief terenu), analizy hydrologiczne, analizy wielokryterialne, analizy: sąsiedztwa, odległości, strefowe, geostatystyczne itp.;
- analiz wektorowych (kolumna WEKTOR) – tworzenie, edycja, analizy poprawności geometrycznej i topologicznej, zapytania SQL, agregacje, buforowanie, przecinanie, analizy statystyczne, klasyfikacje, analizy sieciowe;
- wymiany danych – funkcjonalność modułów importu i eksportu, przetwarzanie w chmurze, dostępność serwisów (np. WMS, WFS).

Oprócz tego, subiektywnej analizie poddano interfejs użytkownika i wybrane moduły interesujące z punktu teledetekcji satelitarnej. Moduły oceniano w skali: „-”, „+”, „++” oraz „+++”. Ocena „-” oznacza brak danego modułu lub dostępność podstawowych funkcji, zwykle rzadko używanych ze względu na to, że główne przeznaczenie danego oprogramowania jest inne (np. ENVI – analizy teledetekcyjne) i dostępne są lepsze narzędzia do tego celu (np. ArcGIS Esri, QGIS – analizy wektorowe i rastrowe). Ocena „+” oznacza podstawową wersję modułu (np. w module fotogrametrycznym pozwalającą na wpasowanie rastra w układ współrzędnych metodą płaskiej transformacji). Ocena „++” oznacza wersję rozszerzoną (np. pozwalającą na wygenerowanie ortofotomapy, czyli np. korekcję z wykorzystaniem NMT, ale bez możliwości pomiaru punktów kontrolnych), „+++” oznacza w pełni rozbudowany moduł.

Należy zwrócić uwagę na ciągły, intensywny rozwój, szczególnie wolnego oprogramowania, i wciąż pojawiające się nowe rozszerzenia programów (np. wtyczki QGIS) zwiększające jego funkcjonalność. Obecnie wszystkie programy, również komercyjne, posiadają możliwość programowania np. w Pythonie, co oznacza, że użytkownik może lepiej dopasować oprogramowanie do własnych potrzeb. Niestety, nie jest to bardzo łatwe zadanie, dlatego w niektórych przypadkach pozostaje korzystanie z komercyjnego oprogramowania, w którym zaimplementowane są specjalistyczne, często opatentowane rozwiązania.

Tabela 5.1. Funkcjonalność specjalistycznego oprogramowania w zakresie różnych modułów

Oprogramowanie	FOTO	TELED	RASTER	WEKTOR	Wymiana danych	Wybrane moduły/uwagi
SNAP	+	+++	+	-	++	Przeznaczony do przetwarzania obrazów ESA
QGIS	-	+	+	++	+++	GIS (model wektorowy), moduł teledetekcyjny SCP
SAGA GIS	-	+	++	+	+	GIS (model rastrowy), moduł do przetwarzania chmur punktów LiDAR
ImageJ	-	++	-	-	+	Przetwarzanie obrazów (medycyna, astronomia)
Multispec	-	++	-	-	+	Przetwarzane obrazów wielo- i hiperspektralnych
ORFEO	+	+++	-	-	+	Przetwarzanie obrazów optycznych (w tym hiperspektralnych) i radarowych
R, Python, GEE	++	+++	++	++	+++	Konieczność programowania
ArcGIS Esri	++	+	+++	+++	+++	Przeznaczony do analiz przestrzennych (wektorowych i rastrowych)
GeoMedia	+	-	-	+++	+++	GIS (model wektorowy) jako rozszerzenie ERDAS IMAGINE
ENVI	+++	+++	+	+	+++	Przetwarzanie obrazów (moduły teledetekcyjne i fotogrametryczne)
ERDAS IMAGINE	+++	+++	+	+	+++	Przetwarzanie obrazów (moduły fotogrametryczne i teledetekcyjne)
PCI Geomatica	+++	++	+	+	+++	Ortorektyfikacja obrazów satelitarnych oraz moduły do zdjęć lotniczych i BSP
eCognition	-	+++	+	-	++	Analiza obiektowa obrazu, segmentacja, klasyfikacja, import warstw GIS, chmur punktów LiDAR

5.1. Wolne oprogramowanie

Beata Hejmanowska

W podrozdziale omówiono wybrane wolne oprogramowanie, które wg Fundacji Wolnego Oprogramowania (ang. *Free Software Foundation*, FSF), musi zapewniać swobodę w zakresie uruchamiania, analizowania, rozpowszechniania i udoskonalania przy zapewnionym dostępie do pełnego kodu źródłowego. Na rynku geoinformatycznym istnieje dziś wiele przykładów wolnego oprogramowania rozwijanego przez społeczność programistów i specjalistów z zakresu analiz przestrzennych. Jeśli chodzi o pracę z wieloma formatami danych, funkcjonalność oraz tempo przetwarzania geodanych, wolne oprogramowanie często dorównuje programom komercyjnym.

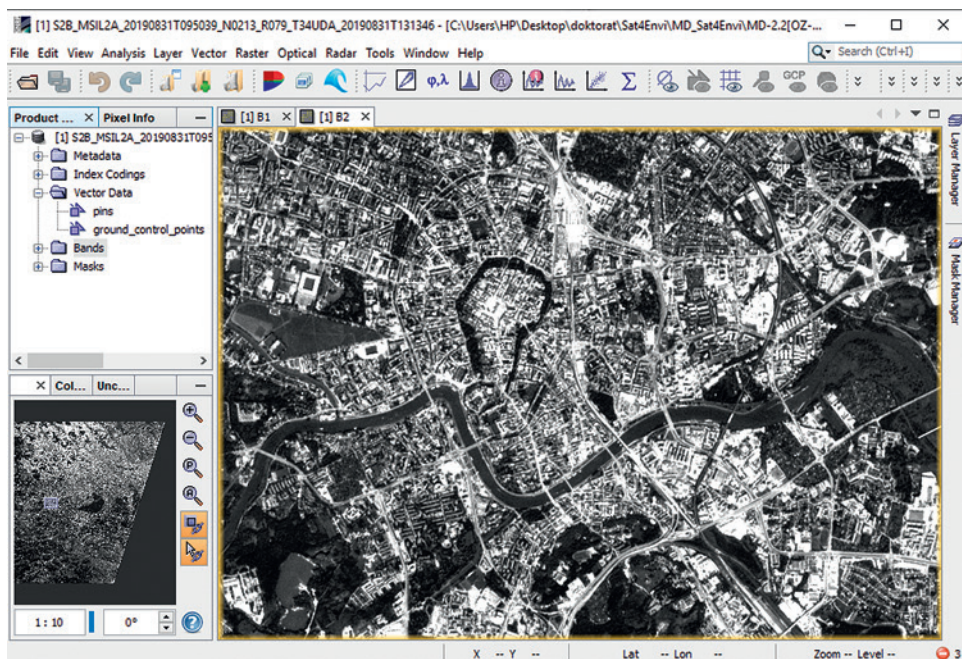
5.1.1. SNAP

Anna Żądło

SNAP (Sentinel Application Platform) jest oprogramowaniem stworzonym przez firmy: Brockmann Consult, SkyWatch oraz C-S na zlecenie Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), przeznaczonym do przetwarzania danych pochodzących z misji Sentinel-1, -2 oraz -3. Program SNAP zawiera zestaw narzędzi oraz interfejs programowania aplikacji (ang. *Application Programming Interface*, API) opracowany w celu ułatwienia przeglądania oraz przetwarzania danych teledetekcyjnych. Oprogramowanie jest całkowicie nieodpłatne, a udostępniane w nim narzędzia nie mają na celu powielania istniejących już innych rozwiązań komercyjnych, ale ich uzupełnienie o dodatkowe opcje pozwala na obsługę obrazów satelitarnych. Program SNAP charakteryzuje się szybkim przetwarzaniem i wyświetlaniem analizowanych obrazów, często o wielkościach plików przekraczających nawet kilka GB. Zaimplementowany zestaw narzędzi Graph Processing Framework (GPF) daje możliwość tworzenia łańcuchów procesów przetwarzania danych zdefiniowanych przez użytkownika. Oprogramowanie umożliwia zarówno pracę z obrazami zapisanymi w lokalnych zasobach dyskowych, jak i wyświetlanie obrazów dzięki usłudze WMS (Web Mapping Service) serwowanej np. przez platformy DIAS.

Interfejs użytkownika

Wszystkie niezbędne do pracy okna: nawigacji, zarządzania warstwami, widoków kanałów oraz obrazów wynikowych, a także paski narzędzi, mogą być dostosowywane do indywidualnych potrzeb użytkownika (ryc. 5.1). Wybór widoku poszczególnych zestawów narzędzi znajduje się w menu *View*.



Ryc. 5.1. Przykładowy interfejs użytkownika oprogramowania SNAP

Moduły fotogrametryczne

SNAP nie ma wydzielonego modułu fotogrametrycznego na potrzeby tworzenia ortofotomapy, ponieważ nie jest on niezbędny w korekcji geometrycznej obrazów satelitarnych o średniej rozdzielczości. Korekcja geometryczna, w tym ujednoczenie rozdzielczości przestrzennej, jest dostępna w modułach teledetekcyjnych.

Moduły teledetekcyjne

Przeznaczone do obsługi danych optycznych i radarowych narzędzia oferowane przez oprogramowanie SNAP znajdują się w zakładkach: *Optical* oraz *Radar*.

Zakładka *Optical* zawiera narzędzia do przetwarzania danych optycznych:

- *Spectrum View* – możliwość wizualizacji krzywej spektralnej wskazanego piksela obrazu na podstawie wartości poszczególnych kanałów.
- *Spectral Unmixing Tool* – narzędzie, dzięki któremu możliwe jest rozłożenie sygnatury spektralnej piksela, którego rozmiar powoduje, że zarejestrowana radiancja pochodzi od różnych typów pokrycia terenu (tzw. „zmieszane” piksele; ang. *mixel*), na elementy składowe.
- *Geometric* – pakiet narzędzi, dzięki któremu można przeprowadzić proces ortorektyfikacji, przepróbkowania, odtworzenie produktów Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR, Sentinel-3) rejestrowanych z orbity oraz rekonstrukcję współrzędnych *nadir* i *forward*, a także czasu rejestracji piksela (AATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer – poprzednik SLSTR).
- *Preprocessing* – tworzenie maski chmur, przeliczenie wartości radiancji na współczynnik odbicia i odwrotnie, korekcja radiometryczna, filtracja PPE (usuwanie pasków).

- *Land/Water Processing* – obliczanie wskaźników teledetekcyjnych (np. NDVI, NDWI).

Zakładka Radar zawiera narzędzia do przetwarzania danych mikrofalowych:

- *Radiometric* – usuwanie zmienności radiometrycznej związanej z topografią terenu, kalibracja, uwzględnienie poprawek ze względu na rozproszenie zasięgu dla produktów ASAR i ERS, korekcja termiczna.
- *Speckle Filter* – filtr usuwający efekt fluktuacji sygnału w postaci plamkowania (tzw. efekt soli i pieprzu).
- *Coregistration* – łączenie kilku pasów produktów radarowych w stosunku do obrazu wzorcowego oraz przygotowanie danych do interferometrycznego przetwarzania krzyżowego.
- *Interferometric* – zestaw narzędzi potrzebnych do opracowania interferometrii radarowej, opis i przygotowanie danych, filtracja, szacowanie spójności kilku obrazów.
- *Geometric* – korekcje topograficzne, nadanie georeferencji, mozaikowanie, projekcja rzutu ukośnego na ortogonalny, ortorektyfikacja scen satelitarnych.

Analizę i wizualizację wyników przetworzeń obrazów teledetekcyjnych oraz ich statystyk umożliwiają narzędzia udostępnione w menu *Analysis*:

- Wykres korelacji (*Correlative Plot*) – pozwala zbadać korelację między zmienną wektorową a rastrową. Dane rastrowe powinny posiadać zdefiniowane obszary, dla których korelacja ma być wyznaczona.
- Wykres rozproszenia (*Scatter Plot*) – pozwala na określenie zależności pomiędzy dwoma plikami rastrowymi lub dwoma kanałami analizowanego obrazu. Dane jednej zmiennej (kanału) przyjmują wartości (DN) na osi X, a drugiej zmiennej na osi Y.
- Wykres profili (*Profile Plot*) – narzędzie to działa tylko wtedy, jeśli dostępne są dane wektorowe. Działa on w dwóch wariantach: *classic mode* – wykres geometrii przedstawia zależność między wartościami pliku wektorowego w pikselach (oś X), a wybranego kanału (oś Y). Wykres przedstawia także odchylenie standardowe dla wartości wybranych pikseli na obszarze regularnego wieloboku, którego rozmiary mogą być określone przez użytkownika. Drugi wariant *correlative mode* – służy porównaniu danych satelitarnych (obrazu rastrowego) z plikiem danych wektorowych.
- Histogram – wyświetla liczbę pikseli w poszczególnych wartościach (DN) analizowanego kanału obrazu.
- Statystyki – oblicza statystykę dla wybranego kanału: liczbę pikseli, wartości minimalne i maksymalne, średnią arytmetyczną, medianę, odchylenie standardowe oraz progi poszczególnych percentyli.
- Geokodowanie (*Geo-coding*) – zapewnia transformację współrzędnych pikselowych do współrzędnych geograficznych, bazując na odwzorowaniu, punktach dostosowania (GCP) lub siatce równoleżników i południków.

Analizy rastrowe

Oprogramowanie posiada szereg narzędzi do wykonywania działań na warstwach rastrowych oraz w efekcie do generowania nowych pochodnych warstw, np. przy pomocy operatorów matematycznych (algebra map) czy na drodze filtracji obrazu predefiniowanymi oraz tworzonymi przez użytkownika algorytmami. Oprogramowanie SNAP umożliwia wykorzystanie numerycznych modeli wysokościowych (np. SRTM), operacje geometryczne takie jak: ortorektyfikacja z wykorzystaniem punktów dosto-

sowania (ang. *ground control point*, GCP), mozaikowanie, ponowne przepróbkowanie (ang. *resampling*) czy transformacje pomiędzy układami współrzędnych płaskich. Oprogramowanie zapewnia również narzędzia do tworzenia i analiz masek, konwersji, segmentacji i klasyfikacji obrazu.

Analizy wektorowe

SNAP przeznaczony jest w szczególności do wykonywania analizy danych teledetekcyjnych, ale dodatkowo zawiera kilka funkcjonalności do obsługi danych wektorowych. Możliwe jest m.in. stworzenie pliku wektorowego oraz import danych w formacie Shapefile ESRI, CSV czy formatu tekstowego WKT (Well-Known Text) – czyli języka znaczników.

Wymiana danych

Import danych możliwy jest przez wybór konkretnego typu sensora (optyczny, radarowy), wybór formatów NMT czy zobrazowań w postaci rastrowej bądź danych wektorowych. Można również importować bezpośrednio foldery skompresowanych danych np. z platformy Copernicus SciHub. SNAP umożliwia zapis oraz eksport projektu, jak i poszczególnych produktów, do wybranych przez użytkownika formatów.

Wybrane moduły

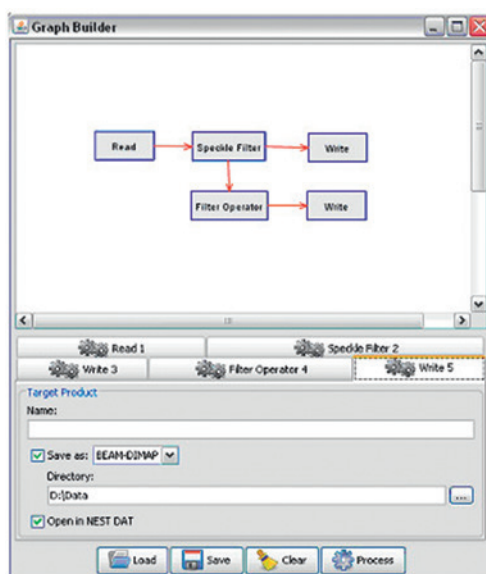
Poza tym, w SNAP zaimplementowano moduły zawierające narzędzia do detekcji obiektów na powierzchni oceanów, obszarów zabudowanych, tworzenia serii analiz czasowych oraz analizy danych ASAR (Envisat) i Sentinel-1 (ESA).

Uruchamianie i kontrola procesów przetwarzania obrazów możliwa jest także dzięki narzędziu *Graph Builder* (ryc. 5.2). Stosuje się je w przypadku, gdy użytkownik wykonuje serię analiz dla jednego lub kilku produktów. Powiązane ze sobą moduły są kolejno uruchamiane, a pliki wynikowe zapisywane i wykorzystane jako dane wejściowe w kolejnych operacjach. Dla każdej z dodanych funkcji tworzone są zakładki, w których dostępne są opcje zmiany parametrów. Dzięki temu możliwe jest stworzenie grafu uruchamiającego wykonanie przygotowanej sekwencji modułów w wybranej przez użytkownika kolejności. Sprawdzenie poprawności utworzonego zestawu funkcji odbywa się na poziomie działania poszczególnych narzędzi (przez wprowadzenie parametrów) oraz na poziomie całego grafu, w którym sprawdzane są połączenia (czy każda zmienna ma dane wejściowe i wyjściowe) oraz czy nie powstały zapętlenia procesów.

Aby wykonać jeden proces dla dużej liczby danych, wykorzystuje się narzędzie do przetwarzania wsadowego (ang. *batch processing*).

Okno *SNAP Tools – AOI Monitoring* pozwala na wyznaczenie i zapisanie obszaru zainteresowania (ang. *Area of Interest*, AOI), a następnie automatyczne uruchamianie procesów zapisanych wsadowo (*Batch Processing*) lub w *Graph Builder*. Użytkownik musi zdefiniować folder z danymi wejściowymi, wyjściowymi, wybrać graf z zapisanymi procesami oraz wskazać obszar do analiz.

Podsumowując, oprogramowanie SNAP umożliwia przetwarzanie satelitarnych danych teledetekcyjnych w sensie geometrycznym i radiometrycznym (bez pełnego modułu fotogrametrycznego, który nie jest niezbędny dla obrazów dostarczanych przez ESA). Program nie oferuje użytkownikowi analiz wektorowych GIS czy nawet przeprowadzenia kontroli jakości (ang. *Quality Assessment*, QA) na polach testowych, co jest rutynowym procesem w komercyjnych oprogramowaniach: ENVI czy PCI Geomatica. Do tego celu ESA rekomenduje np. oprogramowanie QGIS z wtyczką (rozszerzenie funkcjo-



Ryc. 5.2. Przykładowe okno *Graph Builder* (SNAP)

nalności) Semi-Automatic Classification.

Więcej informacji technicznych o oprogramowaniu SNAP, a także podręczniki użytkownika znajdują się na platformie Scientific Toolbox Exploitation Platform (Snap, 2020).

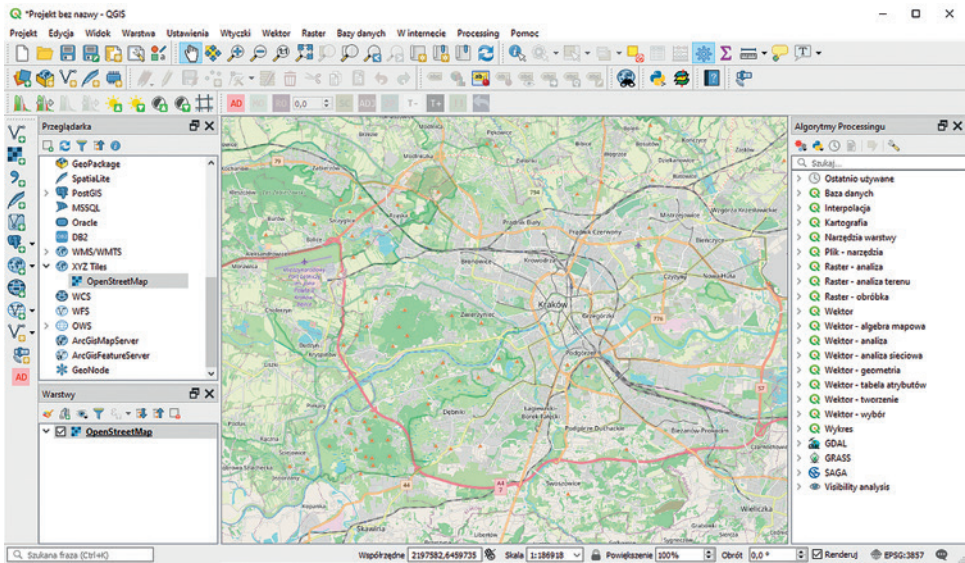
5.1.2. QGIS

QGIS to wieloplatformowe, wolne i otwarte oprogramowanie przeznaczone do przetwarzania danych przestrzennych, licencjonowane na warunkach GNU (General Public License). Oprogramowanie QGIS (do roku 2013 znane jako Quantum GIS) jest oficjalnym projektem organizacji Open Geospatial Foundation (OSGeo). Program działa na systemach operacyjnych Linux, Unix, Mac OSX, Windows oraz Android. Jest nieustannie rozwijany przez rzeszę specjalistów wolontariuszy, a najnowsza wersja oprogramowania – 3.14 nosi nazwę *Pi* (wrzesień 2020). Podstawowym modelem danych w QGIS jest model wektorowy.

QGIS i SAGA (omówiona poniżej) są aplikacjami rozwijanymi dzięki fundacji Open Source Geospatial (OSGeo), a OSGeo4W jest dystrybucją desktopowych aplikacji (QGIS, GRASS GIS), geoprzestrzennych bibliotek (PROJ, GDAL/OGR, GEOS, SpatiaLite, SAGA GIS), języków skryptowych (Python) i wielu innych pakietów geoprzestrzennych.

Interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika QGIS (ryc. 5.3) jest intuicyjny, a jego podstawowe funkcje są dostępne z górnego rozwijanego menu. Dodatkowe algorytmy uruchamiane są z menu: *Processing*. Rozszerzenia programu można instalować z menu: *Wtyczki*.



Ryc. 5.3. Przykładowy interfejs użytkownika oprogramowania QGIS

Moduły fotogrametryczne

Program QGIS nie ma modułu fotogrametrycznego, pozwala jedynie na proste wpasowanie warstw rastrowych i wektorowych w układ współrzędnych.

Moduły teledetekcyjne

Program QGIS nie ma również modułu teledetekcyjnego (istnieją różne rozszerzenia omówione poniżej).

Analizy rastrowe

Narzędzia do analiz i operacji na rastrech oferowane przez oprogramowanie QGIS zgromadzone zostały w panelu menu w zakładce *Raster* (więcej analiz dostępne jest w menu: *Processing – Panel algorytmów*). Za ich pomocą można wykonać m.in. analizę nachylenia, spadku czy ekspozycji. Z kolei podstawowe operacje na danych rastrowych, przydatne np. przy obliczaniu wskaźników roślinności, można wykonywać za pomocą funkcji znanych jako algebra map (*Kalkulator rastra*). Możliwe są także takie analizy jak: konwersja danych rastrowych na format wektorowy, ograniczenie zasięgu warstwy rastrowej do wskazanego zakresu przestrzennego (np. zasięgu warstwy geometrycznej, czy podanych współrzędnych X,Y min. i maks.), zamiana odwzorowania (transformacje pomiędzy układami współrzędnych).

Analizy wektorowe

Podstawowe operacje i analizy wektorowe dostępne w programie QGIS zostały umieszczone w panelu menu w zakładce *Wektor* (więcej analiz dostępnych jest z menu: *Processing – Panel algorytmów*). Narzędzia do analiz dla danych wektorowych znajdują się w zakładkach menu *Wektor*:

- *Narzędzia geoprocessingu* – np. ekwidystanta (ang. *bufor*), różnica, suma, agregacja,
- *Narzędzia geometrii* – np. konwersja poligonów na linie, ekstrakcja wierzchołków,
- *Narzędzia analizy* – np. przecięcia linii, analiza najbliższego sąsiada.

Wymiana danych

Oprogramowanie QGIS pozwala na pracę zarówno z rastrowymi, jak i wektorowymi danymi przestrzennymi. Do obsługiowanych formatów rastrowych zaliczyć można m.in. GeoTIFF, IMG ERDAS, ASCII GRID ArcInfo, JPEG czy PNG. Akceptowane formaty wektorowe to m.in. Shapefile ESRI, MapInfo, SDTS czy GML. Zaletą oprogramowania jest możliwość pracy na danych przestrzennych zapisanych w różnych układach współrzędnych. Dzięki tzw. przetwarzaniu w locie (ang. *project on the fly*) wyświetlane są one w układzie odniesienia specyficznym dla danego projektu (np. PL-1992; EPSG: 2180).

Wybrane moduły

Oprogramowanie QGIS oferuje możliwość tworzenia lub używania bardzo wielu zewnętrznych programów, tzw. wtyczek (ang. *plug-in*) rozszerzających znacznie możliwości jego zastosowania. Najbardziej popularna nakładka przeznaczona do wykonywania zaawansowanych funkcji na rastrowych i wektorach to panel *Algorytmy Przetwarzania*. Umożliwia ona między innymi analizę danych i wyników, przetwarzanie rastrowych oraz przeprowadzenie szerszych analiz wektorowych. Na liście dostępnych wtyczek znaleźć można narzędzia do zarządzania danymi, rozbudowanej wizualizacji danych oraz wyników pracy, przetwarzania obrazów, wykonania dodatkowych zadań, takich jak np. nadawanie georeferencji, klasyfikacja obrazów satelitarnych czy analizy widoczności. Przykładowo wtyczka *DB Manager* pozwala na zarządzanie bazami danych, a *LAStools* na pracę z chmurami punktów LiDAR. Wspomniana już powyżej wtyczka *Semi-Automatic Classification* umożliwia pobieranie obrazów teledetekcyjnych: Sentinel-2, Sentinel-3, Landsat 8, ASTER oraz MODIS (Terra/Aqua), wstępne ich przetwarzanie, klasyfikację, post-processing (np. filtracje wyniku klasyfikacji) czy analizę jej dokładności (ang. *Quality Assesment*, QA). Z punktu widzenia przetwarzania obrazów teledetekcyjnych interesująca jest również wtyczka *Classification tool* umożliwiająca klasyfikację obrazów metodami uczenia maszynowego (ang. *machine learning*, ML), takimi jak: Gaussian Mixture Model, Random Forest oraz SVM (Support Vector Machine). Lista dostępnych wtyczek znajduje się na stronie repozytorium wtyczek QGIS (QGIS plugins 2020). Tworzenie własnych wtyczek jest możliwe w języku Python. Oprogramowanie QGIS pełni też rolę graficznego interfejsu użytkownika dla oprogramowania GRASS, co pozwala na skorzystanie z pełnej funkcjonalności. Program QGIS umożliwia także integrację z innymi projektami realizowanymi przez OSGeo, tj. oprogramowaniem bazodanowym PostGIS czy bibliotekami GDAL (Geospatial Data Abstraction Library).

Należy podkreślić, że powszechnie stosowane w administracji oprogramowanie QGIS swoje podstawowe zastosowanie znajduje najczęściej w analizach danych wektorowych, a także częściowo warstw rastrowych. Analizy przestrzenne GIS oferowane dzięki licznym wtyczkom nie są dużo uboższe niż dostępne w komercyjnych produktach np. ArcGIS Esri. Niewątpliwie przetwarzanie danych teledetekcyjnych jest bardziej ograniczone niż np. w wolnym oprogramowaniu SNAP czy komercyjnym produkcie ENVI, ale dzięki wtyczkom w pewnym zakresie jednak możliwe.

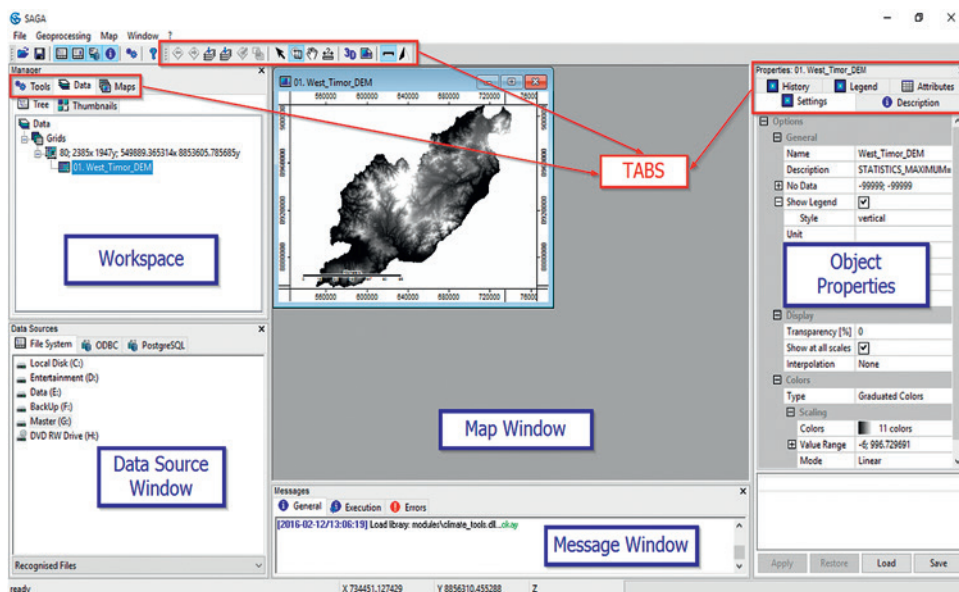
Więcej informacji o oprogramowaniu QGIS znajduje się na stronie oprogramowania QGIS: <https://qgis.org/pl/site> (QGIS, 2020).

5.1.3. SAGA GIS

Oprogramowanie SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) jest wolnym i otwartym oprogramowaniem licencjonowanym na warunkach General Public License (GNU), służącym systemom informacji przestrzennej. Początkowo (od 2001) program SAGA GIS rozwijany był przez zespół pracowników Zakładu Geografii Fizycznej Uniwersytetu w Getyndze (Niemcy), a potem zespół przeniósł się na Uniwersytet w Hamburgu (2007). Obecnie oprogramowanie jest rozbudowywane przez międzynarodową społeczność specjalistów i programistów. SAGA GIS na systemach operacyjnych Windows, Linux i FreeBSD może być używany jako rozszerzenie funkcjonalności oprogramowania QGIS w zakresie analiz rastrowych (podstawowym modelem danych SAGA jest model rastrowy).

Interfejs użytkownika

Program SAGA nie jest dostępny w polskiej wersji językowej, a jego interfejs (ryc. 5.4.) nie jest, niestety, już tak intuicyjny jak w przypadku oprogramowania QGIS.

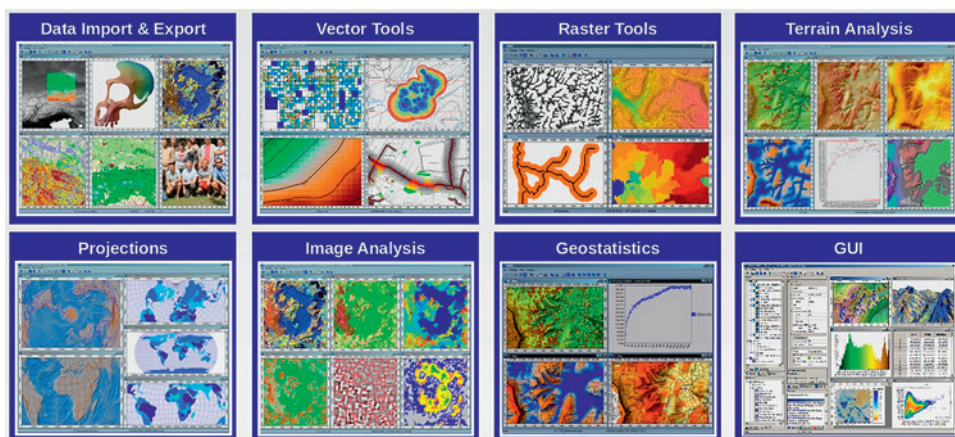


Ryc. 5.4. Przykładowy interfejs użytkownika oprogramowania SAGA
(źródło: SAGA Tutorial, 2017)

Struktura oprogramowania SAGA GIS składa się z niezależnych modułów, takich jak import/eksport danych, narzędzia do danych wektorowych (*Vector Tools*), rastrowych (*Raster Tools*), analiz w wykorzystaniem danych wysokościowych (*Terrain Analysis*), danych obrazowych (*Image Analysis*) i innych (ryc. 5.5).

Moduły fotogrametryczne

SAGA, podobnie jak oprogramowanie QGIS, pozwala na proste wpasowanie geodanych w układ współrzędnych. Istnieją dodatkowe moduły (*LIS – Laserdata Information System*, *Laserdata*) oparte na silniku SAGA do obsługi chmur punktów LiDAR.



Ryc. 5.5. Podstawowe moduły oprogramowania SAGA GIS (źródło: SAGA GIS, 2020)

Moduły teledetekcyjne

Oprogramowanie SAGA GIS zawiera szereg narzędzi do przetwarzania obrazów, tj. specjalistyczne algorytmy filtracji oraz różnych metod klasyfikacji oraz segmentacji. Wykorzystanie SAGA GIS do teledetekcji jest możliwe dzięki wizualizacji poszczególnych kanałów spektralnych zobrazowań (np. Landsat 8 czy Sentinel-2), a nawet tworzeniu kompozycji serii wieloczasowych. W przypadku klasyfikacji obrazu dostępne są algorytmy nienadzorowanej (ang. *unsupervised*) oraz nadzorowanej (ang. *supervised*) klasyfikacji. Do tych ostatnich należy zaliczyć takie algorytmy jak równoległościannów (ang. *Parallelepiped*), najmniejszej odległości (ang. *Minimum Distance*, MD), Mahalona-bisa (ang. *Mahalanobis Distance*, MH), największego prawdopodobieństwa (ang. *Maximum Likelihood*, ML), czy bazujące na wykorzystaniu kąta spektralnego (ang. *Spectral Angle Mapping*, SAM).

SAGA GIS oferuje również narzędzia z zakresu SAGA analizy obiektowej, czyli GEOBIA, umożliwiające wykonanie segmentacji obrazów satelitarnych, a następnie ich klasyfikację na podstawie wartości DN poszczególnych obiektów (segmentów) i reguł klasyfikacji.

Analizy rastrowe

Analizy statystyczne w module *Spatial and Geostatistics* programu SAGA GIS obejmują statystyki strefowe i modelowanie regresyjne, które pozwalają na interpolację i ekstrapolację danych, a dzięki wykresom semiwariogramów umożliwiają obliczanie autokorelacji pomiędzy danymi. SAGA GIS zawiera także moduł przeznaczony dla numerycznych modeli wysokościowych, dzięki któremu użytkownik może wykonywać wiele analiz, np. widoczności, ekspozycji i spadków terenu, cieniowania reliefu, a także hydrologicznych oraz morfometrycznych. Dużą zaletą oprogramowania SAGA GIS jest możliwość pracy z chmurą punktów LiDAR, a także wizualizacja danych i obiektów 3D. Geodane oraz wyniki wizualizowane są w SAGA GIS przy pomocy map, widoku 3D, histogramów, diagramów, wykresów rozrzutu i tabel.

SAGA ma również zaimplementowane różne algorytmy do analiz wielokryterialnych, wspierające proces decyzyjny.

Analizy wektorowe

Podstawowym modelem danych programu SAGA jest model rastrowy, w związku z tym większość analiz bazuje na nim. Jak we wszystkich tego rodzaju programach, istnieje możliwość wczytania wektora i przetwarzania wspólnie z rastrem. SAGA jest w tym zakresie komplementarna z QGIS w ramach OSGeo4W.

Wymiana danych

Moduł *Import/Export* pozwala na wymianę formatów danych wektorowych, rastrowych, tabel atrybutowych, baz danych oraz chmur punktów. Dzięki zastosowaniu biblioteki GDAL (Geospatial Data Abstraction Library, OSG Foundation) służącej do przetwarzania danych rastrowych, SAGA GIS oferuje możliwości obsługi bardzo wielu formatów. W module *Projections* zaimplementowane zostały trzy biblioteki ze zdefiniowanymi układami współrzędnych, które umożliwiają nadawanie georeferencji (kalibracja) danym wektorowym oraz rastrowym. Wiele modułów zawiera także narzędzia do tworzenia i edytowania danych wektorowych, takie jak: rysowanie, selekcja obiektów, łączenie obiektów, tworzenie linii na podstawie danych rastrowych i inne. Warstwy rastrowe mogą być generowane na podstawie danych punktowych (interpolacje). W oprogramowaniu dostępne są także funkcjonalności przetwarzania warstw rastrowych, np. przepróbkowania (ang. *resampling*), wypełnianie luk w danych ciągłych, kalkulator rastrowy (algebra map) czy też generowanie ekwidystanty (ang. *buffer*) na podstawie rastra i inne.

Wybrane moduły

Na uwagę zasługuje funkcjonalność programu SAGA w przypadku przetwarzania chmur punktów LiDAR (przykładowo – możliwość wczytywania punktów, generowania NMT i NMPT oraz narzędzie do wizualizacji 3D).

Program SAGA GIS, podobnie jak QGIS, przeznaczony jest głównie do analiz przestrzennych GIS, z naciskiem na szerokie spektrum funkcjonalności w zakresie przetwarzania danych rastrowych. Możliwości SAGA GIS, choć przewyższają QGIS pod kątem analiz i modelowania danych rastrowych, to jednak nie posiadają pełnej funkcjonalności w zakresie specjalistycznych danych teledetekcyjnych, jakimi cechują się programy SNAP czy ENVI.

Więcej informacji na temat oprogramowania SAGA GIS znajduje się na stronie internetowej SAGA: <http://www.saga-gis.org/en/index.html> (SAGA GIS, 2020).

5.1.4. ImageJ

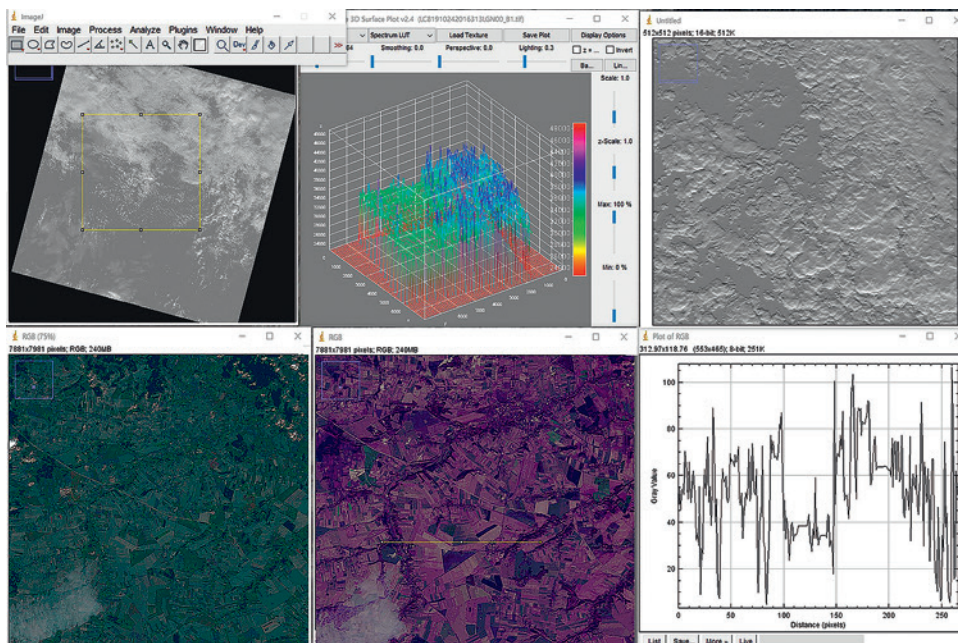
Sławomir Królewicz, Piotr Wężyk

ImageJ jest oprogramowaniem do przetwarzania obrazów cyfrowych, napisanym w języku programowania Java przez zespół badaczy z National Institutes of Health i Laboratory for Optical and Computational Instrumentation Uniwersytetu Wisconsin (USA). Program ten jest powszechnie wykorzystywany, przede wszystkim w medycynie i astronomii oraz w badaniach naukowych. Oprogramowanie ImageJ można również z powodzeniem wykorzystać do analizy obrazów lotniczych lub satelitarnych. Program ImageJ działa w środowiskach systemów operacyjnych: Windows, Mac OS, Mac OSX i Linux oraz jako aplikacja na tzw. maszynie wirtualnej Java 1.4 lub nowszej. ImageJ jest

rozwijany w wielu projektach i dostępny w wielu wersjach. Przykładem bardzo rozbudowanej wersji jest ImageJ/Fiji. Zawiera ona zdecydowanie większy pakiet zainstalowanych wtyczek niż wersja podstawowa programu

Interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika pozwala uruchomić podstawowe funkcjonalności programu oraz zainstalować wybrane wtyczki ze jego strony internetowej (jest ich ponad 500). Praca jest możliwa w trybie wielu oddzielnych okien. Przykładowy interfejs użytkownika (w wersji angielskiej) oprogramowania ImageJ przedstawiono na rycinie 5.6.



Ryc. 5.6. Przykładowy interfejs użytkownika oprogramowania ImageJ

Moduły fotogrametryczne

W podstawowej wersji programu ImageJ brak jest modułu fotogrametrycznego, możliwe są jedynie podstawowe operacje geometryczne (obrót, odbicie lustrzane). Transformacje geometryczne z wykorzystaniem zewnętrznych współrzędnych, można wykonać za pomocą wtyczki *Open Geospatial Fundamentals* (ImageJ, 2020). Dostępny jest też pakiet Fiji (ImageJ Fiji, 2020) bazujący na oprogramowaniu ImageJ, w którym dostępne są proste funkcjonalności fotogrametryczne (np. generowanie chmury punktów metodą dopasowania obrazów (ang. *matching*)) oraz wspomniana wtyczka *Open Geospatial Fundamentals*.

Moduły teledetekcyjne

Jeśli chodzi o moduły teledetekcyjne, to w oprogramowaniu ImageJ dostępne są następujące funkcjonalności:

- generowanie histogramu obrazu i obliczanie jego statystyk,
- tworzenie profili spektralnych,
- wizualizacje kompozycji barwnych obrazu,

- zmiana kontrastu, wyostanie, wygładzanie,
- wykrywanie krawędzi,
- operacje algebraiczne (algebra map),
- transformacja Fouriera,
- filtracje morfologiczne,
- wizualizacja wielowymiarowa i in.

Analizy rastrowe

W programie ImageJ nie zaimplementowano funkcjonalności przestrzennych analiz rastrowych GIS.

Analizy wektorowe

Program nie posiada funkcjonalności w zakresie analiz wektorowych, które są standardowo dostępne w oprogramowaniu typu GIS.

Wymiana danych

Oprogramowanie ImageJ pozwala na odczytywanie powszechnie używanych formatów zapisu obrazu, takich jak: TIFF, GIF, JPEG, BMP czy RAW (tzw. „surowy” format, czyli dane nieprzetworzone). Oprogramowanie umożliwia także przetwarzanie sekwencji wideo w różnych formatach zapisu.

Oprogramowanie ImageJ pozwala na wyświetlanie, edytowanie, analizę, przetwarzanie, zapis oraz wydruk obrazów 8-, 16- i 32-bitowych (o wartościach całkowitych i zmiennoprzecinkowych). Jest programem wielowątkowym, czyli umożliwia jednoczesne wykonywanie wielu operacji (przetwarzanie jednego obrazu nie blokuje dostępu do menu oprogramowania, np. w celu analizowania kolejnych obrazów).

Wybrane moduły

Podstawowy zestaw funkcji programu ImageJ może być rozszerzony o funkcje dostępne w postaci tzw. wtyczek (ImageJ Plugins, 2020) (dostępnych jest ponad 500 tzw. *plug-in*), np. wspomniana wcześniej wtyczka *Open Geospatial Fundamentals* posiada opcję wzmacniania treści obrazu kanałem o wyższej rozdzielczości przestrzennej (ang. *pan-sharpening*) metodą IHS (Intensity-Hue-Saturation), czy wtyczki służące segmentacji obrazu np. *Mixture Modeling Thresholding*, *MultiThresholder* (wtyczka udostępnia 15 różnych metod segmentacji obrazu, m.in. ISODATA, MaxEntropy, Otsu), *SIOX* (Simple Interactive Object Extraction), *RATS* (Robust Automatic Threshold Selection).

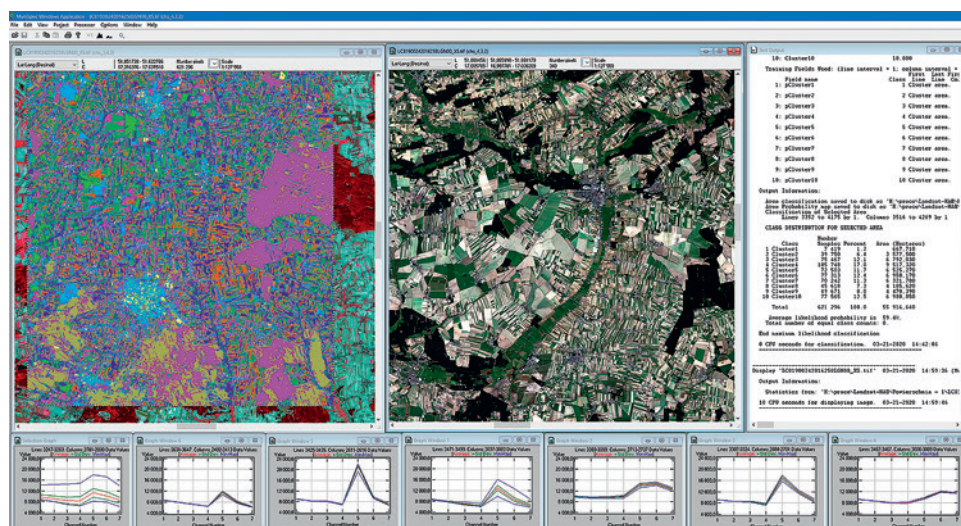
Witryna internetowa oprogramowania ImageJ, poza ostatnimi wersjami programu do pobrania, oferuje dostęp do wtyczek, forum użytkowników i materiałów szkoleniowych (ImageJ Użytkownik, 2020).

5.1.5. MultiSpec

Oprogramowanie MultiSpec zostało opracowane przez naukowców z uniwersytetu Purdue w Zachodnim Lafayette (USA) z myślą o analizowaniu obrazów wielo- i hiperspektralnych. MultiSpec dostępne jest na zasadach licencji typu *open source* na systemy operacyjne Windows oraz Mac OS, ale także przez przeglądarkę internetową (MultiSpec, 2020).

Interfejs użytkownika

Przykładowy interfejs użytkownika (wersja angielska) oprogramowania Multispec zaprezentowano na rycinie 5.7.



Ryc. 5.7. Przykładowy interfejs użytkownika oprogramowania MultiSpec

Moduły fotogrametryczne

Oprogramowanie MultiSpec jest przeznaczone do przetwarzania obrazów wielospektralnych i hiperspektralnych, ale nie umożliwia korekcji geometrycznej metodami fotogrametrycznymi. Można w nim natomiast przeprowadzić proces łączenia pojedynczych scen satelitarnych w większe mozaiki. Program Multispec umożliwia ponadto wizualizację obrazów wielospektralnych w różnych odwzorowaniach kartograficznych.

Moduły teledetekcyjne

Moduły teledetekcyjne dostępne w MultiSpec oferują następujące funkcjonalności:

- tworzenie kompozycji barwnej, z możliwością poprawy kontrastu,
- wykonywanie obliczeń statystycznych dla obrazów,
- analizę głównych składowych (ang. *Principal Component Analysis*, PCA),
- generowanie wykresów krzywych spektralnych,
- klasyfikację obrazów wielo- i hiperspektralnych z użyciem algorytmów: maksymalnego prawdopodobieństwa, minimalnej odległości, Fisher Linear Discriminant, ECHO, Spectral Angle Mapper czy Matched Filter.

Klasyfikację obrazu można prowadzić metodą nadzorowaną (ang. *supervised*) na podstawie utworzonych obszarów treningowych (ang. *training sites*) lub metodą nie nadzorowaną (ang. *unsupervised*). Klasyfikację można prowadzić na całym zasięgu obrazu lub na wyznaczonym przez operatora fragmencie. Program posiada narzędzia do szczegółowej analizy wyników klasyfikacji, które można zapisać do różnych formatów rastrowych.

Analizy rastrowe

W oprogramowaniu MultiSpec nie zostały zaimplementowane moduły analiz rastrowych takie jak w przypadku typowych programów GIS.

Analizy wektorowe

W oprogramowaniu MultiSpec nie zaimplementowano modułów do analiz warstw wektorowych, w rozumieniu edycji danych wektorowych oraz analiz przestrzennych GIS.

Wymiana danych

Program odczytuje obrazy rastrowe w kilkunastu formatach, m.in. GeoTIFF, BIL, ECW, HDF5, PIX, JP2000, a dane wektorowe, m.in. w formacie Shapefile ESRI.

Wybrane moduły

Na uwagę zasługują algorytmy do przetwarzania i klasyfikowania obrazów hiperspektralnych.

Dokumentacja oprogramowania MultiSpec, podręcznik użytkownika oraz przykładowe zbiory danych do ćwiczeń są dostępne na stronie internetowej programu MultiSpec: <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/index.html> (MultiSpec doc, 2020).

5.1.6. ORFEO

Orfeo Toolbox (OTB) jest zestawem aplikacji, tzw. bibliotek (ang. *libraries*) służących do przetwarzania obrazów teledetekcyjnych, których opracowanie zainicjowała francuska agencja kosmiczna CNES. W chwili obecnej oprogramowanie jest rozwijane przez szeroką społeczność użytkowników daleko wykraczającą poza tę agencję. Oprogramowanie jest dostępne na podstawie nieodpłatnej licencji.

Interfejs użytkownika

Wykorzystanie narzędzi zawartych w bibliotece OTB jest możliwe na kilka sposobów, dla programistów przez programowanie w językach Python, C++, czy pracę w środowisku IDL/ENVI lub MATLAB. Dla pozostałych użytkowników biblioteki dostępne są dzięki użyciu aplikacji Monteverdi, której interfejs zaprezentowano na rycinie 5.8. oraz jako wtyczki do oprogramowania QGIS rozszerzające jego możliwości w zakresie teledetekcji (zakres i sposób uruchamiania narzędzi zależny od wersji). Do pracy z OTB można wykorzystywać również linię poleceń. Biblioteki OTB dostępne są dla systemów operacyjnych Windows, Mac OSX oraz Linux.

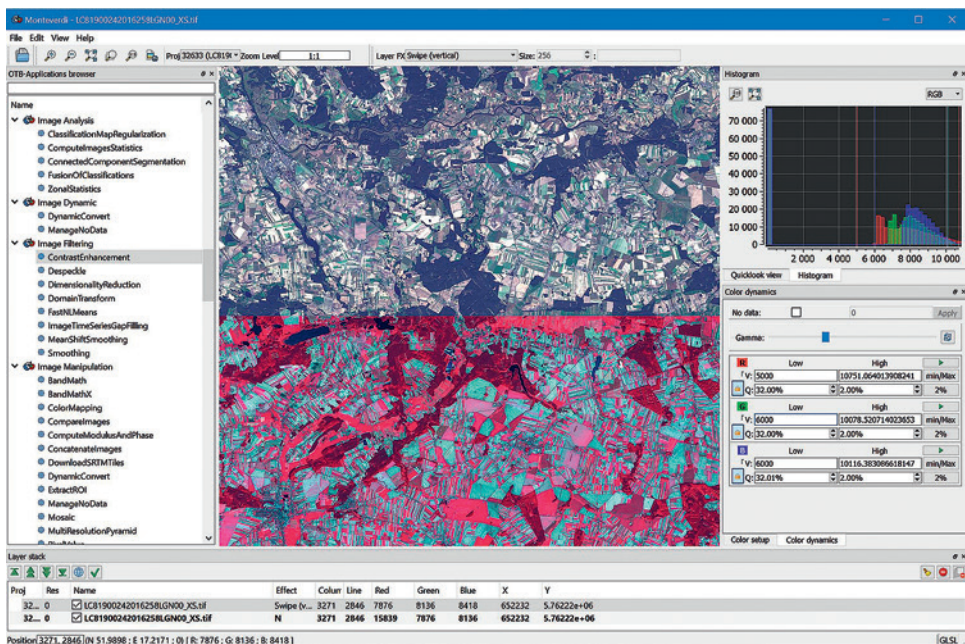
Moduły fotogrametryczne

Program posiada zestaw narzędzi z zakresu fotogrametrii do generowania chmur punktów metodą dopasowania (ang. *matching*) obrazów o pokryciu stereoskopowym, ortorektyfikacji, mozaikowania czy tworzenia tzw. *pyramid* obrazu.

Moduły teledetekcyjne

W zakresie teledetekcji w oprogramowaniu ORFEO dostępna jest funkcjonalność w zakresie:

- kalibracji, przetwarzania optycznych, w tym także hiperspektralnych,
- wzmacniania obrazu (ang. *pan-sharpening*),
- kalibrowania i przetwarzania obrazów radarowych,



Ryc. 5.8. Przykładowy interfejs użytkownika oprogramowania ORFEO

- klasyfikacji obrazów metodami: Random Forest, SOM, K-means lub VML,
- analizy serii wieloczasowych zobrażeń satelitarnych,
- segmentacji obrazu (GEOBIA),
- bogaty zestaw narzędzi do przetwarzania obrazów radarowych, porównywalny z możliwościami oprogramowania SNAP.

Analiz rastrowe

Oprogramowanie ORFEO służy głównie do teledetekcji, nie umożliwia analiz rastrowych w rozumieniu analiz GIS (biblioteki OTB zawierają podstawowe narzędzia do analiz rastrowych z zakresu algebry map, takie jak np. kalkulator rastrów).

Analiz wektorowe

W oprogramowaniu ORFEO zaimplementowane są również moduły do analiz wektorowych, a rozszerzenia funkcjonalności w tym zakresie może dostarczyć program QGIS, jeśli ORFEO jest w nim zainstalowany jako wtyczka.

Wymiana danych

Oprogramowanie OTB dostosowano do przetwarzania zobrażeń pozyskiwanych z satelitarnych sensorów optycznych, takich jak: Sentinel-2, Landsat 8, QuickBird-2, IKONOS-2, WorldView-2, FORMOSAT, SPOT-5, -6 i -7, Pleiades oraz radarowych TerraSAR-X, Sentinel-1 oraz Radarsat-2. W tym celu OTB wykorzystuje metadane dostarczane wraz z obrazami, które są niezbędne do przeprowadzania kalibrowania obrazu lub jego korekcji geometrycznej.

Wybrane moduły

Na uwagę zasługuje możliwość przetwarzania obrazów radarowych i hyperspektralnych. Pełna dokumentacja wszystkich narzędzi dostępna jest na stronie Orfeo Toolbox: <https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/index.html> (Orfeo, 2020).

5.1.7. Oprogramowanie R, Python, GEE

Współczesne trendy w informatyce przejawiają się często odchodzeniem od środowisk obliczeniowych typu desktop, szczególnie w przypadku tworzenia licznych aplikacji działających na różnych platformach obliczeniowych (np. w chmurze obliczeniowej, ang. *cloud processing*), w tym często mobilnych. Również w dziedzinie teledetekcji satelitarnej coraz częściej aplikacje bazują na języku skryptowym Python, sterują instrumentami zamontowanymi na satelitach albo pozwalają na sprawne przetwarzanie danych przez nie rejestrowanych. Dominującą cechą nowoczesnych trendów w produkcji nowych aplikacji (programów wieloplatformowych) jest stosowanie języków oprogramowania i architektury przetwarzania danych, które sprawiają, że są one bardziej czytelne, łatwe w użyciu i przede wszystkim wysoko efektywne.

5.1.7.1. Środowisko R

Jarosław Jasiewicz, Piotr Kramarczyk

Pakiet R (R, 2020) to oprogramowanie stworzone do wykonywania obliczeń statystycznych i wizualizowania ich wyników. R obejmuje język programowania i środowisko uruchomieniowe kodu programów zapisanych w plikach tekstowych, tzw. skryptach.

Program R rozpowszechniany jest jako wolne oprogramowanie na licencji GNU copyleft (GNU, 2020). Wyróżnikiem tej licencji jest to, że: „Copyleft stwierdza, że każdy, kto rozpowszechnia oprogramowanie, z poprawkami lub bez nich, musi równocześnie przekazać prawo do niego” (GNU, 2020).

Interfejs użytkownika

Pakiet R nie posiada typowego dla programów graficznych interfejsu graficznego. Do pracy przy tworzeniu skryptów można wykorzystać najprostszy edytor tekstowy. Skrypty można uruchamiać w systemowej konsoli tekstowej lub konsoli tekstowej R (*R console*). Najczęściej jednak do pracy ze skryptami wykorzystywane są zewnętrzne dla R zintegrowane środowiska programistyczne (ang. *integrated development environment*, IDE). Wykorzystywanie IDE umożliwia łatwe tworzenie i uruchamianie skryptów, oferując m. in.:

- uzupełnienie/podpowiadanie składni,
- kolorowanie składni,
- tzw. debugger kodu,
- zintegrowaną konsolę,
- zarządzanie projektami (pliki, katalogi, moduły),
- oraz wiele innych funkcji wspomagających pracę.

Poniżej zaprezentowano widok domyślnej (wbudowanej) konsoli R (ryc. 5.9) oraz popularnego IDE – Rstudio (ryc. 5.10) w oprogramowaniu R.

```
(base) ul@legion:~$ R

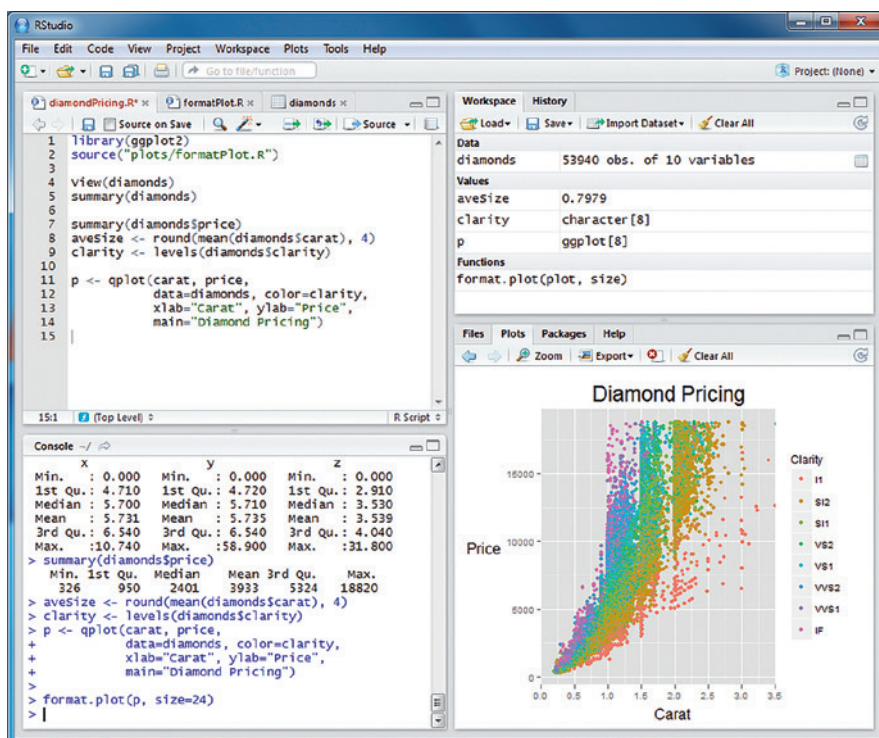
R version 3.5.2 (2018-12-20) -- "Eggshell Igloo"
Copyright (C) 2018 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-pc-linux-gnu (64-bit)

R jest oprogramowaniem darmowym i dostarczany jest BEZ JAKIEJKOLWIEK GWARANCJI.
Możesz go rozpowszechniać pod pewnymi warunkami.
Wpisz 'license()' lub 'licence()' aby uzyskać szczegóły dystrybucji.

R jest projektem kolaboracyjnym z wieloma uczestnikami.
Wpisz 'contributors()' aby uzyskać więcej informacji oraz
'citation()' aby dowiedzieć się jak cytować R lub pakiety R w publikacjach.

Wpisz 'demo()' aby zobaczyć demo, 'help()' aby uzyskać pomoc on-line, lub
'help.start()' aby uzyskać pomoc w przeglądarce HTML.
Wpisz 'q()' aby wyjść z R.
>
```

Ryc. 5.9. Widok konsoli R



Ryc. 5.10. Widok okna programu (IDE) RStudio

Moduły fotogrametryczne

Chociaż Środowisko R nie jest przeznaczone do korekcji geometrycznej obrazów i nadawania georeferencji, dostarcza pakietów przeznaczonych dla fotogrametrii. Przykładem fotogrametrycznego rozszerzenia funkcjonalności jest moduł *StereoMorph* (StereoMorph, 2020) umożliwiający pomiar punktów 3D na podstawie analizy zdjęć o pokryciu stereoskopowym.

Moduły teledetekcyjne

Z punktu widzenia teledetekcji zaletą języka R jest możliwość bezpośredniego odczytywania i zapisywania danych teledetekcyjnych z zachowaniem zasięgu, układu odniesień przestrzennych i rozdzielczości danych. Wczytywanie i analizę danych przestrzennych w starszych wersjach R zapewniają pakiety *rgdal* oraz *sp*. Nie są już jednak one dalej rozwijane i w nowszych wersjach R zostały zastąpione przez narzędzia *sf* (*simple feature*) oraz *stars* (*spatio-temporal arrays*). Pakiety *mapview* i *mapedit* przeznaczone są do edycji i wizualizacji map, a niezależnie od nich rozwijane pakiety *raster/terra* pozwalają na przetwarzanie danych rastrowych. Zaletą nowych pakietów R jest przede wszystkim przetwarzanie bardzo dużych zbiorów danych, co stało się kluczowym wyzwaniem dla teledetekcji. Rozbudowany opis narzędzi R, przeznaczony do analizy geodanych, dostępny jest w *R tasks view – Spatial* (R task view, 2020).

Bardzo popularnym pakietem stosowanym w środowisku R do pracy z obrazami satelitarnymi jest *RStoolbox* (*Tools for Remote Sensing Data Analysis*) umożliwiający przetwarzanie i analizę zobrażeń, takich jak: obliczanie indeksów teledetekcyjnych, transformacja głównych składowych (PCA) czy klasyfikację nienadzorowaną i nadzorowaną.

W przypadku narzędzi uczenia maszynowego środowisko R oferuje w zasadzie wszystkie dostępne algorytmy i to zarówno te o ugruntowanej pozycji na rynku, jak i zupełnie nowe, eksperymentalne rozwiązania. Struktura środowiska R jest tak zorganizowana, że każda metoda uczenia maszynowego dostarczana jest w osobnym pakiecie. Narzędziem integrującym pakiety uczenia maszynowego jest pakiet *mlr* (następca pakietu *caret*).

Omówienie narzędzi przeznaczonych do uczenia maszynowego w środowisku R można znaleźć na stronach internetowych projektu *mlr* (MLR, 2020) a także *R tasks view Machine Learning* (R Machine Learning, 2020) oraz *Cluster* (R Cluster, 2020) w przypadku prowadzenia klasyfikacji nienadzorowanej. Środowisko R współdzieli ze środowiskiem Python takie popularne narzędzia głębokiego uczenia (ang. *deep learning*) jak *tensorflow/keras*.

Analizy rastrowe

Środowisko R umożliwia prowadzenie analiz rastrowych w różnym zakresie, w tym m.in. algebry map, analiz globalnych, strefowych czy analizy na NMT (tworzenie map spadków, ekspozycji, cieniowanego reliefu) (R analizy, 2020a; 2020b).

Analizy wektorowe

W środowisku R możliwe są również analizy na danych wektorowych w dość szerokim zakresie, takie jak: operacje na zbiorach, wycinanie, analizy wzorców, autokorelacje przestrzenne czy analizy odległości (R analizy, 2020b).

Wymiana danych

Środowisko R dostarcza również narzędzi pozwalających na bezpośredni dostęp do zasobów (zobrazowań) wybranych misji satelitarnych, takich jak pakiet *Landsat*, zgromadzonych na serwerach NASA oraz przeprowadzenie ich korekcji. Innym ważnym pakietem jest biblioteka *sen2r*, która pomaga pobierać i wstępnie przetwarzać obrazy Sentinel-2 (ESA). Celem funkcji zawartych w bibliotece *sen2r* jest zapewnienie instrumentów wymaganych do łatwego wykonywania (ostatecznie zautomatyzowania) wszystkich kroków niezbędnych do zbudowania pełnego łańcucha przetwarzania danych Sentinel-2, bez potrzeby jakiegokolwiek manualnej interwencji ani konieczności dodatkowej integracji narzędzi zewnętrznych.

Wybrane moduły

Środowisko R udostępnia również zaawansowane silniki graficzne pozwalające na prezentację i kartograficzną wizualizację wyników analiz przestrzennych:

- *ggplot2*, *tmap* – umożliwia wizualizację danych rastrowych (*geom_raster*) i wektorowych (*geom_sf*),
- *leaflet* (*rleaflet*) oraz *RgoogleMaps* i *plot KML* – umożliwia wizualizację danych przestrzennych w sieci internetowej.

5.1.7.2. Język programowania Python

Python jest interpretowanym (nie kompilowanym) językiem programowania, zorientowanym obiektowo. Kod programu, podobnie jak w R, zapisywany jest w plikach tekstowych (skryptach). Cechami charakterystycznymi Pythona są:

- prosta i łatwa do nauczenia składnia,
- wyjątkowo czytelny zapis kodu: wcięcia kodu określają strukturę programu – brak znaków końca linii, brak nawiasów separujących fragmenty kodu,
- dynamiczne tworzenie zmiennych (nie wymaga deklaracji zmiennej ani jej typu),
- dostarcza interfejsów do wielu popularnych bibliotek utworzonych w innych językach programowania np. GDAL, openCV.

Python dystrybuowany jest na licencji *open source* typu GPL (Python, 2020).

Interfejs użytkownika

W przypadku języka Python, podobnie jak w przypadku R, trudno mówić o interfejsie użytkownika, ponieważ jest to język skryptowy, którego kod można napisać w edytorze. Istnieją także różne narzędzia ułatwiające pracę w Pythonie, czego przykładem może być Jupiter Notebook (ryc. 5.11). Jest on powszechnie używany ze względu na możliwość dzielonej zespołowej pracy on-line w kodzie programu (np. *kaggle* (Kaggle, 2020)).

Moduły fotogrametryczne

Przykładem modułu fotogrametrycznego umożliwiającego ortorektyfikację obrazów satelitarnych jest *ortho_tools.py* (Ortho tools, 2020).

Moduły teledetekcyjne

Dane teledetekcyjne pochodzące z misji satelitarnych, a więc przechowywane w formie rastrowej, importowane są jako macierze *numpy*. Od użytkownika systemu zależy czy wczytany zostanie cały zbiór danych, czy też jedynie wybrany obszar zainteresowania (AOI) bądź nawet pojedyncze piksele (określone współrzędnymi XY macierzy). Również proces zapisu danych pozwala na zapis tzw. porcjami – zgodnymi z fragmentami danych przechowywanych aktualnie w pamięci. Pozwala to na podział zadań zarówno na poszczególne wątki realizowane na jednym komputerze, jak i pomiędzy maszynami będącymi częścią klastra obliczeniowego. Przykładem może być użycie technologii *MPI* (MPI, 2020) lub pakietu *Ray* (RAY, 2020), wykorzystywanych również w procesie uczenia maszynowego.

W przypadku uczenia maszynowego środowisko Python oferuje rozbudowany zestaw narzędzi w formie zunifikowanej biblioteki *scikit-learn* (Scikit-learn, 2020). Zawiera ona uznane na rynku narzędzia z zakresu uczenia maszynowego oraz rozwiązania wspomagające tworzenie procedur obliczeniowych. Słabą stroną tego pakietu jest brak wielu nowoczesnych i eksperymentalnych rozwiązań, które niekiedy oferowane są jako

III. Download Sentinel images

module `sentinelsat`

```
[22]: from sentinelsat import SentinelAPI#, read_geojson, geojson_to_wkt  
      from datetime import date
```

```
[23]: api = SentinelAPI('Puchatek', '!scihub.copernicus.eu!', 'https://scihub.  
      ~copernicus.eu/dhus')
```

```
[24]: # search by polygon, time, and SciHub query keywords  
      print(f'footprint:\n{poly}\n')
```

```
footprint:  
POLYGON ((19.792135 50.08683, 20.090542 50.08683, 20.090542 49.880343, 19.792135  
49.880343, 19.792135 50.08683))
```

```
[25]: products = api.query(poly,  
                          date=('20200401', '20200415'),  
                          platformname='Sentinel-2',  
                          cloudcoverpercentage=(0, 30))
```

```
[26]: type(products)  
df = api.to_dataframe(products)
```

```
[27]: df.columns
```

```
[28]: Index(['title', 'link', 'link_alternative', 'link_icon', 'summary',  
          'beginposition', 'endposition', 'ingestiondate', 'orbitnumber',  
          'relativeorbitnumber', 'cloudcoverpercentage',  
          'highprobacloudspercentage', 'mediumprobacloudspercentage',
```

Ryc. 5.11. Przykładowy interfejs – kod Pythona w notatniku Jupiter Notebook

zewnętrzne biblioteki, jak choćby popularny algorytm *xgboost* (Xgboost, 2020), czy *keras* (Keras, 2020) będący nakładką na bibliotekę *tensorflow* (Tensorflow, 2020) przeznaczoną do uczenia głębokiego. Należy podkreślić, że wszystkie wymienione biblioteki wspierają równoległe obliczenia, szczególnie na etapie treningu klasyfikatora. Poza wymienionymi rozwiązaniami, środowisko Python oferuje kilka rozbudowanych narzędzi takich jak *PyTorch* (PyTorch, 2020) i *neupy* (Neupy, 2020), czyli rozwiązania alternatywne dla *keras*.

Obsługa wizualizacji kartograficznych nie jest również mocną stroną środowiska Python (pomimo że *rasterio* i *geopandas* oferują taką podstawową funkcjonalność), co wynika jednak z filozofii rozwoju narzędzia, które nastawione jest na dostarczanie narzędzi deweloperskich. W przypadku udostępniania wyników w środowisku sieci internetowej, Python posiada bibliotekę *folium*, będącą nakładką na bibliotekę *leaflet*.

Analizy rastrowe

Funkcjonalność dotycząca analiz rastrowych jest dostępna przy użyciu pakietów:

- *numpy* – podstawowy pakiet do obliczeń naukowych takich jak rachunek macierzowy,
- *rasterstats* – analizy statystyczne,
- *matplotlib* – wizualizacja danych,
- *pysal* – biblioteka funkcji przestrzennych.

Analizy wektorowe

Przykładowym pakietem do analiz wektorowych może być: *geopandas* (Geopandas, 2020), który łączy możliwości pakietu *pandas* oraz *shapely*, umożliwiając manipulowanie i analizy danych wektorowych.

Wymiana danych

Wymiana danych jest możliwa przy pomocy pakietów:

- *rasterio* – odczyt i zapis danych rastrowych,
- *OWSLib* – ładowanie danych rastrowych z serwisu: Web Coverage Services,
- *GDAL* – odczyt i zapis danych rastrowych.

Wybrane moduły

W skład tego zestawu wchodzi pakiety: *numpy* odpowiedzialne za rachunek macierzowy (w sposób podobny do R, Matlab czy Fortran), *scipy* dostarczające wielu naukowych procedur obliczeniowych, *pandas* – narzędzie analizy danych czy *matplotlib* – silnik graficzny. Procedury dostępu do danych przestrzennych realizowane są przez biblioteki *GDAL*, *ogr* i *osr* będące nakładkami na biblioteki języka *c++* o tych samych nazwach (niestety, w ograniczony sposób wykorzystują one specyficzne własności języka Python). Alternatywnym i znacznie wygodniejszym narzędziem są biblioteki *rasterio* i *geopandas* przeznaczone do obsługi danych rastrowych i wektorowych.

Zaletą obu typów narzędzi zarówno *GDAL*, jak i *rasterio* jest to, że po nawiązaniu połączenia ze zbiorem danych przestrzennych mechanizmy ładowania, przetwarzania i zapisu danych zależą wyłącznie od użytkowników systemu, co daje zdecydowanie większą kontrolę nad procesem analizy niż w języku R.

Inne szczegółowe informacje na temat języka Python oraz dokumenty źródłowe, można znaleźć na stronie internetowej Python Software Foundation (PSF): <https://www.python.org> (PSF, 2020).

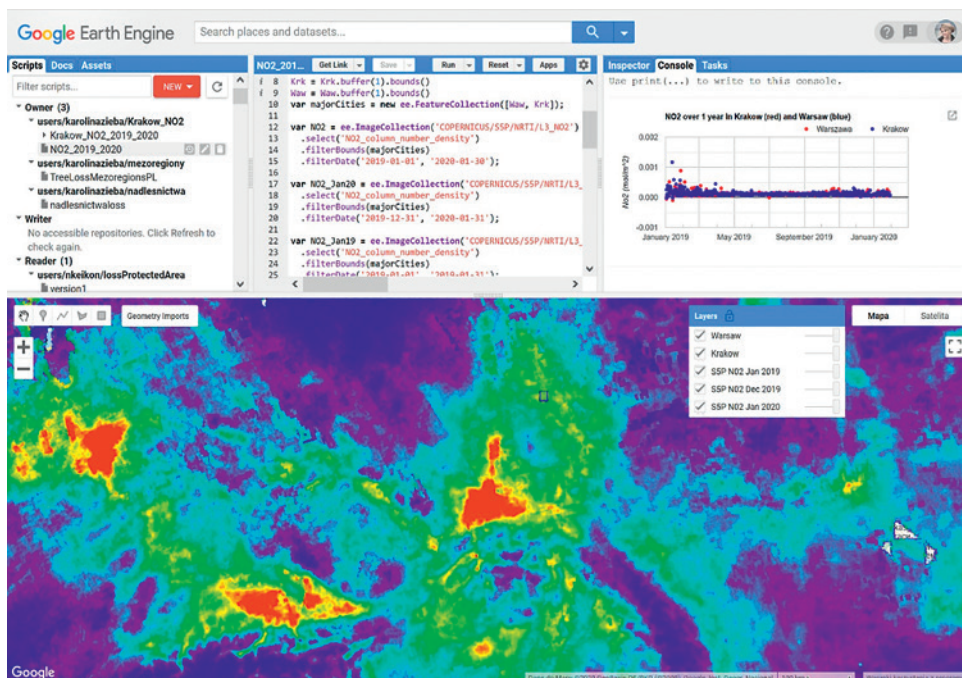
5.1.7.3. Google Earth Engine (GEE)

Karolina Zięba-Kulawik, Piotr Wężyk

Google Earth Engine (GEE) jest platformą działającą w chmurze obliczeniowej (ang. *cloud computing*), przeznaczoną przede wszystkim do analiz ogromnych zbiorów danych teledetekcyjnych, których objętość liczona jest już w petabajtach (petabajt = 1015 bajtów). Serwery GEE gromadzą głównie archiwalne publiczne dane satelitarne obserwacji Ziemi zarejestrowane przez satelity w ciągu ostatnich 40 lat. Aktualna lista udostępnianych nieodpłatnie (dla celów niekomercyjnych) geodanych dostępna jest dla użytkowników na stronie GEE (GEE, 2020).

Interfejs użytkownika

Za pomocą intuicyjnego interfejsu dostępnego dla użytkownika przez przeglądarkę internetową, GEE integruje środowisko programistyczne oparte na języku JavaScript z repozytorium danych satelitarnych, a także ze zbiorami danych wektorowych (GIS), danych społecznych, demograficznych, klimatycznych, pogodowych, modelami wysokościowymi Ziemi oraz informacjami o pokryciu i użytkowaniu terenu (ang. *Land Use Land Cover, LULC*). Platforma GEE posiada wbudowane narzędzia umożliwiające tworzenie własnych geoportali do publikowania wyników analiz wykonywanych w tej chmurze obliczeniowej.

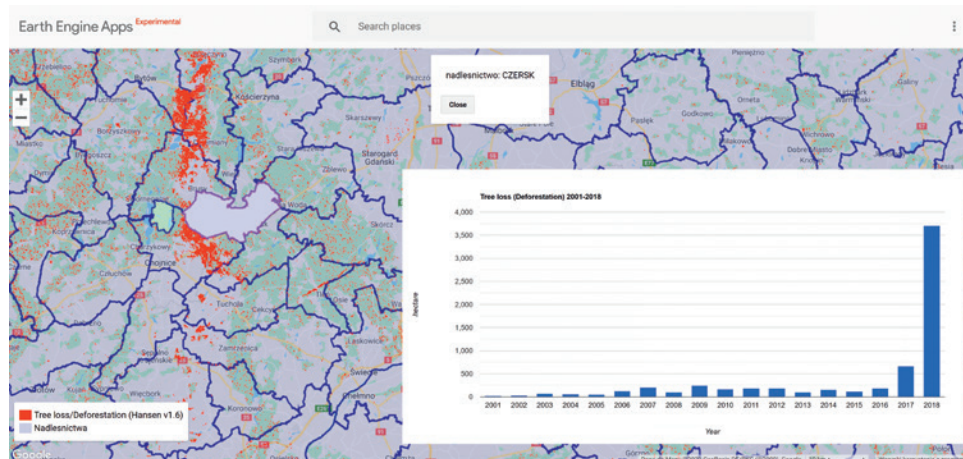


Ryc. 5.12. Przykładowy interfejs użytkownika Google Earth Engine (edytor kodu); przykład aplikacji z zastosowaniem zestawu danych Sentinel-5P Nitrogen Dioxide (źródło: opracowano z wykorzystaniem platformy Google Earth Engine)

Głównym modulem GEE jest edytor kodu (ang. *code editor*), czyli zintegrowane środowisko programistyczne IDE (Integrated Development Environment) działające w przeglądarce internetowej i służące do szybkiego prototypowania oraz wizualizacji złożonych analiz przestrzennych przy użyciu języka JavaScript (ryc. 5.12). Wymaga on od użytkownika zalogowania się na konto Google, które ma włączoną opcję dostępu do platformy Earth Engine. Funkcje edytora kodu zostały zaprojektowane tak, aby tworzenie algorytmów było szybkie dzięki API, które ma możliwość wywoływania zapytań do GEE z języków programowania JavaScript oraz Python. Interfejs API Google Earth Engine udostępnia biblioteki funkcji, które można stosować do zgromadzonych w archiwum zasobów, a także własnych geodanych. Publiczny katalog zawiera zbiór demonstracyjnych skryptów dostępnych dla każdego użytkownika GEE z możliwością ich kopiowania oraz edycji kodu. Użytkownik może także tworzyć prywatne zasoby. Infrastruktura obliczeniowa (ang. *compute power*) platformy GEE jest przystosowana do równoległego przetwarzania geodanych.

Łatwo dostępny i przyjazny dla użytkownika interfejs GEE zapewnia wygodne środowisko do interaktywnego opracowywania danych i tworzenia własnych algorytmów. Użytkownicy mają możliwość importowania dowolnego zestawu danych zgromadzonych w zasobach chmury obliczeniowej Google do środowiska skryptowego, a także przesłania własnych danych rastrowych lub wektorowych. Mogą także udostępniać kody źródłowe skryptów publicznie lub tylko prezentować wyniki analiz w formie interaktywnych map (ryc. 5.13). Platforma GEE umożliwia naukowcom oraz pracownikom administracji publicznej nieodpłatne wykorzystanie ogromnego zasobu

danych i klastra obliczeniowego. GEE jest alternatywą dla budowania własnej infrastruktury informatycznej o ogromnej przestrzeni dyskowej i odpowiednich mocach obliczeniowych, często wyposażonej w bardzo drogie specjalistyczne oprogramowanie, co wiąże się również z koniecznością zatrudnienia wysokiej klasy specjalistów do jej obsługi i utrzymania.



Ryc. 5.13. Aplikacja GEE wizualizująca ubytki w drzewostanach Nadleśnictwa Czernik (RDLP Toruń) w okresie 2001–2018 r., wykonana z wykorzystaniem algorytmu Global Forest Change (Hansen i in., 2013) oraz własnych warstw wektorowych (plik Shapefile; nadleśnictwa w Polsce, źródło: BDL, 2020)

Moduły fotogrametryczne

W środowisku GEE możliwe jest dopasowanie wstępnie skorygowanych geometrycznie obrazów (np. gotowych ortofotomap) w celu usunięcia istniejących jeszcze szczątkowych zniekształceń (*Registering Images*) (GEE guides, 2020).

Moduły teledetekcyjne

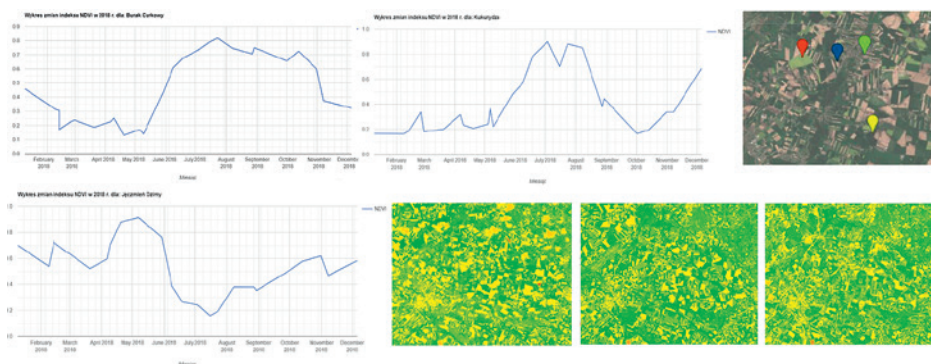
W GEE można wykonywać wiele analiz teledetekcyjnych, na przykład można tworzyć wieloczasowe obrazy wskaźnika NDVI i analizować wykresy zmienności tego wskaźnika w czasie we wskazanych na mapie punktach (ryc. 5.14). Dostępne są również algorytmy klasyfikacyjne (nadzorowane i nienadzorowane) wykorzystujące uczenie maszynowe metodami: *CART*, *Naive Bayes*, *SVM* i *Random Forest*, czy model *TensorFlow*. Przykładowe wyniki klasyfikacji obrazów przedstawiono na rycinie 5.15.

Analizy rastrowe

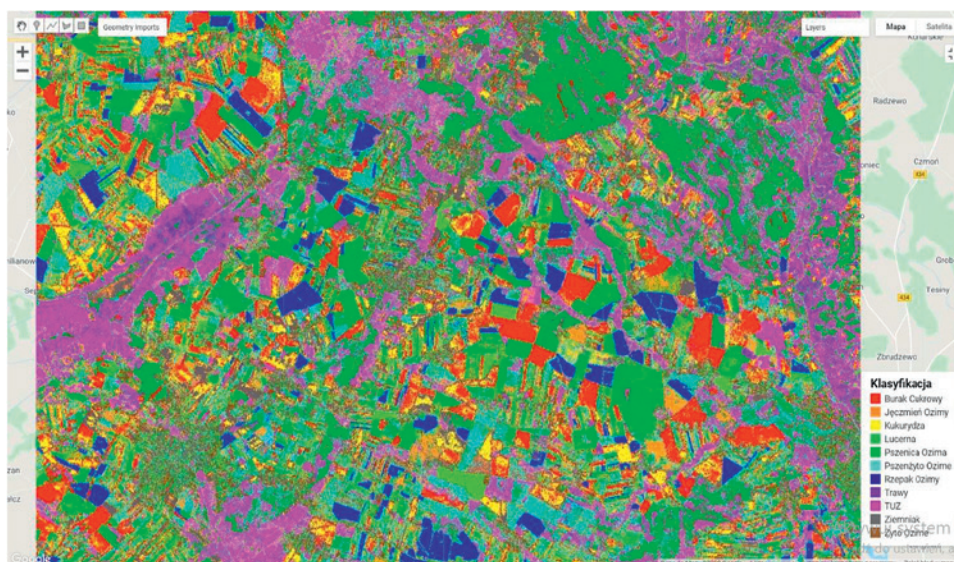
W GEE dostępnych jest wiele metod i funkcji do analiz rastrowych w zestawie algorytmów (GEE algorytmy, 2020): *Image* (operacje algebraiczne, logiczne, warunkowe, morfologiczne, analiza krawędzi, transformacje spektralne, analizy tekstualne, obliczanie gradientów, kosztów itp.). Możliwa jest też konwersja z modelu rastrowego do wektorowego.

Analizy wektorowe

W GEE dostępne są również metody i funkcje do wykonywania analiz wektorowych, głównie na potrzeby analizy obrazów, w zestawie algorytmów: *Geometry*, *Feature*, *FeatureCollection*, *Reducer* (filtrowanie (przez zapytania i atrybut), agregacje, analizy strefowe, statystyczne). Możliwa jest też zamiana wektora na raster (interpolacja).



Ryc. 5.14. Aplikacja GEE: wizualizacja zmienności NDVI w wybranych punktach (źródło: Polak, 2020)



Ryc. 5.15. Wynik klasyfikacji sceny satelitarnej pod kątem upraw rolniczych z wykorzystaniem algorytmu SVM na platformie GEE (źródło: Polak, 2020)

Wymiana danych

GEE oferuje możliwość importu i eksportu warstw rastrowych (na dysk lub do chmury Google Cloud Storage) w formacie GeoTiff i TFRecord z możliwością podziału na części – w przypadku dużych plików. Eksport tabel i warstw wektorowych jest możliwy w formatach CSV, SHP, GeoJSON, KML, KMZ albo TFRecord, a import z formatu SHP i CSV z informacją lokalizacji (GeoJSON, WKT) lub za pomocą GDAL/ORG.

Wybrane moduły

Do przeglądania oraz wizualizacji geodanych w publicznym katalogu danych przygotowano aplikację Earth Engine Explorer (EE Explorer). Jest to intuicyjny interfejs sieciowy API, który składa się z katalogu danych i obszaru roboczego (ryc. 5.12). Zalogowani użytkownicy GEE mogą importować dane, przeprowadzać proste analizy, zapisywać

i eksportować wyniki. Aplikacja EE Explorer umożliwia wizualizację analiz zmian wielo-
czasowych serii danych.

Ponadto na uwagę zasługują gotowe moduły: Global Forest Change (ryc. 5.13) i Glo-
bal Surface Model. Aby rozpocząć korzystanie z zaawansowanych funkcji Earth Engine,
należy zarejestrować się na stronie GEE (GEE rejestracja, 2020).

5.2. Oprogramowanie komercyjne

Beata Hejmanowska, Piotr Wężyk

W przypadku masowego przetwarzania dużych ilości zobrazowań i innych danych
satelitarnych (np. meteorologicznych czy mikrofalowych), w ramach dużych komercyj-
nych projektów realizowanych w instytucjach państwowych lub międzynarodowych
agencjach obowiązywał, w zasadzie do niedawna, model stosowania wyłącznie spe-
cjalistycznego oprogramowania komercyjnego. Powodem było to, że często oprogra-
mowanie komercyjne (pomimo że wymaga zakupu licencji) jest bardziej stabilne i ma
zwykle bardziej intuicyjny interfejs dla użytkownika. Wynika to z faktu, że tego typu
produkty informatyczne były rozwijane przez wiele lat na bazie doświadczeń wielu
użytkowników. Niekoniecznie jednak oprogramowanie komercyjne musi być zawsze
szybsze i bardziej skuteczne w przetwarzaniu danych, szczególnie gdy przyszło mu
obecnie konkurować z nowymi produktami *open source*, tworzonymi w nowej, bardziej
innovacyjnej i efektywniejszej architekturze informatycznej przez dziesiątki eksper-
tów, wolontariuszy i entuzjastów.

Niepodważalną zaletą stosowania komercyjnego oprogramowania jest możliwość
uzyskania wsparcia producenta w przypadku wystąpienia problemów i gwarancja usu-
nięcia ewentualnych błędów dzięki okresowym aktualizacjom w ramach obsługi gwa-
rancyjnej. Poniżej omówiono funkcjonalność powszechnie stosowanego oprogramo-
wania służącego do przetwarzania obrazów teledetekcyjnych, tj. ArcGIS Esri, GeoMedia,
PCI Geomatica, ENVI, Erdas Imagine oraz eCognition.

5.2.1. ArcGIS Esri

Piotr Wężyk, Anna Żądło

Oprogramowanie ArcGIS firmy Esri (Environmental System Research Institute) to ko-
mercyjny pakiet programów przeznaczonych do pracy z geodanymi, tj. ich edycji, kon-
trolli poprawności topologicznej, wykonywania analiz przestrzennych GIS, zarządzania
danymi w geobazie oraz udostępniania produktów, zazwyczaj kompozycji mapowych.
Producent oferuje obecnie szereg aplikacji serwerowych, desktopowych oraz mobil-
nych dla użytkowników GIS na różnych poziomach zaawansowania w stosowaniu tego
typu oprogramowania.

W starszej wersji pakiet programów ArcGIS Desktop składał się z podstawowych
modułów, takich jak:

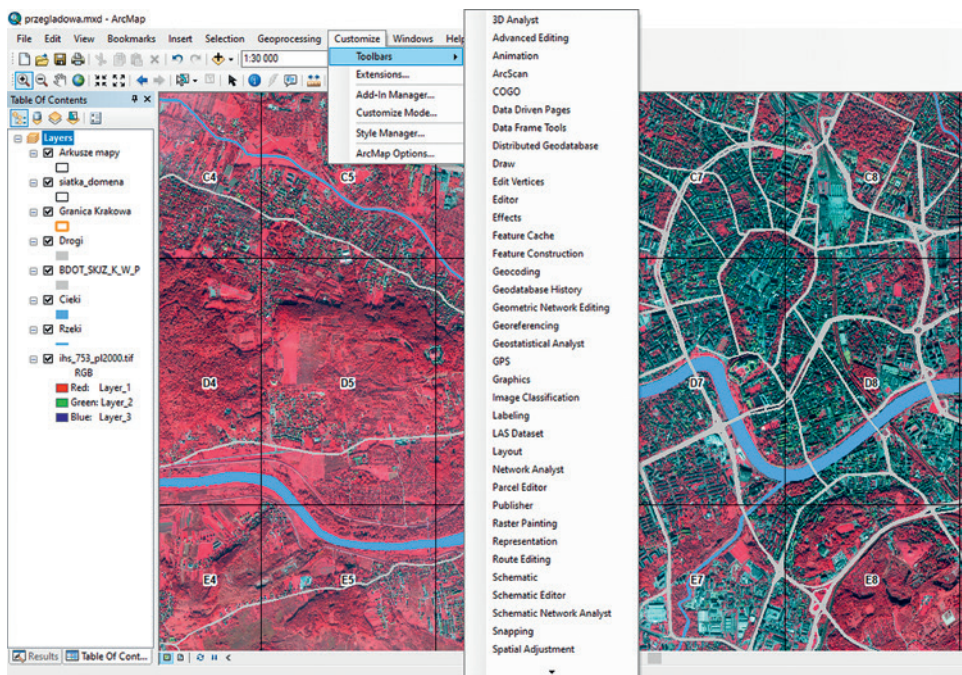
- *ArcMap* – do edycji, tworzenia map, analizy geodanych,
- *ArcCatalog* – do zarządzania i obsługi geodanych, tworzenia dostępu do
metadanych,

- *ArcToolbox* – narzędzia do analiz przestrzennych oraz użycia trybu wsadowego przetworzeń,
- *ArcGlobe* – do wizualizacji geodanych w przestrzeni 3D na dużych obszarach,
- *ArcScene* – do wizualizacji danych 3D.

Najnowsza aplikacja, tj. pakiet ArcGIS Pro, współpracuje z programem ArcGIS Online oraz jego rozszerzeniami przeznaczonymi do zaawansowanych analiz przestrzennych oraz specjalistycznych rozwiązań branżowych.

Interfejs użytkownika

W związku z tym, że ArcGIS Esri jest oprogramowaniem składającym się z różnych modułów, trudno zaprezentować jeden specyficzny interfejs użytkownika. Na rycinie 5.16 przedstawiono interfejs najczęściej używanego modułu *ArcMap*.

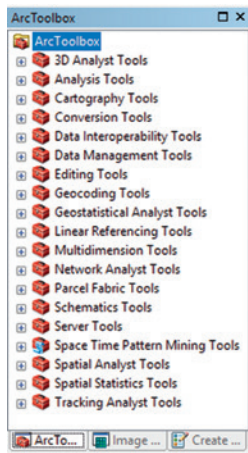


Ryc. 5.16. Przykładowy interfejs użytkownika *ArcMap Esri*

Narzędzia programu ArcMap mogą być obsługiwane na dwa sposoby, tj. przez aktywowanie danego zestawu narzędzi (ang. *toolbar*), który pojawi się na pasku narzędzi lub przez wyszukanie odpowiedniej funkcji w *ArcToolbox* (ryc. 5.17).

Moduły fotogrametryczne

W ArcGIS, w rozszerzeniu *Image Analyst*, dostępna jest funkcja *Orthorectify* do generowania ortofotomap satelitarnych z wykorzystaniem współczynników RPC (dostarczanych wraz z obrazami np. GeoEye) i numerycznego modelu terenu (NMT). O ile funkcja ta nie ma pełnej fotogrametrycznej funkcjonalności, np. możliwości pomiaru punktów kontrolnych na modelu, to w najnowszej wersji ArcGIS Pro Esri dodano moduły umożliwiające generowanie ortofotomap ze zdjęć pozyskiwanych z platform BSP (Drone Ima-



Ryc. 5.17. Zakładka ArcToolbox

gery Workflow). Moduł ten umożliwia pracę nawet ze zdjęciami wielospektralnymi, dając możliwości dopasowania zdjęć (ang. *matching*) w celu wygenerowania chmury punktów i budowy NMT oraz przeprowadzenia procesu ortorektyfikacji obrazów z wykorzystaniem punktów dostosowania (ang. *Ground Control Point*, GCP).

Moduły teledetekcyjne

Do pracy z danymi teledetekcyjnymi przeznaczone są też inne funkcje rozszerzenia: *Image Analysis* (ryc. 5.18), które umożliwiają np. szybkie ustawienie sposobu wyświetlania danych rastrowych, tworzenie tymczasowych kompozycji barwnych na podstawie poszczególnych kanałów obrazów wielospektralnych i pozwalają na szybką regulację jasności i kontrastu.

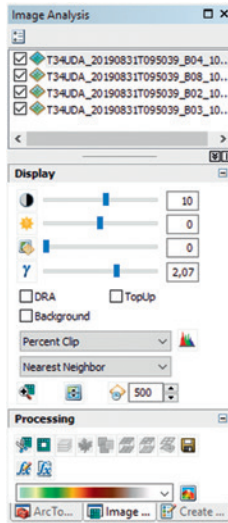
Należy zwrócić uwagę, że funkcjonalność *Image Analysis* obejmuje również klasyfikację obrazów, identyfikację obiektów metodą głębokiego uczenia, podstawową korekcję geometryczną obrazów, bardzo zaawansowane narzędzia do dynamicznej wizualizacji (ang. *full-motion imagery*) oraz możliwość obserwacji stereoskopowej.

Z kolei rozszerzenie *Spatial Analyst* zawiera zestaw narzędzi *Multivariate* do przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej i nienadzorowanej z obrazów satelitarnych. Pasek narzędzi *Image Classification* zapewnia przyjazne dla użytkownika środowisko do tworzenia pól treningowych (ang. *training sites*) oraz plików sygnatur spektralnych w celu przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej. Podstawowym algorytmem klasyfikacyjnym jest narzędzie największego prawdopodobieństwa. Dostępne są również narzędzia do tworzenia warstw pochodnych z obrazów satelitarnych jak i generowania głównych składowych (PCA).

Analizy rastrowe

Analizy rastrowe podobnie jak analizy teledetekcyjne są dostępne z dwóch rozszerzeń (ang. *extensions*): *Spatial Analyst* i częściowo *Image Analyst*.

W rozszerzeniu *Spatial Analyst* można wymienić przykładowo: obliczanie odległości, pozyskiwanie informacji z warstwy rastrowej w obszarze obiektu wektorowego, generalizację, analizy hydrologiczne, interpolację, analizy lokalne i strefowe, algebrę map (operacje algebraiczne, trygonometryczne i logiczne), analizy sąsiedztwa, nakładanie warstw rastrowych, reklasyfikacje oraz obliczanie map pochodnych NMT (mapy nachyleń, eksponycji, oświetlenia),



Ryc. 5.18. Okno *Image Analysis*

W rozszerzeniu *Image Analyst*, oprócz funkcji zaliczonych do teledetekcyjnych, znajdują się również funkcje dostępne w *Spatial Analyst* (jak np. algebra map) przeznaczone do analiz wyników klasyfikacji. Ciekawe są funkcje dostępne w przypadku analizy zmian – w narzędziu *Multidimensional Analysis*.

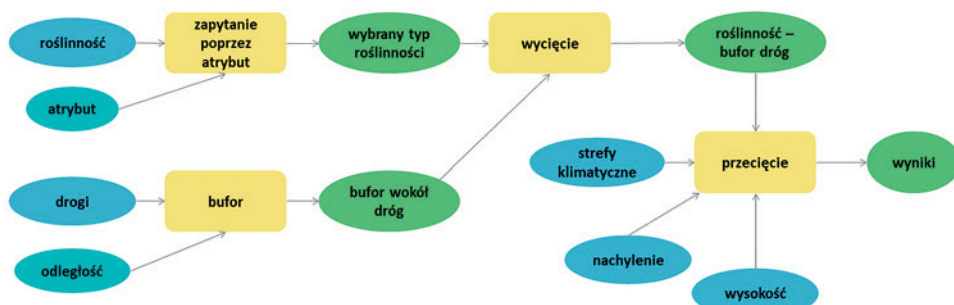
Analizy wektorowe

Zakładka menu ArcMap – *Geoprocessing* zawiera narzędzia służące do wykonania podstawowych analiz wektorowych (np. ekwidystanta – *Buffer*, wycinanie – *Clip* czy łączenie – *Merge*) oraz dostęp do panelu *Toolbox*. Znajduje się w nim szereg funkcji umożliwiających zarządzanie danymi, konwersję między formatami, eksport i import danych, edycję, analizy przestrzenne, statystyczne, rastrowe i wektorowe.

Dzięki tzw. rozszerzeniom, czyli aplikacjom zwiększającym podstawową funkcjonalność programu, można wykonywać bardziej zaawansowane analizy, takie jak: analiza widoczności w trybie 3D, wektoryzacja plików rastrowych, integracja różnego typu danych, analizy geostatystyczne, analizy wielokryterialne.

Automatyzacja procesów przetwarzania geodanych w ArcMap możliwa jest dzięki funkcji *ModelBuilder* oraz dzięki tworzeniu skryptów w języku Python. Moduł *ModelBuilder* (ryc. 5.19) umożliwia definiowanie sekwencji zadań, które mają zostać wykonane, w sposób graficzny bez konieczności wielokrotnego uruchamiania kolejnych procesów. Narzędzie to jest bardzo użyteczne, w szczególności do analizy dużej ilości danych, gdy istnieje potrzeba wielokrotnego wykonania tego samego procesu. Dodatkowo umożliwia ono tworzenie własnych narzędzi oraz integrację z zewnętrznymi aplikacjami. W ArcGIS udostępniono także pakiet *ArcPy* przystosowany do analizy danych przestrzennych za pomocą języka Python. Obecnie istnieje także możliwość korzystania z usługi ArcGIS Online, która pozwala na tworzenie interaktywnych map oraz udostępnianie utworzonych produktów w sieci lub danej grupie odbiorców.

Podsumowując, oprogramowanie ArcGIS Esri, podobnie jak QGIS, przeznaczone jest do pozyskiwania i przetwarzania danych przestrzennych GIS, głównie wektorowych i rastrowych, choć podstawowe przetworzenia danych satelitarnych są możliwe.



Ryc. 5.19. Przykład modelu wykonanego w ModelBuilder

Wymiana danych

Podobnie jak w innych programach z zakresu GIS, praca w ArcGIS ArcMap (Esri) ma charakter hybrydowy, tzn. odbywa się na warstwach wektorowych oraz rastrowych. Program obsługuje większość formatów danych GIS i posiada dodatkowe rozszerzenia w przypadku przetwarzania bardzo specyficznych geodanych (np. rozszerzenie FME). Podczas pracy możliwy jest eksport każdej z warstw (lub zaznaczonej części warstwy) osobno. Przez panel *Catalog* mogą być dodawane ścieżki zawierające foldery z danymi oraz tworzone są nowe pliki. Edycja warstw wektorowych (Shapefile ESRI) odbywa się w panelu *Create Features*, który umożliwia tworzenie warstw typu punkt, linia i poligon, zdefiniowanie układu współrzędnych i przypisanie atrybutów do tabeli.

Oprogramowanie ArcGIS posiada wiele narzędzi do wizualizowania wyników obliczeń na mapach, w postaci np. kartogramów, kartodiagramów, różnego typu map wraz z legendą, podziałką, kierunkiem północy. Do dyspozycji jest wiele stylów i symboli stworzonych do wizualizacji danych, co umożliwia:

- tworzenie histogramów, grafów i różnych typów wykresów przydatnych do zaprezentowania danych statystycznych,
- stosowanie różnego typu map bazowych, w tym również OpenStreetMap, czy Bing Maps,
- przeglądanie dzięki usłudze WMS i WMT danych przestrzennych, udostępnianych np. przez Geoportal (Geoportal, 2020).

Szczegółowe informacje o oprogramowaniu oraz dostęp do pomocy technicznej i forum użytkowników można uzyskać na stronie internetowej Esri: <https://www.esri.pl> (ESRI, 2020).

5.2.2. GeoMedia

Piotr Kramarczyk

Oprogramowanie GeoMedia firmy Hexagon Geospatial to aplikacja przeznaczona do pracy na danych przestrzennych, oferująca ich obsługę (edycję, aktualizację, zarządzanie), przy czym jej twórcy skupili się głównie na warstwach wektorowych. Program dostępny jest w trzech wersjach:

- GeoMedia Essentials,
- GeoMedia Advantage,
- GeoMedia Professional.

GeoMedia Essentials umożliwia tworzenie złożonych zapytań oraz wykonywanie podstawowych analiz przestrzennych na danych wektorowych pochodzących z różnych źródeł. Dostępny jest również pakiet *IMAGINE Essentials* umożliwiający podstawowe przetwarzanie obrazu.

GeoMedia Advantage udostępnia funkcje GeoMedia Essentials oraz dodatkową funkcjonalność w zakresie gromadzenia i edycji oraz przetwarzania i analizy danych wysokościowych i topograficznych, w tym chmur punktów LiDAR. Pozwala na sprawdzanie poprawności geodanych i oferuje zaawansowane narzędzia analizy rastrowej.

GeoMedia Professional (ryc. 5.20) zawiera wszystkie funkcje z wyżej wymienionych wersji oraz zapewnia zarządzanie i analizę geodanych dla wielu użytkowników. Zarządza sieciami liniowymi, obsługuje tworzenie profesjonalnych map. Posiada zaawansowane funkcje edycji, zarządzania zbiorami działek oraz analizy sieci. Zapewnia monitorowanie i kontrolę zmian, integruje geodane z wielu źródeł.

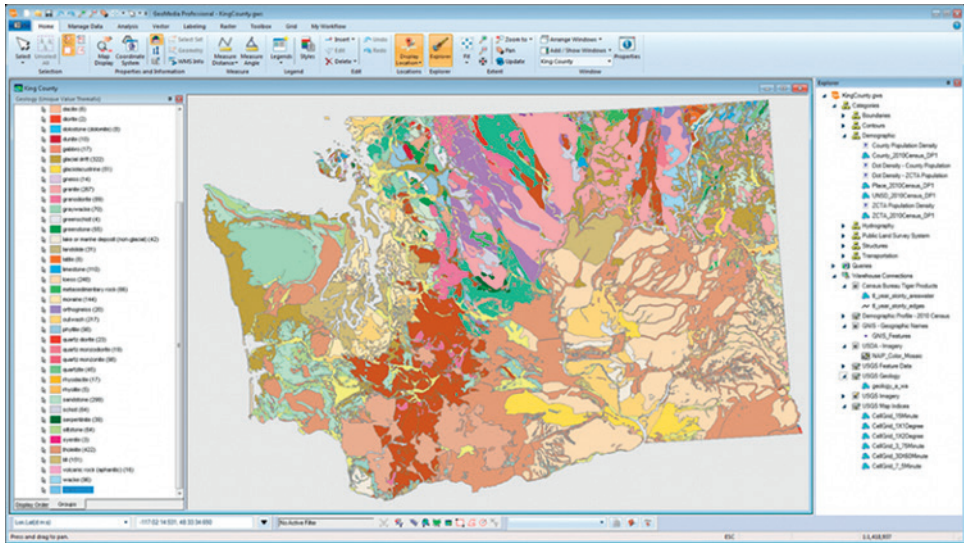
Interfejs użytkownika

Oprogramowanie Geomedia, podobnie jak ArcGIS, jest programem do przetwarzania danych przestrzennych (GIS) bazującym na modelu wektorowym z modułem rastrowych analiz (*Spatial Modeler*) oraz możliwością poszerzenia funkcjonalności z wykorzystaniem tzw. rozszerzeń: *Geomedia Transportation Manager*, *Geomedia Mapping Manager*, *Geoemdia Motion Video Analyst Professional* i 4 rozszerzenia *Image Station*.

GeoMedia pozwalają wizualizować i analizować dane z wielu baz danych w jednym środowisku, bez konieczności ich importu. Bezpośrednie wykorzystanie danych źródłowych pozwala na uniknięcie redundancji i problemów z ich aktualnością. Dane przestrzenne z różnych projektów są dołączane do wspólnej przestrzeni geograficznej – GeoPrzestrzeni (ang. *GeoWorkspace*) i tam mogą być razem wyświetlane i analizowane. W rezultacie użytkownik może pracować na oryginalnych projektach bez konieczności ich importowania. Interfejs GeoMedia Professional jest zbliżony do większości programów GIS, zapewnia dostęp do pakietu narzędzi poprzez menu lub zakładki, a także daje możliwość zarządzania wyświetlanymi warstwami w panelu *Legend*.

Moduły fotogrametryczne

Profesjonalne moduły fotogrametryczne są dostępne w czterech rozszerzeniach (GeoMedia rozszerzenia, 2020): *Image Station Stereo* (pomiar stereoskopowy), *Image Station DTM* (pozyskiwanie punktów do tworzenia NMT), *Image Station OrthoPro* (generowanie cyfrowych ortofotomap) i *Image Station PixelQue* (kontrola i poprawa jakości ortofotomapy).



Ryc. 5.20. Przykładowy interfejs użytkownika Geomedia Professional (źródło: Hexagon Geospatial, 2020)

Moduły teledetekcyjne

Moduły teledetekcyjne są dostępne w innym narzędziu firmy Hexagon – Erdas Imagine.

Analizy rastrowe

Funkcjonalność analiz rastrowych jest dostępna w module *Spatial Modeler* (ryc. 5.21), który posiada również możliwość budowania analizy, podobnie jak *ModelBuilder* ArcGIS (ryc. 5.19) i pozwala na wykonywanie różnorodnych analiz rastrowych (obliczanie odległości, wydobywanie informacji z warstwy rastrowej w obszarze obiektu wektorowego, analizy hydrologiczne, interpolację, analizy lokalne i strefowe, algebrę map (operacje algebraiczne, trygonometryczne i logiczne) i inne).

Analizy wektorowe

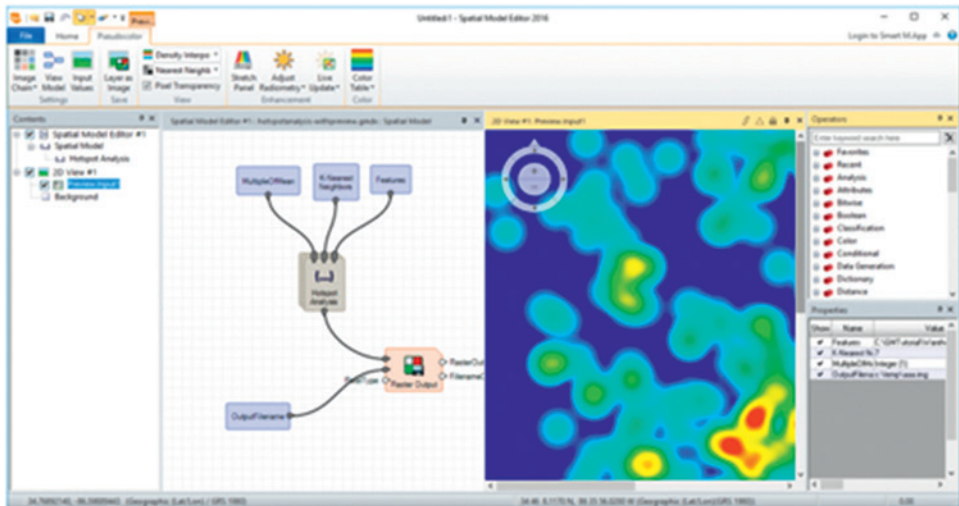
Geomedia Professional jest programem opartym na modelu danych wektorowych i wspiera zarówno proces pozyskiwania i kontroli danych wektorowych, jak i umożliwia wykonywanie analiz wektorowych. Na uwagę zasługują następujące funkcjonalności:

- tworzenie rozbudowanych zapytań, łączenie zapytań,
- jednoczesne zapytania do wielu baz danych (różne platformy, różne pliki) przechowujących dane w różnych układach współrzędnych.

Wymiana danych

Wybrane funkcje oprogramowania Geomedia Professional w przypadku wymiany danych obejmują:

- bezpośredni dostęp do baz danych takich jak: Oracle, SQL Server, PostGIS,
- obsługę popularnych formatów plików: MicroStation, AutoCAD, Shapefile ESRI, GeoDatabase File ESRI, KML, itp.,
- obsługę usług internetowych: WMS, WMTS i WFS,
- możliwość integracji danych z różnych źródeł,



Ryc. 5.21. Przykładowa wizualizacja wyniku analizy przestrzennej w module *Spatial Modeler* (źródło: Hexagon Geospatial, 2020)

- rozszerzenia: Serwer danych Excel (Excel Data Server), Serwer danych przestrzennych SQL (SQL Server Spatial Data Server).

Z kolei rozszerzenie serwer danych Excel (Excel Data Server):

- pozwala na dostęp do danych tabelarycznych w formie arkuszy kalkulacyjnych Excel,
- obsługuje dane zapisane w formacie *.xls oraz *.xlsx, a dostęp następuje dzięki połączeniu do tzw. hurtowni danych (ang. *warehouse connection*).

Z kolei serwer danych przestrzennych SQL (SQL Server Spatial Data Server) i serwer danych Microsoft SQL Server®Spatial zapewnia pełną obsługę zapisu i odczytu danych w natywnych formatach dla wybranych pól geometrii:

- domyślnie dla pola typu obszar i linia,
- opcjonalnie dla pola typu punkt i pola typu złożonego.

Wybrane moduły

Nakładka *GeoMedia Image*, stosowana jako rozszerzenie oprogramowania GeoMedia Professional, umożliwia prowadzenia operacji na obrazach. Pozwala na przetwarzanie, analizowanie i wizualizację danych z różnych źródeł bezpośrednio w GeoMedia. Posiada funkcje niezbędne do poprawy jakości wizualnej obrazu, kalibracji, wykrywania krawędzi, wyrównywania i edycji obrazu (zmiany jasności, kontrastu, wyostrzenia) i wielu innych.

Ciekawym rozwiązaniem tego oprogramowania jest dostępność funkcji tworzenia wirtualnej mozaiki z obrazów zaimportowanych do obszaru roboczego. Po jej utworzeniu *GeoMedia Image* zapewnia wydajne narzędzia do jej przeszukiwania (ryc. 5.22).

Podsumowując, program GeoMedia należy do programów GIS, które podobnie jak wcześniej opisywane QGIS i ArcGIS bazują w podstawowej wersji na danych wektorowych. Z punktu widzenia teledetekcji bardzo ważnym rozszerzeniem jest *Image Station*, które umożliwia przeprowadzenie korekcji geometrycznych obrazów teledetekcyjnych



Ryc. 5.22. Przeszukiwanie wirtualnej mozaiki w GeoMedia Image
(źródło: Hexagon Geospatial, 2020)

oraz Erdas Imagine (omawiany w dalszej części), przeznaczony do analiz tematycznych (np. obliczenia wskaźników teledetekcyjnych oraz klasyfikacji obrazu).

Szczegółowe informacje o oprogramowaniu oraz dostęp do pomocy technicznej można uzyskać na stronie internetowej GeoMedia: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/geomedia> (GeoMedia, 2020).

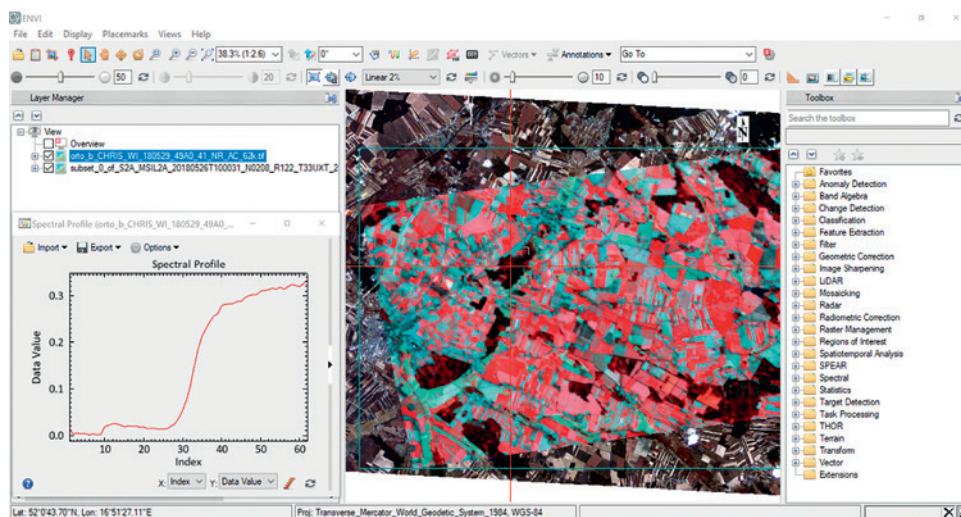
5.2.3. ENVI

Ewa Głowienka

Oprogramowanie ENVI firmy L3Harris Geospatial zajmuje jedną z czołowych pozycji wśród narzędzi do przetwarzania danych teledetekcyjnych, zarówno optycznych, jak i radarowych. Oprogramowanie ENVI posiada strukturę modułową. Każdy moduł zawiera odpowiednio dobrany pakiet funkcji przeznaczonych do przetwarzania określonego typu danych teledetekcyjnych lub zestawy funkcji dostosowanych do potrzeb użytkowników np. *ENVI Feature Extraction* czy *ENVI +Pix4D* (Harris, 2020).

Interfejs użytkownika

Interfejs oprogramowania ENVI (ryc. 5.23) zapewnia szybki dostęp do menu, standardowych narzędzi, menedżera warstw oraz panelu z narzędziami dostępnymi



Ryc. 5.23. Interfejs oprogramowania ENVI

w ENVI – *Toolbox*. Z górnego paska narzędzi użytkownik ma cały czas dostęp do najbardziej potrzebnych narzędzi. Menedżer warstw (*Layer Manager*) pokazuje, z jakimi warstwami pracuje w danym momencie użytkownik oraz która z nich jest aktywna, a która jest warstwą bazową. W głównym panelu kontrolnym ENVI znajduje się pakiet standardowych narzędzi *Toolbox*.

Moduły fotogrametryczne

W ENVI są dostępne dwa moduły fotogrametryczne, tj. *ENVI Photogrammetry* i *ENVI Opicalscape* pozwalające na generowanie ortofotomapy satelitarnej, lotniczej oraz ze zdjęć z Bezzałogowych Statków Powietrznych (BSP), automatyczne generowanie numerycznych modeli powierzchni terenu (NMPT), automatyczne mozaikowane, analizy chmur punktów LiDAR oraz generowanie modeli 3D.

Moduły teledetekcyjne

W oprogramowaniu ENVI istnieje możliwość przetwarzania danych teledetekcyjnych pozyskanych z różnych platform, w tym BSP, lotniczych i satelitarnych z wykorzystaniem sensorów: RGB, wielospektralnych, hiperspektralnych, termalnych i mikrofalowych (radar). W oprogramowaniu ENVI producent udostępnia liczne funkcje umożliwiające klasyfikację obrazów, detekcję zmian na podstawie serii wieloczasowych obrazowań, analizy wskaźników roślinności, transformację obrazów, korekcję geometryczną i radiometryczną oraz korekcję atmosferyczną (moduł *FLAASH*).

Do algorytmów klasyfikacji nienadzorowanej obrazowań satelitarnych dostępnych w ENVI zaliczyć można *k-means* oraz *ISODATA*. Klasyfikacja nadzorowana stosowana w podejściu klasyfikacji pikselowej wykorzystuje natomiast algorytmy: *Parallelepiped Classification*, *Maximum Likelihood Classification*, *Minimum Distance Classification*, *Mahalanobis* oraz *Distance Classification*. Dodatkowo ENVI oferuje metodę bazującą na metodzie klasyfikacji *Spectral Angle Mapper (SAM)*.

Poza podstawowym podejściem pikselowym do klasyfikacji obrazu ENVI wprowadziło własne opatentowane algorytmy do segmentacji obrazów, czyli analizy obiektowej (*GEOBIA*).

Oprogramowanie ENVI jest też powszechnie znane jako te, które od wielu lat wspiera klasyfikację obrazów hiperspektralnych, oferując wyspecjalizowane narzędzia do tego służące. W ENVI na danych hiperspektralnych wykonywane są takie procesy jak redukcja skorelowanych ze sobą kanałów spektralnych (ang. *Minimum Noise Fraction*), analiza czystości spektralnej pikseli (ang. *Pixel Purity Index*), klasyfikacja obrazu metodą maszyny wektorów nośnych (ang. *Support Vector Machine, SVM*) oraz ocena dokładności klasyfikacji metodą macierzy błędów. Funkcjonalność analiz teledetekcyjnych można rozszerzyć, wykorzystując przeznaczone do tego moduły: *ENVI SARscape*, *ENVI Crop Science*, *ENVI Deep Learning*

Analizy rastrowe

Oprogramowanie ENVI nie dysponuje funkcjonalnością w zakresie analiz rastrowych GIS. W tym przypadku użytkownik ma do dyspozycji rozszerzenie *Spatial Analyst* oprogramowania ArcGis, z którym ENVI jest kompatybilne.

Analizy wektorowe

Oprogramowanie ENVI nie umożliwia analiz wektorowych GIS, które jednak można w łatwy sposób wykonać, wykorzystując pełną integrację oprogramowania ENVI z ArcGIS.

Wymiana danych

Formatem rastrowym, oryginalnym dla ENVI jest HDR, ale oprogramowanie umożliwia odczyt bardzo wielu formatów zarówno rastrowych, jak i wektorowych (ENVI doc, 2020).

Wybrane moduły

Skrypty napisane w ENVI w języku IDL można w prosty sposób przenieść do języka Python i zaimplementować w oprogramowaniu ArcGIS, przy czym możliwa jest również odwrotna operacja. Program ENVI oferuje także możliwość korzystania z API, które pozwala użytkownikom dodawać własne algorytmy, rozszerzać istniejące narzędzia i modele, automatyzować zadania często wykonywane i łączyć wiele narzędzi w celu uzyskania pożądanych rezultatów (Esri, 2020). Na szczególną uwagę w przypadku ENVI zasługują moduły służące do korekcji atmosferycznej (*FLAASH*) oraz klasyfikacji obrazów hiperspektralnych.

Szczegółowe informacje o oprogramowaniu, podręcznik użytkownika (ENVI podręcznik, 2020) oraz dostęp do pomocy technicznej można uzyskać na stronie internetowej ENVI: <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI> (ENVI, 2020).

5.2.4. ERDAS IMAGINE

Piotr Wężyk

ERDAS IMAGINE firmy Hexagon Geospatial to jeden z wiodących na rynku teledetekcji programów przeznaczonych do przetwarzania obrazów satelitarnych. ERDAS IMAGINE wykorzystywane jest również do pracy z danymi przestrzennymi GIS (w postaci rastrowej i wektorowej).

Interfejs użytkownika

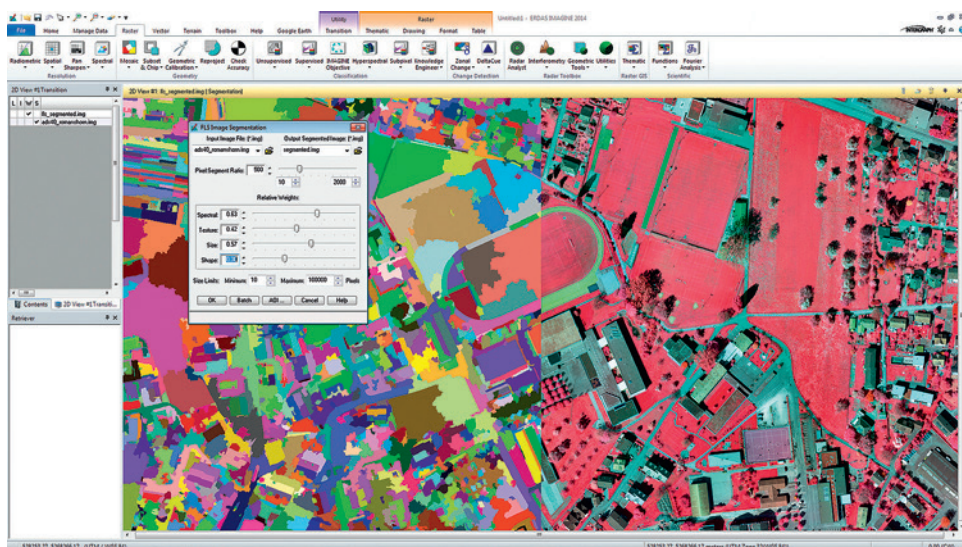
Interfejs użytkownika oprogramowania ERDAS IMAGINE (ryc. 5.24) (podobnie jak interfejs innego programu tej firmy – GeoMedia), zbliżony jest do większości programów zapewniających dostęp do pakietu narzędzi dzięki wstążkom (ang. *ribbon*) oraz dających możliwość zarządzania wyświetlanymi danymi w panelu *Contents*.

Moduły fotogrametryczne

Moduł *Data Preparation* służy do wstępnego przetwarzania danych i przygotowania ich do dalszych analiz. Możliwe jest np. stworzenie obszaru zainteresowań (AOI), mozaiki, wielokanałowych obrazów, konwertowanie układów współrzędnych w locie, nadawanie georeferencji, a także przeprowadzanie ortorektyfikacji obrazów. Moduł *Photogrammetry* zawiera narzędzia do wykonywania projektów fotogrametrycznych, takich jak: pomiar punktów dostosowania (GCP), aerotriangulacja, generowanie modeli wysokościowych (metodą dopasowania zdjęć) i ortofotomap cyfrowych. W module przeznaczonym do opracowania chmur punktów LiDAR, można je wyświetlać według atrybutów, edytować, tworzyć profile oraz wykonywać pomiary długości i objętości obiektów. Możliwe jest także wygenerowanie modelu 3D na podstawie chmury punktów.

Moduły teledetekcyjne

Narzędzia do wykonywania analiz na wielospektralnych obrazach satelitarnych po-



Ryc. 5.24. Interfejs oprogramowania ERDAS IMAGINE (źródło: Hexagon Geospatial, 2020)

zwalają na tworzenie wykresów sygnatur spektralnych na podstawie zdefiniowanych pól treningowych, przeprowadzanie klasyfikacji nadzorowanej oraz nienadzorowanej, korekcie radiometryczne (np. tworzenie i edycja histogramu), analizy przestrzenne (np. próbkowanie; ang. *resampling*), filtrowanie obrazu, wzmocnienie obrazów (transformacje obrazów np. RGB do IHS, Tasseled Cap, generowanie głównych składowych PCA), przeprowadzanie detekcji zmian czy wykrywanie obiektów, itp. Oprogramowanie ERDAS Imagine zawiera także moduł przygotowany do pracy na danych radarowych. Pozwala na wykonanie ortorektyfikacji oraz kalibracji danych radarowych, filtracji przydatnej w usuwaniu szumów i wykrywaniu krawędzi, a także interferometrii radarowej.

Kontrolę działania programu i wybór procesów prowadzić można z okna interfejsu programu oraz przy pomocy narzędzia *Spatial Model Editor*. Pozwala ono na zautomatyzowanie analizy dużej ilości danych dzięki zdefiniowaniu własnej sekwencji planowanych do wykonania zadań. Oprogramowanie pozwala także na implementację własnych skryptów napisanych w języku Python.

Należy w tym miejscu wspomnieć także o możliwościach ERDAS IMAGINE w przypadku tzw. falkowej kompresji ECW obrazów satelitarnych (algorytm opatentowany w przeszłości przez twórców programu ER Mapper), szczególnie tych o znacznych rozmiarach (zobrazowania o bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej lub w przypadku rozległych obszarowo mozaik).

Analizy rastrowe

Moduł *Raster* służący do analiz rastrowych skupia w sobie większość narzędzi przydatnych do analiz przestrzennych, takich jak: analizy sąsiedztwa, interpolacja wartości, analizy ukształtowania terenu (mapa spadków, ekspozycji).

Analizy wektorowe

Do analiz przestrzennych służy moduł *Spatial Modeler*. Omówiony przy okazji Geo-media Professional (rozdział 5.2.2).

Wymiana danych

Erdas Imagine zapewnia możliwość pracy na różnych typach danych przestrzennych, takich jak: wielospektralne zobrazowania satelitarne (np. HDF-EOS5, Sentinel-2, TerraSAR-X, RapidEye), chmury punktów LiDAR (format LAS), dane rastrowe (m.in. formaty: TIFF, JPEG, JPEG200) czy warstwy wektorowe (m.in. Shapefile ESRI). Dzięki modułowi *Image Catalog* możliwe jest sprawne zarządzanie dużą ilością danych gromadzonych w katalogach. Dane i wyniki mogą być wyświetlane i prezentowane w formie 2D w modelu rastrowym lub wektorowym oraz w postaci widoków 3D (np. NMT lub warstwy wektorowe posiadające atrybuty trzech wymiarów).

Oprogramowanie ERDAS IMAGINE posiada bogate możliwości konwersji ponad 190 formatów obrazów do wszystkich głównych formatów plików (ERDAS formaty, 2020), w tym: GeoTIFF, NITF, CADRG, JPEG, JPEG2000, ECW czy MrSID. Ponadto dostępne są kompleksowe usługi sieciowe (OGC), takie jak: WCS oraz WMS, a także katalogowe dla sieci (CSW).

Wybrane moduły

Warte zauważenia są moduły (ERDAS moduły, 2020): *IMAGINE AUTO DTM* (automatyczne generowanie NMPT), *IMAGINE Terrain Editor* (narzędzie do edycji danych wysokościowych po nałożeniu na model stereoskopowy), *IMAGINE Photogrammetry* (poprzednio *LPS*, pełny moduł fotogrametryczny służący do tworzenia ortofotomap), *IMAGINE Expansion Pack* (zaawansowany moduł do wizualizacji realistycznych 3D i tworzenia NMT z danych radarowych, pomiar na modelu stereoskopowym), *ATCOR* (korekcja atmosferyczna), *IMAGINE Objective* (klasyfikacja/analiza obiektowa), *IMAGINE SAR Interferometry* (interferometria radarowa), *Spatial Modeler* (analizy przestrzenne). Niektóre z tych modułów są dostępne również jako rozszerzenia programu Geomedia Professional.

Więcej szczegółów na temat tego wiodącego w teledetekcji oprogramowania oraz dostęp do podręcznika użytkownika (ERDAS podręcznik, 2020) można uzyskać na stronie internetowej ERDAS IMAGINE: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine> (ERDAS, 2020).

5.2.5. PCI Geomatica

Ewa Głowienka

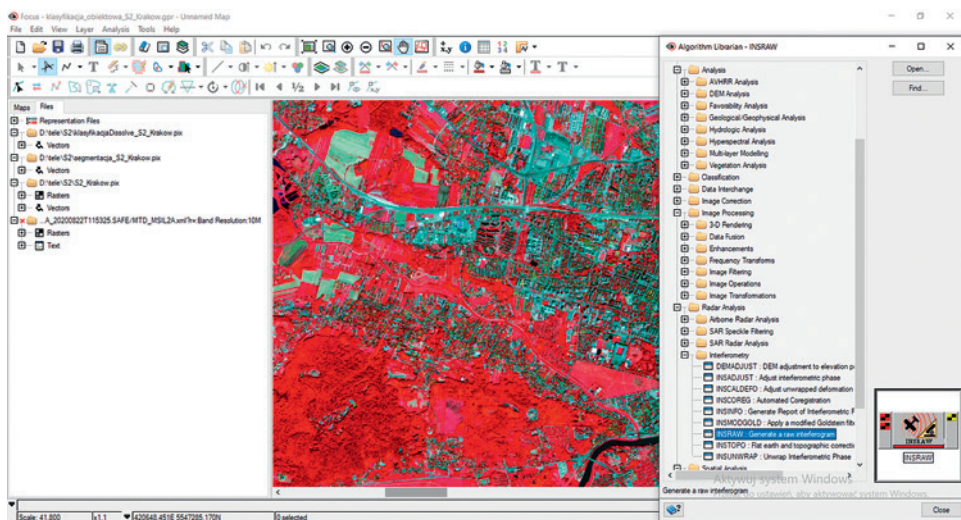
Oprogramowanie PCI Geomatica (PCI Geomatics) oferuje szeroki zestaw narzędzi w zakresie teledetekcji, fotogrametrii cyfrowej, analiz przestrzennych, tworzenia opracowań kartograficznych czy mozaikowania danych rastrowych. Pakiety narzędzi PCI Geomatica zebrane są w odpowiednich modułach (np. *Focus*, *OrthoEngine*, *Pansharpening*, *ATCOR*)

Interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika oprogramowania PCI Geomatica, podobnie jak wcześniej omówionych programów do przetwarzania danych teledetekcyjnych, zapewnia intuicyjny dostęp do narzędzi i zarządzania wyświetlaniem i manipulacją danymi (ryc. 5.25).

Moduły fotogrametryczne

Silną stroną oprogramowania PCI Geomatica jest moduł *OrthoEngine* służący do ge-



Ryc. 5.25. Interfejs oprogramowania PCI Geomatica (moduł Focus)

nerowania ortofotomap na podstawie zobrazowań satelitarnych. W module dostępne są także funkcje pomocne do przetwarzania zdjęć lotniczych oraz pozyskanych z BSP (*Geomatica Banff*).

Moduły teledetekcyjne

Moduły teledetekcyjne w oprogramowaniu PCI Geomatica umożliwiają m.in. korekcję atmosferyczną (ATCOR), analizy obrazu, detekcję zmian na obrazach, klasyfikację zobrazowań opartych na metodzie pikselowej oraz na podejściu obiektowym (GEOBIA, moduł *Geomatica's Object Analyst*), zarówno w przypadku obrazów optycznych, jak i danych radarowych (SAR).

W przypadku pikselowego podejścia do klasyfikacji zobrazowań satelitarnych dostępne są takie algorytmy jak równoległościaków, minimalnych odległości oraz maksymalnego prawdopodobieństwa.

Analizy rastrowe

Jednym z głównych zadań oprogramowania PCI Geomatica jest korekcja geometryczna i radiometryczna obrazów teledetekcyjnych. W przypadku analiz na rastrowych dostępne są proste analizy, takie jak obliczanie wskaźników i reklasyfikacja.

Analizy wektorowe

W oprogramowaniu PCI Geomatica użytkownik ma dostęp do prostych analiz wektorowych dzięki narzędziu *Focus-Spatial Analyst*. Zaawansowane analizy wektorowe GIS nie są dostępne w tym programie.

Wymiana danych

Poszczególne moduły PCI Geomatica są zintegrowane w jednym środowisku, co zapewnia dobrą organizację pracy z geodanymi. Oprogramowanie posiada własny format zapisu danych, zarówno rastrowych, jak i wektorowych w jednym pliku typu PCIMSKI (*.pix). Taki sposób zapisu umożliwi szybki dostęp do nich. Jeden plik może składać się z warstw różnego typu, dotyczących tego samego terenu, np. obrazu satelitarnego

oraz wyników jego klasyfikacji, pól treningowych, sygnatur spektralnych, danych radarowych, NMT, danych wektorowych itd. Oprogramowanie PCI Geomatica jest systemem otwartym, tzn. akceptuje formaty wielu uznanych programów jak: ENVI (L3Harris), ERDAS IMAGINE (Hexagon), ArcGIS (Esri) czy AutoCAD (Autodesk).

W oprogramowaniu PCI Geomatica istnieje możliwość importu, wizualizacji i przetwarzania szerokiej gamy dostępnych obecnie obrazów rejestrowanych przez sensory satelitarne, lotnicze oraz BSP. Długa lista obsługiwanych formatów danych oraz sensorów jest aktualizowana na bieżąco przez kanadyjskiego producenta. PCI Geomatica pozwala użytkownikom rozszerzać funkcjonalności oprogramowania o własne procedury i algorytmy przygotowane w języku Python (PCI Geomatica, 2020).

Wybrane moduły

Funkcjonalność PCI Geomatica, na którą warto zwrócić uwagę, to m.in. tworzenie ortofotomap satelitarnych, w tym mozaikowanie (*OrthoEngine*) oraz możliwość łączenia obrazów o różnej rozdzielczości przestrzennej, czyli zwiększanie rozdzielczości obrazu wielospektralnego z użyciem obrazu panchromatycznego (moduł *Focus – Algorithm Librarian*).

Więcej szczegółów na temat oprogramowania PCI Geomatica oraz dostęp do materiałów szkoleniowych (Geomatica materiały, 2020) użytkownik może znaleźć na stronie internetowej PCI Geomatics: <https://www.pcigeomatics.com> (Geomatica, 2020).

5.2.6. eCognition

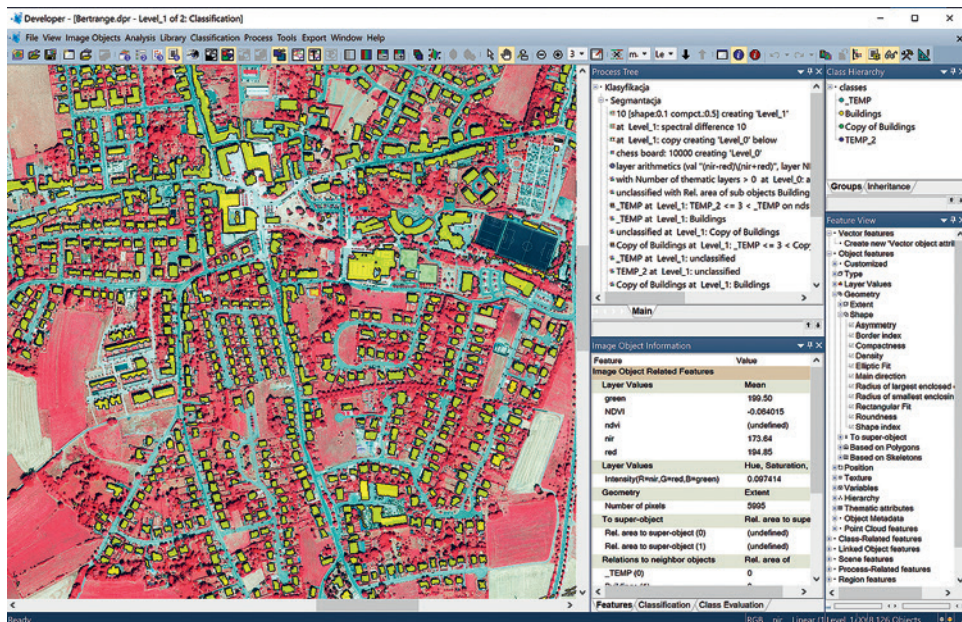
Karolina Zięba-Kulawik, Piotr Wężyk

Rosnąca dostępność wysokorozdzielczych i wielospektralnych zobrazowań satelitarnych wymusiła gwałtowny rozwój w dziedzinie zautomatyzowanych analiz danych obrazowych, a co za tym idzie, pojawienie się na rynku specjalistycznych programów przeznaczonych do automatycznej segmentacji i klasyfikacji obrazu. Niewątpliwie czołowe miejsce wśród tych programów zajmuje produkt eCognition (Trimble Geospatial).

Dzięki zastosowaniu zaawansowanych metod klasyfikacji opartych m.in. na zasadach logiki rozmytej, eCognition jest narzędziem służącym do analizy obrazów w każdej skali, poczynając od analizy obrazów mikroskopijnych struktur komórkowych (np. rozpoznanie komórek nowotworowych w medycynie), a kończąc na zobrazowaniach satelitarnych (np. wykrywanie sylwetek samolotów bojowych na lotniskach). Oprogramowanie eCognition zawiera pakiet zaawansowanych algorytmów umożliwiających przeprowadzenie procesów analizy obiektowej (ang. *Object Based Image Analysis*, OBIA) często nazywanej także *Geographic Object-Based Image Analysis*, GEOBIA) w celu ekstrakcji informacji z gromadzonych zobrazowań i innych geodanych (warstw wektorowych, rastrowych, chmur punktów LiDAR). Poza radiometrycznymi, statystycznymi i geometrycznymi cechami obiektów, oprogramowanie analizuje także zachodzące między nimi relacje, zarówno poziome (z obiektami sąsiadującymi), jak i pionowe (z obiektami znajdującymi się powyżej lub poniżej, na pogrupowanych hierarchicznie poziomach segmentacji obrazu). Funkcje oprogramowania eCognition pozwalają na automatyzację przetwarzania obrazów w kierunkach: kartowania terenu, rozpoznawania obiektów czy detekcji zmian. Oprogramowanie eCognition oferowane jest w wersjach: Suite (Developer, Architekt oraz Server) oraz Essentials.

Interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika oprogramowania eCognition (ryc. 5.26) zapewnia standardowy dostęp do narzędzi analizy i zarządzania danymi przez menu i pasek narzędzi. Dodatkowo użytkownik ma do dyspozycji okna usprawniające pracę z analizą obrazów: okno zarządzania zbiorem reguł (*Process Tree*), okno informacji o cechach obiektów (*Image Object Information*), panel hierarchii klas (*Class Hierarchy*) oraz panel cech obiektów (*Feature View*).



Ryc. 5.26. Interfejs oprogramowania eCognition Developer (Trimble Geospatial) z zestawem reguł klasyfikacyjnych (*Process Tree*, *Rule-set*) prowadzących do klasyfikacji budynków na podstawie lotniczej ortofotomapy CIR (GSD 0,25 m), znormalizowanego numerycznego modelu pokrycia terenu (zNMPT) oraz warstwy wektorowej

Moduły fotogrametryczne

Oprogramowanie eCognition nie zawiera typowych modułów fotogrametrycznych, gdyż służy wyłącznie analizie obiektowej obrazów.

Moduły teledetekcyjne

Rozpoczynając pracę w środowisku oprogramowania eCognition, użytkownik definiuje zestaw obrazów i kanałów spektralnych, na podstawie których opatentowany algorytm wykonuje segmentację. Każdemu kanałowi można przyporządkować odpowiednią wagę, zwiększając w ten sposób jego istotność w procesie segmentacji. Segmentacja rozpoczyna się od analizy pojedynczych pikseli, których zgrupowania tworzą następnie większe obiekty (segmenty). Decyzje o połączeniu segmentów podejmowane są przez użytkownika z zastosowaniem parametru skali (ang. *scale*), który ma bezpośredni wpływ na wielkość powstających obiektów (segmentów). Pozostałymi kryteriami homogeniczności definiowanymi przez użytkownika są kolor (barwa; związane z wartościami w poszczególnych kanałach spektralnych) oraz kształt (geometria

obiekty; np. tworząca wielobok regularny czy też okrąg). Istotnym zagadnieniem klasyfikacji GEOBIA, poza parametrami segmentacji, jest wybór odpowiedniego algorytmu (ryc. 5.27). W programie eCognition zaimplementowano następujące algorytmy segmentacyjne:

- tzw. szachownicy (ang. *Chessboard Segmentation*), drzewa czwórkowego (ang. *Quadtree Based Segmentation*), filtru kontrastu (ang. *Contrast Filter Segmentation*), podziału kontrastu (ang. *Contrast Split Segmentation*),
- wielopoziomowej segmentacji (ang. *Multiresolution Segmentation*),
- wielowarunkowy (ang. *Multi-Threshold Segmentation*),
- wieloprotocowe algorytmy, tj. algorytm wielopoziomowy + segmentacja różnic spektralnych (ang. *Spectral Difference Segmentation*); drzewa czwórkowego + segmentacja różnic spektralnych (ang. *Spectral Difference Segmentation*),
- segmentacja przez zmianę kształtu (ang. *Segmentation by Reshaping Algorithm*), do której należy algorytm drzewa czwórkowego + segmentacja wielowarunkowa – wersja „powiększanie regionów” (ang. *Region Grow*).

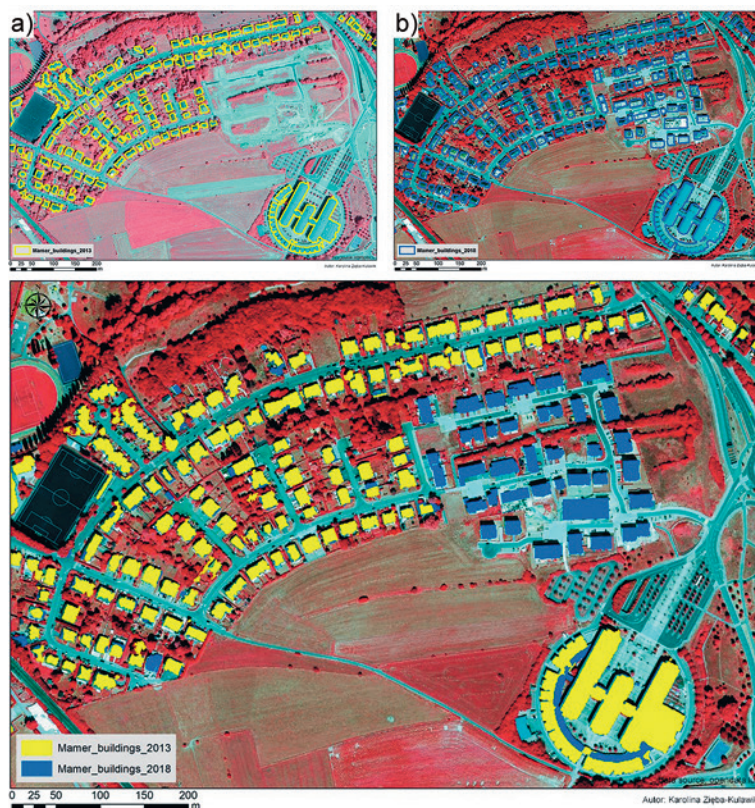


Ryc. 5.27. Przykład segmentacji (Multiresolution Segmentation) z zastosowaniem różnych parametrów (shape; compactness) w celu wyodrębnienia budynków (źródło: Zięba-Kulawik i in. 2020)

Proces klasyfikacji obiektowej w oprogramowaniu eCognition Developer bazuje na wielu parametrach definiujących odpowiednie klasy. Parametry bezpośrednio opisujące obiekty to te związane z wartościami w poszczególnych kanałach spektralnych, czyli wartość jasności obiektu (obliczana jako średnia jasność pikseli tworzących ten obiekt), związane z kształtem obiektu (powierzchnia, obwód, symetria, usytuowanie na obrazie) oraz jego teksturą. Parametry relacji między obiektami opisują ich wzajemne położenie w ramach poszczególnych poziomów segmentacji (np. długość granicy z sąsiednim obiektem). Ważną cechą analizy OBIA jest możliwość definiowania tzw. funkcji użytkownika (np. wygenerowanie wzoru wskaźnika NDVI) bez konieczności obciążania systemu dodatkową warstwą obrazową dodawaną do oprogramowania. Każdy obiekt zdefiniowany w czasie segmentacji może zostać sklasyfikowany parametrycznie, czyli na podstawie ustalonych kryteriów wartości parametrów lub z zastosowaniem metody *k*-najbliższych sąsiadów (ang. *k-nearest neighbours*, kNN).

Oprogramowanie eCognition to bardzo zaawansowane środowisko programistyczne służące do obiektowej analizy obrazu, monitorowania procesów oraz wykrywania zmian, stosowane w wielu naukach (w tym np. w medycynie – radiologia, analiza obra-

zów cyfrowych), przez ekspertów teledetekcji, planistów miejskich, leśników, architektów krajobrazu, ekologów i innych do opracowywania zestawów reguł klasyfikacyjnych wykorzystywanych do automatycznej analizy danych teledetekcyjnych (ryc. 5.28).



Ryc. 5.28. Wykrywanie zmian w rozprzestrzenianiu się zabudowy miejskiej: a) 2013 r. (kolor żółty) i b) 2018 r. (kolor niebieski) (źródło: Zięba-Kulawik i in. 2020)

Analizy rastrowe

W oprogramowaniu eCognition nie zaimplementowano typowych funkcjonalności przestrzennych analiz rastrowych stosowanych w programach z zakresu GIS.

Analizy wektorowe

W programie eCognition nie zaimplementowano typowych funkcjonalności analiz przestrzennych GIS, rozumianych jako analizy na danych wektorowych.

Wymiana danych

Oprogramowanie eCognition umożliwia import oraz eksport danych popularnych formatów takich jak: ASCII, TIF, IMG, JPG, JPEG2000, PNG, BMP, NTF oraz chmur punktów LiDAR LAS/LAZ, dzięki czemu można dokonywać fuzji danych teledetekcyjnych i GIS. Wyniki analizy obiektowej obrazu (po segmentacji i klasyfikacji) mogą być zapisane doliku wektorowego Shapefile ESRI wraz z tabelą atrybutową.

Wybrane moduły

Warto podkreślić, że nowe wersje eCognition (od 2017 roku) wykorzystują technologię głębokiego uczenia (ang. *deep learning*) z biblioteki Google Tensor Flow™ (CNN), przez co oprogramowanie zapewnia użytkownikowi wysoce wyrafinowane narzędzia do rozpoznawania wzorców i ich korelacji, które automatyzują proces klasyfikacji obiektów zainteresowania w celu szybkiego uzyskania dokładniejszych wyników. Oprogramowanie eCognition zapewnia dostęp do nowych algorytmów uczenia maszynowego. Nowe zaimplementowane narzędzia obejmują dający się wyszkolić model siatki neuronowej (ang. *Convolutional Neural Network*, CNN) i algorytmy automatycznego generowania próbek, trenowania sieci i stosowania modelu, a także możliwość zapisywania i ładowania modeli do eCognition.

Szczegółowe informacje o oprogramowaniu oraz dostęp do pomocy technicznej i forum użytkowników można uzyskać na stronie internetowej oprogramowania eCognition: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/ecognition> (eCognition, 2020).

6. Zastosowania obrazów satelitarnych, programu Copernicus oraz prezentacja dobrych praktyk w działaniach administracji publicznej

Piotr Wężyk

Do definicji *smart city*, czyli inteligentnego miasta lub metropolii, zdążyliśmy się już przyzwyczaić a większość społeczeństwa wie, że to obszary charakteryzujące się przede wszystkim wysoką jakością życia ich mieszkańców (np. dużym udziałem zieleni miejskiej), zrównoważonym rozwojem uwzględniającym ochronę środowiska, konkurencyjną gospodarką, inteligentnymi sieciami transportowymi, wykorzystaniem energii odnawialnych, wysokiej jakości kapitałem społecznym oraz inteligentnym zarządzaniem publicznym. Zarządzanie jednostkami administracyjnymi poza *smart city*, czyli gminą, powiatem, województwem, regionami (np. Karpaty), czy też na obszarze całego kraju, wymaga wykorzystania technologii geoinformacyjnych i komunikacyjnych na wysokim poziomie zaawansowania. Szczególna rola przypada w tym miejscu aktualnej i wiarygodnej informacji przestrzennej w postaci danych teledetekcyjnych, pochodzących np. z satelitów meteorologicznych. Poza samymi danymi niezmiernie ważne jest środowisko ich przetwarzania (np. w chmurach obliczeniowych) oraz sposób udostępniania informacji mieszkańcom tych obszarów (np. aplikacje, Internet). W przeszłości obrazy satelitarne, zwłaszcza w obszarze zadań publicznych, były głównie wykorzystywane przez pojedyncze instytuty badawcze nadzorowane przez ministerstwa. Ta sytuacja ulega obecnie zmianie. Dane satelitarne dostępne w serwisach wykorzystywane są coraz częściej, m.in. przez służby zarządzania kryzysowego, np. w przypadku wystąpienia powodzi czy pożaru.

W rozdziale zostały przedstawione wybrane serwisy dostarczające danych, produktów i usługi opartych na danych satelitarnych. Innowacyjne technologie, dostępne dla administracji publicznej, w tym technologie satelitarne, aby mogły być powszechnie wykorzystywane do realizacji zadań publicznych muszą być znane przyszłym użytkownikom i powszechnie dostępne. Pomocne w budowaniu świadomości na temat użyteczności danych satelitarnych oraz pozyskiwaniu wiedzy są materiały dydaktyczne, podręczniki oraz ustawiczne szkolenia.

Dzięki bogatej ofercie dostępnych nieodpłatnie danych satelitarnych, infrastruktury technicznej i oprogramowaniu, warunki do implementacji technologii satelitarnych do realizacji zadań publicznych są obecnie nadzwyczaj sprzyjające. Nie wymagają bowiem wysokich nakładów finansowych, a jedynie modyfikacji organizacji pracy w celu włączenia materiałów teledetekcyjnych w procedury i procesy.

Jeszcze nie tak dawno dla administracji publicznej prawdziwą trudnością był proces uruchomienia procedury zamówień publicznych w celu pozyskania danych satelitarnych od komercyjnego dostawcy. Dodatkowych problemów nastroczało pozyskanie ich w określonym terminie (warunki pogodowe), czy konieczność posiadania specjalistycznego oprogramowania do ich przetwarzania w celu przygotowania ostatecznego produktu. Bariery w wykorzystaniu danych satelitarnych była również konieczność

dysponowania odpowiednią infrastrukturą informatyczną do prowadzenia obliczeń i archiwizacji danych oraz zatrudnienie pracowników o wysokich kompetencjach w zakresie geoinformatyki (w tym teledetekcji).

Obecnie istnieją liczne krajowe i zagraniczne platformy internetowe pozwalające użytkownikom (na różnym poziomie ich zaawansowania) w łatwy i przyjazny sposób przeglądać i wykorzystywać obrazy satelitarne oraz inne dane przestrzenne. Dostęp do bogatych zasobów danych teledetekcyjnych, m.in. serwisów Copernicus, oferujących aktualizowane zestawy geodanych (wektorowych i rastrowych), jest obecnie znacznie ułatwiony, a oferowane narzędzia do ich obsługi są przyjazne użytkownikowi i w znacznej mierze intuicyjne. Usługi w zakresie dostępu do danych i informacji również na platformach DIAS (Data and Information Access Services), predefiniowane usługi i produkty, takie jak: mapy indeksów teledetekcyjnych, analizy serii wieloczasowych zdjęć i inne – pozwalają administracji publicznej na bieżącą weryfikację i uzupełnienie danych gromadzonych w urzędach. Świetnym przykładem tego typu usług jest mapa pokrycia terenu Polski i całej Europy (S2GLC – Europe LC, CreoDIAS), opracowana w innowacyjny sposób przez Centrum Badań Kosmicznych – PAN (Gromny i in., 2019) przy zastosowaniu algorytmów uczenia maszynowego oraz baz danych CORINE Land Cover.

W wielu urzędach, agencjach czy państwowych przedsiębiorstwach w Polsce, pracownicy posiadają kompetencje do pozyskiwania danych i ich przetwarzania, np. w obszarze rolnictwa czy leśnictwa. Obecnie w niektórych instytucjach trwają prace nad wdrożeniem zobrazowań satelitarnych oraz wyników ich analiz do procedur administracyjnych celem zwiększenia efektywności postępowania administracyjnego np. w zakresie weryfikacji i kontroli wniosków o pomoc finansową oraz bieżące monitorowanie upraw. Nie ulega wątpliwości, że korzystne dla gospodarki kraju i obywateli byłoby rozpowszechnienie stosowania danych satelitarnych we wszystkich obszarach działania administracji publicznej.

Dane satelitarne znajdują dzisiaj szerokie zastosowanie w bardzo wielu dziedzinach gospodarki. W tabeli 6.1 przedstawiono syntetyczne zestawienie serwisów oraz metod i możliwości wykorzystania danych satelitarnych w wybranych obszarach zastosowania, które szerzej zostały omówione w kolejnych podrozdziałach. Znakiem „+” oznaczono możliwość wykorzystania danych i serwisów satelitarnych w danym obszarze zastosowania (im więcej plusów, tym większe możliwości wykorzystania, więcej zastosowań). Znakiem „-” oznaczono brak informacji nt. możliwości wykorzystania danych bądź analiz na dzień dzisiejszy.

Tabela 6.1. Zastosowanie danych satelitarnych, analiz i serwisów w wybranych obszarach zastosowań

Obszary zastosowań	Serwis	VIS, NIR, SWIR	TIR, MV	RADAR	LiDAR	Klasyfikacja obrazu	Wskaźniki, modele regresyjne	Numeryczne modele matematyczne	Metody
Gospodarka przestrzenna	<ul style="list-style-type: none"> obszary lądowe 	+++	+	+	+++	+++	-	-	klasyfikacja obrazu na potrzeby LULC, modelowanie 3D, interferometria radarowa (monitorowanie osiadania gruntu)
Rolnictwo	<ul style="list-style-type: none"> obszary lądowe 	+++	++	++	+	+++	+++	+++	modele regresyjne (szacowania powierzchni upraw, wielkości pól), modele biofizyczne (modele symulacyjne rozwoju roślin, modelowanie: agrometeorologiczne, ewapotranspiracji, hydrologiczne), modelowanie zagrożenia erozyjnego
Infrastruktura drogowa	<ul style="list-style-type: none"> obszary lądowe 	+++	++	++	++	++	+++	-	modele regresyjne współczynnika szorstkości nawierzchni jezdni, interferometria radarowa (monitorowanie osiadań gruntów, planowanie nowych odcinków dróg)
Gospodarka wodna	<ul style="list-style-type: none"> środowisko morskie obszary lądowe 	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	modelowanie stref zagrożenia powodziowego (modele hydrologiczne i hydrauliczne), modele regresyjne i biofizyczne (modelowanie jakości wód, szacowanie składu fizykochemicznego wód, zasolenia mórz i oceanów)

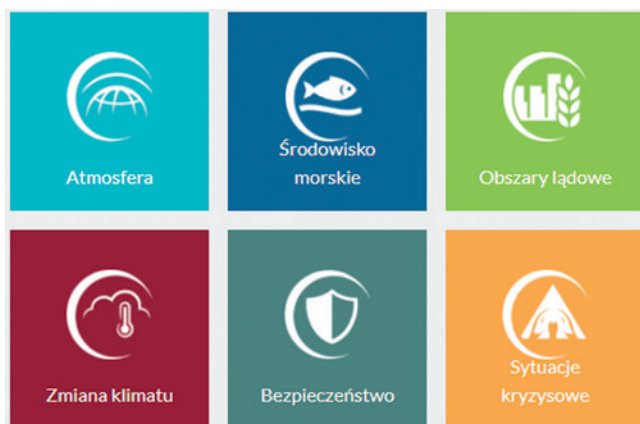
6.1. Serwisy programu Copernicus

Program Copernicus to program obserwacji Ziemi Unii Europejskiej, w ramach którego monitorowane są różne komponenty środowiska. W ramach programu dostępne są dane i usługi dostarczające informacje uzyskane na podstawie analizy obrazów satelitarnych oraz danych z pomiarów naziemnych (*in situ*). Program Copernicus koordynowany i zarządzany przez Komisję Europejską (EC), realizowany jest we współpracy z państwami członkowskimi Unii Europejskiej (EU), Europejską Agencją Kosmiczną (ESA), Europejską Organizacją Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych (EUMETSAT), Europejskim Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF), innymi unijnymi agencjami i instytutem badawczym Mercator Océan. Wielkie zbiory globalnych danych teledetekcyjnych oraz z naziemnych, powietrznych i morskich systemów pomiarowych wykorzystuje się do przygotowania informacji, które mają pomóc usługodawcom, organom publicznym i innym organizacjom międzynarodowym w podnoszeniu jakości życia mieszkańców Europy (Copernicus, 2020a).

W ramach programu Copernicus pozyskiwane są dane satelitarne (np. w ramach misji Sentinel), które są gromadzone i udostępniane użytkownikom za pośrednictwem punktów dostępowych, oferujących również dodatkowe usługi, takie jak analiza danych czy udostępnianie infrastruktury obliczeniowej.

W celu wsparcia użytkowników w wykorzystaniu danych i produktów programu Copernicus (Copernicus, 2020a) przygotowano infrastrukturę, która służy do ich gromadzenia w sześciu obszarach tematycznych (ryc. 6.1):

1. Atmosfera (ang. *Atmosphere*),
2. Środowisko morskie (ang. *Marine*),
3. Obszary lądowe (ang. *Land*),
4. Zmiany klimatu (ang. *Climate change*),
5. Bezpieczeństwo (ang. *Security*),
6. Sytuacje kryzysowe (ang. *Emergency*).



Ryc. 6.1. Logotypy serwisów tematycznych programu Copernicus (źródło: Copernicus pl, 2020)

Użytkownicy serwisów mają zagwarantowany bezpłatny i otwarty dostęp do wszystkich usług informacyjnych świadczonych w ramach programu Copernicus.

Z usług programu Copernicus korzystają najczęściej decydenci i organy publiczne, którzy potrzebują informacji na potrzeby opracowania przepisów prawa i prowadzenia polityki ochrony środowiska lub wsparcia kluczowych decyzji w przypadku sytuacji kryzysowej, takiej jak klęska żywiołowa lub kryzys humanitarny (Copernicus, 2020a).

6.1.1. Atmosfera

W ramach usługi Atmosfera, oferowanej przez program Copernicus, dane oraz informacje dotyczące składu i jakości atmosfery ziemskiej są na bieżąco rejestrowane przez sensory satelitów, analizowane, zapisywane w bazach danych i dostarczane do odbiorców przez Serwis Monitorowania Stanu Atmosfery (ang. *Copernicus Atmosphere Monitoring Services*, CAMS). Usługa CAMS polega głównie na ocenie stanu obecnego atmosfery, jak i predykcji (z kilkudniowym wyprzedzeniem) oraz analizowaniu zgromadzonych danych w poszczególnych bazach tematycznych. Usługa Atmosfera wspiera takie dziedziny jak: zdrowie, monitorowanie środowiska, energia odnawialna, meteorologia czy klimatologia. Serwis Atmosfera dotyczy pięciu głównych obszarów, tj.: jakości powietrza i składu atmosfery, warstwy ozonowej i promieniowania ultrafioletowego (UV), emisji i strumieni powierzchniowych, promieniowania słonecznego oraz tzw. wymuszania klimatycznego, w tym np. koncentracji gazów cieplarnianych (Copernicus Atmosphere, 2020).

Typowymi produktami oferowanymi w ramach tej usługi są: mapy i dane dla regionalnych i lokalnych prognoz jakości powietrza, retrospektywne oceny jakości powietrza, identyfikacja zanieczyszczeń i ich źródeł, poziomy stężenia pyłków w atmosferze, dane służące ocenie kontroli emisji oraz informacje zdrowotne i ostrzeżenia (Copernicus Atmosphere, 2017).

6.1.2. Środowisko morskie

W zakresie obszaru tematycznego Środowisko morskie działa Serwis Monitorowania Środowiska Morskiego (ang. *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, CMEMS), który zapewnia dostęp do systematycznie gromadzonych danych o stanie fizycznym i biogeochemicznym, ich zmienności przestrzennej oraz dynamice parametrów fizycznych ekosystemów oceanicznych i morskich w skali globalnej i europejskiej. Obserwacje i prognozy generowane w ramach usługi CMEMS służą analizom środowiska morskiego w zakresie bezpieczeństwa, zasobów morskich, środowiska przybrzeżnego i morskiego. Serwis dostarcza danych na temat: prądów morskich, wiatrów i lodu morskiego wspierając bezpieczną żeglugę, operacje morskie w tym poszukiwawczo-ratownicze (Copernicus Marine, 2020).

Usługa CMEMS wspiera także zrównoważone gospodarowanie żywymi zasobami mórz oraz ich ochronę (akwakultura, zrównoważone zarządzanie rybołówstwem). Fizyczne (np. poziom, temperatura, prądy) i morskie biogeochemiczne parametry są niezmiernie przydatne w zakresie monitorowania jakości wód (np. zasolenia) i kontroli ich zanieczyszczenia (np. plamy ropy naftowej). Monitorowanie wzrostu poziomu mórz i oceanów jest kluczowym wskaźnikiem procesu postępujących zmian klimatu i jest pomocne w ocenie zagrożenia erozji obszarów przybrzeżnych. Wiele danych dostarczonych w ramach tej usługi (np. temperatura, zasolenie, poziom morza, prądy, wiatr

i lód morski) odgrywa również kluczową rolę w zakresie prognozowania pogody i opisu zmian klimatu (Copernicus Marine, 2020).

6.1.3. Obszary lądowe

W ramach bloku tematycznego Obszary lądowe Europejska Agencja Kosmiczna udostępnia Serwis Monitorowania Obszarów Lądowych (ang. *Copernicus Land Monitoring Service*, CLMS). Przez serwis CLMS użytkownik otrzymuje dostęp do wybranych informacji w zakresie środowiska lądów, m.in. na temat pokrycia i użytkowania terenu (ang. *Land Use Land Cover*, LULC) oraz dynamiki ich zmian, stanu roślinności, cyklu hydrologicznego oraz zmiennych w zakresie energii na powierzchni Ziemi. Usługa CLMS wspiera działania w wielu obszarach, takich jak planowanie przestrzenne i urbanistyczne, gospodarka leśna, gospodarka wodna, rolnictwo i bezpieczeństwo żywnościowe, ochrona przyrody oraz działania w zakresie przywrócenia środowiska naturalnego do stanu pierwotnego, rozwój obszarów wiejskich, rachunkowość ekosystemową oraz łagodzenie negatywnych skutków postępujących zmian klimatu (Copernicus Land, 2020).

Od 2012 roku, usługa CLMS jest wdrażana przez Europejską Agencję Środowiska (ang. *European Environment Agency*, EEA) oraz Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (Copernicus Land, 2020).

Tematyka usługi Obszary lądowe podzielona została na cztery główne komponenty (Land Copernicus, 2020): Dane Globalne, Paneuropejski, Lokalny oraz Obrazów satelitarnych i danych referencyjnych (ryc. 6.2).



Ryc. 6.2. Główne cztery komponenty serwisu Obszary lądowe (ang. Land) Copernicus (źródło: Land Copernicus, 2020)

6.1.3.1. Komponent Dane Globalne (wszystkie kontynenty Ziemi)

Komponent Dane Globalne (ang. *Global*) oferuje analizy wykonywane na danych teledetekcyjnych o stosunkowo niskiej rozdzielczości przestrzennej (np. 1 km czy 330 m GSD). Dostępne są one w skali globalnej dla roślinności (np. wskaźnik NDVI czy LAI (Leaf Area Index) – wskaźnik powierzchni liści, obszary pożarów i in.), lądów i wód (temperatura radiacyjna, jakość wody w jeziorach) oraz dla kriosfery – pokrycie jezior lodem i śniegiem, pokrywa śniegu na lądzie (Land Copernicus Global, 2020).

6.1.3.2. Komponent Paneuropejski

Udostępnianie produktów oferowanych przez komponent Paneuropejski jest koordynowane przez Europejską Agencję Środowiska (EEA). Użytkownik znajdzie tu bazy danych o pokryciu terenu – CORINE Land Cover (CLC), warstwy tematyczne o tzw. wysokiej rozdzielczości (ang. *High Resolution Layers*, HRL), parametrach biofizycznych oraz Europejskiej Służby Ruchu Mas Ziemnych. Poniżej omówione zostaną szczegółowo bazy danych wchodzące w skład tego komponentu, które administracja publiczna może w praktyce wykorzystać w wielu obszarach swego działania (Land Copernicus Pan-European, 2020).

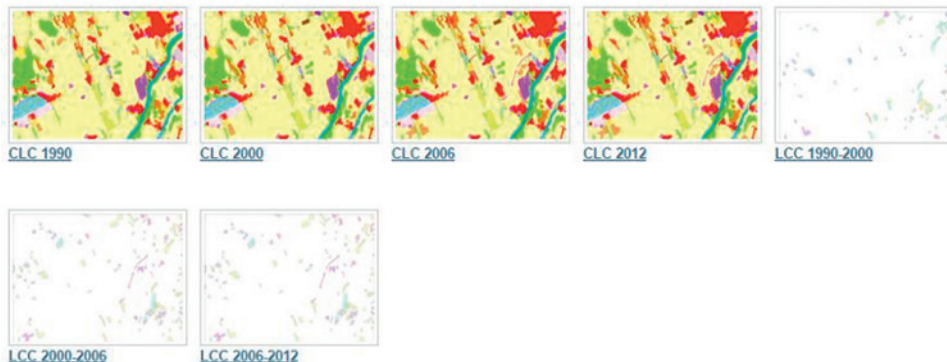
Baza danych CORINE Land Cover

Wartwy informacyjne CORINE Land Cover (CLC) są jednym z działów tematycznych programu CORINE (Coordination of Information on the Environment) prowadzonego przez Europejską Agencję Środowiska (EEA) z siedzibą w Kopenhadze. Istotą programu CLC jest prowadzenie aktualnego zasobu informacji przestrzennej dotyczącej użytkowania i pokrycia terenu (LULC) na obszarze Europy w oparciu o regularne przetwarzanie danych satelitarnych oraz analiz dynamiki zmian zachodzących w poszczególnych krajach UE. Pierwsza baza CORINE LC 1990 została opracowana w oparciu o analizy map topograficznych oraz interpretację klas użytkowania i pokrycia terenu na zobrazowaniach satelitarnych Landsat TM 5 (NASA). Prace rozpoczęły się już w 1985 roku i trwały do roku 1993. Kolejne edycje, czyli aktualizacje baz geometrycznych i opisowych CLC, datowane są kolejno na lata: 2000, 2006, 2012 oraz 2018 (odpowiednio bazy danych: CLC 2000, CLC 2006, CLC 2012 i CLC 2018; GIOŚ, 2020).

W bazie CLC wyróżniono łącznie 44 klasy pokrycia terenu w całej Europie. Minimalna powierzchnia jednostki podlegającej kartowaniu klasy pokrycia terenu CLC1990 wynosiła 25 ha. W przypadku obiektów liniowych kryterium kartowania wyniosło co najmniej 100 m (GIOŚ, 2020).

Baza danych dynamiki zmian pokrycia terenu (pomiędzy terminami wykonania kolejnych edycji CLC) zawiera tzw. mapy różnicowe: CLC 1990-2000, CLC 2000-2006, CLC 2006-2012 oraz CLC 2012-2018 (ryc. 6.3; tabela 6.2). Przy ich tworzeniu zastosowano próg minimalnej powierzchni 5 ha, oraz szerokości poligonu co najmniej 100 m. W przypadku obszaru Polski dane CLC, którymi zarządza GIOŚ (Główny Inspektorat Ochrony Środowiska) zostały zapisane w układzie współrzędnych płaskich PL-1992, co ułatwia pracę administracji publicznej (GIOŚ, 2020).

CORINE Land Cover



Ryc. 6.3. Produkty CLC serwisu CLMS dostępne nieodpłatnie w ramach serwisów EEA (źródło: Land Copernicus CLC, 2020)

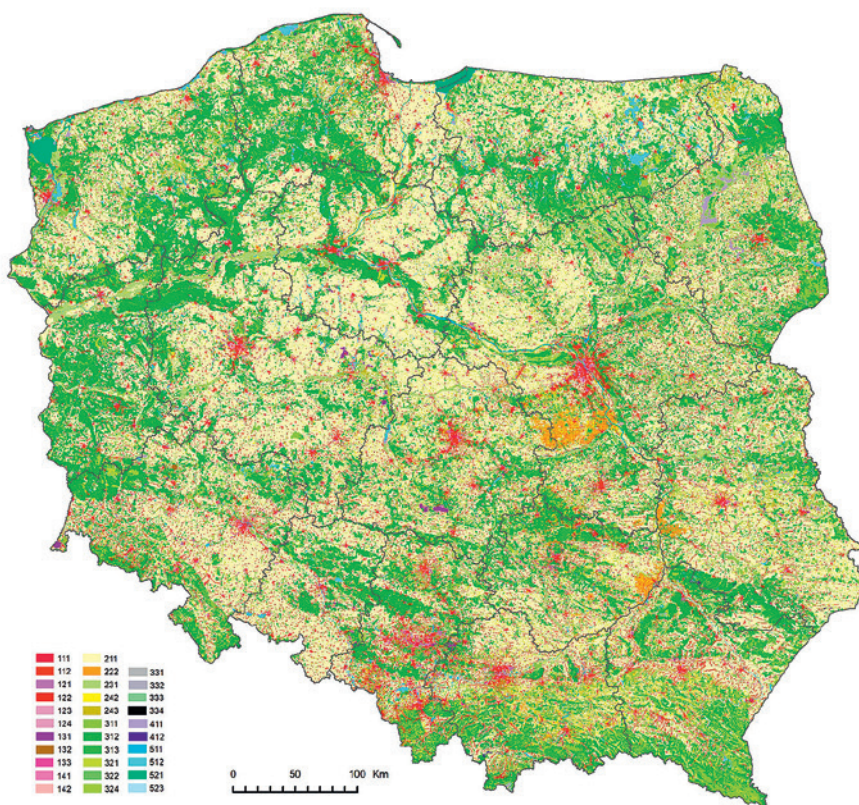
Ostatnia edycja projektu CORINE – Land Cover 2018 realizowana była już w ramach europejskiego programu monitorowania Ziemi (ang. *Copernicus Land Monitoring*, CLM). Podstawowym celem projektu było wykazanie zmian w zasięgu klas LULC, jakie zaszły w latach 2012–2018 oraz stworzenie bazy danych GIS (CLC 2018). W Polsce za opracowanie jednolitej bazy CLC 2018 oraz weryfikację warstw wysokorozdzielczych (stan na rok 2015) i weryfikację komponentów lokalnych (*Urban Atlas 2012*, *Riparian Zones* i *Natura*

2000) odpowiedzialny był Instytut Geodezji i Kartografii (IGiK), jako jeden z Krajowych Centrów Referencyjnych EIONET (Europejskiej Sieci Informacji i Obserwacji Środowiska) do spraw pokrycia terenu. Prace nad projektem CLC 2018 koordynowane były przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (GIOŚ), w którym ulokowany jest Krajowy Punkt Kontaktowy do spraw współpracy z EEA w ramach EIONET. Do kartowania zmian LULC w okresie 2012–2018 oraz opracowania jednolitej bazy CLC 2018 wykorzystano zobrazowania satelitarne (GIOŚ, 2020):

- RapidEye (Planet Labs) oraz IRS-P6 z lat 2011–2012,
- Sentinel-2 (ESA) oraz Landsat 8 (NASA) z 2017 roku.

W trakcie analiz zmian pokrycia i użytkowania terenu wykorzystano dodatkowo archiwalne i aktualne obrazy satelitarne dostępne za pośrednictwem aplikacji Google Earth oraz ortofotomapy lotnicze (usługa WMS udostępniana przez krajowy geoportal infrastruktury informacji przestrzennej (Geoportal, 2020). W wyniku prac nad CLC 2018 powstały następujące bazy danych wraz z metadanymi (GIOŚ, 2020):

- baza zmian LULC – CORINE Land Cover 2012–2018 (CHA18_PL),
- baza pokrycia klas LULC – CORINE Land Cover 2018 (CLC18_PL),
- skorygowana baza CORINE Land Cover 2012 (CLC12_PL) – baza pokrycia i użytkowania terenu.



Ryc. 6.4. Wyniki projektu CORINE Land Cover 2018 dla obszaru Polski (źródło: GIOŚ, 2020)

Wyniki projektu CLC 2018 (ryc. 6.4) obejmują obszar całego kraju wraz ze strefą ok. 1 km wokół granic i udostępniane są nieodpłatnie przez GIOŚ (GIOŚ, 2020) w formie geobazy plikowej ESRI (CLC2018.gdb).

Tabela 6.2. Charakterystyka baz danych CORINE LC opracowanych w okresie 1990–2018

Cecha	CLC1990	CLC2000	CLC2006	CLC2012	CLC2018
Obrazy teledetekcyjne	Landsat 5 MSS/TM pojedyncze sceny	Landsat 7 ETM+ pojedyncze sceny	SPOT-4/5, IRS P6 LISS III	IRS P6 LISS III, RapidEye dual date	Sentinel-2 oraz Landsat 8 jako uzupełnienie
Lata	1986–1998	2000 ± 1 rok	2006 ± 1 rok	2011–2012	2017–2018
Dokładność geometryczna obrazu	≤ 50 m	≤ 25 m	≤ 25 m	≤ 25 m	≤ 10 m (Sentinel-2)
Min. jednostka powierzchni	25 ha/100m	25 ha/100m	25 ha/100m	25 ha/100m	25 ha/100m
Dokładność geometryczna mapy CORINE LC	100 m	lepiej niż 100 m	lepiej niż 100 m	lepiej niż 100 m	lepiej niż 100m
Dokładność tematyczna bazy CORINE LC	≥ 85% prawdopodobnie nie osiągnięto	≥ 85% osiągnięto	≥ 85%	≥ 85% prawdopodobnie osiągnięto	≥ 85%
Kryterium detekcji zmiany (CHA)	brak możliwości	zmiana granic min. 100 m; zmiana pow. ≥ 5 ha; zmiany izolowane ≥ 25 ha	zmiana granic min. 100 m; zmiana pow. poligonu ≥ 5 ha; do mapowania	zmiana granic min. 100 m; zmiana pow. poligonu ≥ 5 ha; do mapowania	zmiana granic min. 100 m; zmiana pow. poligonu ≥ 5 ha; do mapowania
Dokładność tematyczna, CHA	–	nie sprawdzono	≥ 85% osiągnięto	≥ 85%	≥ 85%
Czas produkcji bazy	10 lat	4 lata	3 lata	2 lata	1,5 roku
Dokumentacja	metadane niekompletne	standardowe metadane	standardowe metadane	standardowe metadane	standardowe metadane
Dostęp do (CLC, CHA)	niejednoznaczna polityka dostępu	polityka rozpowszechniania znana od początku	otwarty dostęp	otwarty dostęp	otwarty dostęp
Liczba zaangażowanych krajów	26 (27 krajów zaimplementowało)	30 (35 z późniejszą implementacją)	38	39	39

Cyfrowa mapa CORINE LC 2018 dostępna jest także na stronach serwisu Copernicus (ryc. 6.5) (Land Copernicus CLC2018, 2020), zarówno w wersji rastrowej (rozdzielczość 100 m GSD) jak i wektorowej (geobaza ESRI oraz SQLite).

Show entries

Search:

Name	Year	Type	Format	Version	Size
Corine Land Cover - 100 meter	2018	Raster	100m GeoTiff	v2020_20u1	125.0 MB
Corine Land Cover - ESRI FGDB	2018	Vector	ESRI Geodatabase	v2020_20u1	5.0 GB
Corine Land Cover - GeoPackage	2018	Vector	SQLite Database	v2020_20u1	3.5 GB

Previous Next

Ryc. 6.5. Okno dostępu do baz danych CLC 2018 z serwisów EEA (źródło: Land Copernicus CLC2018, 2020)

Baza danych warstw wysokorozdzielczych (HRL)

Warstwy wysokorozdzielcze (HRL) prezentują podstawowe formy pokrycia terenu i zostały wytworzone w procesie automatycznej klasyfikacji serii wieloczasowych wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Warstwy te (ryc. 6.6) zostały przygotowane na zlecenie Europejskiej Agencji Środowiska (ang. *European Environment Agency*, EEA) dla łącznie 39 państw europejskich (28 krajów UE, 5 krajów EEA oraz 6 państw współpracujących: Republiki Albanii, Bośni i Hercegowiny, Czarnogóry, Republiki Kosowa, Republiki Macedonii Północnej i Republiki Serbii) (Land Copernicus CLC2018, 2020).

High Resolution Layers



Ryc. 6.6. Warstwy HRL udostępnione na serwerach EEA (źródło: Land Copernicus HRL, 2020)

Z danych z 2012 roku przygotowane zostały warstwy wysokorozdzielcze (HRL) o rozdzielczości przestrzennej 20×20 m GSD dla obiektów (IGIK CORINE HRL2012, 2020):

- tereny nieprzepuszczalne (ang. *Imperviousness*),
- tereny zadrzewione/zwarcie i typy lasów (ang. *Tree Cover Density/Forest Type*),
- trwałe użytki zielone (ang. *Permanent Grassland*),
- obszary podmokłe (ang. *Wetlands*),
- zbiorniki wodne (ang. *Water Bodies*).

Na podstawie danych z 2015 roku przygotowane zostały następujące warstwy wysokorozdzielcze (HRL) o rozdzielczości przestrzennej 20×20 m GSD (IGIK CORINE HRL2015, 2020):

- tereny nieprzepuszczalne (ang. *Imperviousness*),
- tereny zadrzewione/zwarcie i typy lasów (ang. *Tree Cover Density/Forest Type*),
- tereny pokryte roślinnością trawiastą (ang. *Grassland*),
- zbiorniki wodne i obszary podmokłe (ang. *Water and Wetness*),
- obszary zakrzewione (ang. *Small Woody Features*),
- place budowy (ang. *Construction Sites*) bez widocznych aktualnych prac budowlanych.

Do tzw. obszarów nieprzepuszczalnych (ang. *Imperviousness*) zaliczono: osiedla mieszkaniowe, obszary komunikacyjne (lotniska, porty, stacje kolejowe, parkingi), tereny przemysłowe i handlowe, parki rozrywki (bez terenów zielonych), place budowy z widocznymi aktualnie pracami budowlanymi, pojedyncze domy (gospodarstwa) oraz inne powierzchnie nieprzepuszczalne bez przyległych do nich terenów zielonych (np.: ogródki działkowe, cmentarze, tereny sportowe i kempingi z widoczną infrastrukturą, drogi i koleje związane z innymi obszarami nieprzepuszczalnymi, umocnione brzegi zbiorników wodnych, szklarnie, panele słoneczne, tereny trwale pokryte plastikiem (IGIK CORINE HRL2015, 2020).

Warstwa tematyczna terenów leśnych (zadrzewionych; ang. *Forest*) obejmuje natomiast: drzewa liściaste i iglaste, sady, gaje oliwne, plantacje owocowe, obszary rolno-leśne, szkółki leśne, lasy w fazie regeneracji oraz w stanie zmian, zadrzewione parki i ogrody, drzewa na obszarach miejskich, elementy infrastruktury leśnej, infrastrukturę wewnątrz lasu (drogi leśne, pasy przeciwpożarowe itp.) o szerokości poniżej 20 m, obszary uszkodzonych lasów (częściowo spalone, wiatrołomy, tereny uszkodzeń spowodowanych przez gradację szkodników (IGIK CORINE HRL2015, 2020).

Do klasy obejmującej tereny pokryte roślinnością trawiastą (ang. *Grassland*, przed rokiem 2015 określane jako trwałe użytki zielone) metodyka HRL (2015) zaliczyła: łąki, półnaturalne użytki zielone oraz naturalną roślinność trawiastą, przy założeniu iż roślinność pokrywa okresowo tego typu obszar w co najmniej 30%. Jako produkt ekspercki dodano tzw. wskaźnik orki (ang. *Ploughing Indicato*, PLOW). Szczegółowe informacje w zakresie metodyki oraz kolejnych zmian wprowadzonych w roku 2018 (np. rozdzielczość 10 m GSD) czytelnik może znaleźć w podręczniku użytkownika CLMS (Land Copernicus HRL 2018 User Manual, 2020).

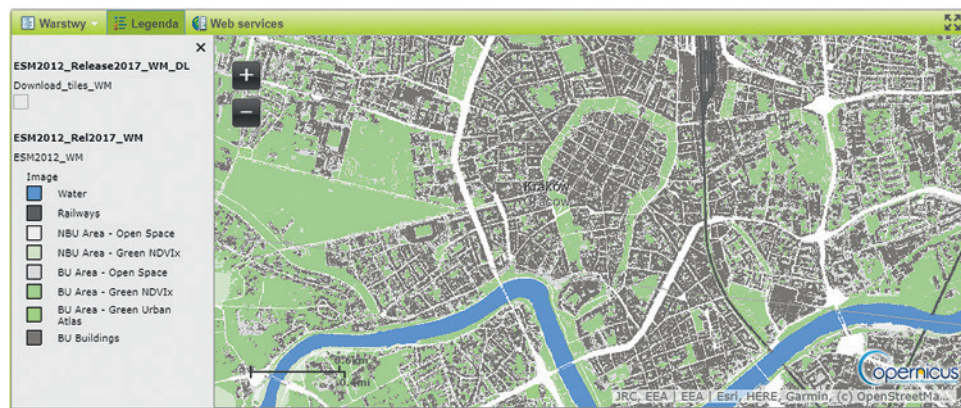
Zbiorniki wodne i obszary podmokłe (ang. *Water and Wetness*) to klasa HRL zawierająca takie obiekty, jak: wody stałe (obszary pokryte wodą $\geq 80\%$ wszystkich obserwacji satelitarnych), tj.: stałe jeziora śródlądowe (naturalne), stałe stawy rybne, zbiorniki retencyjne, naturalne stawy (trwałe, otwarte, śródlądowe powierzchnie wodne lub przybrzeżne tereny podmokłe), rzeki, kanały stale wypełnione wodą, wody przybrzeżne (laguny, estuaria), obszary z płynnymi ściekami oraz powierzchnie wodne z roślinnością, wody okresowe – czyli tymczasowe powierzchnie wód związane z trwałymi jednolitymi częściami wód (np. oscylującymi obszarami brzegowymi zbiorników), okresowe jeziora naturalne i sztuczne jeziora, okresowe rzeki, obszary powodziowe, okresowo zalewane pola rolnicze, delty rzek oraz okresowo zalewane obszary (z powodu topniejącego śniegu, powodzi lub deszczu). W warstwie *Water and Wetness* występują też tzw. trwałe podmokłe obszary (co najmniej 60% wszystkich obserwacji satelitarnych): obszary porośnięte trzciną, torfowiska, mokradła, okresowo wilgotne obszary (25–60% wszystkich obserwacji satelitarnych) – np. śluzy śródlądowe, okresowe mokradła, okresowo mokre pola uprawne czy okresowo mokre łąki (IGIK CORINE HRL2015, 2020).

Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie, który pełni funkcję jednego z krajowych centrów referencyjnych EIONET ds. pokrycia terenu (ang. *National Reference Centres*, NRC Land Cover) był odpowiedzialny za weryfikację, ocenę jakości i poprawę czterech warstw wysokorozdzielczych HRL w rozdzielczości 20×20 m dla Polski. Każda z czterech warstw podlegała następnie weryfikacji i integracji przez Europejską Agencję Środowiska (EEA). Ocena dokładności każdej z warstw w rozdzielczości przestrzennej 100×100 m jest aktualnie prowadzona przez EEA (IGIK CORINE HRL, 2020).

Baza danych osadnictwa (European Settlement Map)

Europejska mapa osadnictwa z 2016 roku (ang. *European Settlement Map*, EMS) to przestrzenny zbiór danych rastrowych. Mapa prezentuje osadnictwo w Europie i została wykonana na podstawie klasyfikacji 3599 scen satelitarnych SPOT-5 i SPOT-6 wykonanych w latach 2010–2013. Zwana jest również „EUGHSL2016” i przedstawia procent pokrycia obszaru zabudową na jednostkę przestrzenną. Metoda opracowania warstwy GHSL (Global Human Settlement Layer) wykorzystuje techniki uczenia maszynowego w celu wykrycia systematycznych relacji między cechami morfologicznymi i teksturalnymi, wyodrębnionymi z kanałów wielospektralnych i panchromatycznych obrazów SPOT-5 i -6 opisujących osadnictwo w Europie (ESM, 2017).

Kolejna edycja mapy ESM 2015 to produkt zawierający wynik przetworzeń scen satelitarnych: Pléiades, Deimos-02, WorldView-2, WorldView-3, GeoEye-1 oraz Spot-6 i -7 z lat 2014-2016 pozyskanych w ramach działania Copernicus VHR_IMAGE_2015 (JRC, 2019). Mapa ESM jest dystrybuowana przez EEA jako produkt przedstawiający gęstość zabudowy zagregowanej do 100 m oczka rastra (EMS, 2017). W niedalekiej przyszłości planowane jest również udostępnienie tego produktu w formie rastrowej o rozdzielczości przestrzennej 10 m GSD (ryc. 6.7).



Ryc. 6.7. Klasy z warstwy HRL – European Settlement Map fragmentu Krakowa (źródło: ESM, 2017)

6.1.3.3. Komponent Lokalny

Komponent Lokalny serwisu Obszary lądowe zawiera bazy danych: *Urban Atlas*, *Riparian Zones*, *Natura2000* oraz *Coastal Zones* (Land Copernicus Local, 2020), które zostaną przedstawione poniżej.

Bazy danych Urban Atlas

Baza danych Atlasu Miast (ang. *Urban Atlas*, UA) Komponentu Lokalnego zapewnia porównywalne w całej Europie dane dotyczące użytkowania gruntów i pokrycia terenu dla funkcjonalnych obszarów miejskich (ang. *Functional Urban Areas*, FUA). Urban Atlas jest wspólną inicjatywą Dyrekcji Generalnej Komisji Europejskiej ds. Polityki Regionalnej i Miejskiej oraz Dyrekcji Generalnej ds. Przedsiębiorstw i Przemysłu w ramach programu Copernicus, przy wsparciu Europejskiej Agencji Kosmicznej oraz Europejskiej Agencji

Środowiska. Do tej pory pojawiły się już dwie edycje UA (2006 oraz 2012). Urban Atlas przedstawia strefy funkcjonalne obszarów miejskich i zawiera szczegółowe dane o użytkowaniu i pokryciu terenu (ang. *Land Use Land Cover, LULC*) opracowane dla najbardziej zaludnionych miast europejskich (> 50 tys. mieszkańców; Land Copernicus UA, 2020).

Baza Urban Atlas opracowana w 2006 roku obejmowała 301 europejskich miast, natomiast edycja z 2012 roku aż 695. Urban Atlas uwzględnia obiekty o minimalnej powierzchni 0,25 ha dla klas miejskich i 1,0 ha dla pozostałych klas. Wyróżniono 17 klas miejskich (w tym 5 klas zabudowy o różnej gęstości) o minimalnej jednostce powierzchni (ang. *Minimum Mapping Unit, MMU*) 0,25 ha oraz 10 klas wiejskich o MMU 1,0 ha związanych z innymi formami pokrycia terenu. Dla wybranych miast opracowane zostały również szczegółowe bazy zmian dla okresu 2006–2012 (Land Copernicus UA, 2020).

W 2018 roku Instytut Geodezji i Kartografii dokonał uszczegółowienia produktu Urban Atlas 2012 przez dodanie informacji o użytkowaniu terenu. Jako dane referencyjne wykorzystano krajową bazę obiektów topograficznych BDOT10K (IGIK LC, 2020).

Urban Atlas 2006 dotyczy 319 jednostek FUA w całej Europie z liczbą ponad 100 tys. mieszkańców, zgodnie z definicją Urban Audit. Dane przestrzenne można pobierać nieodpłatnie wraz z mapą dla każdego obszaru miejskiego i raportem z metadanymi. Bazę danych Urban Atlas 2012 opracowano dla 785 jednostek FUA obejmujących 28 krajów UE, Europejskie Stowarzyszenie Wolnego Handlu (ang. *European Free Trade Association, EFTA*), Bałkany Zachodnie oraz Turcję. Zmiany granic FUA, jakie nastąpiły w ostatnich dekadach spowodowały, że rozszerzeniu lub zawężeniu uległo 188 z nich, a pojawiły się 154 zupełnie nowe obszary. Tylko 443 obszary pozostały bez zmian (ryc. 6.8) (EEA, 2018).

Powierzchnia opracowania Urban Atlas dla polskich miast wynosiła 82 004 km² (26,2% kraju). Obecnie trwają zaawansowane prace nad edycją nowej bazy Urban Atlas 2018. Dla części miast Zachodniej Europy produkty są już dostępne na serwerach EEA (Land Copernicus UA, 2020).

W tej samej lokalizacji dostępne są warstwy prezentujące zmiany, które zaszły w latach 2012–2018 (ang. *Urban Atlas Change 2012–2018*) dla wybranych miast europejskich (Land Copernicus UA, 2020). Opracowanie dla Polski jest w trakcie przygotowania.



Ryc. 6.8. Mapa serwisu Urban Atlas (źródło: EEA, 2018)



Ryc. 6.9. Wizualizacja bazy danych Urban Atlas 2012 dla obszaru fragmentu Warszawy (źródło: EEA, 2012a)

Poza wcześniej opisanymi warstwami w zasobach Urban Atlas istnieją także takie bazy danych, jak drzewa przyuliczne (ang. *Street Tree Layer*, STL; ryc. 6.10) (EEA, 2012b) dla roku 2012 oraz 2018 (dla Polski w opracowaniu), wysokości budynków (ang. *Building Height 2012*) (EEA, 2012c) oraz dane demograficzne (ang. *Population Estimates by Urban Areas polygon*) (EEA, 2012e).

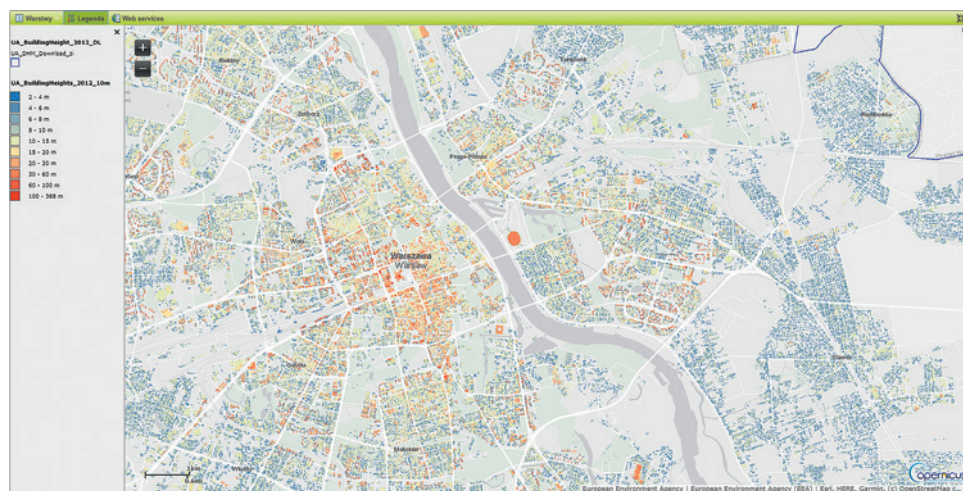
Warstwa STL powstała w oparciu o klasyfikację wielospektralnych obrazów satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości (Pléiades, KOMPSAT, Planet, SPOT-6, SuperView, 2–4 m GSD). Minimalną szerokość kartowanego pasa zieleni przyulicznej ustalono na poziomie 10 m, a powierzchnię biogrup > 500 m² (EEA, 2012b). Dane STL nie obejmują zwartych obszarów leśnych położonych w granicach miasta lub w bezpośred-



Ryc. 6.10. Warstwa Street Tree Layer (2012) dla obszaru Krakowa (źródło: EEA, 2012b)

nim ich sąsiedztwie. W wielu miastach Europy tego typu dane będą mogły posłużyć do przygotowania map jakości życia przedstawiających tzw. usługi ekosystemowe (ang. *Ecosystem Services*, ES) świadczone przez drzewa w miastach w aspekcie miejskich wysp ciepła tj. opisujących pozytywny wpływ drzew na przeciwdziałanie nagrzewaniu się powierzchni dróg i budynków.

Z bazy danych Urban Atlas 2012 można również pobrać warstwę wysokości budynków (ang. *Building Height 2012*; ryc. 6.11) (EEA, 2012c) o rozdzielczości przestrzennej 10 m GSD, opracowaną dla 31 stolic europejskich. Warstwa znormalizowanego modelu wysokościowego powstała przez zastosowanie stereoskopowych obrazów z satelity IRS-P5. Na ich podstawie wygenerowano numeryczny model pokrycia terenu (NMPT), od którego odjęto wysokość terenu pozyskaną z numerycznego modelu terenu (NMT) w wyniku czego uzyskano znormalizowany numeryczny model pokrycia terenu (zNMPT, ang. *normalised Digital Surface Model*, nDSM) (EEA, 2012c).



Ryc. 6.11. Wysokości budynków w Warszawie wizualizowane w portalu Urban Atlas (źródło: EEA, 2012c)

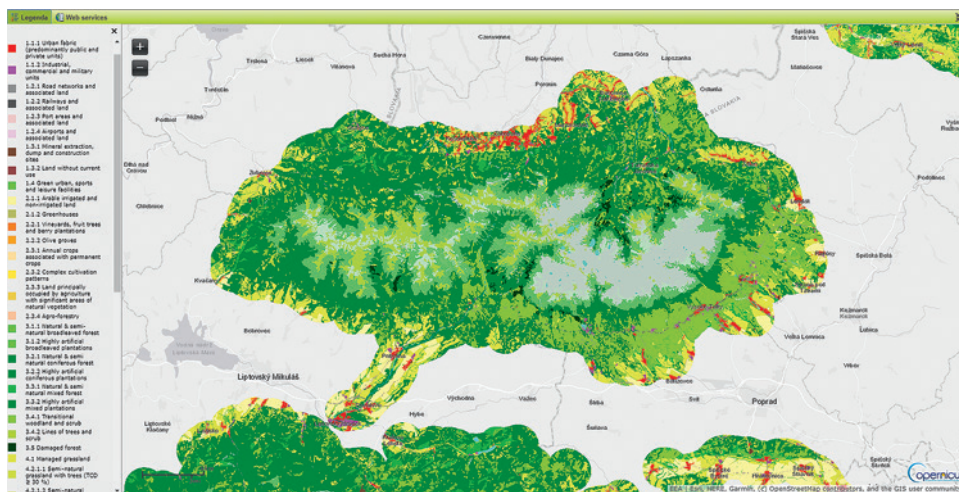
Baza danych stref nadrzecznych

Baza stref nadrzecznych (ang. *Riparian zones*) zawiera szczegółowe dane o klasach LULC występujących w strefach nadrzecznych oraz ich potencjalnych i aktualnych zasięgach przestrzennych. Analiza dotyczy największych rzek Europy, a zastosowana legenda jest hierarchiczna, odpowiada czwartemu poziomowi CORINE LC (80 klas) i jest zgodna z koncepcją kartowania i oceny ekosystemów oraz ich usług (ang. *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services*, MAES). Warstwa *Riparian zones* uwzględnia obiekty o minimalnej powierzchni 0,5 ha i minimalnej szerokości 10 m (Land Copernicus RZ, 2020).

Europejska Sieć Natura 2000

Natura 2000 (N2K) to sieć obszarów tworzonych dla ochrony zagrożonych w skali Europy siedlisk przyrodniczych oraz gatunków roślin i zwierząt. Obszary N2K wytypowane zostały we wszystkich 28 krajach UE, zarówno na lądzie, jak i na morzu. Celem sieci jest zapewnienie długoterminowego przetrwania najcenniejszych i najbardziej za-

grożonych gatunków i siedlisk w Europie, wymienionych w Dyrektywie Ptasiej i Dyrektywie Siedliskowej. Baza danych N2K dostępna przez CLMS zawiera szczegółowe dane o klasach LULC dla wybranych obszarów Natura 2000 wraz ze strefą buforową 2 km (EEA, 2012d). Zastosowana legenda LULC jest typu hierarchicznego, odpowiada czwartemu poziomowi legendy CLC (80 klas) i jest zgodna z koncepcją MAES. W bazie Natura 2000 uwzględnione są obiekty o minimalnej powierzchni 0,5 ha i szerokości 10 m. Klasyfikację wykonano metodą półautomatyczną na podstawie wysokorozdzielczych zobrażeń satelitarnych (SPOT-5 i -6 oraz Pléiades) pozyskanych w latach 2011–2014. W 2017 roku dokonano przeglądu nomenklatury w celu harmonizacji, w skutek czego zmniejszono liczbę klas. W warstwie N2K (ryc. 6.12) rozróżnia się obecnie 55 klas tematycznych LULC (EEA, 2012d).



Ryc. 6.12. Mapa obszarów Natura 2000 Tatr polskich (kod: PLC120001) i słowackich (kod: SKCHVU030) z klasami CORINE LC (źródło: EEA, 2012d)

Baza danych Coastal Zones

Baza danych stref przybrzeżnych (ang. *Coastal Zones*) obejmuje 10 km strefę łądu wzdłuż europejskiej linii brzegowej w celu monitorowania dynamiki zmian pokrycia terenu zachodzących w strefach przybrzeżnych. Dane te pozwalają na lepszą koordynację wzrostu gospodarczego krajów i regionów nadmorskich, przy jednoczesnej ochronie środowiska wybrzeża, jako podstawy dobrobytu mieszkańców Unii Europejskiej (Copernicus Land, 2020).

6.1.3.4. Komponent obrazów satelitarnych i danych referencyjnych

Bazy danych komponentu Obrazów satelitarnych i danych referencyjnych zawierają takie produkty jak: EU-DEM, EU-HYDRO, LUCAS, European Image Mosaic oraz Global Image Mosaic (Land Copernicus Dane, 2020).

Model EU-DEM to paneuropejski numeryczny model powierzchni terenu, który opisać można jako hybrydę modelu DTED z misji SRTM (sensor mikrofalowy) oraz ASTER Global DEM (sensor optyczny). Dokładność (RMSE) modelu EU-DEM określa się na około 2,9 m (Land Copernicus DEM, 2020).

Baza EU-Hydro obejmuje wszystkie 39 krajów (członków EEA), zapewniając użytkownikom dostęp do danych o europejskiej sieci rzek, spójnej z tzw. jednolitymi częściami wód (ang. *water bodies*; jezior i dużych rzek zgodnie z Dyrektywą Wodną) oraz do modelu sieci hydrologicznej (Land Copernicus Hydro, 2020).

Baza danych LUCAS jest jedną z długookresowych europejskich baz danych, która służyła do weryfikacji i walidacji szeregu usług informacyjnych w ramach usługi monitorowania obszarów lądowych Copernicus. Komponent udostępnia jednolite paneuropejskie mozaiki satelitarne po przeprowadzonym procesie ortorektyfikacji. Serwis zapewnia również dostęp do usługi globalnej mozaiki stworzonej z obrazów Sentinel-2 (Land Copernicus LUCAS, 2020).

6.1.4. Zmiana klimatu

W ramach obszaru tematycznego Zmiana klimatu Europejska Agencja Kosmiczna uruchomiła Serwis Monitorowania Zmian Klimatu (ang. *Copernicus Climate Change Service, C3S*), w którym dostarczane są informacje o historycznym, obecnym i przyszłym klimacie Europy oraz reszty świata. Zadaniem C3S jest wspieranie polityki adaptacji i łagodzenia skutków zmian klimatu przez zapewnianie spójnych i wiarygodnych informacji. Serwis oferuje bezpłatny i otwarty dostęp do danych i narzędzi dotyczących zmian klimatu. Opiera się na badaniach klimatu przeprowadzonych w ramach Światowego Programu Badań Klimatu (ang. *World Climate Research Programme, WCRP*) i odpowiada wymaganiom użytkowników określonym przez Globalny System Obserwacji Klimatu (ang. *Global Climate Observing System, GCOS*). Usługa C3S jest wdrażana także przez Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF*) na zlecenie Komisji Europejskiej (KE). ECMWF jest niezależną organizacją międzyrządową wspierającą państwa członkowskie UE i inne stowarzyszone państwa przez opracowywanie numerycznych prognoz pogody i monitorowanie systemów planetarnych, które wpływają na pogodę, prowadzenie badań naukowych i technicznych w celu poprawy umiejętności prognozowania oraz utrzymywanie archiwum danych meteorologicznych (Copernicus CC, 2020).

6.1.5. Bezpieczeństwo

W zakresie obszaru tematycznego Bezpieczeństwo został opracowany i udostępniony Serwis Bezpieczeństwa (ang. *Copernicus Security Service, CSS*). Dane z serwisu CSS wspierają działania w różnych obszarach polityki Unii Europejskiej, umożliwiając zwiększenie skuteczności w zakresie zapobiegania sytuacjom kryzysowym, zwiększając stopień gotowości i czasu reakcji w sytuacjach zagrożeń, skuteczności ochrony granic UE (ograniczenie ofiar śmiertelnych wśród imigrantów, walka z przestępczością i inne), nadzoru w strefie morskiej (bezpieczeństwo żeglugi, wspieranie kontroli rybołówstwa, zwalczanie zanieczyszczania morza) oraz wsparcia działań zewnętrznych Wspólnoty (sytuacje kryzysowe, misje humanitarne itp. (Copernicus SS, 2020).

6.1.6. Sytuacje kryzysowe

W ramach usługi w obszarze tematycznym Sytuacje kryzysowe udostępniany jest

Serwis Zarządzania Kryzysowego (ang. *Copernicus Emergency Management Service*, CEMS), który dostarcza aktualnych i rzetelnych geodanych uzyskanych za pomocą teledetekcji satelitarnej. Wykorzystane w serwisie EMS dane satelitarne uzupełnione są o dane ze źródeł *in situ* lub otwartych danych dla podmiotów zaangażowanych w zwalczanie klęsk żywiołowych. Usługa EMS składa się z dwóch komponentów: opracowania produktów kartograficznych (komponent mapowy) oraz wczesnego ostrzegania (Copernicus E, 2020).

Komponent mapowy dostarcza kompilacje mapowe tworzone na podstawie obrazów satelitarnych dla terenów całego świata. Usługa działa od 1 kwietnia 2012 roku i prowadzona jest przez Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (ang. *Joint Research Centre*, JRC) (Copernicus EM, 2020).

Komponent wczesnego ostrzegania składa się z trzech systemów europejskich: Europejskiego Systemu Informowania o Powodziach (ang. *European Flood Awareness System*, EFAS), Europejskiego Systemu Informacji o Pożarach Lasów (ang. *European Forest Fire Data Center*, EFFIS), Europejskiego Obserwatorium ds. Susz (ang. *European Drought Observatory*, EDO) oraz trzech systemów globalnych: Globalnego Systemu Informowania o Powodziach (ang. *Global Flood Awareness System*, GloFAS), Globalnego Systemu Informowania o Pożarach (ang. *Global Wildfire Information System*, GWIS), oraz Globalnego Obserwatorium ds. Susz (ang. *Global Drought Observatory*, GDO; (Copernicus E, 2020).

6.2. Gospodarka przestrzenna

Beata Hejmanowska

Gospodarka przestrzenna jest dziedziną zarówno naukową, jak i praktyczną, bardzo bliską człowiekowi, ponieważ dotyczy kształtowania otaczającej nas przestrzeni. W opracowaniach i analizach przygotowywanych szczególnie w skali regionalnej, krajowej czy europejskiej bardzo często wykorzystywane są dane satelitarne.

6.2.1. Serwis Copernicus na potrzeby gospodarki przestrzennej

Przykładem wykorzystania danych CORINE LC (CLC) są opracowania regionalne, krajowe, czy też wykonywane na poziomie europejskim, szczególnie do obserwacji dynamiki zmian użytkowania terenu. Właśnie na podstawie informacji zawartych w bazie CLC 2012 określono lesistość Polski na poziomie 30,8% (Hościło i Tomaszewska, 2015). Metodyka tworzenia warstw CLC, przewiduje, że „LAS” to obszar porośnięty drzewostanem o wysokości min. 5 m i zwarciu poziomym koron > 30%. Oczywiście określenie wysokości drzew bezpośrednio na zobrazowaniach Landsat nie jest możliwe i należy korzystać z innych źródeł informacji, jak np. bazy branżowe (np. Bank Danych o Lasach, BDL) czy też modelach wysokościowych (np. zNMPT; ISOK GUGiK). Temat lesistości był kontynuowany w następnych latach w badaniach realizowanych przez IGIK w Warszawie, z wykorzystaniem warstw wektorowych Leśnej Mapy Numerycznej (LMN) Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasów Państwowych (PGL LP), map topograficznych BDOT10k oraz innych źródeł geodanych. Służyły one przeprowadzeniu walidacji produktu HRL (High Resolutions Layers – Forests) z serwisu CLMS (Hościło i in., 2016). Osza-

cowana lesistość Polski według autorów tego opracowania wyniosła aż 32%, wskazując na około 800 tys. ha lasów więcej, niż oficjalne dane Głównego Urzędu Statystycznego (GUS). Gdyby lesistość Polski określać według definicji Protokołu z Kioto, to wynosiłaby ona aż 33,5%. Oznaczałoby to tym samym, że główny cel Krajowego Programu Zwiększania Lesistości (KPZL), zakładający przybliżenie Polski do średniej europejskiej – 33%, został już osiągnięty (zakładano to dopiero na rok 2050). Uznanie 800 tys. ha lasów (za drzewień), które nie są ujęte w aktualnej ewidencji gruntów (obszary sukcesji wtórnej na gruntach porolnych) ma dla Polski ogromne znaczenie w zakresie sekwestracji dwutlenku węgla, handlu emisjami gazów cieplarnianych czy bioróżnorodności i znaczenia tych obszarów pod kątem retencji wód.

Innym przykładem wykorzystania bazy CLC w badaniach nad zmianami struktury krajobrazu obszarów chronionych w Polsce, mogą być prace realizowane w ośmiu parkach narodowych, dla których zweryfikowano przydatność geodanych CLC 2000 do zarządzania tymi obszarami (Kozieł, 2008). Wybrane do analiz parki narodowe charakteryzują się różnymi typami krajobrazu przyrodniczego. Kategorie klas pokrycia terenu CLC 2000 porównano z danymi pochodzącymi z roczników statystycznych. Autor wykorzystał oprogramowanie Patch Analyst 3.1 do określenia metryk i wskaźników krajobrazowych do scharakteryzowania struktury krajobrazowej analizowanych obszarów. Spośród ośmiu analizowanych obszarów chronionych największą różnorodnością krajobrazową charakteryzował się Wigierski Park Narodowy, natomiast najniższe wskaźniki różnorodności odnotowano dla Świętokrzyskiego Parku Narodowego. Dodatkowo w pięciu na osiem analizowanych parkach narodowych Kozieł (2008) stwierdził istotne zmiany w strukturze krajobrazu w ciągu ostatnich dziesięciu lat (CLC 1990-CLC 2000).

Bardzo ciekawą analizę zmian klas LULC przeprowadzono na obszarze województwa łódzkiego na podstawie danych z bazy CORINE Land Cover przygotowanej w latach 2000, 2006, 2012 i 2018 (Nalej, 2019). Badania wykazały, że dominującą formą pokrycia terenu województwa łódzkiego były tereny rolnicze. Drugą pozycję pod względem powierzchni zajmowała klasa lasy i ekosystemy seminaturalne, a trzecią – tereny antropogeniczne. Największe zmiany, bo zajmujące aż 1% powierzchni województwa, nastąpiły w latach 2012–2018. Nieco mniejsze zmiany (0,9%) zaszły w latach 2006–2012, a najmniejsze (0,6%) zanotowano w okresie od 2000 do 2006 roku. Badanie przestrzennego umiejscowienia zmian pokrycia terenu wykazało, że największe ich nasilenie wystąpiło w południowej części województwa (eksploatacja złóż węgla brunatnego w KWB Bełchatów). W trzech rozpatrywanych okresach zidentyfikowane zmiany pokrycia terenu były związane głównie z budową autostrad A1 i A2 oraz drogi ekspresowej S8.

Baza danych CLC 2000 była wykorzystywana w Polsce również w procesie wyznaczania obszarów ESE Natura 2000 oraz sporządzania planów gospodarowania wodami dorzeczy zgodnie z Dyrektywą Wodną (Bielecka i Ciołkosz, 2007).

Z danych z bazy CORINE LC korzystano także w licznych analizach przestrzennych związanych z kartowaniem usług ekosystemów (ang. *Ecosystem Services*, ES) czyli korzyści płynących ze środowiska dla ludzi (Mikołajczyk, 2015), oceną oddziaływania dróg krajowych na środowisko (Bohatkiewicz i in., 2008), Koncepcją Zagospodarowania Przestrzennego Kraju (KZPK 2013), oceną skutków powodzi (Bielecka i Ciołkosz, 1998) czy monitorowania kondycji roślinności (Dąbrowska-Zielińska i in., 2015).

Dane Urban Atlas 2012 wykorzystano też do opracowania ważnego raportu przygotowanego przez Europejską Agencję Środowiska (EEA) pt. „Adaptacja miast do zmian klimatu w Europie. Wyzwania i szanse dla miast wraz ze wspierającymi politykami krajo-

wymi i europejskimi”, który wskazuje na bardzo poważne zagrożenia płynące ze strony kataklizmów (powódzie, fale upałów, susza i in.) dla miast europejskich (EEA, 2012a).

W przypadku mapy EMS (mapa osadnictwa), dla większości badań ogólnoeuropejskich rozdzielczość przestrzenna 100 m GSD, może okazać się wystarczająca, niemniej jednak dla analiz regionalnych i lokalnych prawdopodobnie należy zastosować lepszą rozdzielczość, tj. np. 10 m GSD w celu analizy gęstości zabudowy i jej tekstury (Florczyk i in., 2016).

Ustanowienie obszarów Sieci Ekologicznej Natura 2000 (N2K) w Polsce pociągnęło za sobą również potrzebę dostosowania ustawodawstwa oraz rozpowszechnienia dobrych praktyk w zakresie prowadzenia gospodarki leśnej na tych obszarach. O ile w przypadku siedlisk priorytetowych N2K należało się liczyć z pewnymi ograniczeniami dla wybranych form zabiegów gospodarczych czy hodowlanych, to dla pozostałych siedlisk te ograniczenia nie oznaczają znaczących zmian w sposobie prowadzenia zabiegów (Szwagrzyk, 2008). Przeprowadzanie np. Ocen Oddziaływania na Środowisko (OOS) dla sporządzanych co dziesięć lat Planów Urządzenia Lasu, szczególnie w obszarach N2K, stało się już normą akceptowalną zarówno przez leśników jak i ekologów.

6.2.2. Przykłady zastosowań danych teledetekcyjnych w gospodarce przestrzennej

Istotnym krokiem w kierunku upowszechniania wykorzystania danych teledetekcyjnych w planowaniu przestrzennym było opracowanie (Borsa i in., 2017), w którym przedstawiono teledetekcyjne źródła danych przestrzennych dla potrzeb planowania przestrzennego i zarządzania przestrzenią, zaprezentowano międzynarodowe i krajowe projekty badawczo-rozwojowe MOLAND, GEOLAND-2, Urban Atlas i UrbanSAT oraz przykłady dobrych praktyk, m.in. projekty: MONIT-AIR, Cyfrowa Łódź 3D, G-SIP Konstancin-Jeziorna, monitorowanie szkód górniczych na terenie Bytomia czy analiza zieleni miejskiej we Wrocławiu.

Projekty: MOLAND, GEOLAND-2, Urban Atlas i UrbanSAT dotyczyły kartowania obszarów zurbanizowanych. Projekty różnią się skalą, czyli wielkością Minimalnych Jednostek Kartowania (ang. *Minimum Mapping Unit*, MMU), liczbą wydzielanych klas, obszarem opracowania i rozdzielczością czasową (tabela 6.3).

Tabela 6.3. Wybrane międzynarodowe i krajowe projekty badawczo-rozwojowe (Borsa i in., 2017)

Projekt	Liczba klas	MMU	Liczba miast	Lata
MOLAND	99	1 ha	40	1950–1990
GEOLAND-2/Urban Atlas	20	0,25 ha	697	co 6 lat, od 2006
UrbanSAT	6	50 m	Warszawski Obszar Metropolitarny	2002–2008

Realizację projektu MOLAND (Monitoring LandUse/Cover Dynamics), który początkowo nazywał się MURBANDY (Monitoring Urban Dynamics), rozpoczęto w 1998 roku i kontynuowano pod tą nazwą w ramach piątego Programu Ramowego Komisji Europejskiej. Prace nad projektem koordynowało Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (ang. *Joint Reserach Centre*, JRC) w Isprze, we Włoszech. Celem projektu MOLAND

było monitorowanie rozwoju obszarów miejskich wraz z identyfikacją trendów rozwojowych w skali regionalnej i lokalnej (skala makro i mikro). Główny nacisk został położony na opracowanie modelu prognostycznego, który oparto o metodę automatów komórkowych (ang. *cellular automation*). Mapy użytkowania natomiast tworzono metodą fotointerpretacji obrazów satelitarnych (IRS, SPOT, IKONOS) oraz archiwalnych zdjęć lotniczych lub zdjęć z satelitów wojskowych. Technologie wypracowane w tym projekcie stanowią cenny materiał w badaniach związanych z planowaniem przestrzennym.

Projekt GEOLAND-2, kontynuował zadania poprzedniego projektu pod tytułem GEOLAND, finansowano go z funduszy GMES (obecnie COPERNICUS) i był realizowany w latach 2008–2012 przez międzynarodowe konsorcjum, w skład którego wchodziło 51 partnerów z 21 krajów, w tym dwa polskie instytuty: Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN) oraz Instytut Geodezji i Kartografii (IGiK). Projekt GEOLAND-2 miał na celu opracowanie podstaw dla tworzonego serwisu Copernicus (Obszary lądowe, LMCS), a jego produktem był Urban Atlas, który został utworzony w oparciu o wyostrome obrazy satelitarne o rozdzielczości przestrzennej (GSD) 2,5 m (SPOT-5, ALOS, QuickBird-2, RapidEye) metodą klasyfikacji hybrydowej (automatyczno-wizualnej).

W porównaniu do globalnej skali projektów MOLAND i GEOLAND-2 skalę projektu UrbanSAT należy uznać za lokalną. Projekt realizowano w latach 2009–2012 z funduszy Europejskiej Agencji Kosmicznej, koordynatorem było CBK PAN (początkowo Techmex S.A.), a partnerami w projekcie – Uniwersytet Jagielloński i Uniwersytet Rolniczy z Krakowa, Instytut Systemów Przestrzennych i Katastralnych (ISPIK) S.A. z Gliwic, SmallGIS z Krakowa, GeoVille GmbH z Innsbrucka (Austria), Infoterra GmbH z Friedrichshafen (Niemcy). Na potrzeby projektu wydzielono stosunkowo niewiele klas, w tym: budynki, powierzchnie nieprzepuszczalne, użytki zielone, lasy, nieużytki i obszary wodne. Do kartowania wykorzystano obrazy IKONOS-2 o rozdzielczości przestrzennej 1 m GSD oraz zastosowano metodę klasyfikacji obiektowej OBIA. W ramach projektu powstała również aplikacja wspomagająca tworzenie planów zagospodarowania przestrzennego (UrbanSAT Planowanie) umożliwiająca standaryzację planów zagospodarowania terenu i wykorzystanie produktów teledetekcyjnych.

Podsumowując, można stwierdzić, że teledetekcja wraz z narzędziami GIS stanowi cenne wsparcie dla gospodarki przestrzennej, ponieważ z jednej strony dostarcza danych do inwentaryzacji stanu obecnego, a z drugiej pozwala na analizę danych archiwalnych i prognozowanie.

Planowania przestrzennego dotyczą również krajowe projekty uznane za dobre praktyki (Borsa i in., 2017), a mianowicie:

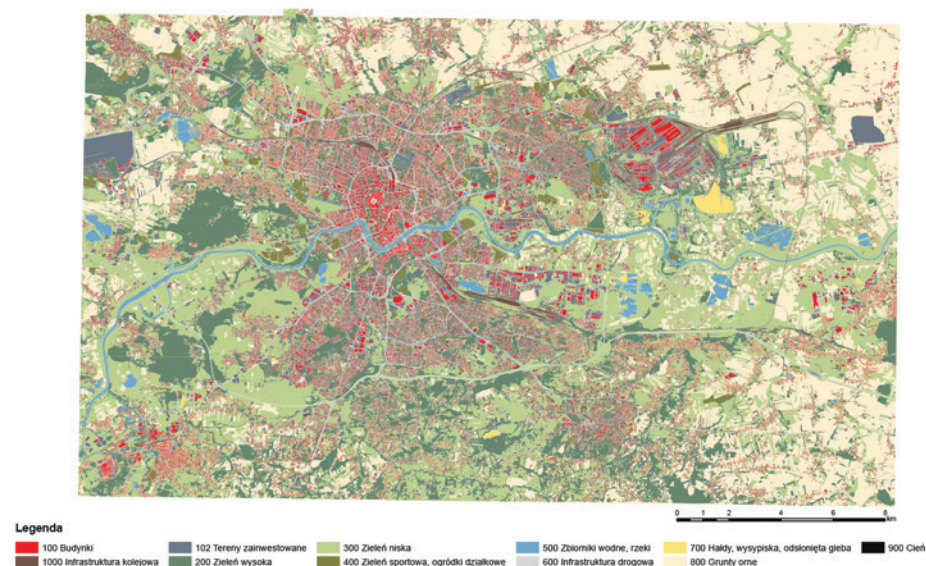
- MONIT-AIR projekt realizowany przez Urząd Miasta Krakowa ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego 2009–2014 (EEA Grants) przy współpracy IMGW,
- Cyfrowa Łódź 3D – projekt realizowany przez Miejską Pracownię Urbanistyczną w Łodzi w latach 2014–2017,
- G-SIP Konstancin-Jeziorna – projekt realizowany przez Biuro Informatyzacji i Infrastruktury Informacji Przestrzennej Urzędu Miasta i Gminy Konstancin-Jeziorna od 2013 roku.

Dobrym przykładem praktycznego wykorzystania bazy danych Urban Atlas 2012 był projekt MONIT-AIR realizowany na obszarze aglomeracji Krakowa. Celem projektu było stworzenie mapy pokrycia i użytkowania Krakowa, do czego wykorzystano zobrazowa-

nia satelitarne WorldView-2 (DigitalGlobe) oraz dane LiDAR. W projekcie zastosowano analizę obiektową obrazu GEOBIA, wspomagając się dodatkowo warstwami tematycznymi GIS (np. sieć komunikacyjna czy granice własności). Dane z UA2012 poddane zostały uszczegółowieniu i walidacji na podstawie scen satelitarnych WorldView-2 pozyskanych w 2014 roku. W ramach projektu MONIT-AIR opracowany został „Atlas pokrycia terenu i przewietrzania Krakowa” (red. Bajorek-Zydroń i Wężyk, 2016).

Część kartograficzna opracowania obejmuje sześć map tematycznych, w tym pokrycia i szorstkości terenu oraz roślinności rzeczywistej Krakowa. Ważnym komponentem opracowania był model przewietrzania miasta oparty o bardzo dużą ilość zmiennych wyjaśniających (typ pokrycia terenu, albedo obiektów, roślinność, kolor dachów, spadki i ekspozycje dachów i inne) opracowanych na podstawie analizy GEOBIA scen satelitarnych, chmur punktów ALS oraz danych GIS (wektorowych i rastrowych), a także pomiarów *in situ* profili prędkości wiatru (urządzenie pomiarowe SODAR).

Wyniki projektu są do dziś wykorzystywane przez pracowników Urzędu Miasta Krakowa oraz IMGW do modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza, a zgeneralizowana mapa pokrycia terenu została przekazana do Biura Planowania Przestrzennego UM Krakowa (ryc. 6.13). Również Zarząd Zieleni Miejskiej (ZZM) UM Krakowa szeroko wykorzystuje mapy środowiskowe opracowane w ramach projektu MONIT-AIR, szczególnie charakterystyki poszczególnych dzielnic miasta pod kątem jakości życia mieszkańców (wskaźnik wypełnienia zielenią, indeks VV2VB).



Ryc. 6.13. Zgeneralizowana mapa pokrycia i użytkowania Krakowa
(źródło: Bajorek-Zydroń i Wężyk, 2016)

Innym projektem, który można zaliczyć do dobrych praktyk jest Cyfrowa Łódź 3D. Celem projektu było, m.in. opracowanie metod wspierania procesów planistycznych, w szczególności na potrzeby konsultacji społecznych dotyczących MPZP (Miejscowych Planów Zagospodarowania Przestrzennego). Działania podejmowane w ramach projektu obejmowały np. utworzenie modeli 3D istniejącej zabudowy (na podstawie ukończonych zdjęć lotniczych, ortofotomapy oraz danych ze skanowania laserowego), mode-

lowanie 3D zabudowy projektowanej oraz inwentaryzację zieleni miejskiej. W aspekcie dobrych praktyk należy podkreślić, że zastosowana metodyka pozwala na zminimalizowanie kosztów związanych z wywiadem terenowym, możliwość szybkiego wydobycia parametrów geometrycznych budynków (wysokość, powierzchnie dachów), utworzenie łatwego w interpretacji materiału na potrzeby opiniowania i konsultacji społecznych umożliwiającego modyfikację wizualizacji w czasie rzeczywistym oraz możliwość przeprowadzenia na modelu analiz przestrzennych, w tym analiz zacienienia i widoczności.

Z kolei celem projektu G-SIP Konstancin-Jeziorna było udostępnienie rzetelnych danych przestrzennych zarówno mieszkańcom, jak i pracownikom urzędu gminy z wykorzystaniem rozwiązań WebGIS OpenSource. Do dobrych praktyk należy zaliczyć uwzględnienie w zestawie udostępnianych danych przestrzennych wieloczasowych ortofotomap, pozyskiwanych cyklicznie każdego roku.

Omawiając dobre praktyki warto jeszcze przytoczyć (Borsa i in., 2017) dwa przedsięwzięcia: monitorowanie szkód górniczych na terenie Bytomia z wykorzystaniem danych LiDAR oraz analizę zieleni miejskiej we Wrocławiu również z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego i ortofotomap lotniczych CIR.

W podsumowaniu dotyczącym wykorzystania obrazów satelitarnych na potrzeby gospodarki przestrzennej należy podkreślić istotę:

- serwisu Copernicus Obszary lądowe,
- baz danych CORINE LC i Urban Atlas tworzonych z wykorzystaniem obrazów satelitarnych średnio – i wysokorozdzielczych (Landsat, SPOT-5, RapidEye, ALOS, QuickBird-2, IKONOS, WorldView-2),
- wysokorozdzielczych ortofotomap lotniczych oraz numerycznych modeli terenu (NMT) i powierzchni terenu (NMPT) utworzonych z wykorzystaniem danych z lotniczego skaningu laserowego w ramach projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju),
- bazy danych obiektów topograficznych (BDOT10K),
- metody hybrydowej klasyfikacji obrazów (automatyczno–wizualna) oraz klasyfikacji obiektowej GEOBIA.

6.3. Rolnictwo

Mariusz Sojka, Joanna Jaskuła, Rafał Wróżyński

Powszechny dostęp do danych satelitarnych, wzrost rozdzielczości czasowej, przestrzennej, spektralnej i radiometrycznej zobrazowań oraz bardzo dynamiczny rozwój narzędzi do przetwarzania danych, umożliwia prowadzenie analiz w różnych skalach przestrzennych (Wężyk i in., 2012). W rolnictwie zobrazowania satelitarne wykorzystywane są do rozpoznania upraw i określania ich powierzchni, monitorowania warunków wzrostu i rozwoju roślin uprawnych, monitorowania kondycji upraw, prognozowania i szacowania plonów, wykrywania obszarów dotkniętych suszą rolniczą, monitorowania przezimowania upraw, oceny zawartości składników pokarmowych, występowania chorób i szkodników, stopnia zachwaszczenia upraw oraz właściwości gleb (zwarości materii organicznej, wilgotności, odczynu pH, zasolenia oraz uziarnienia). Wyniki analiz zobrazowań satelitarnych wykorzystywane są do oceny efektywności zabiegów agrotechnicznych, nawożenia i stosowania środków ochrony roślin oraz planowania nawadniania.

6.3.1. Szacowanie powierzchni upraw za pomocą teledetekcji od skali regionalnej do globalnej

Prowadzenie efektywnej polityki rolnej na poziomach regionalnym, krajowym i globalnym wymaga dysponowania wiarygodnymi i aktualnymi danymi dotyczącymi areалу i struktury upraw oraz prognozowanej wielkości plonów. Wraz z rozwojem technologii obrazowania powierzchni Ziemi, dane teledetekcyjne znalazły zastosowanie w rolnictwie, m.in. do określania powierzchni zajmowanej przez poszczególne uprawy. Obecnie funkcjonujące systemy satelitarne pozwalają na gromadzenie wysokiej jakości aktualnych i wiarygodnych danych (Atzberger i in., 2016), które w połączeniu z danymi pochodzącymi z pomiarów terenowych, danymi statystycznymi oraz szczegółowymi opracowaniami kartograficznymi wykorzystywane są do określania powierzchni upraw rolniczych (Kussul i in., 2016). Realizacja tego zadania stawia przed wykonawcą pewne wyzwania, które wynikają ze zróżnicowania powierzchni upraw, kształtu pól, rozproszenia i zróżnicowania struktury upraw, zróżnicowania terminu wysiewu i fazy fenologicznej uprawy, warunków fizjograficznych, a także stosunkowo dużej zmienności czasowej struktury upraw. Ponadto w przypadku szacowania powierzchni upraw w skali ponadlokalnej należy wziąć pod uwagę trudności wynikające ze zróżnicowania systemu prowadzenia uprawy, fazy wzrostu oraz kultury rolnej (Craig i Atkinson, 2013).

W związku z przedstawionymi powyżej wyzwaniami wymagane jest wypracowanie metodyki teledetekcyjnego szacowania powierzchni upraw dostosowanych do lokalnych uwarunkowań oraz warunków środowiskowych. Dostarczenie wysokiej jakości produktu w postaci wiarygodnego spisu upraw wraz z określeniem ich powierzchni wymaga opracowania metodyk referencyjnych lub przygotowania zbioru dobrych praktyk w zakresie określenia parametrów danych satelitarnych, metod pozyskiwania danych podczas pomiarów naziemnych, opracowania metod analizy oraz walidacji końcowych produktów. W wielu krajach na świecie podejmowane były liczne próby wypracowania metodyk referencyjnych teledetekcyjnego monitorowania powierzchni upraw. W procesie przygotowania metodyki można wyróżnić następujące etapy:

- określenie sieci obszarów testowych,
- określenie struktury upraw na obszarach testowych na podstawie danych terenowych,
- przetwarzanie danych i obliczenie powierzchni upraw,
- walidacja wyników (Ray i Neetu, 2017).

Szczególne znaczenie z punktu widzenia jakości końcowego produktu ma określenie powierzchni testowych, w których w kolejnym etapie powadzone będą szczegółowe analizy bazujące na wynikach pomiarów terenowych i analiz zobrazowań satelitarnych. Obszary testowe mają najczęściej kształt kwadratu o zróżnicowanym rozmiarze boków. Dla przykładu, w Polsce stosuje się pola testowe o rozmiarze boku wynoszącym 1 km, a w Indiach 5 km. Wybór pól testowych prowadzony jest w dwóch etapach.

W pierwszym kroku na obszar objęty analizą nakładana jest siatka pól testowych o założonym rozmiarze oczka, następnie dokonuje się stratyfikacji pól jednostkowych pod kątem intensywności produkcji rolniczej. W tym celu wykorzystywane są wskaźniki prezentujące procentowy udział użytków rolnych, jakości rolniczej przestrzeni produkcyjnej oraz średnią wielkości plonów, które opracowywane są na podstawie map użytkowania ziemi, map glebowo-rolniczych oraz danych statystycznych GUS.

Jednym z przykładów stratyfikacji pól/segmentów może być ich podział na klasy w zależności od udziału upraw rolniczych w pojedynczym segmencie: klasa I – powyżej 50%, klasa II – od 30 do 50%, klasa III – od 15 do 30% i klasa IV – poniżej 15%. Następnie metodą losową spośród każdej z klasy pól/segmentów jednostkowych wybierane są pola/segmenty badawcze. W obrębie wybranych pól/segmentów badawczych prowadzone są szczegółowe analizy terenowe, na podstawie których możliwe jest określenie rzeczywistej powierzchni upraw.

Jak wskazano w raporcie z 2008 roku, opracowanym przez Instytut Ochrony i Bezpieczeństwa Obywateli (ang. *Institute for the Protection and Security of the Citizen*, IPSC), który wchodzi w skład Wspólnego Centrum Badawczego Komisji Europejskiej (ang. *Joint Research Centre*, JRC) (Gallego i in., 2008), w przypadku braku danych pochodzących z pomiarów terenowych zalecane jest dokonanie analizy wizualnej (fotointerpretacji) wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych lub zdjęć lotniczych. Ponadto powierzchnia upraw w wytypowanych polach/segmentach badawczych może być określana na podstawie analizy wieloczasowej serii niskorozdzielczego satelity EO1 (MODIS) i średniorozdzielczych obrazów z satelitów SPOT-5 (Vegetation 2) i Resourcesat-2 (AWiFS) lub na podstawie pojedynczych średniorozdzielczych obrazów Sentinel-2 (MSI), Landsat 8 (OLI) czy Resourcesat-2 (LISS III). W Azji południowej i południowo-wschodniej, ze względu na wysokie zachmurzenie podczas sezonu deszczowego, wykorzystywane są zobrazowania radarowe. Ponadto, coraz częściej w projektach dotyczących szacowania powierzchni upraw wykorzystywane są zobrazowania o wysokiej rozdzielczości przestrzennej z satelitów RapidEye, SPOT-5 (HRS) i innych (Ray i Neetu, 2017).

W następnym etapie na podstawie wyników analizy danych z pomiarów terenowych oraz wyników analiz uzyskanych metodami teledetekcyjnymi tworzone są modele regresyjne, które dalej wykorzystywane są do szacowania powierzchni upraw w skali lokalnej, krajowej i regionalnej. Ważnym etapem szacowania powierzchni upraw jest walidacja wyników na podstawie szczegółowych danych z badań terenowych lub fotointerpretacji wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych oraz zdjęć lotniczych. Na podstawie uzyskanych wyników tworzona jest macierz błędów, obliczane są błędy przeszacowania i pominięcia oraz ogólna dokładność klasyfikacji. Ponadto wyniki uzyskane metodami teledetekcyjnymi mogą być porównywane z wynikami prezentowanymi przez urzędy statystyczne.

Badania w zakresie wykorzystania obrazów satelitarnych w rolnictwie prowadzone są od lat 70. ubiegłego wieku. Prekursorami tych badań były Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (ang. *United State Department of Agriculture*, USDA) oraz Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej Stanów Zjednoczonych (ang. *National Aeronautics and Space Administration*, NASA). Na przestrzeni prawie pół wieku, na świecie było realizowanych wiele programów o zasięgu krajowym, regionalnym i globalnym, które miały na celu wykorzystanie teledetekcji satelitarnej do szacowania powierzchni upraw (Ray i Neetu, 2017).

Wśród programów o zasięgu krajowym należy wymienić program CDL (Cropland Data Layer) realizowany przez Wydział Statystyki Rolnictwa (ang. *National Agricultural Statistics Service*, NASS) w USDA (Mueller i Seffrin, 2006). Program został uruchomiony w 1997 roku, a jego wyniki są publikowane na portalu CropSpace (CropSpace, 2020). Wśród programów o zasięgu regionalnym należy wymienić program MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing), który został rozpoczęty pod koniec lat 80. ubiegłego wieku przez kraje członkowskie Unii Europejskiej (Gallego, 2006). W programie wyko-

rzystywane są wysokorozdzielcze zobrazenia satelitarne w połączeniu z badaniami terenowymi w wyselekcjonowanych wcześniej obszarach/segmentach testowych.

Uzyskane wyniki stanowiły podstawę opracowania modelu regresji do szacowania powierzchni upraw w Unii Europejskiej. Program MARS na początku lat 90. XX wieku został rozszerzony i objęto nim inne kraje zlokalizowane w środkowej i wschodniej Europie. W Polsce weryfikacji metod oceny powierzchni upraw, opracowanej w ramach programu MARS, dokonano w połowie lat 90. Uzyskane wyniki zaowocowały kolejnymi badaniami prowadzonymi przez zespoły badawcze Instytutu Geodezji i Kartografii w zakresie dostosowania metody opracowanej przez Instytut Ochrony i Bezpieczeństwa Obywateli (ang. *Institute for the Protection and Security of the Citizen*, IPSC) w Isprze (Włochy) do specyficznych warunków polskiego rolnictwa.

Natomiast wśród programów o zasięgu globalnym należy wspomnieć programy: CropWatch opracowany przez Instytut Teledetekcji Chińskiej Akademii Nauk, FAS (Foreign Agriculture Service) Departamentu Rolnictwa Stanów Zjednoczonych oraz GEOGLAM (Group on Earth Observations GLObal Agricultural Monitoring) realizowany przez kraje członkowskie grupy G20 (Ray i Neetu, 2017).

6.3.2. Identyfikacja gatunków upraw rolniczych i predykcja plonu

Systemy upraw rolniczych są często zróżnicowane i złożone, a rodzaje uprawianych roślin i czas ich wzrostu są odmienne. W celu zapewnienia wysokiej jakości produktu w postaci mapy struktury upraw, wymagany jest wybór odpowiednich danych satelitarnych i danych referencyjnych do analiz (naziemnych) wykorzystywanych na etapie przeprowadzenia klasyfikacji oraz walidacji przyjętych metod klasyfikacji. Ma to szczególne znaczenie w analizie gatunków upraw rolniczych, które charakteryzuje wysoka dynamika przestrzenna i czasowa (Bargiel, 2017).

Większość dotychczas przeprowadzonych analiz w zakresie zastosowania technik teledetekcyjnych do identyfikacji gatunków upraw była prowadzona z wykorzystaniem zobrażeń optycznych. Identyfikacja upraw dokonywana jest na podstawie wielkości odbicia w zakresie niebieskim, zieleni, czerwieni, bliskiej i średniej podczerwieni oraz wskaźników roślinności.

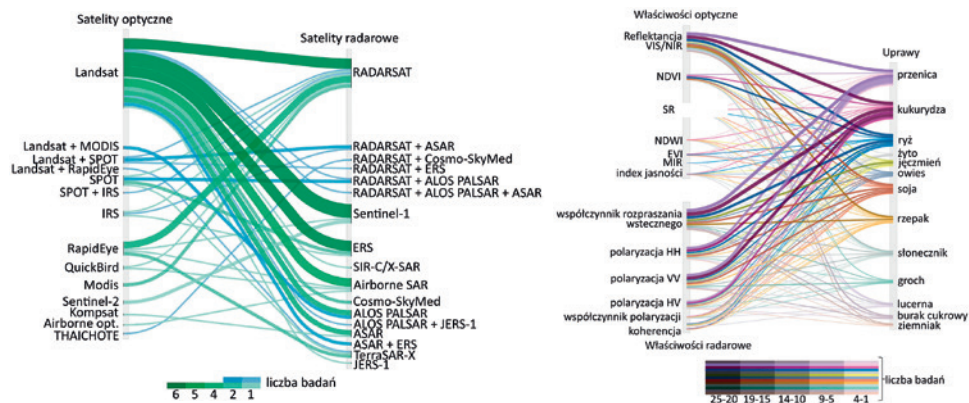
W związku z tym, że właściwości fizyczne poszczególnych gatunków roślin różnią się w kolejnych okresach wzrostu, podczas identyfikacji wykorzystywane są dane wieloczasowe pochodzące z różnych okresów fenologicznych (Osińska-Skotak i in., 2013; Grabska, 2017), co pozwala na poprawę jakości wyników klasyfikacji (Lewińska, 2009, 2011). Nie rozwiązuje to jednak problemów związanych z podobieństwem profili wskaźników roślinności dla różnych upraw o podobnej fenologii (Wang i in., 2019). Ponadto, główną barierą ograniczającą możliwości wykorzystania zobrażeń optycznych jest zachmurzenie, które w połączeniu z kilku lub kilkunastodniową częstotliwością pozyskiwania obrazów może skutkować znacznym ograniczeniem dostępności danych lub nawet spowodować ich brak.

Obecnie jedną z najczęściej stosowanych technik wykorzystywanych w badaniach pokrycia i użytkowania terenu jest łączenie danych satelitarnych pochodzących z różnych źródeł (Ban i in., 2015). Integracja różnych danych pozwala na podwyższenie rozdzielczości przestrzennej obrazu, wzmocnienie rozróżnialności obiektów, zastępowanie brakujących informacji na jednym obrazie informacjami z innego obrazu lub detekcję zmian przy użyciu danych z wielu momentów czasowych (Grabska, 2017).

Coraz częściej podczas rozpoznawania upraw wykorzystywane są zobrazowania radarowe, których główną zaletą jest niezależność od oświetlenia słonecznego i zachmurzenia. Pozwala to na pozyskiwanie danych z wysoką częstotliwością, co przekłada się bezpośrednio na jakość klasyfikacji upraw (Bargiel, 2017). W przypadku danych radarowych w zakresie mikrofalowym, rejestrowane rozproszenie wsteczne zależy od właściwości dielektrycznych ośrodka rozpraszającego oraz jego geometrii (wilgotności gleby, zawartości wody w roślinach, szorstkości podłoża, gęstości roślinności). Wartości te są również zależne od rozmiaru, kształtu i orientacji poszczególnych części rośliny: łodyg, liści oraz owoców. Wykorzystanie zobrazowań radarowych pozwala na poprawę jakości klasyfikacji uzyskanej na obrazach optycznych lub utrzymanie wyników klasyfikacji na wysokim poziomie w przypadku braku bezchmurnych obrazów optycznych (Mróz i Ciołkowska, 2004).

Najczęściej do rozpoznawania upraw wykorzystywane były dane optyczne z satelitów Landsat w połączeniu ze zobrazowaniami radarowymi satelitów Sentinel-1 lub RADARSAT (ryc. 6.14a). Wykorzystując jednocześnie dane optyczne i radarowe można uzyskać wysoką jakość klasyfikacji upraw we wczesnej fazie rozwoju roślin (Orynbaikyzy i in., 2019).

Wraz ze zwiększeniem dostępności do coraz nowszych zobrazowań satelitarnych o wyższej rozdzielczości przestrzennej, czasowej i spektralnej zmieniają się trendy w zakresie ich wykorzystania w rolnictwie. W celu uzyskania najlepszych wyników podczas klasyfikacji typów upraw poszukuje się optymalnego połączenia potencjału informacyjnego zobrazowań optycznych i radarowych. Obecnie przy klasyfikacji upraw wykorzystywane są najczęściej odbicia z zakresu promieniowania widzialnego oraz bliskiej podczerwieni w połączeniu ze współczynnikiem rozpraszania wstecznego oraz polaryzacją HH i VV (ryc. 6.14b).



Ryc. 6.14. Wykorzystanie danych optycznych oraz radarowych podczas identyfikacji gatunków upraw rolniczych (źródło: Orynbaikyzy i in., 2019)

Podczas klasyfikacji gatunków upraw rolniczych wykorzystywane są również dane gromadzone podczas pomiarów terenowych, które dotyczą rodzaju uprawy, odmiany oraz fazy wzrostu roślin. Ponadto zapisywana jest lokalizacja miejsc w terenie przy wykorzystaniu globalnego systemu pozycjonowania (ang. *Global Positioning System*, GPS), w których dane były pozyskane. W ten sposób tworzone są dane referencyjne tzw. pola

treningowe. Ponadto, dane referencyjne mogą być pozyskiwane przez terenowe uczytelnienie wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych lub na podstawie ankiet prowadzonych wśród rolników.

Zgromadzone dane satelitarne oraz dane referencyjne stanowią podstawę klasyfikacji, którą można określić jako cyfrowe przetwarzanie obrazu w celu wyodrębnienia określonych klas, np. gatunków upraw rolniczych. Szczegółowo metody klasyfikacji danych zostały przedstawione w rozdziale 2.3. Etapem końcowym jest walidacja wyników klasyfikacji poszczególnych gatunków upraw, której dokonuje się na podstawie posiadanej wiedzy z badań terenowych. Wyniki badań terenowych najczęściej dzielone są na dwie części, z których pierwsza wykorzystywana jest na etapie uczenia (w metodzie nadzorowanej tworzenia sygnatur poszczególnych klas), a druga do walidacji uzyskanych wyników klasyfikacji. Podstawą do wykonania ilościowej analizy jakości klasyfikacji jest macierz błędów, obliczone wartości całkowitej dokładności klasyfikacji oraz łączny błąd klasyfikacji (współczynnik kappa). W celu poprawy jakości klasyfikacji, a tym samym produktów w postaci map upraw rolniczych, ciągle ulepszane są istniejące lub poszukiwane są nowe metody klasyfikacji upraw rolniczych (Wang i in., 2019).

Bardziej zaawansowanym poziomem wykorzystania zobrazowań satelitarnych, poza identyfikacją uprawy, jest prognoza plonów. Analiza wysokości potencjalnych plonów wykonywana jest najczęściej na podstawie analizy zobrazowań z okresu bezpośrednio poprzedzającego zbiór roślin, natomiast prognoza odnosi się do szacowania potencjalnego plonu na podstawie analizy zobrazowań z różnych faz rozwoju roślin. Najczęściej wykorzystywane są dwa podejścia. Pierwsze polega na tym, że dane teledetekcyjne wykorzystywane są do określenia zależności między wskaźnikami roślinności a wielkością uzyskanych plonów, a drugie opiera się na wykorzystaniu danych satelitarnych w modelach symulacyjnych rozwoju roślin do wyznaczenia wartości parametrów modelu, kalibracji modelu oraz walidacji wyników.

Najczęściej do prognozowania plonów stosuje się modele regresyjne oparte na empirycznie wyznaczonych zależnościach między wartościami wskaźników roślinnych obliczonych na podstawie danych spektralnych oraz wielkością uzyskanych plonów (Wall i in., 2008). Do oceny i predykcji plonów tworzone są zależności regresyjne pomiędzy wielkością plonów, a znormalizowanym różnicowym wskaźnikiem roślinności (NDVI) (Piekarczyk i in., 2004; Wójtowicz i in., 2005). Modele regresyjne opracowywane są przez poszukiwanie zależności pomiędzy wartościami wskaźnika NDVI obliczonymi dla poszczególnych faz rozwoju roślin, a plonami, w celu określenia optymalnego okresu dla szacowania plonów upraw.

W Polsce do określenia plonu zbóż opracowano model regresji bazujący na wartościach wskaźnika (NDVI) oraz wartościach temperatury radiacyjnej roślin (Dąbrowska-Zielińska i in., 2001). Na tej podstawie obliczane są dekadowe wartości wskaźników stanu roślinności (VCI) oraz temperatury (TCI), które są skorelowane z wielkością plonów roślin. Do szacowania plonów wykorzystywane są zobrazowania z satelity NOAA AVHRR i Terra MODIS, które mogą być pozyskiwane z częstotliwością jednego razu na dobę. Na podstawie modelu opracowanego przez Instytut Geodezji i Kartografii (IGiK) możliwe jest prognozowanie plonów na cztery tygodnie przed żniwami.

Modele regresyjne są łatwe do zastosowania i nie wymagają wielu danych wejściowych. Głównym ograniczeniem w szerokim stosowaniu danego modelu jest regionalny charakter zależności pomiędzy wysokością plonu a charakterystykami spektralnymi ro-

ślin. Ponadto trafność oceny plonów zależy od terminu wykonania zobrazowania, a co za tym idzie uchwycenia stanu wegetacyjnego roślin w najbardziej odpowiedniej do predykcji fazie rozwojowej (Piekarczyk i in., 2004).

Przy szacowaniu plonów z użyciem biofizycznych modeli symulujących rozwój roślin, dane spektralne są wykorzystywane do określania parametrów początkowych oraz do kalibracji tych modeli. Modele wykorzystywane do predykcji wysokości plonów charakteryzują się różnym stopniem złożoności. Proste modele pozwalają na predykcję plonów na podstawie powszechnie dostępnych danych agrometeorologicznych oraz danych statystycznych dotyczących plonów. Natomiast w modelach bardziej złożonych istnieje konieczność przygotowania dużej liczby danych wejściowych opisujących relacje pomiędzy glebą, rośliną i atmosferą (Moriondo i in., 2007).

Jednym z takich modeli jest holenderski model WOFOST (World Food Studies Simulation Model), który stanowi element monitorowania stanu i predykcji plonu upraw w Unii Europejskiej. W Polsce do prognozowania plonu zbóż opracowany został przez Instytut Geodezji i Kartografii (IGiK) model PLONSAT. Model ten wykorzystuje dane satelitarne rejestrowane przez satelity serii NOAA, na podstawie których obliczane są m.in. wartości wskaźnika powierzchni liści (ang. *Leaf Area Index*, LAI) (Dąbrowska-Zielińska i in., 2008). W Europie system prognozowania plonów został opracowany, przetestowany i wdrożony w 1992 roku przez Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (JRC).

System prognozowania zbiorów upraw (ang. *MARS Crop Yield Forecasting System*, MCYFS) pozwala na monitorowanie wzrostu oraz prognozowanie zbiorów roślin uprawnych. System MCYFS to rozbudowane narzędzie analityczne wykorzystujące dane teledetekcyjne, obserwacje i prognozy meteorologiczne, modelowanie agrometeorologiczne i biofizyczne wzrostu upraw, a także analizy statystyczne. Wyniki monitorowania w okresie wegetacyjnym są regularnie publikowane w biuletynie MARS, w którym przedstawiane są wyniki analizy stanu upraw, mapy warunków pogodowych, wskaźniki upraw oraz oczekiwane plony. Ponadto wyniki modelowania agrometeorologicznego CGMS (Crop Growth Monitoring System) oraz monitorowania meteorologicznego są udostępniane on-line w ramach portalu JRC MARS Explorer (Marsop, 2020).

Również w Polsce w ostatnich latach obserwowany jest bardzo dynamiczny rozwój w zakresie wykorzystania zobrazowań satelitarnych w rolnictwie. Na podkreślenie zasługuje system ASAP (Advanced Sustainable Agricultural Production) opracowany pod kierunkiem Centrum Teledetekcji Instytutu Geodezji i Kartografii w ramach projektu ASAP współfinansowanego przez Europejską Agencję Kosmiczną. W ramach projektu utworzony został serwis operacyjny wykorzystujący dane satelitarne i naziemne, który oferuje szeroką gamę produktów, a mianowicie mapy: suszy, kondycji upraw, redukcji plonów w stosunku do plonów maksymalnych dla danego obszaru, klasyfikacji upraw, prognozy plonów, plonowania oraz dokumentację strat w produkcji roślinnej wywołanej suszami, wymarznieniami i lokalnymi podtopieniami. Ponadto IGiK na przestrzeni ponad 25 lat zrealizował szereg projektów naukowych i wdrożeniowych przeznaczonych dla rolnictwa, które obejmowały m.in. monitorowanie upraw, predykcję plonów, analizę wpływu suszy oraz przymrozków na kondycję roślin.

Na podkreślenie zasługują projekty realizowane i zrealizowane przez IGiK we współpracy z ESA dotyczące monitorowania suszy (Service4Drought – Service 4 Drought Monitoring applying Satellite Data), klasyfikacji upraw i prognozy plonów pod kątem wspomaganego zbierania informacji statystycznej (EOStat – Agriculture Poland: Services

for Earth Observation-based statistical information for agriculture) czy opracowanie demonstracyjnego systemu wspomagania nawodnień na podstawie danych satelitarnych (IRRSAT – Irrigation Factor 4 potato growth using Sentinel-1 and Sentinel-2 data).

Kolejny projekt wykorzystujący dane satelitarne (m.in. Sentinel-1 i -2, Landsat, PlanetScope, MODIS) w obszarze rolnictwa, to projekt pt. „Wykorzystanie teledetekcji do zarządzania Zasobem Własności Rolnej Skarbu Państwa – etap pilotażowy” ogłoszony w 2019 roku przez Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa (KOWR). Celem projektu było wykonanie badań naukowych i prac rozwojowych wykorzystujących teledetekcję satelitarną w rolnictwie przez monitorowanie suszy rolniczej, wymoknięć oraz wymarznięć roślin uprawnych na podstawie danych satelitarnych oraz danych meteorologicznych (Wężyk i in., 2020). Wyniki projektu mogą stanowić podstawę do opracowania systemu satelitarne-go monitorowania upraw rolnych dla kompleksowego monitorowania szkód w rolnictwie.

Ponadto na polskim rynku obserwowany jest dynamiczny rozwój systemów wspierających rolników w zakresie zarządzania gospodarstwem. Dostępnych jest coraz więcej specjalistycznych aplikacji obsługiwanych za pośrednictwem przeglądarek internetowych. Na wyróżnienie zasługuje aplikacja SatAgro, która pozwala monitorować rozwój upraw z uwzględnieniem warunków meteorologicznych oraz prowadzonych zabiegów agronomicznych. Kolejnym ciekawym narzędziem, które może znaleźć powszechne zastosowanie w rolnictwie stanowi aplikacja Sen2Agri, opracowana w ramach projektu Sentinel-2 for Agriculture. Sen2Agri to aplikacja pozwalająca na analizę obrazów satelitarnych Sentinel-2 i Landsat 8, pod kątem automatycznego mapowania powierzchni i rodzaju upraw oraz obliczania wskaźników opisujących stan i kondycję roślin.

6.3.3. Analiza i prognoza skutków suszy

Występujące coraz częściej długotrwałe deficyty wody wywołane zmianami klimatu zmusiły kraje członkowskie Unii Europejskiej do poszukiwania bardziej efektywnych metod detekcji obszarów objętych suszą oraz prognozowania wystąpienia suszy. Podstawowym dokumentem regulującym gospodarkę wodną na poziomie unijnym jest Ramowa Dyrektywa Wodna (RDW), która ustanowiła założenia wspólnotowego działania w zakresie polityki wodnej. W dyrektywie brak jest jednak podstawy prawnej nakładającej na kraje członkowskie obowiązek opracowania planów przeciwdziałania skutkom susz. Jedynymi dokumentami w całości poświęconymi problematyce suszy, są komunikaty Komisji Europejskiej, które nie posiadają mocy prawnej. W związku z tym, polityka krajów członkowskich UE w zakresie niedoboru wody i susz była w dużym stopniu niezależna. Informacje gromadzone na szczeblu europejskim uzyskane od instytucji krajowych, regionalnych i lokalnych były zróżnicowane pod względem rodzaju i formatu, a także zasięgu przestrzennego i czasowego, co znacznie utrudniało analizę problemu w skali całego kontynentu.

Po raz pierwszy zauważono konieczność poprawy zarządzania ryzykiem wystąpienia suszy w komunikacie Komisji Europejskiej z 18 lipca 2007 roku, dotyczącym rozwiązania problemu związanego z niedoborem wody i suszą na terenach państw Unii Europejskiej. W komunikacie zwrócono uwagę na potrzebę utworzenia obserwatorium i systemu wczesnego ostrzegania na wypadek suszy. Głównym celem funkcjonowania Europejskiego Obserwatorium ds. Susz (ang. *European Drought Observatory*, EDO), stworzonego przez Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (JRC), jest pozyskiwanie od krajów UE informacji o suszach oraz utworzenie systemu wczesnego ostrzega-

nia, w celu efektywnego zarządzania ryzykiem suszy. W komunikacie KE wskazano, że tworzony system powinien obejmować dane, wyniki badań naukowych oraz narzędzia do monitorowania, wykrywania i prognozowania suszy na różnych płaszczyznach przestrzennych. Dane prezentowane na stronie Europejskiego Obserwatorium ds. Susz wykorzystują zobrazenia rejestrowane przez sensor MODIS umieszczony na pokładzie satelity Terra. Na portalu internetowym EDO (EDO, 2020) prezentowane są informacje w postaci mapy wskaźników pozwalających na detekcję suszy.

Wskaźniki podzielone są na grupy tematyczne i dotyczą detekcji suszy:

- meteorologicznej – wskaźnik standaryzowanego opadu (ang. *Standardized Precipitation Index, SPI*), wskaźnik standaryzowanego opadu i parowania (ang. *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, SPEI*),
- glebowej – wskaźnik odchylenia wilgotności gleby od warunków przeciętnych (ang. *Soil Moisture Anomaly, SMA*), wskaźnik surowości suszy Palmera (ang. *Palmer Drought Severity Index, PDSI*), wskaźnik intensywności suszy (ang. *Drought Severity Index, DSI*),
- hydrologicznej – wskaźnik niskich przepływów (ang. *Low Flow Index, LFI*).

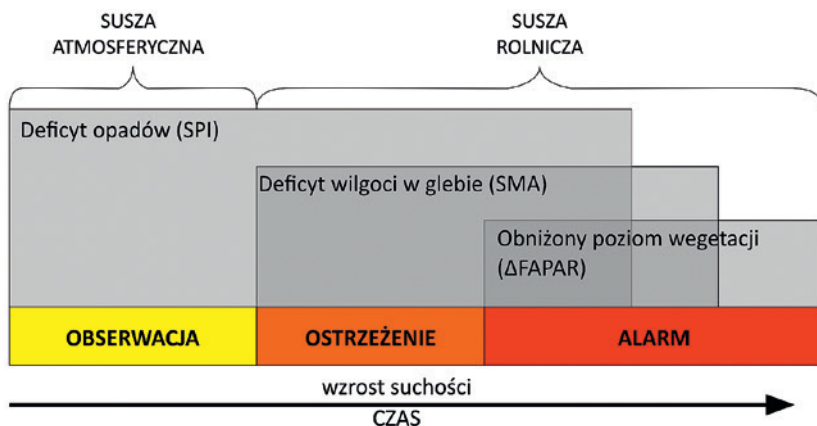
Wskaźniki suszy meteorologicznej obliczane są na podstawie danych naziemnych, natomiast wskaźniki suszy glebowej i hydrologicznej na podstawie wyników uzyskanych z modelu LISFLOOD. Parametr wejściowy w modelu LISFLOOD stanowi wskaźnik LAI, który obliczany jest na podstawie danych rejestrowanych przez sensor MODIS umieszczony na pokładzie satelity Terra. Wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści LAI jest wielkością bezwymiarową, która charakteryzuje stosunek powierzchni liści do jednostkowej powierzchni gleby, którą ta roślinność pokrywa. LAI jest wskaźnikiem pozwalającym na szacowanie ilości biomasy, kondycji i struktury roślin. Ponadto jest jednym z podstawowych parametrów wejściowych w większości modeli produktywności ekosystemów.

Ze względu na znaczącą rolę wskaźnika LAI przeprowadzono wiele badań zmierzających do określenia jego przestrzennej i czasowej zmienności. Punktem wyjścia do określenia zmienności czasowej i przestrzennej tego wskaźnika są pomiary *in situ*, wykonywane w sposób pośredni za pomocą urządzeń takich jak np. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Wiele badań prowadzono również w zakresie szacowania LAI na podstawie zobrażeń satelitarnych. W większości przypadków opracowane zostały zależności empiryczne pomiędzy odpowiedzią spektralną roślin wyrażoną w postaci wskaźnika roślinności, np. NDVI lub SAVI (tabela 6.5), a LAI. Wskaźniki roślinne mogą być obliczane na podstawie zobrażeń optycznych pochodzących, np. z satelitów Landsat 7 i 8, Sentinel-2, Terra (MODIS, ASTER) i Envisat (MERIS). Inną metodą szacowania wskaźnika LAI może być wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych i danych z naziemnych pomiarów *in situ* oraz zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 (poszczególnych zakresów promieniowania) (Novelli i in., 2019).

Ponadto EDO udostępnia, w postaci map oraz tabel, wyniki obliczeń zintegrowanego wskaźnika suszy (ang. *Combined Drought Index, CDI*), który został opracowany przez JRC (Sepulcre-Canto i in., 2012). Wskaźnik CDI dostarcza spójnej informacji na temat obszarów, na których występuje susza, albo które potencjalnie mogą być zagrożone wystąpieniem suszy rolniczej. CDI obliczany jest na podstawie trzech wskaźników:

- wskaźnika standaryzowanego opadu (SPI),
- wskaźnika odchylenia wilgotności gleby od warunków przeciętnych (SMA),
- wskaźnika odchylenia frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej od warunków przeciętnych ($\Delta FAPAR$).

Schemat koncepcyjny detekcji suszy atmosferycznej i rolniczej za pomocą wskaźników SPI, SMA i Δ FAPAR przedstawiono na rycinie 6.15. Wskaźnik SPI w pierwszej kolejności informuje o wielkości, intensywności i czasie trwania deficytów opadów (suszy atmosferycznej). Gdy deficytowi opadów zaczyna towarzyszyć deficyt wilgotności gleby, co obrazuje wskaźnik SMA, występują przesłanki do wydania ostrzeżeń o wystąpieniu suszy. Natomiast, gdy w wyniku suszy glebowej dochodzi do osłabienia kondycji roślin lub zahamowania ich wzrostu, ogłoszony zostaje stan alarmowy.



Ryc. 6.15. Schemat koncepcyjny detekcji suszy wg EDO za pomocą wskaźników SPI, SMA i Δ FAPAR (źródło: Sepulcre-Canto i in., 2012)

Wskaźnik standaryzowanego opadu (SPI) jest najczęściej wykorzystywanym wskaźnikiem suszy meteorologicznej (McKee i in., 1993). SPI pozwala na detekcję okresów występowania suszy i ocenę jej intensywności. Wskaźnik SPI został w 2010 roku uznany przez Międzynarodową Organizację Meteorologiczną (World Meteorological Organization, WMO) jako referencyjny do monitorowania operacyjnego suszy atmosferycznej. Wskaźnik SPI wskazuje na odchylenie sum opadów obserwowanych w danej lokalizacji od średnich wieloletnich sum opadów w tym samym okresie. Wskaźnik SPI obliczany jest na podstawie wieloletnich ciągów ilości opadów w określonym przedziale czasu, najczęściej 1, 3, 6, 9, 12, 24 lub 48 miesięcy. Wskaźnik CDI wykorzystuje wskaźniki SPI-1 i SPI-3 (1 i 3 miesiące). Wskaźnik SPI-3 jest najbardziej odpowiedni do identyfikacji suszy rolniczej, ze względu na fakt, że jest on silnie skorelowany z reakcją roślinności na niedobór opadów (Ji i Peters, 2003; Rossi i Niemeyer, 2012). Wskaźnik SPI obliczany jest na podstawie naziemnych danych pomiarowych, a następnie wyniki są prezentowane przestrzennie metodami interpolacji.

Wskaźnik odchylenia wilgotności gleby od warunków przeciętnych jest wykorzystywany przez EDO do określenia rozpoczęcia okresu suszy glebowej i czasu jej trwania. Wilgotność gleby jest obliczana za pomocą modelu LISFLOOD (De Roo i in., 2000). Model ten jest modelem hydrologicznym zaimplementowanym w środowisku GIS, który pozwala na prowadzenie obliczeń symulacyjnych, w tym m.in. dobowych wartości wilgotności gleby dla warstwy powierzchniowej i strefy korzeniowej z rozdzielczością przestrzenną 5×5 km. Dane rejestrowane przez sensor MODIS umieszczony na pokładzie satelity Terra wykorzystywane są do obliczania wskaźnika LAI, który stanowi parametr wejściowy w modelu LISFLOOD.

Wilgotność gleby uzyskana z modelu LISFLOOD jest przeliczana na wskaźnik wilgotności gleby (SMI). Wskaźnik SMI jest obliczany według metodyki van Genuchtena (1987), wykorzystującej normalizację wilgotności gleby względem punktu trwałego wędnięcia, a punktem połowej pojemności wodnej. Przyjmuje on wartości od 0 (gleba jest mocno wysuszona – punkt trwałego wędnięcia) do 1 (wilgotność gleby przekracza połowę pojemność wodną). Wskaźnik SMA jest obliczany dla okresów dekadowych i wskazuje na odchylenie wartości dekadowych wskaźników wilgotności (SMI) w odniesieniu do wieloletnich wartości wskaźników wilgotności z okresu od 1995 roku do ostatniego pełnego roku, w którym wykonywane były obliczenia (na przykład dla map w 2019 roku był to okres 1995–2018).

Wskaźnik odchylenia frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej (FAPAR) od warunków przeciętnych jest wykorzystywany do detekcji wpływu suszy na wzrost i produktywność roślin. Wskaźnik Δ FAPAR, jest obliczany na podstawie danych rejestrowanych przez sensor MODIS umieszczony na pokładzie satelity Terra (Myneni i in., 2002; Myneni i in., 2003). MODIS jest skanerem optyczno–mechanicznym, który rejestruje promieniowanie elektromagnetyczne w 36 zakresach od 0,459 do 14,385 μm o rozdzielczości przestrzennej od 250 m do 1 km. W związku z dużym polem widzenia (110°) MODIS rejestruje dane dwa razy na dobę. Wartości Δ FAPAR prezentowane na stronach EDO obliczane są dla okresów dekadowych, z rozdzielczością przestrzenną $0,1^\circ$. Anomalie Δ FAPAR są obliczane przez odniesienie aktualnych dekadowych wartości Δ FAPAR do wartości dekadowych dla okresu od 2001 roku do ostatniego pełnego roku, dla którego zostały wykonywane obliczenia (na przykład dla map anomalii Δ FAPAR w roku 2019 okresem odniesienia były lata 2001–2018). Szczegółowy opis obliczania wskaźników znajduje się na portalu EDO.






Zintegrowany wskaźnik suszy CDI obliczany jest jako kombinacja wskaźników SPI-1, SPI-3, SMA i Δ FAPAR (tabela 6.4). W ten sposób na podstawie wartości CDI dany obszar jest klasyfikowany do jednej z pięciu klas, które opisują wystąpienie suszy atmosferycznej, glebowej oraz negatywnego oddziaływania deficytu wodnego na rośliny. Pozostałe dwie klasy wskazują na przywracanie normalnych warunków wodnych w odniesieniu do warunków meteorologicznych oraz kondycji roślin.

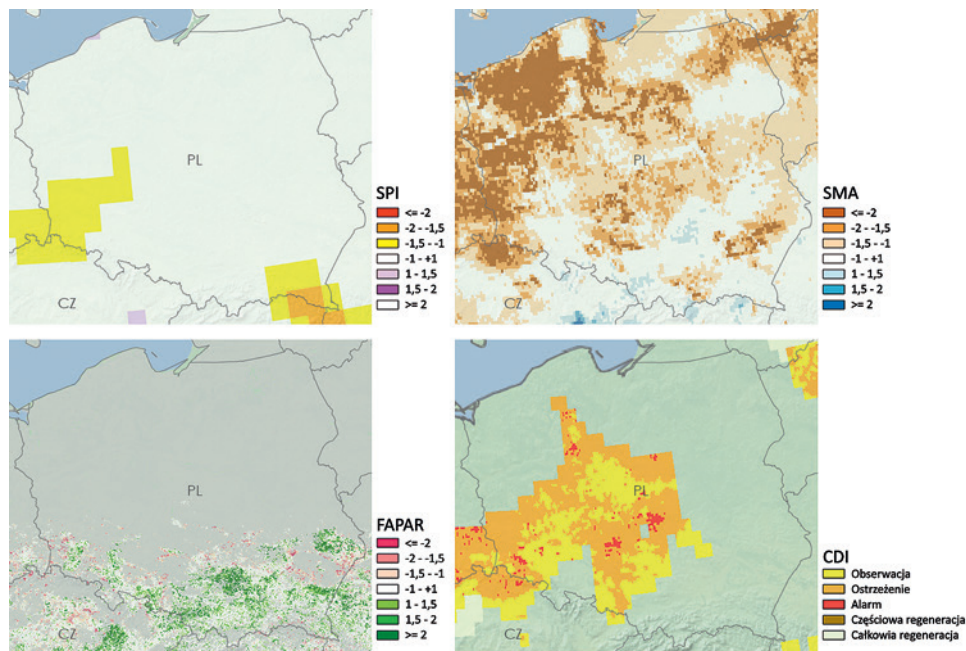
Wyniki obliczeń wskaźników SPI-3, SMA, Δ FAPAR oraz CDI w postaci map dostępnych w przeglądarce EDO dla pierwszej dekady września 2019 roku przedstawiono na rycinie 6.16.

W przeglądarce EDO istnieje możliwość przeglądania zarówno wyników monitorowania wskaźników SPI, SMA, Δ FAPAR oraz CDI, jak i prognoz oraz serii czasowych wyżej wymienionych wskaźników w postaci zestawień tabelarycznych i wykresów.

Susza staje się coraz poważniejszym problemem w Europie, dostrzeganym przez wiele państw. Bardzo aktywnie stara mu się przeciwdziałać Polska, o czym świadczą liczne projekty badawcze i wdrożeniowe, których celem jest wykorzystanie zobrazowań satelitarnych do monitorowania i oceny skutków suszy. Jednym z takich działań jest projekt „Serwis monitoringu suszy z zastosowaniem danych satelitarnych” (ang. *Service 4 Drought Monitoring Applying Satellite Data*) realizowany przez WIND-HYDRO oraz Instytut Geodezji i Kartografii i finansowany przez Europejską Agencję Kosmiczną. Realizacja projektu rozpoczęła się 1 lipca 2017 roku, a jego głównym zamierzeniem jest opracowanie kompleksowego i operacyjnego Systemu Monitorowania Zjawiska Suszy na podstawie zobrazowań satelitarnych oraz danych naziemnych. Wymiernym efektem realizacji projektu jest oddany do użytku w czerwcu 2020 roku serwis esusza.pl (Esusza, 2020).

Tabela 6.4. Sposób obliczania zintegrowanego wskaźnika suszy wraz z podziałem suszy na klasy według EDO

Poziom	Kolor	Klasyfikacja	Interpretacja
Obserwacja		SPI-3 < -1 lub SPI-1 < -2	Obserwowany jest istotny deficyt odpadów
Ostrzeżenie		SMA < -1 lub (SPI-3 < -1 lub SPI-1 < -2)	Deficytowi odpadów towarzyszą anomalie wilgotności gleby
Alarm		$\Delta FAPAR < -1$ i (SPI-3 < -1 lub SPI-1 < -2)	Powyższym warunkom towarzyszą negatywne anomalie wzrostu roślin
Częściowa regeneracja		($\Delta FAPAR < -1$ i (SPI-3 _{m-1} < -1 i SPI-3 > -1)) lub ($\Delta FAPAR < -1$ i (SPI-1 _{m-1} < -2 i SPI-1 > -2))	Po epizodzie suszy warunki meteorologiczne powróciły do normalnego stanu, ale wzrost roślin nadal jest nieprawidłowy
Całkowita regeneracja		(SPI-3 _{m-1} < -1 i SPI-3 > -1) lub (SPI-1 _{m-1} < -2 i SPI-1 > -2)	Powrót do normalnego stanu zarówno warunków meteorologicznych, jak i wzrostu roślin



Ryc. 6.16. Przestrzenna zmienność wskaźników SPI-3, SMA, $\Delta FAPAR$ oraz CDI w Polsce w pierwszej dekadzie września 2019 roku (na podstawie danych serwisu EDO)

Do identyfikacji satelitarnej suszy rolniczej wykorzystywany jest wskaźnik DISS (Drought Identification Satellite System). Wskaźnik DISS obliczany jest na podstawie wy-

ników temperatury radiacyjnej powierzchni czynnej, która rejestrowana jest przez satelitę NOAA AVHRR oraz wyników pomiarów meteorologicznych (opadu i temperatury). Ponadto Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa (IUNG) w Puławach przystąpił do rozbudowy funkcjonującego do tej pory Systemu Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR). Do systemu SMSR zaimplementowane zostaną metody teledetekcyjne dzięki współpracy IUNG z Poznańskim Centrum Superkomputerowo–Sieciowym, które dysponuje zaawansowaną infrastrukturą, pozwalającą na efektywne pozyskiwanie, gromadzenie oraz przetwarzanie obrazów satelitarnych Sentinel-1, Sentinel-2 i Landsat 8. Wyniki analizy obrazów satelitarnych mają umożliwić analizę zasięgu oraz stanu upraw w odniesieniu do poszczególnych działek rolnych. Pion teledetekcyjny zostanie włączony pilotażowo do SMSR w 2021, a pełną funkcjonalność system ma uzyskać w 2022 roku.

6.3.4. Wykorzystanie wskaźników roślinności do oceny stanu roślinności

Jednym z podstawowych zastosowań teledetekcji w rolnictwie jest wykorzystanie obrazów satelitarnych do oceny stanu i kondycji roślin uprawnych. Zjawisko występowania dużego kontrastu pomiędzy odbiciem promieniowania widzialnego i promieniowania z zakresu bliskiej podczerwieni dla roślin zostało wykorzystane do opracowania tzw. wskaźników roślinności (Jordan, 1969; Rouse i in., 1974). Wskaźniki roślinności prezentują w sposób ilościowy proporcje między promieniowaniem absorbowanym i odbijanym przez rośliny w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Proporcje pomiędzy ilością promieniowania absorbowanego, odbijanego i przechodzącego przez rośliny charakteryzują tzw. właściwości optyczne roślin, które zależą od struktury komórek, obecności chlorofilu i wody. Na podstawie wskaźników roślinności można ocenić stan biochemiczny i biofizyczny roślinności, w tym zawartość wody, barwników i substancji budulcowych oraz stres roślin w wyniku niedoboru wody, składników pokarmowych, chorób lub występowania szkodników. Wskaźniki roślinności są miarami służącymi do oceny aktywności wegetacyjnej roślin. Wskaźniki są skorelowane z biofizycznymi parametrami roślin, tj. powierzchnią projekcyjną liści (LAI), temperaturą roślin (Ts) i pochłoniętym promieniowaniem fotosyntetycznym (APAR). Z punktu widzenia zastosowania w rolnictwie wskaźniki można podzielić na dwie grupy: opisujące kondycję roślin oraz zawartość wody w roślinach (tabela 6.5).

Pierwsza grupa wskaźników opracowanych na podstawie zakresu promieniowania widzialnego oraz podczerwieni wykorzystywana jest do oceny ogólnego stanu roślinności, ilości barwników fotosyntetycznych oraz ilości światła wykorzystywanego w procesie fotosyntezy. Promieniowanie widzialne dochodzące do roślin ulega odbiciu i pochłonięciu. Ilość promieniowania pochłoniętego przez rośliny jest cechą indywidualną rośliny, ponadto zależy od kondycji i fazy rozwojowej. W zakresie widzialnym ilość promieniowania pochłoniętego zależy od zawartości chlorofilu, karotenoidów i antocyjanów. Promieniowanie w zakresie niebieskim i czerwonym jest pochłaniane i wykorzystywane w procesie fotosyntezy, natomiast promieniowanie w zakresie zielonym jest odbijane. Wielkość odbicia energii w zakresie podczerwieni zależy od cech biofizycznych roślin, w szczególności struktur komórkowych, zawartości wody, substancji budulcowych, grubości liścia, szorstkości powierzchni liścia i baldachimu, wieku fizjologicznego, sposobu ułożenia liści, okresu fenologicznego oraz stopnia uszkodzenia. Występowanie dużych różnic pomiędzy odbiciem promieniowania w zakresie widzialnym i w zakresie bliskiej podczerwieni zostało wykorzystane do opracowania

wskaźników roślinności. Wskaźniki roślinności są bezwymiarowymi miarami wykorzystywanymi do oceny kondycji roślin.

Tabela 6.5. Teledetekcyjne wskaźniki roślinności

Nazwa wskaźnika	Możliwy sposób obliczania wskaźnika na podstawie zobrażeń Sentinel-2
Ocena ogólnego stanu roślinności	
Normalized Difference Vegetation Index NDVI (ROUSE i in., 1974)	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$
Ratio Vegetation Index RVI (Jordan, 1969)	$RVI = \frac{NIR}{R}$
Soil Adjusted Vegetation Index SAVI (Huete, 1988)	$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - R)}{NIR + R + L}$
Atmospherically Resistant Vegetation Index ARVI (Kaufman i Tanre, 1992)	$ARVI = \frac{NIR - B}{NIR + B}$
Visible Atmospheric Resistant Index VARI (Gitelson i in., 2002)	$VARI = \frac{G - R}{G + R - B}$
Enhanced Vegetation Index EVI (Huete i in., 2002)	$EVI = G \cdot \frac{NIR - R}{L + NIR + C_1 B + C_2 R}$
Normalized Difference R Edge index (NDRE) (Barnes i in., 2000)	$NDRE = \frac{NIR - R1}{NIR + R1}$
Ocena zawartości wody	
Normalized Difference InfraR Index NDII (Hardisky i in., 1983)	$NDII = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$
Normalized Difference Water Index NDWI (Gao, 1996)	$NDWI = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$
Moisture Stress Index MSI (Rock i in., 1985)	$MSI = \frac{SWIR1}{NIR}$
Normalized Multi-Band Drought Index NMDI (Wang i Qu, 2007)	$NMDI = \frac{NIR - (SWIR1 - SWIR2)}{NIR + (SWIR1 - SWIR2)}$

Najczęściej do oceny kondycji roślin wykorzystywany jest znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności (NDVI), który pozwala ocenić aktywność fotosyntezy roślin oraz stan struktur komórkowych. Wartości wskaźnika NDVI obliczane są na podstawie wartości współczynnika odbicia w podczerwieni (NIR) oraz

w zakresie czerwonym (R) (Rouse i in., 1974). Wartości wskaźnika NDVI zależą m.in. od odbicia promieniowania od powierzchni gleby oraz rozproszenia w atmosferze. Wartości NDVI najczęściej wynoszą od $-0,1$ do $+0,7$. Chmury, woda, śnieg i lód warunkują ujemne wartości NDVI, gleba od $-0,1$ do $+0,1$ (Wójtowicz i in., 2005). W przypadku obszarów pokrytych roślinami wartości NDVI przyjmują wartości z zakresu od $0,2$ do $1,0$. Wartości NDVI z zakresu od $0,2$ do $0,4$ odpowiadają roślinności o słabej kondycji; od $0,4$ do $0,6$ umiarkowanej, a wartości powyżej $0,6$ wskazują na dobrą i bardzo dobrą kondycję roślin.

Innym często wykorzystywanym wskaźnikiem wegetacyjnym jest wskaźnik RVI wyrażający proporcję pomiędzy ilością odbitego promieniowania z zakresu bliskiej podczerwieni (NIR) i czerwieni (R) (Jordan, 1969).

Wskaźnik NDVI na przestrzeni lat był wielokrotnie modyfikowany, a na jego bazie opracowywano nowe wskaźniki roślinności. Przykładem jest wskaźnik SAVI, który jest mniej wrażliwy na odbicie promieniowania od gleby. Wskaźnik SAVI, podobnie jak NDVI obliczany jest na podstawie wartości współczynników odbicia w zakresach czerwonym i podczerwonym (R i NIR) (Huete, 1988). Dodatkowo, podczas obliczeń wskaźnika SAVI wprowadzany jest współczynnik korygujący odbicia od gleby (L). Współczynnik L może przyjmować wartości od 0 do 1 , odpowiednio dla bujnej i bardzo ubogiej pokrywy roślinnej. Najczęściej podczas obliczania wskaźnika SAVI przyjmuje się wartość L na poziomie $0,5$ dla przeciętnego pokrycia gleby roślinami. Pewnym ograniczeniem w stosowaniu wskaźnika SAVI jest wrażliwość na zmiany w atmosferze (Qi i in., 1994).

W celu ograniczenia wpływu atmosfery na wyniki obliczeń opracowane zostały wskaźniki VARI (Gitelson i in., 2002) oraz ARVI (Kaufman i Tanre, 1992). Wskaźnik VARI, obliczany jest na podstawie wartości współczynnika odbicia w zakresie niebieskim (B), zielonym (G) i czerwonym (R). Z kolei wskaźnik ARVI obliczany jest na podstawie odbicia promieniowania w zakresach niebieskim (B), czerwonym (R) oraz bliskiej podczerwieni (NIR). Pewnym ograniczeniem w zakresie stosowania wskaźników VARI i ARVI jest ich wrażliwość na zakłócenia spowodowane zmiennością gleby (Qi i in., 1994). Wskaźnik ARVI jest około czterokrotnie mniej wrażliwy na zakłócenia atmosferyczne niż NDVI.

W celu zredukowania wpływu atmosfery i gleby na wartość sygnału spektralnego opracowany został wskaźnik EVI (Liu i Huete, 1995). Wskaźnik obliczany jest na podstawie odbić w zakresie niebieskim (B), czerwonym (R) i bliskiej podczerwieni (NIR). We wzorze znajdują się współczynniki korygujące wpływ podłoża (L) i osłabienia promieniowania niebieskiego i czerwonego przez aerozole (C1 i C2) oraz współczynnik wzmocnienia (G). Ważną rolę odgrywa czerwień krawędziowa (ang. *RedEdge*, RE), tj. wielkość współczynnika odbicia pomiędzy zakresem czerwonym i w bliskiej podczerwieni. Zakres promieniowania RE wykorzystywany jest do oceny ilościowej zawartości chlorofilu w roślinach, przez co możliwe jest dokonanie oceny zdrowotności oraz stresu roślin. Jednym ze wskaźników wykorzystujących zakres krawędzi podczerwieni jest wskaźnik NDRE (Barnes i in., 2000).

Druga grupa wskaźników wykorzystuje zakresy promieniowania w bliskiej i średniej podczerwieni. W średniej podczerwieni następuje absorpcja promieniowania przez wodę zawartą w roślinach, co przekłada się na niskie wartości współczynnika odbicia w tym zakresie. Wskaźniki zaliczone do tej grupy informują o zawartości wody w roślinach, a tym samym o wystąpieniu niedoborów wody.

Jednymi z najczęściej wykorzystywanych wskaźników z tej grupy są znormalizowany wskaźnik podczerwieni (NDII) (Hardisky i in., 1983) oraz znormalizowany wskaźnik

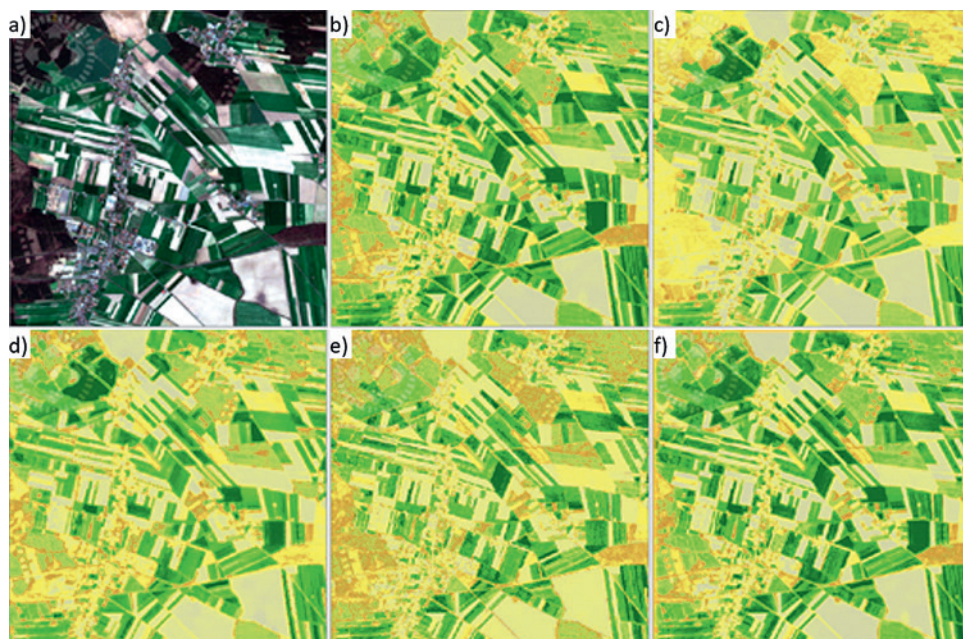
wodny (NDWI) (Gao, 1996), które wykorzystuje się do określenia zawartości wody w roślinach oraz rodzaju i stopnia pokrycia roślinami analizowanych terenów. Oba wskaźniki oblicza się na podstawie podobnego równania, w którym wykorzystywane są wartości współczynnika odbicia w podczerwieni (NIR) oraz średniej podczerwieni (SWIR1 i SWIR2). Wskaźnik MSI, który jest ilorazem współczynnika odbicia w zakresie średniej podczerwieni (SWIR) oraz bliskiej podczerwieni (NIR) wykorzystuje się do określania stopnia stresu wodnego roślinności (Rock i in., 1985). Stosunkowo nowym wskaźnikiem stosowanym do oceny stanu wilgotności gleby i zawartości wody w roślinach jest wskaźnik NMDI (Wang i Qu, 2007). Wskaźnik NMDI obliczany jest na podstawie trzech wartości współczynnika odbicia: w podczerwieni (NIR) oraz dwóch zakresach średniej podczerwieni (SWIR1 i SWIR2).

Wskaźniki roślinności powinny spełniać następujące założenia: po pierwsze powinny być silnie skorelowane z parametrami biofizycznymi roślin (biomasa, powierzchnia projekcyjna liści (LAI), pochłonięte promieniowanie fotosyntetycznie czynne – APAR), po drugie ograniczać wpływ czynników zakłócających lub utrudniających interpretację wyników. Do czynników zakłócających, bezpośrednio związanych z roślinami, należy zaliczyć glebę, rzeźbę terenu oraz nieaktywne fotosyntetycznie części roślin, a do czynników zewnętrznych: atmosferę, kąt padania promieni słonecznych oraz kąt rejestracji promieniowania odbitego przez sensor (Wójtowicz i in., 2005).

Część wskaźników roślinnych, wykorzystywanych pierwotnie w badaniach naukowych, znalazła praktyczne zastosowanie w rolnictwie. Jednym z czynników, które zachęcają jednostki administracji publicznej do korzystania z danych teledetekcyjnych, jest dostęp do bogatego zbioru narzędzi pozwalających na ich szeroką analizę, w tym obliczanie wskaźników roślinnych. Wykorzystując bezpłatne oprogramowanie ESA – SNAP (Sentinel Application Platform) opracowane przez Europejską Agencję Kosmiczną, które jest przeznaczone do analizy obrazowań satelitarnych, m.in. Sentinel, można w sposób automatyczny obliczyć ponad 20 wskaźników roślinnych. Obliczenia sprowadzają się do wyboru pożądanego wskaźnika, który jest zdefiniowany w zakładce indeksów roślinnych (*Optical* → *Thematic Land Processing* → *Vegetation radiometric indices*).

Przykładowe wyniki obliczeń wskaźników roślinnych uzyskane w programie SNAP przedstawiono na rycinie 6.17. Ponadto wskaźniki roślinności mogą być obliczane na podstawie m.in. obrazowań Landsat i Sentinel-2, za pomocą bezpłatnego programu QGIS i specjalnej wtyczki SCP (Semi Automatic Classification Plugin). Obliczane na bieżąco wartości wskaźników roślinnych pozwalają na ocenę aktualnej kondycji roślin oraz mogą stanowić podstawę do podejmowania działań w zakresie nawadniania, nawożenia czy stosowania środków ochrony roślin.

Wybrane wskaźniki roślinności wykorzystywane w rolnictwie, które szczegółowo przedstawiono w tabeli 6.5, mogą być obliczane na podstawie danych optycznych rejestrowanych przez szerokie spektrum satelitów: Sentinel-2, Landsat 7, Landsat 8, rodzinę satelitów WorldView, GeoEye-1, SPOT-6, SPOT-7, Pléiades-HR, PlanetScope, SkySat oraz KOMPSAT-2 i KOMPSAT-3. Ponadto wskaźniki roślinności mogą być obliczane na podstawie danych optycznych pochodzących z sensorów rejestrujących z niską i średnią rozdzielczością przestrzenną, takich jak np. ASTER i MODIS. Do obliczania wskaźników roślinnych bardzo przydatne są również dane pochodzące z sensorów hiperspektralnych np. Hyperion i CHRIS. Zakres możliwych do obliczenia wskaźników roślinnych na podstawie danych uzyskiwanych z określonych sensorów jest uzależniony od zakresu rejestrowanego promieniowania elektromagnetycznego i liczby kanałów, w których odbywa się zapis. Szczegółowy opis satelitów i sensorów rejestrujących dane teledetekcyjne przedstawiono w rozdziale 3.



Ryc. 6.17. Wyniki obliczeń wybranych wskaźników roślinności w programie SNAP (kolor zielony – roślinność w dobrej kondycji, kolor żółty – roślinność w słabej kondycji, kolor pomarańczowy – brak roślinności): a) kompozycja w barwach rzeczywistych, b) wskaźnik NDVI, c) wskaźnik SAVI, d) wskaźnik NDWI, e) wskaźnik NDI45, f) wskaźnik ARVI

6.3.5. Rolnictwo a obszary Natura 2000

Mapy dokumentujące zasięg przestrzenny obszarów Natura 2000 odgrywają istotną rolę w systemach dopłat bezpośrednich dla producentów rolnych w całej Unii Europejskiej. Szczególne znaczenie dla obszarów Natura 2000 ma promowanie i wspieranie dobrych praktyk rolnych, które mogą zapobiec niszczeniu rzadkich lub zagrożonych siedlisk wielu gatunków zwierząt będących pod ochroną unijnego prawa. Mimo tego, że w całej UE za pomocą dopłat bezpośrednich zachęca się rolników do prowadzenia produkcji zgodnie z wymaganiami środowiska przyrodniczego, to zdarzają się sytuacje, w których zasady te nie są przestrzegane, co może skutkować negatywnym oddziaływaniem na siedliska i zwierzęta chronione w ramach sieci Natura 2000. Dlatego, poza systemem zachęt, konieczne jest wdrożenie systemu monitorowania pozwalającego na bieżącą kontrolę działalności rolników.

Elementem wspomagającym proces monitorowania mogą być zobrazowania satelitarne. Za przykład może posłużyć projekt AgroEye sfinansowany przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA), a realizowany w latach 2015–2017 przez firmę ProGea Consulting. Celem projektu było opracowanie aplikacji wspomagającej procesy realizacji polityki rolnej UE, w tym kontroli tzw. norm dobrej kultury rolnej obowiązujących w krajach członkowskich. Aplikacja AgroEye pozwala na szybkie i precyzyjne monitorowanie obszarów rolniczych na podstawie analizy obiektowej zobrazowań satelitarnych Sentinel-2. Pozwala to na wiarygodną ocenę działalności producentów rolnych, ponieważ obszary objęte dopłatami bezpośrednimi są obrazowane nawet kilka razy w roku,

wraz z ich analizą w czasie i przestrzeni. Aplikacja AgroEye może znaleźć zastosowanie w szeroko pojętym monitorowaniu i zarządzaniu środowiskiem przyrodniczym (np. obszarów Natura 2000, parków narodowych, parków krajobrazowych i obszarów chronionego krajobrazu).

Inną aplikacją mogącą znaleźć zastosowanie w monitorowaniu upraw rolnych jest Sen4CAP (Sentinels for Common Agricultural Policy). Realizacja projektu związanego z tworzeniem aplikacji Sen4CAP rozpoczęła się w 2017 roku, w ramach projektu realizowanego przez konsorcjum w składzie UCLouvain-Geomatics (Katolicki Uniwersytet Lwański, Belgia), CS ROMANIA (Rumunia), e-GEOS (Włochy), GISAT (Czechy) i Sinergise (Słowenia), zainicjowanego przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA) w bezpośredniej współpracy i na wniosek DG-Agri, DG-Grow i DG-JRC. Celem nadrzędnym projektu było dostarczenie europejskim i krajowym podmiotom, odpowiedzialnym za realizację wspólnej polityki rolnej, narzędzi pozwalających na monitorowanie działalności rolniczej. W ramach projektu zwrócono szczególną uwagę, w jaki sposób zobrazowania satelitarne Sentinel-1 i -2 mogą wesprzeć modernizację i uprościć realizację wspólnej polityki rolnej w okresie po 2020 roku.

Jako jeden z przykładów wykorzystania zobrazowań satelitarnych na terenach Natura 2000 mogą posłużyć badania prowadzone przez Calleja i in. (2019) dotyczące wpływu inwazyjnego gatunku *Baccharis halimifolia* na stan obszarów chronionych. Badania zostały przeprowadzone w celu opracowania procedury mapowania ww. gatunku za pomocą zobrazowań satelitarnych Sentinel-2A oraz Landsat 8. W ramach analizy zastosowano trzy podejścia klasyfikacyjne (oparte na pikselach, obiektach oraz metodzie hybrydowej), aby określić, które z podejść umożliwia najdokładniejsze mapowanie. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami, klasyfikacja oparta na pikselach umożliwiła mapowanie gatunków inwazyjnych z dokładnością, co najmniej 70% dla zobrazowań pochodzących z obu satelitów. Uzyskane wyniki pozwoliły na stwierdzenie, że zobrazowania z satelity Landsat 8 charakteryzowały się wyższą dokładnością klasyfikacji ogólnej roślinności, natomiast satelita Sentinel-2 pozwolił na bardziej precyzyjne określenie zasięgu analizowanego gatunku inwazyjnego. Jak podają autorzy, było to spowodowane wyższą rozdzielczością przestrzenną i spektralną satelity Sentinel-2. Ponadto, zobrazowania Landsat zostały wykorzystane w 2005 roku do mapowania rozmieszczenia inwazyjnego gatunku, którego wyniki wykazały dokładność na poziomie 72% i 88%. Opracowana procedura stanowi cenne narzędzie w projektach dotyczących ochrony środowiska przyrodniczego, szczególnie obszarów Natura 2000, umożliwiając prowadzenie wielkoobszarowych i relatywnie niedrogich obserwacji rozmieszczenia gatunków inwazyjnych na obszarach chronionych.

Z kolei badania przeprowadzone przez Schustera i in. (2015) na obszarze Natura 2000 w północno-wschodnich Niemczech, miały na celu dokonanie oceny możliwości zastosowania zobrazowań satelitarnych RapidEye oraz TerraSAR-X do monitorowania otwartych siedlisk krajobrazowych pod kątem zmian środowiskowych i utraty różnorodności biologicznej. Do analizy wykorzystano roczne dane satelitarne w postaci 21 zobrazowań, pozyskanych za pomocą systemu satelitarnego multispektralnego (RapidEye) i radaru z syntetyczną aperturą (TerraSAR-X), mających na celu dokonanie podziału na siedem klas użytków zielonych. Dokładność klasyfikacji została oceniona i porównana w odniesieniu do typu sensora – multispektralnego lub radarowego – oraz minimalnej liczby potrzebnych zobrazowań satelitarnych. Uzyskane wyniki wykazały, że pozyskane dane satelitarne umożliwiają mapowanie analizowanych typów roślinno-

ści z bardzo wysoką dokładnością klasyfikacji, wynoszącą ponad 90%. Zgodnie z uzyskanymi wynikami stwierdzono, że przeprowadzenie klasyfikacji na podobnym poziomie dokładności przy wykorzystaniu satelity TerraSAR-X wymaga analizy większej ilości obrazowań satelitarnych.

Podsumowując opis przykładów praktycznego zastosowania danych satelitarnych w obszarze rolnictwa można sformułować następujące wnioski:

- poprawa rozdzielczości czasowej, przestrzennej i spektralnej obrazowań satelitarnych oraz bardzo dynamiczny rozwój narzędzi do przetwarzania danych, pozwalają na wiarygodne szacowanie powierzchni oraz rozpoznawanie gatunków upraw,
- wykorzystanie jednocześnie obrazowań optycznych i radarowych pozwala na uzyskanie wysokiej jakości klasyfikacji upraw we wczesnej fazie rozwoju roślin,
- analiza obrazowań satelitarnych z okresu bezpośrednio poprzedzającego zbiór roślin pozwala na szacowanie wysokości potencjalnych plonów, natomiast analiza obrazowań z różnych faz rozwoju roślin pozwala na wiarygodną prognozę plonu,
- obrazowania satelitarne stanowią najważniejszy element systemu szacowania zagrożenia oraz ryzyka występowania suszy,
- wskaźniki roślinności pozwalają na szybką ocenę stanu biochemicznego i biofizycznego roślinności, w tym zawartość wody, barwników i substancji budulcowych oraz stresu roślin w wyniku niedoboru wody,
- szeroki dostęp do darmowych danych teledetekcyjnych oraz łatwych w obsłudze narzędzi do ich przetwarzania pozwala na ocenę aktualnej kondycji roślin, co stanowi podstawę operacyjnego podejmowania decyzji w zakresie nawadniania, nawożenia czy stosowania środków ochrony roślin,
- dane teledetekcyjne pozwalają na bieżące monitorowanie stosowania kodeksu dobrej praktyki rolniczej, co może mieć przełożenie na funkcjonowanie obszarów Natura 2000,
- nie ma jednego uniwersalnego zestawu danych (obrazowań satelitarnych), który może być wykorzystywany do konkretnych zastosowań w rolnictwie (szacowanie powierzchni upraw, rozpoznawanie gatunków upraw, prognozowanie plonu, oceny kondycji upraw i in.), co wynika z dynamicznego rozwoju systemów pozyskiwania danych oraz narzędzi wykorzystywanych do ich analizy i przetwarzania.

6.4. Infrastruktura drogowa

Beata Hejmanowska

Wykorzystanie danych satelitarnych w monitorowaniu infrastruktury drogowej można przedstawić w dwóch aspektach:

- monitorowanie „cyklu życia” infrastruktury drogowej,
- planowanie przestrzenne i ochrona środowiska.

6.4.1. Monitorowanie „cyklu życia” infrastruktury drogowej

Monitorowanie „cyklu życia” infrastruktury drogowej można prowadzić wykorzystując różne dane teledetekcyjne w różnych fazach rozwoju infrastruktury drogowej, a głównie na etapach:

- projektowania i budowy,
- utrzymania i monitorowania.

„Cykl życia” infrastruktury drogowej obejmuje prace studyjne, projektowe, realizacyjne, związane z utrzymaniem drogi, ewentualne prace modernizacyjne i, w pewnych przypadkach, zmianę użytkowania terenu, czyli przekształcenie obszaru pokrytego infrastrukturą drogową w inny typ użytkowania. W monitorowaniu infrastruktury drogowej na wszystkich etapach wykorzystuje się techniki teledetekcyjne, geodezyjne, geotechniczne, geofizyczne.

W ostatnim czasie opracowano nowe wytyczne dotyczące wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego (RID, 2017), które zawierają dużą ilość informacji na temat różnych etapów „cyklu życia” infrastruktury drogowej. Metody teledetekcji satelitarnej mają większe zastosowanie na etapie studiów i projektowania, niż na etapie realizacji i bezpośredniej eksploatacji, czy przebudowy. Na tych etapach dominują naziemne pomiary geodezyjne lub zobrazowania bardzo wysokorozdzielcze, najczęściej z pułapu lotniczego lub dronów.

Na etapie eksploatacji teledetekcja satelitarna może być pomocna w monitorowaniu wpływu inwestycji drogowej na środowisko i w tym przypadku można wykorzystać potencjał metod badania zmian. Najbardziej zaawansowane korzystanie z obrazów satelitarnych polega na interpretacji struktur, obiektów i zjawisk pod powierzchnią. Na podstawie informacji o powierzchni terenu, uzyskanej w oparciu o interpretację obrazu, wyciągane są wnioski na temat warstw geologicznych znajdujących się pod powierzchnią ziemi. Przykładem jest badanie podłoża gruntowego, które w naszym klimacie najczęściej nie jest widoczne, ponieważ przykrywa je warstwa organiczna gleby i roślinność (ryc. 6.18). Różnice w wilgotności gleby, które nie są widoczne na kompozycji w barwach naturalnych, stają się łatwe do detekcji na kompozycji w barwach zafałszowanych (FCC). W przypadku gleby odkrytej, zróżnicowanie wilgotności jest widoczne na każdej kompozycji w postaci ciemniejszego, w stosunku do otoczenia, półpiersienia (wąskie pole po lewej stronie wskazane na rysunku strzałką).

Innym zagadnieniem jest badanie stanu nawierzchni drogi, które może być prowadzone kilkoma metodami:

- metoda akustyczna – ograniczeniem jest zawodność,

- metoda lidarowa (LiDAR) – ograniczeniem są warunki pogodowe,
- metoda georadarowa.



Ryc. 6.18. Detekcja obszarów nadmiernie uwilgotnionych na kompozycjach w barwach naturalnych i zafalszowanych: strzałką pokazano miejsca o zwiększonej wilgotności w stosunku do otoczenia (źródło: RID, 2017)

Główną wadą wyżej wymienionych metod naziemnych jest to, że mogą być wykorzystane jedynie w ograniczonym zakresie z uwagi na ich pracochłonność.

Wykorzystanie teledetekcji satelitarnej wydaje się interesującą alternatywą dla technik naziemnych. Istnieją w tym zakresie dwa podejścia:

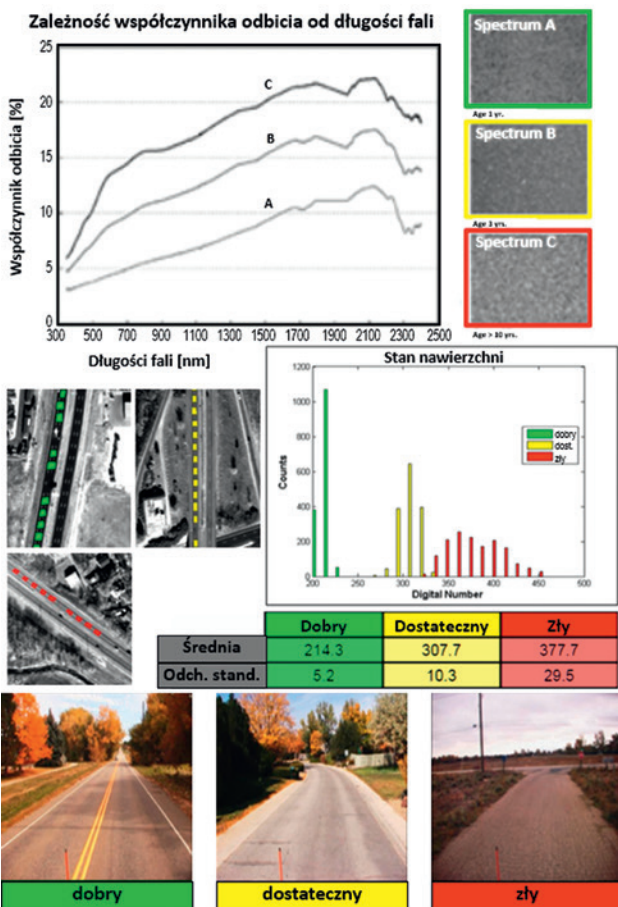
- analiza zmian właściwości nawierzchni z wykorzystaniem obrazów optycznych (np. WorldView-2, Sentinel-2), termalnych (np. Landsat 8, kanał 10 i 11) i radarowych (np. Sentinel-1),
- analiza potencjalnych zagrożeń, możliwość wystąpienia uszkodzeń (interferometria radarowa).

Analiza zmian właściwości nawierzchni z wykorzystaniem obrazów optycznych

Teledetekcyjny monitoring uszkodzeń nawierzchni dróg o analizę optycznych obrazów wielospektralnych wykorzystuje następujące właściwości optyczne nawierzchni asfaltowych (ryc. 6.19):

- nieszkodzone nawierzchnie są ciemniejsze (mają mniejszy współczynnik odbicia) niż nawierzchnie uszkodzone, poza tym charakteryzują się również bardziej jednorodną teksturą,
- minimalny współczynnik odbicia dla wszystkich typów dróg występuje dla długości fali ok. 350 nm i rośnie wraz z długością fali, największa różnica występuje w zakresie SWIR 1750 nm; należy zauważyć, że różne typy asfaltu odbijają w różny sposób, w związku z tym porównanie musi dotyczyć tego samego materiału.

W przypadku obrazów termalnych i radarowych wykorzystuje się, zamiast współczynnika odbicia, odpowiednio współczynnik emisyjności i współczynnik szorstkości.

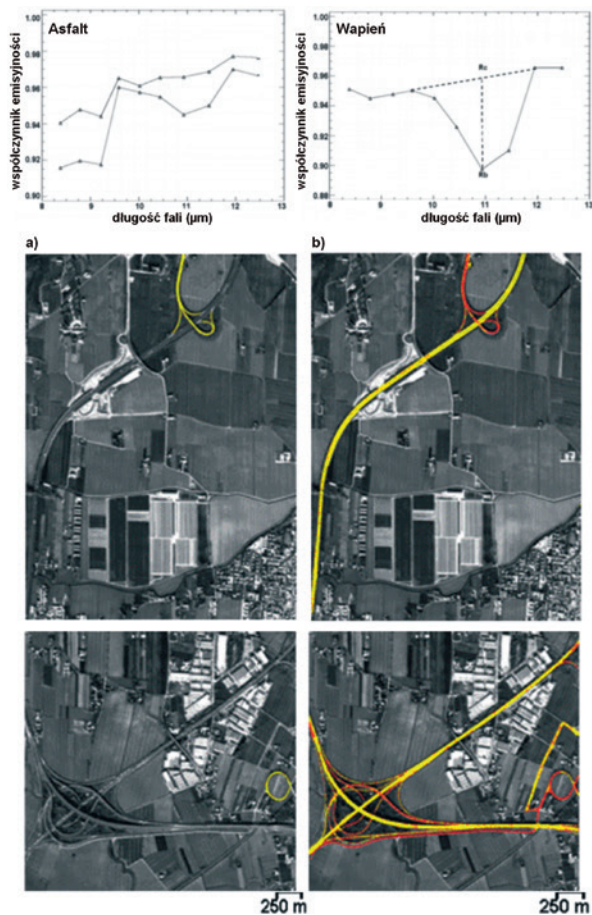


Ryc. 6.19. Przykładowe krzywe spektralne w zakresie VNIR (współczynnik odbicia) dla nawierzchni nowej, w dobrym stanie i dla nawierzchni o słabej jakości (źródło: Emery i in., 2014)

Nawierzchnia asfaltowa jest mieszaniną mineralno–asfaltową złożoną z kruszyw i lepiszcza. W składzie nawierzchni uszkodzonej zwiększa się udział cząstek kruszywa. Zjawisko to może być monitorowane w zakresie podczerwieni termalnej w zakresie TIR z wykorzystaniem długości fali pomiędzy 8 a 14 μm z uwagi na gwałtownie zmniejszający się w tym przedziale współczynnik emisyjności asfaltu, wynikający z pojawienia się krzemionki (por. rozdział 1.4.3).

Do badania stanu nawierzchni można wykorzystać obrazy termalne, zarejestrowane np. wielospektralnym skanerem lotniczym (ang. *Multispectral Infrared Visible Imaging Spectrometer*, MIVIS). Przykład zastosowania tego skanera można znaleźć w publikacji (Pascucci i in., 2008). W publikowanych badaniach analizę oparto o przebieg krzywej spektralnej w zakresie promieniowania termalnego o długości fali w przedziale 8–14 μm . Uszkodzenie nawierzchni powoduje pojawienie się cząstek kruszywa (krzemionki), co wpływa na zmianę przebiegu krzywej spektralnej, którą w tym przypadku wyraża zależność współczynnika emisyjności od długości fali, a konkretnie powoduje zmniejszenie współczynnika emisyjności w tym zakresie. Współczynnik emisyj-

ności nowego asfaltu rośnie, w miarę jednorodnie, wraz z długością fali. Asfalt z uszkodzoną nawierzchnią charakteryzuje się spadkiem wartości współczynnika emisyjności w zakresie ok. 11 μm . Spadek ten, spowodowany pojawieniem się na powierzchni krzemionki, widoczny jest na wykresie w postaci mniejszego współczynnika emisyjności dla około 11 μm (ryc. 6.20b). Na obrazach pokazano przykładowy wynik analizy współczynnika emisyjności, która pozwoliła na wydzielenie odcinków nowej nawierzchni (kolor żółty) i zużytej (kolor czerwony) (ryc. 6.20).



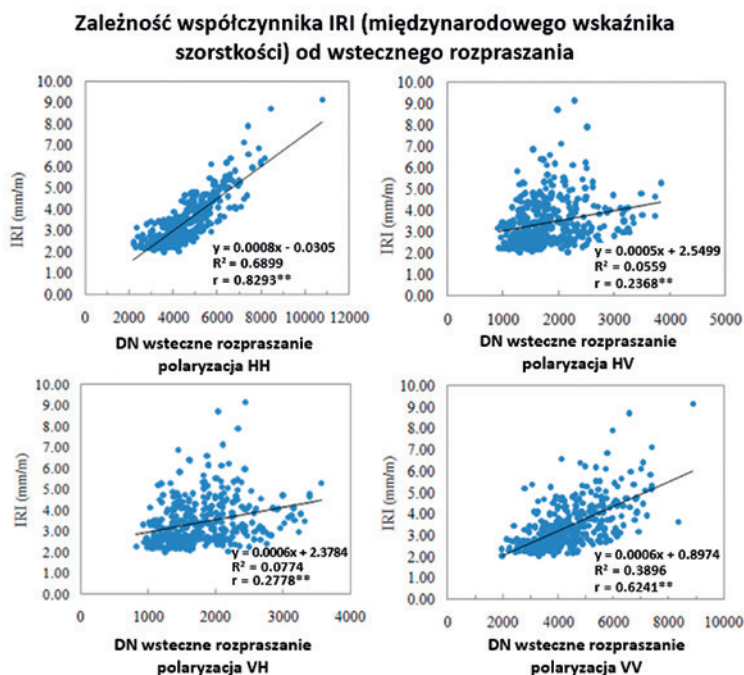
Ryc. 6.20. Przykładowe krzywe spektralne w zakresie TIR (współczynnik emisyjności): a) dla nawierzchni nowej, w dobrym stanie (nawierzchnia nieuszkodzona, kolor żółty); b) dla nawierzchni o słabej jakości (nawierzchnia uszkodzona, kolor czerwony) (źródło: Pascucci i in., 2008)

W celu scharakteryzowania stopnia uszkodzenia nawierzchni wprowadzono pojęcie międzynarodowego wskaźnika szorstkości (ang. *International Roughness Index*, IRI). Przykładem wykorzystania metod teledetekcyjnych, wykorzystujących zdalny sposób określania tego współczynnika, są metody radarowe. Monitorowanie uszkodzeń nawierzchni z wykorzystaniem obrazów radarowych polega na obserwacji zjawiska zwiększania się współczynnika wstecznego rozpraszania odbitego sygnału o polaryza-

cji HH lub VV wraz ze zużywaniem się nawierzchni. Metoda wydaje się użyteczna, gdyż uzyskuje się wartości korelacji pomiędzy współczynnikiem szorstkości powierzchni IRI, a współczynnikiem wstecznego rozpraszania na poziomie 90%.

Tabela 6.6. Niepewność modelowania stanu nawierzchni (Suanpaga i Yoshikazu, 2010)

		Nawierzchnia modelowana		(%)
		słaba	dobra	
Nawierzchnia obserwowana	słaba	112	30	78,87
	dobra	22	236	91,47
(%)		33,5	66,5	87



Ryc. 6.21. Zależność współczynnika IRI (międzynarodowego wskaźnika szorstkości) od wstecznego rozpraszania (źródło: Suanpaga i Yoshikazu, 2010)

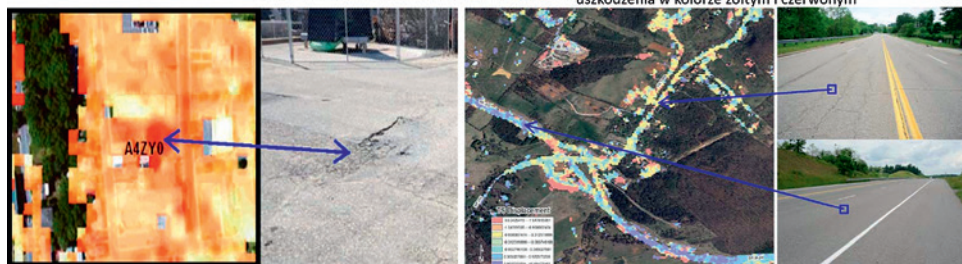
Na wykresie (ryc. 6.21) zaprezentowano zależność współczynnika IRI od wstecznego rozpraszania dla obrazów o różnej polaryzacji. Najwyższą wartość współczynnika determinacji ($R^2 = 0,69$) pomiędzy współczynnikiem szorstkości (IRI), a współczynnikiem wstecznego rozpraszania uzyskano w polaryzacji HH. Skuteczność rozróżnienia nawierzchni dobrej od słabej można prześledzić w tabeli 6.6, w której na przekątnej znajduje się liczba poprawnie zamodelowanych stanów nawierzchni drogi, co biorąc pod uwagę wszystkie analizowane przypadki (całkowitą sumę przypadków w tabeli 6.6), daje dokładność 87%. Na rycinie przedstawiono również przykładowe obrazy wstecznego rozpraszania dla różnych polaryzacji z nałożonymi autostradami prezentowanymi w kolorze czerwonym.

Analiza potencjalnych zagrożeń, możliwość wystąpienia uszkodzeń (interferometria radarowa)

Analizę potencjalnych zagrożeń spowodowanych osiadaniem terenu można przeprowadzić wykorzystując interferometrię radarową. Dane mogą pochodzić z jednego z dostępnych satelitów, np. Sentinel-1. Przykład analizy obszarów potencjalnie narażonych na uszkodzenia, czyli obszarów, w których wystąpiły osiadania, można znaleźć w publikacji (Hoppe i in., 2014). W obszarze maksymalnych deformacji rzeczywiście wystąpiły nieciągłe uszkodzenia drogi (ryc. 6.22). W celu wpasowania interferogramów zastosowano metodę punktów rozproszonych (ang. *distributed scatterers*, DS) i czasowych rozpraszaczy (ang. *temporary scatterers*, TS).

Metoda DS i TS – odcinek drogi w obszarze największych deformacji

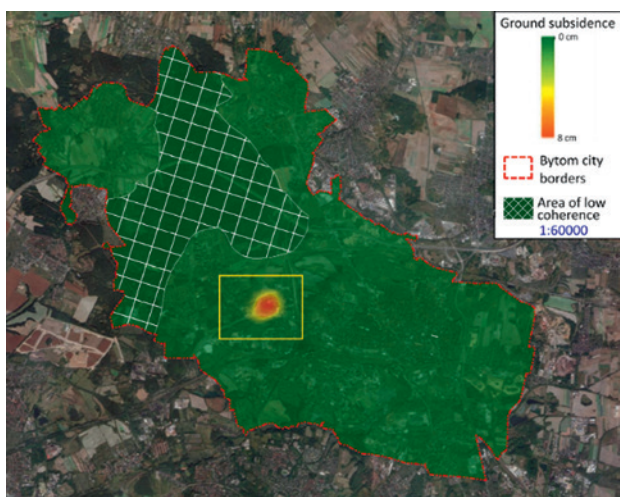
Metoda TS – nawierzchnie w dobrym stanie w kolorze niebieskim, uszkodzenia w kolorze żółtym i czerwonym



Ryc. 6.22. Detekcja uszkodzeń drogi w obszarze maksymalnych deformacji (źródło: Hoppe i in., 2014)

Podobną analizę przeprowadzono również na terenie Polski (Murdzek i in., 2018), wykorzystując dwa obrazy Sentinel-1 zarejestrowane w 2015 roku w odstępnie 24 dni. W wyniku osiadań terenu rzędu 5 cm zaobserwowano uszkodzenie nawierzchni części dróg na obszarze 0,95 km². Zniszczeniu uległa droga DK94 na odcinku 1200 m i droga DK88 na odcinku 1000 m. Wystąpiły także inne negatywne następstwa: awaria wodociągu, wiaduktu na ul. Wrocławskiej i stacji benzynowej. Przykładowa mapa osiadań wykorzystana do określenia potencjalnych obszarów zagrożonych wystąpieniem uszkodzenia dróg znajduje się na rycinie 6.23.

Metody pasywne oparte są o analizy zmiany przebiegu krzywych spektralnych nawierzchni drogi spowodowane jej zużyciem, ujawniającym się zmianami właściwości materiału – asfaltu lub betonu. Wykorzystanie tych metod wymaga znajomości zjawiska, w jaki sposób zmieniające się właściwości materiału nawierzchni wpływają na krzywą spektralną. Konieczne jest określenie, w jaki sposób zużycie nawierzchni wpływa na krzywe spektralne, czyli np. zidentyfikowanie czynnika, który z czasem zmienia współczynnik odbicia lub emisyjności promieniowania elektromagnetycznego. Należy przy tym zauważyć, że drogi mogą być pokryte różnym rodzajem asfaltu lub betonu. Ograniczenie to nie występuje w przypadku metody DInSAR (Differential Interferometry SAR), ponieważ przy jej zastosowaniu uzyskujemy obszary potencjalnie narażone na uszkodzenia, z tym że metoda ta nie sprawdza się w monitorowaniu naturalnego zużycia nawierzchni.



Ryc. 6.23. Mapa osiadań 29.11.2015–23.12.2015: na biało zaznaczono obszar niskiej koherencji (źródło: Murdzek i in., 2018)

6.4.2. Analiza wpływu dróg na środowisko

Obrazy satelitarne są cennym źródłem informacji w zakresie drogownictwa w aspekcie:

- planowania przestrzennego,
- ochrony środowiska, w tym:
 - badania wpływu dróg na środowisko,
 - monitorowania zieleni przyulicznej i przydrożnej,
 - monitorowania klimatu miejskiego.

Identyfikacja przebiegu dróg

Automatyczne wydobycie informacji o drodze z obrazu teledetekcyjnego jest stosunkowo trudnym zadaniem. Trudności powodowane są przez:

- podobieństwo spektralne powierzchni dróg do zabudowy, gleb odkrytych i czasem wody,
- szerokość drogi w stosunku do wielkości piksela obrazu,
- duży wpływ warunków, w jakich rejestrowany jest obraz:
 - warunki oświetleniowe (pora roku, dnia),
 - warunki atmosferyczne,
 - otoczenie drogi (grunty, budynki, lasy),
- typ sensora rejestrującego obraz.

Drogi na obrazach odznaczają się różnymi charakterystycznymi cechami. Cechy te można podzielić na kilka grup, jak np. właściwości geometryczne, spektralne, topologiczne i in. Teoretycznie do pozyskania informacji o drodze można wykorzystać wszystkie cechy, im więcej cech jest wykorzystanych, tym wyższa jest dokładność uzyskanych danych. Podczas przetwarzania obrazów najczęściej dostępna jest tylko część z tych

cech lub wykorzystanie niektórych z nich jest bardzo trudne. Najprostszym przykładem jest wykorzystanie wskaźników spektralnych, np. indeksu zabudowy (ang. *Built-up Areas Index*, BAI), znormalizowanego indeksu zabudowy (ang. *Normalized Difference Built-up Index*, NDBI; wzór 2.19) lub wskaźnika opracowanego na potrzeby wydzielenia dróg, indeks dróg (ang. *Road Extraction Index*, REI) (Shahia i in., 2015).

$$BAI = B - \frac{NIR}{B} + NIR \quad (6.1)$$

$$REI = \left(NIR2 - \frac{B}{NIR2} + B \right) \cdot NIR2 \quad (6.2)$$

W związku z pochłanianiem fal o długościach 520 i 870 nm przez tlenki żelaza zawarte w nawierzchniach drogowych, wskaźnik REI bazuje na kanałach B i NIR2 (WorldView-2). Warto zauważyć, że w nowym wskaźniku zaproponowanym przez autorów (Shahia i in., 2015) wykorzystano kanał NIR2 WorldView-2 jako mnożnik, w celu wyeliminowania zakłócającego „efektu wody” (ang. *water-body effect*), pojawiającego się zwykle przy próbie wydzielenia zabudowy. W związku z podobieństwem spektralnym zabudowy i wody, często w wyniku klasyfikacji automatycznej uzyskuje się błędnie zaklasyfikowane piksele, jako woda w obrębie zabudowy. W podsumowaniu autorzy podają ogólną dokładność identyfikacji dróg na poziomie 86% i 88%, zależnie od obszaru.

Automatyczny wybór lokalizacji drogi i analiza pokrycia terenu w pasie wzdłuż drogi

Innym przykładem wykorzystania zdjęć satelitarnych w planowaniu przestrzennym, może być procedura automatycznej lokalizacji nowej drogi. Zagadnienie to jest interesujące z uwagi na możliwość efektywnego wykonywania analiz wariantowych, uwzględniających kryteria proponowane przez różne grupy interesariuszy i bilansowanie tych kryteriów z uwzględnieniem poziomu ryzyka. Kluczowe znaczenie w tym przypadku ma informacja o pokryciu terenu, dla pozyskania której aktualne obrazy teledetekcyjne są nieocenionym źródłem danych. Regularnie pozyskiwane obrazy Sentinel-1 i Sentinel-2 są tu bardzo dobrym przykładem.

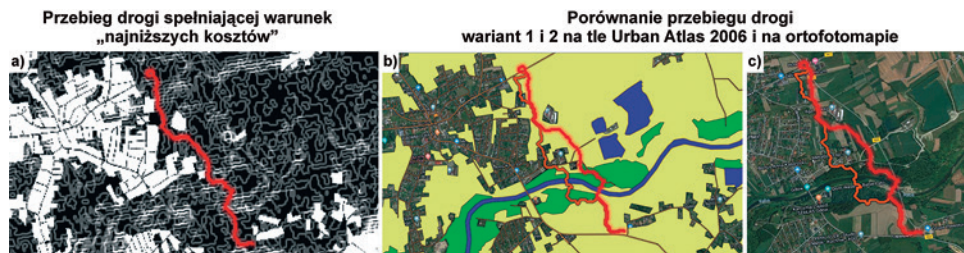
Nie bez znaczenia jest możliwość wykonywania analiz on-line, dzięki dostępności w narzędziach GIS algorytmów do automatycznego projektowania przebiegu drogi.

Przykładem jest tzw. algorytm „najkrótszej drogi”, a właściwie „najniższych kosztów” (ang. *Least Cost Path*). Pojęcie „najkrótszej drogi” jest ujmowane w cudzysłów, ze względu na to, że w rzeczywistości zaprojektowana w ten sposób droga nie jest najkrótsza z geometrycznego punktu widzenia. Algorytmy „najkrótszej drogi” wymagają zdefiniowania początku i końca nowej drogi (nie muszą to być punkty, mogą być to po prostu dwie już istniejące drogi) oraz tzw. „tarcia”.

„Tarcie” również nie oznacza tarcia w sensie fizycznym, tylko określa trudność w poruszaniu się po terenie (trudność w przeprowadzeniu w danym miejscu drogi). Teoretycznie łatwiej zbudować drogę przez łąkę, niż przez las, zakładając brak innych ograniczeń, np. związanych z własnością gruntu i również z reguły łatwiej i taniej zbudować drogę na terenie płaskim, niż górzystym. Mapa „tarcia” to obraz, na którym do każdego piksela przypisuje się wielkość „tarcia”, przy czym, w związku z tym, że nie są to wielkości fizyczne, przypisuje się im wartości proporcjonalne do ograniczeń, np. brak „tarcia”, w przypadku łąki, może to być wartość 1, dla pól uprawnych wartość 10 razy większa, dla lasu 100 razy większa, a dla istniejącej zabudowy, rozumianej jako bariera, wartość

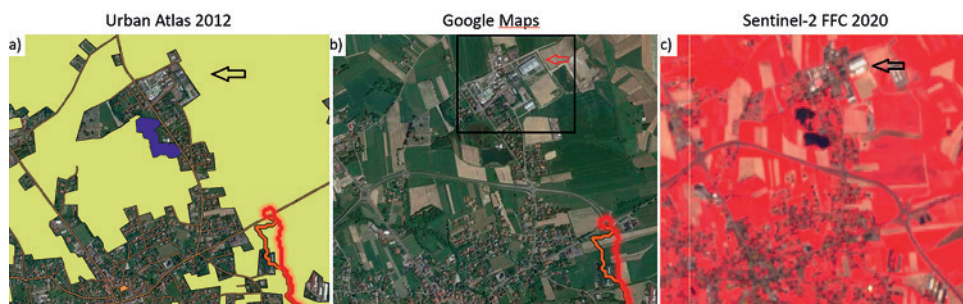
1000. W przypadku analizy ukształtowania terenu, z wykorzystaniem NMT można obliczyć nachylenia i przypisać małe wartości „tarcia” terenom o niewielkim nachyleniu, a duże wartości „tarcia” dużym nachyleniom. Można wprost przyjąć jako „tarcie” wartości nachyleń. Mapy składowe „tarcia” dla poszczególnych cech terenu łączy się uzyskując „tarcie” wypadkowe (ryc. 6.24a).

W analizie przeprowadzonej na potrzeby zilustrowania metody wyboru „najkrótszej drogi”, przyjęto w pierwszym wariantcie „tarcie” równe nachyleniom terenu. W sposób automatyczny uzyskano przebieg planowanej drogi, zgodnie z warunkiem: im nachylenie mniejsze, tym lepiej (droga w kolorze pomarańczowym na tle mapy Urban Atlas (UA) (ryc. 6.24b) i Google Maps (ryc. 6.24c)). Zaprojektowana droga przecina istniejącą zabudowę i w związku z tym przeprowadzono drugi wariant analizy, uwzględniając jako barierę zabudowę z mapy pokrycia terenu (UA). Zmodyfikowana mapa „tarcia”, wraz z drogą uzyskaną w wariantcie drugim, zwizualizowaną w kolorze czerwonym przedstawiono na rysunku (ryc. 6.24a). W kolorze białym przedstawiono istniejącą zabudowę, dla której wielkość „tarcia” jest bardzo wysoka, ponieważ chcemy ominąć zabudowę, natomiast w kolorze szarym „tarcie” związane jest z nachyleniem. Na rycinie 6.24a zaznaczono przebieg drogi uzyskany automatycznie z uwzględnieniem w ten sposób zdefiniowanego „tarcia”. Uzyskanie wiarygodnego wyniku takiej analizy wymaga aktualnych danych o istniejącej zabudowie. Do analizy pozyskano obszar zabudowy z mapy pokrycia terenu (UA). Na rysunku (ryc. 6.25a) znajduje się fragment UA z zabudową z ustawieniem przezroczystości na tle ortofotomapy Google Maps, strzałką pokazano nową zabudowę, która jest bardzo dobrze widoczna na obrazie Sentinel-2 z roku 2020 (ryc. 6.25c).

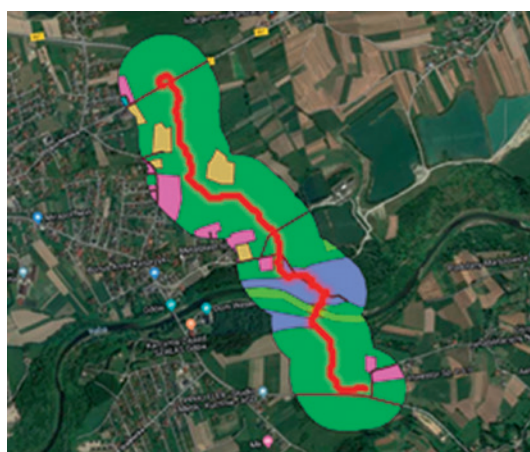


Ryc. 6.24. Wybór „najkrótszej drogi”: a) mapa „tarcia”, na której w kolorze białym przedstawiono bariery (istniejącą zabudowę o wartości „tarcia” 1000), w kolorze szarym inne typy pokrycia o zróżnicowanym nachyleniu, a w kolorze czarnym obszar o najniższym „tarcia” (łąki na terenach płaskich), naniesiono zaprojektowaną automatycznie drogę w kolorze czerwonym; b) dwa warianty drogi na tle Urban Atlas (pomarańczowa uwzględnia tylko nachylenie terenu, czerwona nachylenie terenu i zabudowę); c) dwa warianty drogi na tle ortofotomapy z Google Maps

Jak widać, dane teledetekcyjne pozwalają na weryfikację i ewentualne uaktualnienie mapy pokrycia terenu, która jest bardzo często materiałem źródłowym w różnych analizach GIS, w tym przypadku w analizie automatycznego wyboru najkrótszej drogi. Narzędzia GIS umożliwiają ponadto wykonywanie różnych analiz przestrzennych. Przykładowy wynik analiz obiektów w strefie buforowej planowanej drogi znajduje się na rycinie 6.26. W tabeli 6.7 zamieszczono zestawienie liczby obiektów dla poszczególnych typów pokrycia wraz z minimalną, maksymalną i średnią powierzchnią obiektu danego typu.



Ryc. 6.25. Przykład nieaktualnej mapy Urban Atlas, możliwość weryfikacji i aktualizacji z wykorzystaniem obrazu Sentinel-2 (strzałką zaznaczono nową zabudowę widoczną w jasnoniebieskim kolorze na Google Maps i Sentinel-2, której nie ma w bazie UA)



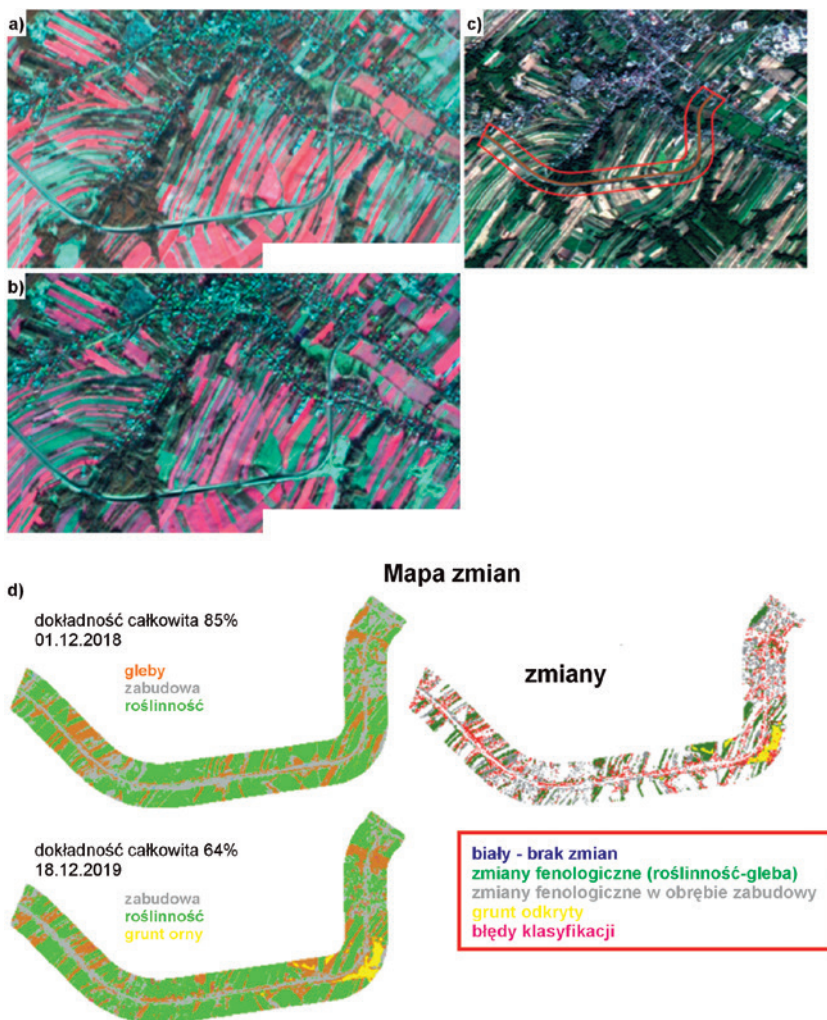
Ryc. 6.26. Analiza typów pokrycia terenu Urban Atlas w strefie buforowej wzdłuż planowanej drogi

Tabela 6.7. Zestawienie liczby obiektów i ich powierzchni [m²] dla poszczególnych typów pokrycia terenu w strefie buforowej wzdłuż planowanej drogi

LULC	Liczba	Min. pow.	Maks. pow.	Średnia pow.
Zabudowa gęsta	2	12	963	487
Zabudowa rozproszona	11	276	22 515	6117
Obszary przemysłowe	5	2541	18 131	8813
Obszary rolne	8	2103	380 809	91 830
Las	3	15 087	50 895	33 365
Woda	2	2333	24 503	13 418
Drogi	5	44	6315	3741

Podobne analizy można wykonywać w trakcie budowy drogi. Przykładem jest analiza zmian pokrycia/użytkowania terenu spowodowanych budową węzła drogowego na drodze S19 w okolicy Kraśnika (ryc. 6.27). Planowany przebieg drogi S19 wraz z dwustumetrową strefą buforową zaznaczono na obrazie Google Map w kolorze czerwonym (ryc. 6.27c). Na obrazie Sentinel-2 z 1 stycznia 2018 roku w kompozycji w barwach zafałszowanych (FCC) widoczny jest przebieg drogi (ryc. 6.27a), a około roku później zarejestrowano efekt prac rozpoczętej budowy węzła drogowego (widoczny odkryty grunt w kolorze jasnoniebieskim na kompozycji z 18 grudnia 2019 roku; ryc. 6.27b).

W celu określenia zmian pokrycia/użytkowania terenu wykonano klasyfikację nadzorowaną obu obrazów, przyjmując pięć klas: woda, roślinność, zabudowa, gleba i grunt odkryty. Analizę zmian przeprowadzono w strefie buforowej, porównując powierzchnie zajmowane przez poszczególne klasy przed i po rozpoczęciu prac budowlanych (tabela 6.8). Mapa zmian (ryc. 6.27d), mapa krzyżowa obu wyników klasyfikacji,



Ryc. 6.27. Analiza zmian pokrycia/użytkowania terenu w buforze wzdłuż drogi

przedstawia dla każdego piksela informację o typie użytkowania z obu dat rejestracji (5 × 5 kombinacji „każdy z każdym”). Obszar zaznaczony na biało oznacza brak zmian, czyli dla danego piksela, w obu przypadkach uzyskano tą samą klasę pokrycia/użytkowania terenu (kombinacje 1:1, 2:2, 3:3 itd.).

Duży wpływ na analizy czasowe ma roślinność, a właściwie różny stopień jej rozwoju fenologicznego, który obserwuje się głównie na polach uprawnych, ale także w obszarze zabudowanym (kombinacje: 4:2, wcześniej gleba odkryta, później roślinność, co może być spowodowane rozwojem fenologicznym posianego jesienią poplonu lub 2:3, wcześniej roślinność, później zabudowa, co może być spowodowane utratą liści jesienią w zadrzewionych obszarach zabudowanych). Dlatego też tego rodzaju zmiany zostały wyodrębnione (w kolorze zielonym i szarym) ze zmian spowodowanych pracami budowlanymi (grunt odkryty w kolorze żółtym).

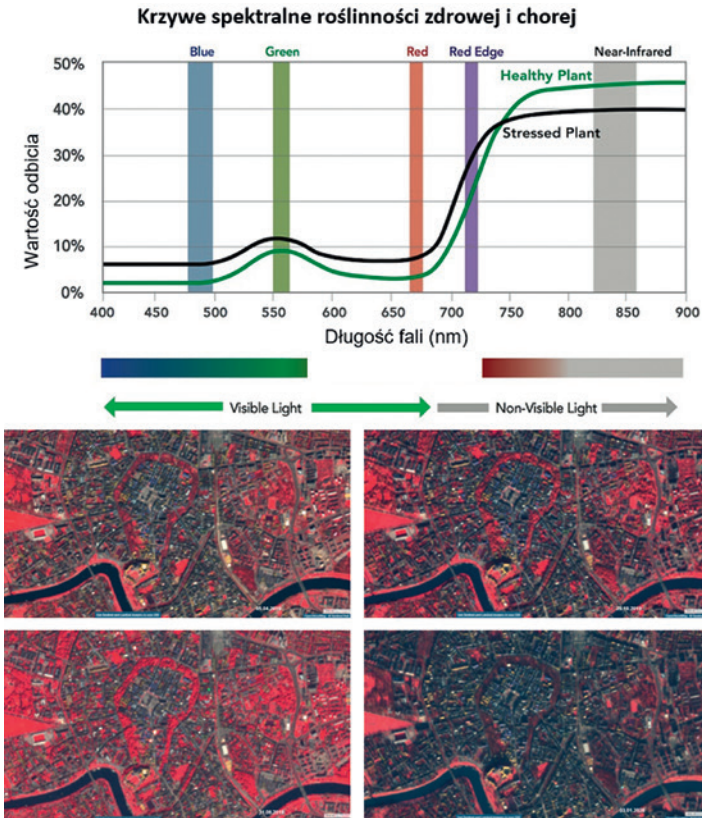
Tabela 6.8. Udział powierzchniowy klas (m²)

Klasa	01.12.2018	18.12.2019	Różnica
1 – Woda	700		700
2 – Roślinność	954 900	975 000	20 100
3 – Zabudowa	635 300	502 300	-133 000
4 – Gleba	347 400	375 700	28 300
5 – Grunt odkryty		85 300	-85 300

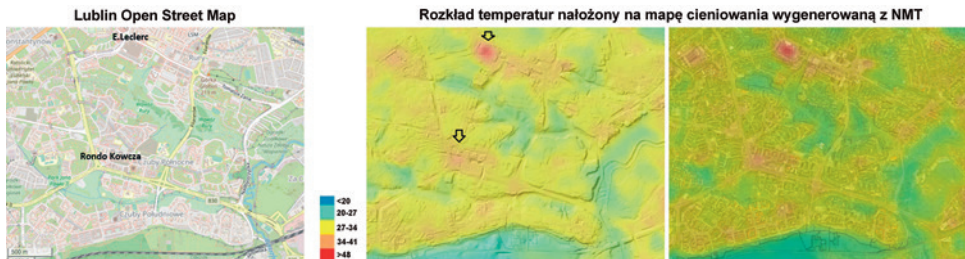
Monitorowanie zieleni przyulicznej i klimatu miejskiego

Innym zagadnieniem związanym z drogownictwem jest monitorowanie zieleni przyulicznej i przydrożnej oraz klimatu miejskiego. Na sekwencjach obrazów obejmujących różne okresy fenologiczne roślin można przeanalizować zielen przyuliczną i przydrożną oraz dokonać oceny stanu zdrowotności roślin wykorzystując np. kanały czerwieni krawędziowej obrazów Sentinel-2 (ryc. 6.28). Na wykresie (ryc. 6.28) pokazano krzywe spektralne roślinności w dobrej i złej kondycji zdrowotnej (MicaSense, 2017), np. uszkodzonej w wyniku oddziaływania infrastruktury drogowej. Wartość współczynnika odbicia w podczerwieni dla roślinności w złej kondycji zdrowotnej jest mniejsza niż dla roślinności w dobrej kondycji. Ponadto następuje tzw. przesunięcie krzywej spektralnej w czerwieni krawędziowej (przesunięcie krzywej w kolorze czarnym w stosunku do krzywej w kolorze zielonym w stronę fal krótszych; ryc. 6.28).

Monitorowanie klimatu miejskiego jest możliwe m.in. w oparciu o analizę mapy rozkładu temperatury, której wartość można uzyskać z obrazu Landsat 8 kanały 10 i 11. Za pomocą dodatku do programu QGIS Semi-automatic Classification Plugin można w sposób automatyczny przetworzyć obrazy Landsat 8 do postaci mapy przedstawiającej rozkład temperatury. Na obrazie temperatur można zaobserwować „wyspy ciepła”, którymi są powierzchnie betonowe i asfaltowe (place, budynki oraz drogi; ryc. 6.29). Na poniższej mapie rozkładu temperatury nałożonej na NMT, w środkowej części widoczny jest Wąwóz Rury (zimniejszy niż otoczenie), a jako wyspy ciepła można na przykład zauważyć dach sklepu wielkopowierzchniowego (E. Leclerc) i rondo Kowcza.



Ryc. 6.28. Analiza zieleni przyulicznej; kompozycje Sentinel-2 w barwach fałszywych (źródło: SentinelHub, 2020); krzywe spektralne roślinności zdrowej i chorej (wartość współczynnika odbicia w podczerwieni dla roślinności chorej jest mniejsza niż dla roślinności zdrowej, ponadto następuje tzw. przesunięcie krzywej spektralnej w kanale RedEdge; źródło: MisaSense, 2017)



Ryc. 6.29. Monitorowanie klimatu miejskiego (Lublin) (źródło: Hyperlab, 2019)

Podsumowując niniejszy podrozdział można sformułować następujące wnioski:

- niewystarczająca rozdzielczość przestrzenna obrazów satelitarnych może być ograniczeniem w wykorzystaniu danych satelitarnych do monitorowania infrastruktury drogowej,
- w trakcie prac związanych z powstawaniem inwestycji drogowych dane satelitarne mogą być wykorzystywane na etapie studiów i projektowania lub w mniejszym stopniu na etapie realizacji, np. w zakresie detekcji obszarów nadmiernie

uwilgotnionych; prace ziemne związane z budową drogi są dobrze widoczne na obrazach satelitarnych,

- prace związane z utrzymaniem infrastruktury drogowej mogą być wspierane danymi z satelitów o średniej rozdzielczości przestrzennej (Sentinel-1 i -2, Landsat 8) oraz obrazami satelitarnymi o wysokiej i bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej,
- do monitorowania nawierzchni drogi można wykorzystywać zjawisko zmienności właściwości spektralnych nawierzchni drogi związanych z jej właściwościami fizyko–chemicznymi; zużywanie się nawierzchni powoduje zmniejszanie się współczynnika odbicia i współczynnika emisyjności,
- międzynarodowy współczynnik szorstkości (IRI) można wyznaczyć wykorzystując współczynnik wstecznego rozpraszania, otrzymywany z obrazów radarowych, np. Sentinel-1,
- w obszarach występowania ruchów powierzchni ziemi spowodowanych np. działalnością górniczą lub szczypaniem wód podziemnych, potencjalne uszkodzenia nawierzchni dróg mogą być wykrywane w obszarach największych osiadań wyznaczonych metodą interferometrii radarowej,
- do identyfikowania sieci infrastruktury drogowej rekomendowane są wskaźniki: indeks obszarów zabudowanych (BAI), znormalizowany indeks zabudowy (NDBI), indeks dróg (REI),
- dane satelitarne, wspólnie z innymi danymi przestrzennymi (NMT, LULC) i narzędziami GIS stanowią cenne wsparcie procesu planowania przestrzennego,
- badanie wpływu dróg na środowisko, monitorowanie zieleni przyulicznej, przydrożnej i klimatu miejskiego może być z powodzeniem wykonywane z wykorzystaniem danych satelitarnych; szczególnie zalecanymi zakresami spektralnymi są: czerwień krawędziowa, bliska podczerwień i podczerwień termalna.

6.5. Gospodarka wodna

Według najnowszych badań postępujące zmiany klimatu wiążą się z coraz większym ryzykiem powodzi. Przewiduje się, że powódzie o prawdopodobieństwie wystąpienia raz na 100 lat podwoją swoją częstotliwość w ciągu najbliższych kilku dekad. Niestety, ze względu na postępujące zmiany klimatu, powódzie będą klęskami żywiołowymi o największym potencjale szkód, zagrażając największej liczbie ludzi.

6.5.1. Ocena zagrożenia powodziowego i zarządzanie kryzysowe

Sylwia Szporak-Wasilewska, Jarosław Chormański

Doświadczenia europejskie z początku XXI wieku (powódzie na Dunaju i Łabie) uwiaryściły potrzebę poprawy oceny zagrożenia powodziowego i zarządzania kryzysowego. Skłoniło to Komisję Europejską do zainicjowania rozwoju Europejskiego Systemu Informowania o Powodziach (ang. *European Flood Awareness System*, EFAS) (EFAS, 2020a; Smith i in., 2016).

Celem EFAS jest dostarczanie w czasie rzeczywistym ogólnoeuropejskich informacji wczesnego ostrzeżenia o sytuacjach nadzwyczajnych – ryzyku wystąpienia dużych

powodzi oraz obejmujących prognozy dla krajowych służb prognostycznych i Centrum Koordynacji Reagowania Kryzysowego (ERCC) Komisji Europejskiej. EFAS przechowuje także regularnie aktualizowane informacje związane z powodziami, takie jak probabilistyczne prognozy powodziowe średniego zasięgu (w tym powodzi krótkoterminowych), prognozy sezonowe oraz oceny skutków i wczesne ostrzeżenia.

EFAS udostępnia ogólnoeuropejskie mapy poglądowe dotyczące zagrożeń powodziowych z dziesięciodniowym wyprzedzeniem. W przypadku stacji pomiarowych dokonujących pomiarów w trybie rzeczywistym dostarcza także późniejsze prognozy. Jako transgraniczny system prognozowania w skali kontynentalnej EFAS oferuje produkty prognostyczne, które są komplementarne do systemów krajowych lub regionalnych dla zlewni powyżej 2000 km². W przeciwieństwie do globalnych systemów, tj. GloFAS (The Global Flood Awareness System), wyższa rozdzielczość przestrzenna EFAS pozwala na dokładniejszą analizę procesów hydrologicznych.

Opracowywane w EFAS mapy zagrożenia powodziowego mają rozdzielczość przestrzenną wynoszącą 1 × 1 km na świecie i 100 × 100 m w Europie. W połączeniu z najnowocześniejszymi modelami prognozowania dostarczają szczegółowych informacji o ryzyku związanym z powodzią pod względem prawdopodobieństwa wystąpienia, wielkości, czasu i wpływu.

EFAS korzysta z wielu działających w Europie systemów hydrometeorologicznych do generowania produktów prognostycznych na podstawie wyników modelu hydrologicznego wykorzystującego numeryczne prognozy pogody. System korzysta obecnie z danych Europejskiego Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF), Konsorcjum Modelowania w małej skali (COSMO) oraz Niemieckiej Służby Meteorologicznej (Deutscher Wetterdienst, DWD) (ryc. 6.30). Produkty systemu są na bieżąco analizowane i w przypadku wzrostu zagrożenia powodzią, w tym powodzią błyskawiczną (ang. *Flash Flood*) społeczność lokalna jest informowana z wykorzystaniem formalnych i nieformalnych narzędzi oraz codziennego monitorowania prognoz krajowych. Formalne powiadomienie powodziowe wydawane jest, gdy prawdopodobieństwo przekroczenia krytycznych progów powodziowych prognozowane jest na ponad 2 dni w dorzeczu o powierzchni co najmniej 2000 km² i przynajmniej jednej prognozie deterministycznej przekraczającej pięcioletni okres zwrotu w EFAS. Powiadomienia są automatycznie dodawane do przeglądu ERCC i w przypadku zagrożenia zgłaszane służbom ochrony ludności.

Systemy prognozowania operacyjnego EFAS można podzielić na kilka głównych bloków funkcyjnych:

- dane hydrometeorologiczne i dane teledetekcyjne,
- modele meteorologiczne i hydrologiczny,
- produkty prognostyczne i alerty powodziowe,
- upowszechnianie.

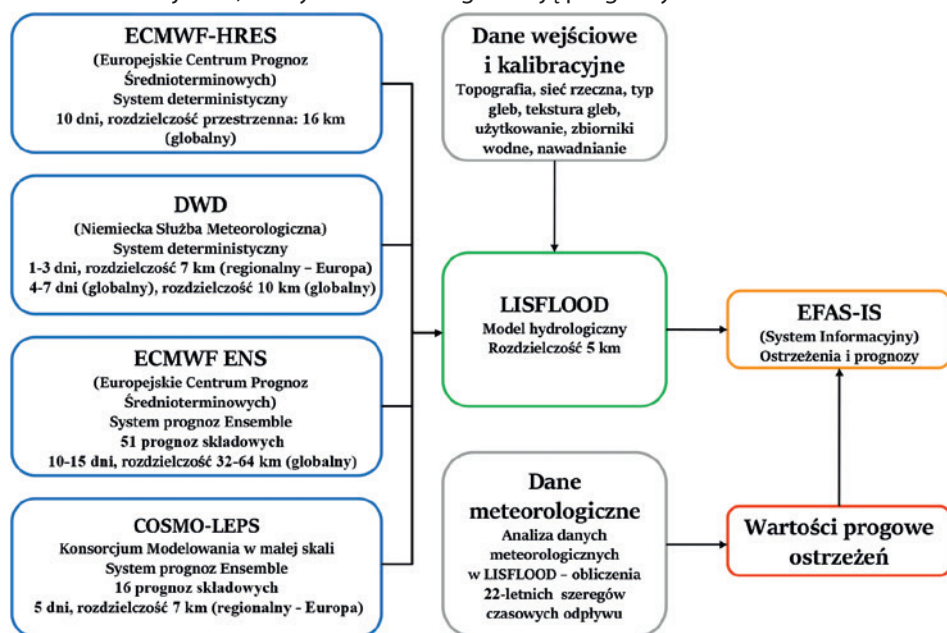
Dane hydrometeorologiczne i dane teledetekcyjne

Wymagania systemu EFAS w zakresie danych statycznych obejmują topografię, użytkowanie terenu, sieć rzeczna i geologię, a w zakresie danych dynamicznych obserwacje hydrometeorologiczne oraz prognozy pogody. Aktualne dane dynamiczne z obserwacji in situ, pozyskiwane z krajowych stacji obserwacyjno-pomiarowych są w systemie niezbędne do obliczenia początkowych warunków hydrometeorologicznych i danych prognostycznych. Dane historyczne (głównie z bazy JRC MARS (Moni-

toring Agricultural Resources)) służą do kalibracji modelu hydrologicznego i do określenia progów powodziowych dla produktów prognostycznych. System EFAS wykorzystuje dane pozyskane teledetekcyjnie obejmujące topografię (np. z misji SRTM, czy ASTER-GDEM), pokrycie terenu (z programu CORINE Land Cover), aktualną wilgotność gleby (np. z misji SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) i ASCAT (Advanced Scatterometer)) czy zapas wody w pokrywie śnieżnej (na podstawie danych radarowych z programu Copernicus Service Snow and Land Ice).

Modele meteorologiczne

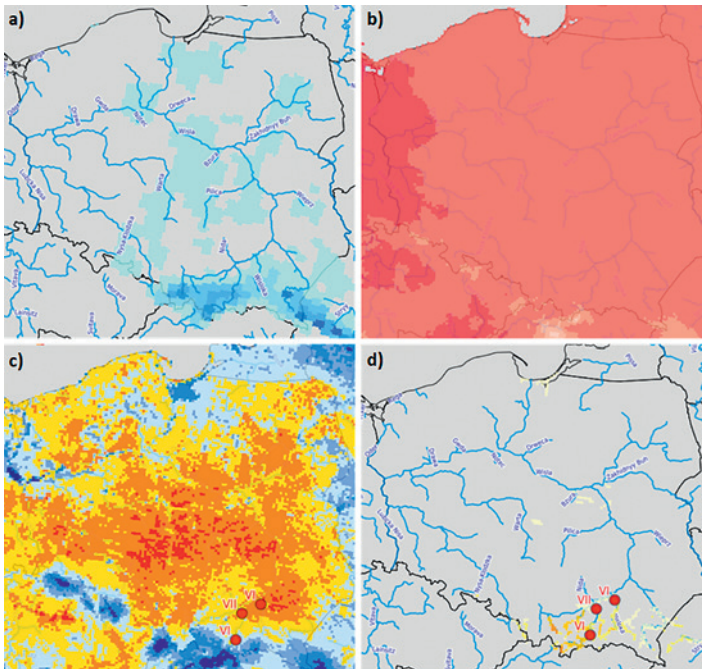
EFAS został zaprojektowany do pracy z kilkoma systemami numerycznej prognozy pogody (NWP). Dwa z nich oparte są na zintegrowanym systemie prognozowania Europejskiego Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF): ECMWF-HRES (deterministyczna prognoza wysokiej rozdzielczości) i ECMWF-ENS (kompleksowa prognoza niższej rozdzielczości). Kolejny system, oferowany przez niemiecką służbę meteorologiczną, zapewnia deterministyczną prognozę opartą na połączeniu modeli globalnych i modeli w mniejszej skali. Kończącym produktem meteorologicznym jest COSMO-LEPS (System Prognozowania Zespolonego na Ograniczonym Obszarze Konsorcjum Modelowania w Małej Skali). Wszystkie modele generują prognozy o 00:00 i 12:00 czasu UTC.



Ryc. 6.30. Komponenty Europejskiego Systemu Informowania o Powodziach – EFAS (Emerton i in., 2016)

Model hydrologiczny

Wykorzystywany w EFAS model LISFLOOD (Burek i in., 2013) to oparty na systemie informacji geograficznej (GIS) model hydrodynamiczny do operacyjnego prognozowania powodzi w skali ogólnoeuropejskiej. Wykorzystując dane meteorologiczne, model oblicza pełny bilans wodny w sześciogodzinnym lub dobowym interwale czasowym.



Ryc. 6.31. Wybrane produkty systemu EFAS: a) prawdopodobieństwo wystąpienia opadu > 150mm, b) temperatura powietrza, c) wilgotność gleby, d) prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi z lokalizacją punktów raportowania i przekroczeniem poziomu progowego (źródło: EFAS, 2020b)

Symulowane procesy obejmują topnienie śniegu, zamarzanie gleby, spływ powierzchniowy, infiltrację, przepływ preferencyjny, redystrybucję wilgotności gleby w profilu glebowym, filtrację do systemu wód podziemnych, odpływ podziemny i retencję wód podziemnych. Wykorzystywane przez model dane przestrzenne są uzyskiwane z europejskich baz danych: właściwości gleb obejmujące typ gleb, teksturę gleby, gęstość objętościową, czy zawartość materii organicznej z europejskiego systemu informacji o glebach (ang. *The European Soil Information System*, EUSIS); szata roślinna i jej parametry biofizyczne, takie jak powierzchnia projekcyjna liści (ang. *Leaf Area Index*, LAI) z produktów GlobCarbon opracowywanych na podstawie comiesięcznych danych satelitarnych o rozdzielczości przestrzennej 1 km GSD z satelitów SPOT-4 i -5 (Program SPOT-VEGETATION, SPOTIMAGE/VITO); pokrycie terenu z programu CORINE Land Cover (European Environment Agency, EEA) wykorzystującego obecnie dane satelitarne z misji Landsat 8 i Sentinel-2. Uzupełniająco wykorzystuje się także dane Global Land Cover 2000 (GLC2000); numeryczny model terenu (NMT) z misji SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) zrealizowanej z pokładu promu kosmicznego Endeavour czy EU-DEM (Copernicus Land Monitoring Service) łączący dane z SRTM z danymi ASTER-GDEM. Dane dotyczące sieci rzecznej pochodzą z systemu CIS (Catchment Information System) i są opracowywane na podstawie produktu GTOPO30 udostępnianego przez centrum USGS EROS. Wybrane parametry meteorologiczne są pobierane z baz danych JRC MARS (Monitoring Agricultural Resources) i EU-FLOOD-GIS.

Produkty prognostyczne i alerty powodziowe

Za generowanie prognoz w EFAS odpowiada centrum obliczeniowe. Prognozy hydrologiczne EFAS są tworzone dwa razy dziennie w ramach cykli 00 i 12. Są zaprezentowane na ryc. 6.31:

- prognozy powodziowe średniego zasięgu – określają ryzyko wystąpienia powodzi w ciągu najbliższych 10 dni (produkty: punkty raportowania, prawdopodobieństwo powodzi, ryzyko przekroczenia prognozy, ocena wpływu);
- sezonowe prognozy hydrologiczne – podsumowują sytuację hydrologiczną w ciągu najbliższych 8 tygodni (produkty: mapy przeglądowe, szeregi czasowe odpływu rzeczny);
- prognozy skutków powodzi – podkreślają regiony o oczekiwanych skutkach wystąpienia w ciągu najbliższych 10 dni.

EFAS generuje alerty powodziowe informując krajowe służby meteorologiczne tylko wtedy, gdy istnieje niebezpieczeństwo przekroczenia przyjętych progów krytycznych.

EFAS tworzy także alerty typu Flash Flood dotyczące ryzyka wystąpienia powodzi błyskawicznej w ciągu najbliższych pięciu dni. Dotychczas system realizował to zadanie przez wykrywanie burz z ekstremalnymi opadami deszczu mającymi miejsce w krótkich okresach czasu (w ciągu 6, 12 i 24 godzin) oraz w zlewniach małych (< 5000 km²) narażonych na gwałtowne powodzie. Europejski wskaźnik opadów oparty był na wskaźniku EPIC (European Precipitation Index based on simulated Climatology), stosowanym tu jako wskaźnik nadchodzących niebezpiecznych zdarzeń. EPIC obliczano dwa razy dziennie przy zastosowaniu podejścia probabilistycznego, z wykorzystaniem prognoz COSMO-LEPS. W lokalizacjach w których istniało duże prawdopodobieństwo przekroczenia progów ostrzegawczych (tj. okresów zwrotu wynoszących 2, 5 i 20 lat), tworzone były tzw. punkty raportowania lokalizowane na sieci rzecznej, które były następnie wyświetlane w serwisie internetowym. Obecnie stosowane są dwa wskaźniki dla powodzi błyskawicznych, pierwszy to wskaźnik spływu powierzchniowego oparty na danych klimatycznych (ang. *European Runoff Index based on Climatology*, ERIC), a drugi to wskaźnik oparty na danych opadowych (ang. *European Rainfall-Induced Hazard Assessment*, ERICHA) generowanych z satelitów radarowych z programu OPERA (Operational Program for the Exchange of Weather Radar Information). Produkty ERIC obejmują zarówno punkty raportowania, jak i obszary objęte zagrożeniem powodzią błyskawiczną. Produkty ERICHA obejmują godzinne i dobowe mapy opadów, jak i mapy zagrożenia powodziowego.

System EFAS tworzy również animację opadów deszczu opartą na COSMO-LEPS i deterministycznych modelach ECMWF. Obrazy są generowane dla różnych przedziałów czasowych, a także w sposób ciągły w całym okresie prognozowanym. EFAS generuje również mapy anomalii np. produkty przedstawiające jak różne są wilgotność i warunki śniegowe w porównaniu z typową (przeciętną) sytuacją. Mapy są opracowywane przez skalowanie wartości przy użyciu średniej i odchylenia od wartości przyjętych w danym dniu roku w długoterminowym modelu LISFLOOD stosowanym do wyznaczenia progów ostrzegawczych. W przypadku ekwiwalentu wody śniegowej symulowana zmiana odpowiada dziesięciodniowej średniej. Dlatego również długoterminową średnią i odchylenie standardowe dla ekwiwalentu wody śniegowej oblicza się na podstawie dziesięciodniowych średnich wartości z długoterminowego cyklu LISFLOOD.

Upowszechnianie

Upowszechnianie prognoz wśród użytkowników końcowych odbywa się na dwa sposoby. Pierwszy polega na użyciu chronionego hasłem systemu informacyjnego EFAS (EFAS-IS) dostępnego tylko dla zarejestrowanych użytkowników. Drugi polega na bezpośrednim kontakcie centrum rozpowszechniania z użytkownikami końcowymi, dla których wysyłane są alarmy. Powiadomienia podzielone są na trzy rodzaje: formalne, nieformalne i powiadomienia o ryzyku wystąpienia powodzi błyskawicznej. Obecnie opracowywane są programy dla EFAS o nazwie Social Media for Flood Risk (SMFR), które zapewniają informacje zbierane w czasie rzeczywistym z mediów społecznościowych na temat zagrożeń i skutków powodzi. Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej pracuje nad narzędziem, które mogłoby wykorzystywać tweety i sztuczną inteligencję do zbierania danych o powodziach w czasie rzeczywistym. Gdy EFAS identyfikuje obszary o podwyższonym ryzyku powodziowym, SMFR zaczyna gromadzić tweety związane z powodzią od użytkowników na zagrożonych obszarach.

6.5.2. Identyfikacja akwenów (wód powierzchniowych) i powodzi na obrazach radarowych

Marek Mróz, Magdalena Mleczo

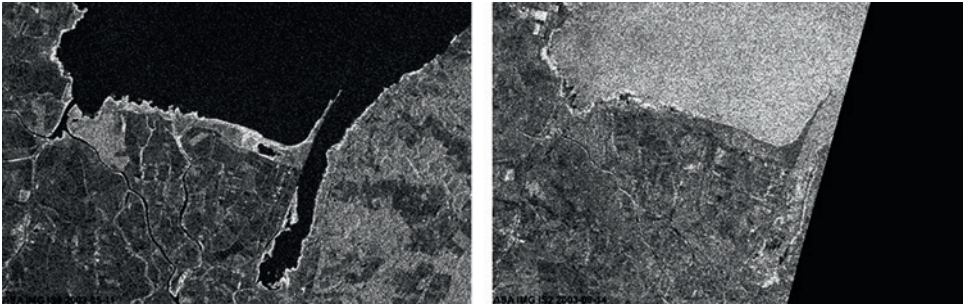
Kiedy mówi się i pisze o tym, że rozpraszanie mikrofal na powierzchni Ziemi zależy od właściwości dielektrycznych i szorstkości powierzchni rozpraszającej, nie od razu uświadamiamy sobie, jakie to ma konsekwencje praktyczne. Dopiero, gdy zestawimy te informacje z informacją o długości fal pasma mikrofalowego staje się jasne, że jedną z kategorii pokrycia terenu, która może wykazywać niezwykłą wprost gładkość swojej powierzchni (czyli brak oznak szorstkości) są obszary akwenów, szczególnie śródlądowych. Powierzchnia tafli wody w bezwietrznych warunkach reprezentuje wręcz pod ręcznikowy przykład obiektu odbijającego mikrofałe w sposób zwierciadlany. W tej cenie upatruje się więc potencjału obrazów radarowych do identyfikacji i kartowania naturalnych i sztucznych zbiorników wodnych, w tym także obszarów zalewanych wodą w sposób incydentalny, a więc przede wszystkim zjawisk powodziowych. Ponieważ zarówno na mapach topograficznych, jak i tematycznych położenie oraz granice jezior i stawów są od dawna dobrze wyznaczone, szczególnie w krajach o wysokiej „tradycji” kartograficznej, to większego zastosowania obrazów radarowych oczekuje się właśnie w monitorowaniu zalewów i powodzi, które mają charakter dynamiczny, zarówno cykliczny, jak i incydentalny. Ponieważ powódź jest zjawiskiem hydrologicznym, które oznacza duży stan zagrożenia dla ludzi i gospodarki, to wysiłek naukowo-badawczy, a co za tym idzie, mnogość publikacji, dotyczą zarówno metod jego modelowania, jak i monitorowania w czasie rzeczywistym.

Do modelowania hydrologicznego, czyli przewidywania czasu oraz kierunków przemieszczania się mas wodnych służą numeryczne modele powierzchni terenu (NMT) oraz mapy pokrycia terenu, a jednym z narzędzi monitorowania (obserwacji) faktycznego przebiegu tego dynamicznego zjawiska jest od lat teledetekcja satelitarna. Słabą stroną obserwacji teledetekcyjnych jest współwystępowanie powodzi i zachmurzenia, które uniemożliwia obserwacje w zakresie widzialnym i podczerwieni, dlatego tak atrakcyjną techniką jest obrazowanie radarowe.

Obserwacja dynamiki zjawiska powodzi polega w istocie na identyfikacji obszarów całkowicie zalanych wodą lub częściowo podtopionych, w tym takich, które przy obserwacji z kosmosu są przesłonięte (zamaskowane) przez porastającą je roślinność.

Rozpocznijmy więc analizę zagadnienia monitorowania powodzi od rozwiązania problemu podstawowego, jakim jest identyfikacja powierzchni całkowicie zalanych wodą. Najprostszym przypadkiem jest gładka tafla wody, która na większości obrazów radarowych widoczna jest jako czarna powierzchnia, co jest wynikiem, jak już powiedziano, zwierciadlanego odbicia promieniowania w kierunku przeciwnym do radaru i brakiem komponentu rozproszenia wstecznego. To założenie, że powierzchnie zbiorników wodnych da się zidentyfikować na zasadzie kontrastu z otaczającymi je obszarami lądowymi o wyższym współczynniku σ_0 , leży u podstaw wszystkich metod ich identyfikacji, ale ma wiele ograniczeń. Ograniczenia te powodują występowanie tzw. fałszywych alarmów. W zależności od pasma (X, C lub L) część powierzchni lądowych takich jak płaskie obszary piaszczyste, łąki, place, parkingi itd. będzie generowała alarmy „fałszywie dodatnie”, błędnie wskazując obiekty o niskiej szorstkości jako obszary zalane wodą lub trwale zbiorniki wód powierzchniowych. Im dłuższa fala, tym mniejsza wrażliwość na szorstkość i tym więcej fałszywych alarmów dodatnich. I na odwrót, sfalowana wiatrem powierzchnia wody generuje silniejszy komponent rozproszenia wstecznego (ang. *backscattering*) prowadzący do błędnej identyfikacji obszarów wodnych jako obszary lądowe. Takie przypadki można ograniczyć stosując polaryzację poziomą HH lub krzyżową HV mniej podatną na szorstkość, a także większy kąt obrazowania. System Sentinel-1 o polaryzacji pionowej VV i krzyżowej VH jest mniej skuteczny w identyfikacji obszarów wodnych niż Radarsat-2 czy TerraSAR-X pracujące w polaryzacji poziomej.

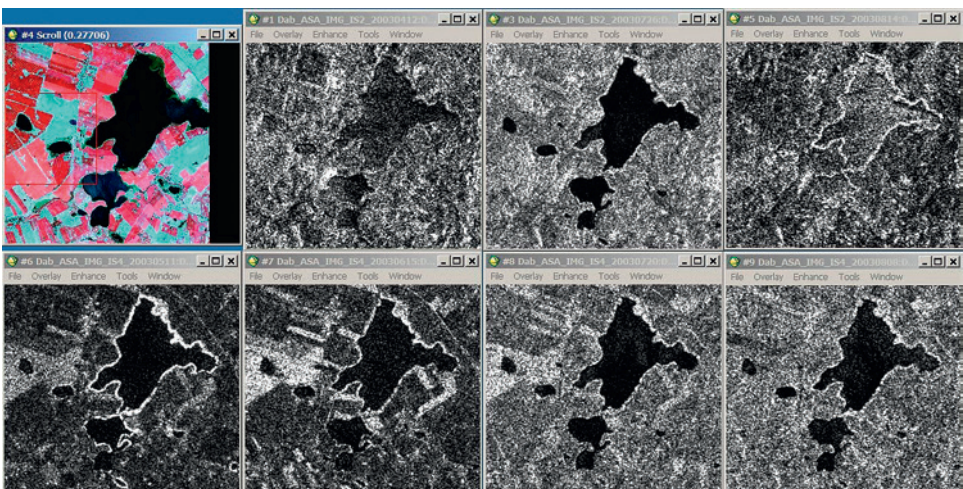
W przypadku obszarów podtopionej roślinności oraz zalanych powodziami terenów zurbanizowanych wykorzystuje się zjawisko podwójnego odbicia nasilone z powodu obecności gładkiej powierzchni wody w środowisku silnych rozpraszaczy (rozdział 2.4.2.1). Przegląd metod identyfikacji obszarów podtopionej roślinności przedstawił zespół Niemieckiej Agencji Kosmicznej w bardzo obszernej pracy (Tsyganskaya i in., 2018). Ciekawe wyniki przedstawiono w pracy (Chini i in., 2019) w zakresie wykorzystania koherencji interferometrycznej do wykrywania zasięgu powodzi na obszarze miasta Huston w USA po przejściu huraganu Harvey. Koherencja interferometryczna to miara stabilności fazy obrazów radarowych. W roku 2015 Martinis z zespołem (Martinis i in., 2015) opublikował schemat automatycznej procedury monitorowania powodzi na podstawie obserwacji TerraSAR-X. Procedura ta zakłada wykorzystanie danych GIS, które opisują teren w stanie sprzed powodzi i analizuje w sposób automatyczny jego zmiany. Numeryczny model terenu jest źródłem informacji o potencjalnych kierunkach przemieszczania się mas wody. Wygenerowane maski obszarów wodnych wykluczają obszary zbiorników stałych, a separacja obszarów woda/ląd odbywa się przez automatyczne progowanie wartości pikseli na obrazach amplitudowych. Cały proces monitorowania zasięgu powodzi jest procesem syntezy różnych informacji z wykorzystaniem dość skomplikowanych metod matematycznych, w tym teorii zbiorów rozmytych. Załączony wykaz literatury przedstawia najnowsze trendy w analizie opisywanego zjawiska, określania zasięgów wody zarówno w warunkach naturalnego jej przemieszczania się, jak i ekstremalnych zjawisk powodziowych.



Ryc. 6.32. Envisat/ASAR – identyfikacja powierzchni pod wodami w dwóch różnych dniach (Zalew Wiślaný)

Powyższa rycina (ryc. 6.32) przedstawia obrazy radarowe z systemu Envisat/ASAR (IMG) fragmentu zachodniej części Zalewu Wiślanego wraz z Zatoką Elbląską wykonane w dwóch różnych dniach. Po lewej stronie widać wyraźnie czarny kontur zbiornika jako efekt odbicia zwierciadlanego od zupełnie gładkiej tafli wody, po prawej ten sam kontur ma już dużo jaśniejszy ton szarości z wyraźnie zaznaczonym typowym dla radaru efektem cętkowania. Ten dużo jaśniejszy obraz powierzchni zbiornika to efekt wzmożonego rozproszenia wstecznego wywołanego silnym sfalowaniem powierzchni wody, czyli wzrostem jej szorstkości.

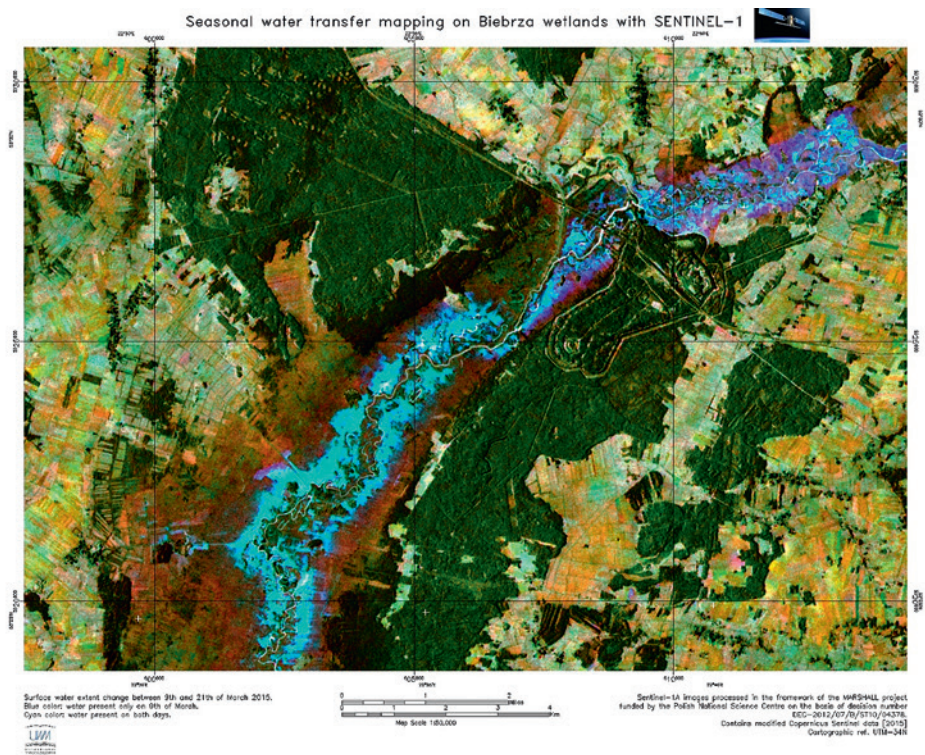
Kolejna rycina (ryc. 6.33) przedstawia serię siedmiu obrazów radarowych wykonanych w różnych dniach, przy różnym wpływie prędkości wiatru na sfalowanie wody i wywoływanie szorstkości jej powierzchni. Obraz pierwszy z lewej w górnym rzędzie to dla porównania kompozycja w barwach fałszywych obrazu optycznego SPOT. Na niektórych obrazach radarowych można dostrzec wokół czarnego konturu jeziora bardzo jasną obwódkę. To pas przybrzeżnych trzcin rosnących w wodzie, generujących zjawisko silnego podwójnego odbicia mikrofal. Na obrazie w prawym górnym rogu tylko dzięki tej obwódce można zidentyfikować kontur jeziora, gdyż silnie sfalowana



Ryc. 6.33. Envisat/ASAR – identyfikacja zbiornika wodnego w różnych dniach (przykład jeziora Dąbrówka Malborska)

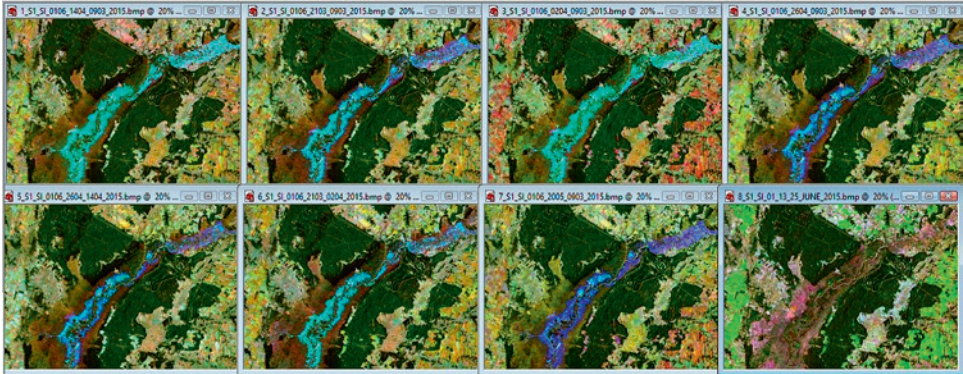
powierzchnia wody odwzorowana jest bardzo podobnie jak otaczające akwen tereny rolnicze. Nie ma więc tak pożądanego kontrastu między tymi obiektami.

Na kolejnym przykładzie (ryc. 6.34) przedstawiono zasięgi zalewów w dolinie Biebrzy utrzymujące się w okresie między dwoma kolejnymi przelotami satelity Sentinel-1 w interwale dwunastodniowym (między 9 i 21 marca 2015 roku). Jest to kompozycja wielo-czasowa RGB trzech obrazów Sentinel-1 GRD z trzech różnych dni: 15 czerwca 2015 roku (komponent R) – brak rozlewisk, 21 i 9 marca (komponenty G i B), dni, w których wystąpiły rozlewiska o różnym zasięgu. W północno-wschodniej części przedstawionego obszaru można dostrzec zarówno kolor niebieski jak i cyjan, reprezentujące obszary rozlewisk, natomiast w południowo-zachodniej cyjan dominuje całkowicie. Kolor cyjanowy jest złożeniem wysokich wartości składowej niebieskiej i zielonej, co oznacza, że w obu tych dniach utrzymywał się na tym obszarze ten sam zasięg rozlewiska.



Ryc. 6.34. Identyfikacja rozlewisk w dolinie Biebrzy w czasie zalewów wiosennych 2015 na podstawie obrazów Sentinel-1 (źródło: Mróz i Mleczko, 2018a)

Poniżej przedstawiono sekwencję ośmiu różnych przetworzeń Sentinel-1 obrazującą dynamikę zjawiska zalewów wiosennych pomiędzy początkiem kwietnia a początkiem czerwca 2015 roku w różnych układach dat rejestracji (ryc. 6.35).



Ryc. 6.35. Seria przetworzonych obrazów Sentinel-1 przedstawiająca rozlewiska w dolinie Biebrzy w czasie zalewów wiosennych 2015 (źródło: Mróz i Mleczko, 2018a)

6.5.3. Monitoring wód śródlądowych, mórz i oceanów

Małgorzata Słapińska, Jarosław Chormański

Monitoring wód prowadzony z wykorzystaniem technik zdalnych obejmuje monitorowanie stanu jakości wód śródlądowych, mórz i oceanów. Na dobór danych teledetekcyjnych do zdalnego monitorowania wód śródlądowych, morskich i oceanicznych wpływ ma wielkość obiektu badań, dla której dobierana jest rozdzielczość przestrzenna tym mniej istotna (mniejsza), im większy obiekt badań. Pomijając rozdzielczość potrzebnych zobrazowań, głównym problemem są wyższe ilości aktywnych optycznie substancji (absorbujących i rozpraszających promieniowanie) znajdujących się w wodach śródlądowych. Utrudnia to zarówno wykonanie korekcji atmosferycznej, jak i samo modelowanie jakości wody (Attila i in., 2013; Odermatt i in., 2012). Na chwilę obecną istnieje dużo więcej opracowanych metod monitorowania jakości wód oceanicznych (Gregg i Casey, 2004; Ferreira i in., 2011). Niemniej teledetekcyjne modelowanie wód śródlądowych jest przedmiotem wielu badań i w jego wyniku uzyskiwane są coraz dokładniejsze wyniki (Dörnhöfer i Oppelt, 2016). W poniższym podrozdziale zajmiemy się podstawami monitorowania wód zarówno śródlądowych jak i oceanicznych.

Monitorowanie wód śródlądowych, mórz i oceanów jest istotnym zagadnieniem w kontekście zagrożenia jakości wód powierzchniowych. Może być prowadzone z wykorzystaniem danych satelitarnych, lotniczych, w tym BSP (bezzałogowe statki powietrzne) zarówno optycznych, jak i z wykorzystaniem teledetekcji aktywnej, szczególnie danych radarowych. Monitoring wód podzielić można również na monitoring ciągły (potencjalnych zagrożeń dotyczących zabezpieczenia zbiorników wodnych i otoczenia tych zbiorników) oraz na monitoring w sytuacji alarmowej. Ciągły monitoring dużych akwenów wodnych jest obecnie możliwy metodami satelitarnymi, jednak w przypadku zagrożenia o charakterze nagłym konieczne wydaje się zastosowanie technologii lotniczej i rozwiązań takich jak BSP, wyposażone w kamery optyczne wielo- i hiperspektralne.

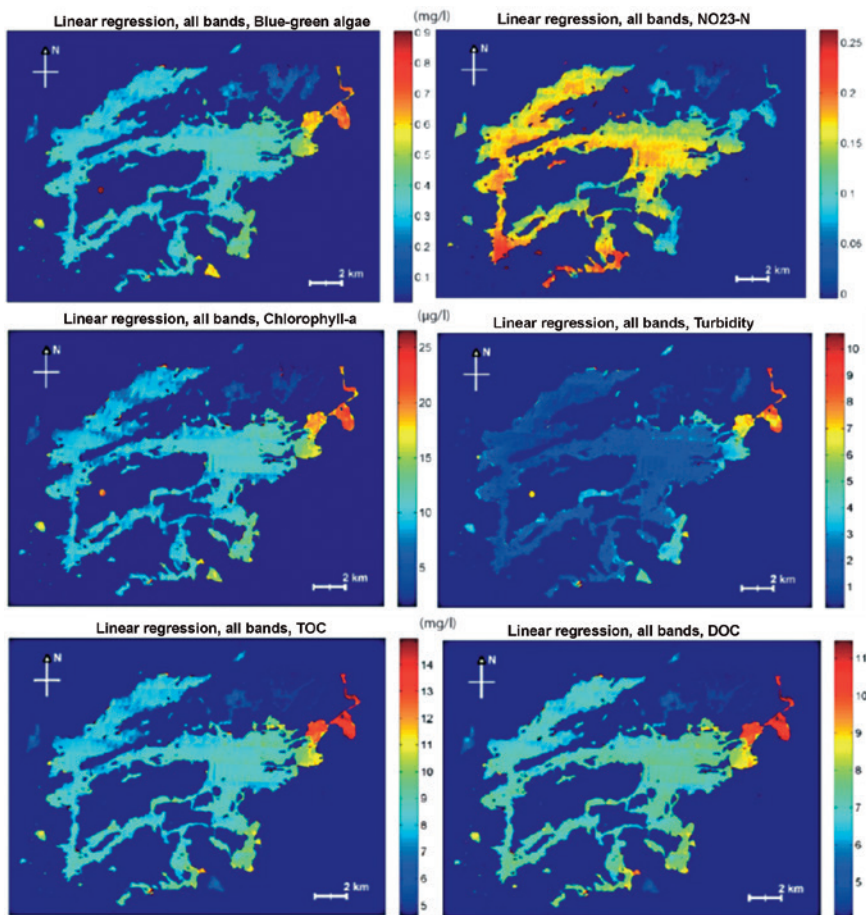
Zastosowanie danych zdalnych (w tym technologii hiperspektralnej) pozwala w krótkim czasie monitorować duży obszar, co jest ewidentnie dużym plusem w porównaniu z punktowymi pomiarami bezpośrednimi. W przypadku wykrycia zanieczysz-

czeń zbiornika wodnego, będącego źródłem wody pitnej dla aglomeracji, zastosowanie dronów z sensorami pozwoli na szybkie zidentyfikowanie zarówno źródła, typu jak i rodzaju zanieczyszczenia, co z kolei umożliwi odpowiednim służbom podjęcie działań ratunkowych. Istnieje grupa najczęściej badanych parametrów umożliwiających teledetekcyjne monitorowanie stanu jakości wód, a do najważniejszych należą: przezroczystość (mierzona tzw. krążkiem Secchiego), mętność, zawartość chlorofilu, określenie grup planktonu takich jak sinice, zawartość węgla.

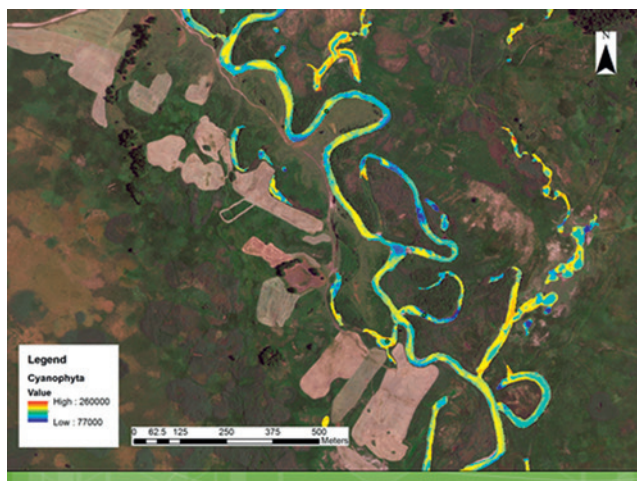
Przezroczystość została ujęta m.in. w legislacjach unijnych jako jeden z ważniejszych parametrów służących do określenia jakości wody i w funkcji zawartych w niej zanieczyszczeń, w tym biologicznych, np. zawartości sinic lub chlorofilu-a. Inną istotną cechą wykorzystywaną do opisu jakości wody jest jej mętność. Duże zmętnienie wody może być sygnałem awarii infrastruktury albo przedostania się zanieczyszczeń. Kolejnym ważnym parametrem jest już wspomniana zawartość w wodzie chlorofilu-a, który jest bezpośrednio skorelowany z miernikiem biomasy fitoplanktonu związanego ze zjawiskiem eutrofizacji. W przypadku zamkniętych zbiorników wody słodkiej proces zakwitu wody występuje już przy stężeniu 8–10 mg/m³ chlorofilu-a, natomiast przekroczenie 30 mg/m³ powoduje niezdatność wody do picia (Kawecka i Eloranta, 1994). Parametrem bezpośrednio związanym z rozwojem eutrofizacji jest stężenie sinic. Ważnym i przydatnym parametrem jakości wody jest zawartość ogólnego węgla organicznego (ang. *Total Organic Carbon*, TOC; całkowity węgiel organiczny) w wodzie, której określenie bazując na obecnych metodach jest niezwykle trudne, szczególnie jeśli chcemy uzyskać zmienność przestrzenną tego związku. Zanieczyszczenia związkami niejonowymi, prowadzą do zniszczenia systemów oczyszczania wody pitnej. Dodatkowo, przedostanie się tych substancji do generatorów energii i pary może skutkować ich uszkodzeniem. W przypadku obrazowania hiperspektralnego uzyskujemy wiarygodny i charakteryzujący się zmiennością przestrzenną wynik TOC w badanym zbiorniku wodnym. Kolejny parametr to rozpuszczona materia organiczna lub inaczej rozpuszczony węgiel organiczny (ang. *Dissolved Organic Carbon*, DOC). DOC powstaje w wyniku procesów tlenowych prowadzonych przez bakterie i jest pozostałością procesów metabolicznych. Skutkiem występowania dużej ilości DOC w środowisku wodnym jest to, że jego wysokie stężenie prowadzi do stymulacji wzrostu glonów i sinic.

W rozdziale tym omówimy kilka przykładów wykorzystania teledetekcji pasywnej i aktywnej w monitoringu jakości wód, przechodząc od szczegółu do ogółu. Pierwszy przykład dotyczy pomiarów wykonanych dronem z zainstalowaną kamerą hiperspektralną SENOP (mogącą rejestrować kilkaset kanałów spektralnych z prędkością 149 klatek na sekundę), które posłużyły do monitorowania systemu jezior w Finlandii. Na poniższej rycinie (ryc. 6.36) przedstawiono wybrane parametry wód śródlądowych (*Blue-green algae* czyli sinice lub *Cyanophyta*; NO₂₃-N – czyli azotany; *Chlorophyl-a* – czyli Chlorofil-a; turbidity – mętność; DOC, TOC określonych przez statystyczną relację liniową z kanałami rejestrowanymi przez tę kamerę). Uzyskano wartości współczynnika korelacji w zakresie 0,5–0,93.

Przykład mapowania jakości wody z wykorzystaniem danych hiperspektralnych z kamery HYSPEX w zbiornikach starorzeczy i rzece Biebrzy podczas suszy w 2015 roku prezentuje Słapińska i in (2016). Dane lotnicze posłużyły tutaj do mapowania parametrów jakości wody oraz możliwości rozwoju sinic. Po wstępnych analizach korekcji geometrycznej i atmosferycznej opracowano modele statystyczne. Model charakterystyk opisujących jakość wody i rozwoju sinic powstał na zasadzie statystycznego dopasowania



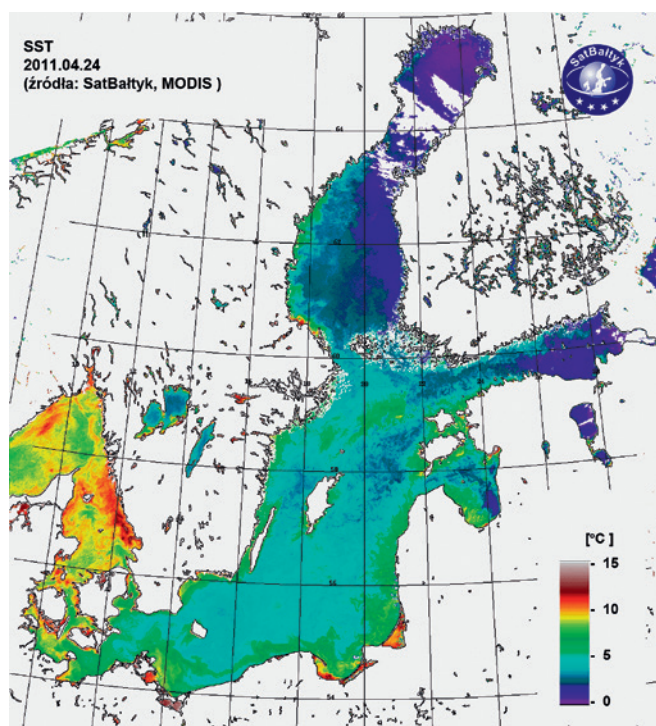
Ryc. 6.36. Mapy parametrów jakości wód (źródło: Erkkilä i in., 2020)



Ryc. 6.37. Mapa rozmieszczenie glonów z grupy *Cyanophyta* (sinice) (źródło: Stapińska i in., 2016)

wania najlepiej skorelowanych kanałów kamery hiperspektralnej do wybranych cech jakości wody, np. biologiczne zapotrzebowanie tlenu (BOD) najlepiej koreluje ze współczynnikami odbicia w kanałach o długościach fal 652,7 nm i 719,8 nm, natomiast sinice najlepiej korelowały ($R^2 = 0,61$) z wartościami współczynników odbicia w zakresach następujących przedziałów długości fal: 524,8, 540,8, 470,2 i 579,2 nm. Wskaźnik opracowany na podstawie ww. kanałów spektralnych dawał najlepsze możliwości opisu tych charakterystyk (ryc. 6.37).

Interesującym przykładem systemu monitorowania wód morskich jest system SatBałtyk – satelitarny monitoring stanu środowiska Bałtyku, który wykorzystuje dane pomiarowe z ponad dwudziestu urządzeń pracujących na pokładach kilkunastu satelitów. System oferuje dostęp do następujących danych w postaci map parametrów wód Bałtyku: dopływu i charakterystyk energii (PAR1, UV2), rozkładów temperatury (ryc. 6.38), stanu dynamicznego powierzchni morza, stężenia chlorofilu i innych pigmentów fitoplanktonu, zakwitów trujących alg, występowania upwellingów (zjawiska polegającego na wynoszeniu ku górze wód głębinowych oceanów i mórz), pojawiania się plam zanieczyszczeń, w tym rozlewów ropy i innych charakterystyk produkcji pierwotnej materii organicznej.



Ryc. 6.38. Mapa rozkładu temperatur (źródło: SatBałtyk, 2015)

Wody Bałtyku są słabiej zasolone i mało przezroczyste dla światła widzialnego. Wnoszenie przez rzeki do Bałtyku dużych ilości azotanów, fosforanów i innych substancji odżywczych (biogenicznych) z pól uprawnych i innych źródeł, powoduje nadmierne przyrosty wielu gatunków fitoplanktonu, w tym często toksycznych cyjanobakterii. Powoduje to konieczność stosowania dla Bałtyku specyficznych,

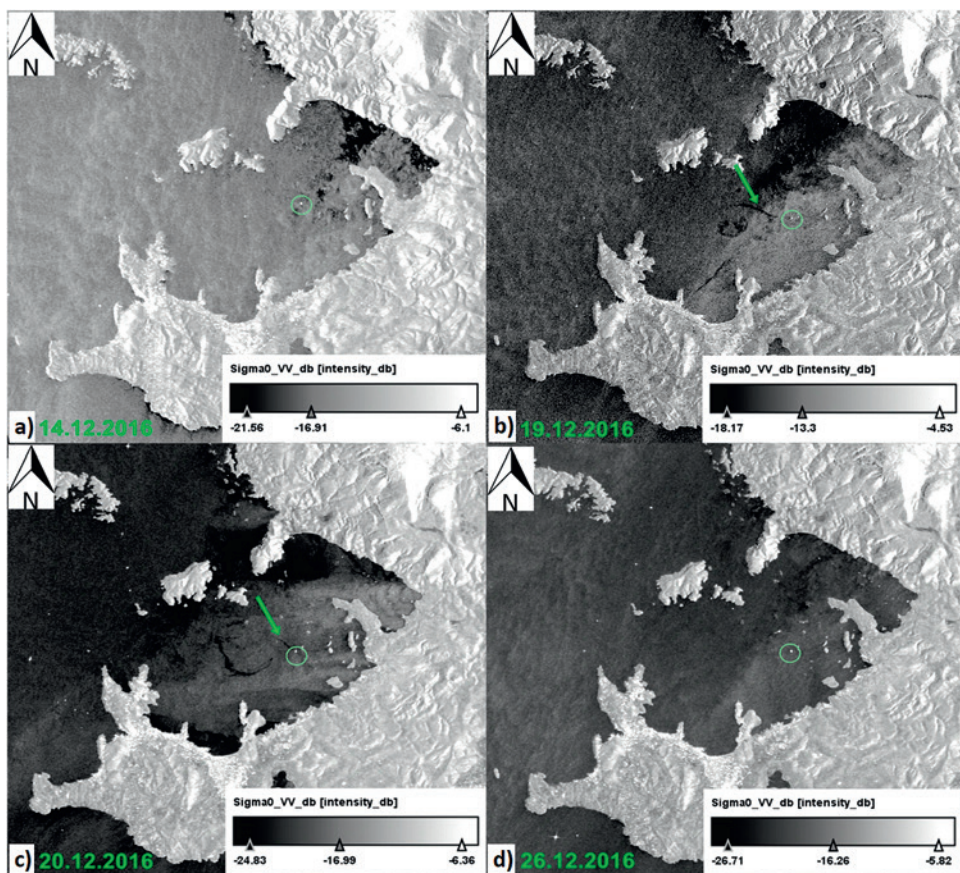
dużo bardziej skomplikowanych niż dla wód oceanicznych, matematycznych modeli i algorytmów (Attila i in., 2013). System SatBałtyk został opracowany do wykonania tego zadania. Wykorzystuje on dane pomiarowe z ponad dwudziestu urządzeń pracujących na pokładach kilkunastu satelitów (m.in. TRIOS N/NOAA, Meteosat 9, EOS, Aqua, Envisat, MODIS) obserwujących obszar Morza Bałtyckiego. System SatBałtyk podzielić można na dwa bloki:

- Blok 1 zawierający zbiór modeli diagnostycznych umożliwiających wyznaczanie wielu charakterystyk środowiska Bałtyku bezpośrednio z danych satelitarnych, nazwany ogólnie Systemem Diagnostycznym DESAMBEM.
- Blok 2 nazwany Systemem Progностycznym BALTFOS3. Blok BALTFOS, zawierający zbiór modeli progностycznych, umożliwia nie tylko wyznaczanie bieżących charakterystyk środowiska w miejscach, gdzie chmury uniemożliwiają dopływ sygnałów od morza do satelity, ale również ich kilkudniowych prognoz.

Charakterystyki środowiska wyznaczone za pomocą systemów diagnostycznych i progностycznych uzupełniają się wzajemnie: BALTFOS wypełnia luki w mapach charakterystyk wyznaczanych za pomocą DESAMBEM (np. w miejscach zachmurzonych), a DESAMBEM zapewnia dane do modeli BALTFOS, umożliwiając tym samym bieżące korygowanie wyników modeli progностycznych. W wyniku zastosowania asymilacji danych wartości charakterystyk wyznaczonych za pomocą matematycznych modeli są korygowane bieżącymi wynikami pomiarów. Jest to metoda bieżącej interpolacji danych obserwacyjnych (satelitarnych), które stanowią podstawę wykonania prognozy. Pozwala to uzupełniać diagnozę stanu środowiska morskiego w rejonach czasowo „niewidocznych” dla satelity. Ciągła asymilacja danych z pomiarów z danymi satelitarnymi znacząco zwiększa wiarygodność modeli oraz obliczanych przez nie krótkookresowych prognoz.

Zakwity sinic (inaczej cyjanobakterii, blue-green algae) w Morzu Bałtyckim są obserwowane co roku na powierzchni powyżej 200 tys. km² (Toming i in., 2017). Obrazy Sentinel-3 z sensora OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) umożliwiają lepszy niż do tej pory monitoring wody morskiej. Sensor ten został zaprojektowany z przeznaczeniem ciągłego monitorowania zmian w środowisku. Przy użyciu kanałów z zakresu czerwieni i bliskiej podczerwieni (NIR) możliwe jest pozyskanie informacji koniecznych do poprawnego modelowania parametrów jakościowych wody. Zasada ta zaimplementowana została w Procesorze C2RCC (Case-2 Regional CoastColour) przeznaczonym dla danych z Sentinel-3, który może przetwarzać też dane z satelitów Sentinel-2, MERIS, VIIRS, MODIS i Landsat 8. Dokonuje on obliczeń oszacowujących optycznie czynne parametry, takie jak wskaźniki odbicia i absorpcji, a następnie na ich podstawie określa optycznie czynne substancje w wodzie (Toming i in., 2017). Działa na zasadzie uczenia sieci neuronowych i jest dostępny w oprogramowaniu SNAP (dedykowanym dla satelitów z Europejskiej Agencji Kosmicznej).

Wykorzystanie danych radarowych w monitorowaniu plam oleju i innych zanieczyszczeń chemicznych morza jest dosyć powszechne. Przykład z wykorzystaniem danych z satelitów Sentinel-1A i -1B do monitorowania plam oleju na oceanach i morzach w zestawieniu z danymi Landsat 8, obu sensorów optycznego i termalnego prezentuje Arslan (2018). Tłumienie sygnału jest podstawą do detekcji plam oleju na podstawie danych SAR; kiedy sygnał radarowy jest wysyłany w stronę morza, tłusta plama oleju osłabia fale kapilarne. Plamy oleju mogą być wtedy zidentyfikowane jako czarne „łaty” na



Ryc. 6.39. Satelitalny monitoring rozprzestrzeniania się plam oleju i innych zanieczyszczeń chemicznych morza (źródło: Arslan, 2018)

obrazie. Dodatkowo dane z satelity optycznego, np. Landsat 8, mogą być wykorzystane przez dodanie dodatkowych filtrów na zobrazowania. Całościowa analiza uwzględniająca dane z różnych sensorów i satelitów pozwala na detekcję skażenia plamami oleju. W przypadku rozlania oleju na terenach nadbrzeżnych istotne jest monitorowanie całej linii brzegowej. 18 grudnia 2016 roku statek towarowy uderzył w skały w pobliżu wyspy Fener (Ufak) w Cesme, w Turcji. Jego wymiary wynosiły 121 m długości i 17 m szerokości. Wyciek oleju doprowadził do niespotykanej dotąd katastrofy ekologicznej w Cesme. Widoczna analiza powstającej plamy w kolejnych 12 dniach od awarii (ryc. 6.39) – na obrazach radarowych na zielono kółkiem zaznaczona pozycja statku.

W podsumowaniu niniejszego podrozdziału można sformułować następujące wnioski:

- obrazy radarowe np. z misji Sentinel-1 są bardzo dobrym źródłem informacji do wykonywania map śródlądowych wód powierzchniowych (jezior, stawów), a także dynamicznych, wielkopowierzchniowych zjawisk powodziowych czy też sezonowych rozlewisk w dolinach rzek nizinnych;
- przydatność danych radarowych (np. Sentinel-1) wynika z: a) właściwości mikrofal penetrujących chmury, a więc obrazujących powierzchnię Ziemi niezależnie

od stopnia zachmurzenia, które może być nawet kilkunastodniowe w okresach wzmożonych opadów i występowania powodzi, b) z faktu, że powierzchnia wody charakteryzuje się odbiciem zwierciadlanym mikrofal, przez co wykazuje duży kontrast z obszarami lądowymi odbijającymi mikrofałę w sposób rozproszony;

- ograniczeniem stosowania obrazów radarowych w tym zakresie jest czasowe występowanie silnych wiatrów, które wywołując falowanie wody wprowadzają element szorstkości powierzchni i w konsekwencji błędne wyznaczanie zasięgu wody;
- problem ten może być zredukowany przez dużą częstotliwość obserwacji satelitów misji Sentinel-1 (6 dni) oraz przez zastosowanie podejścia różnicowego i wykorzystanie danych pomocniczych (np. numerycznego modelu terenu);
- skuteczna ocena zagrożenia powodziowego i efektywne zarządzanie kryzysowe wymaga zastosowania danych teledetekcyjnych o dużej rozdzielczości przestrzennej jak i czasowej obejmujących topografię, pokrycie terenu, właściwości biofizyczne roślin, właściwości gleb i pokrywy śnieżnej;
- dane satelitarne w połączeniu z najnowocześniejszymi modelami prognozowania dostarczają obecnie szczegółowych informacji o ryzyku związanym z powodzią pod względem prawdopodobieństwa wystąpienia, wielkości, czasu i wpływu;
- wyższa rozdzielczość przestrzenna produktów systemu EFAS pozwala na dokładniejszą analizę procesów hydrologicznych. Zaletą systemu EFAS jest dostarczanie produktów prognostycznych obejmujących zarówno prognozy powodziowe średniego zasięgu określające ryzyko wystąpienia i jej skutków w ciągu najbliższych 10 dni, ale także dostarczanie sezonowych prognoz hydrologicznych podsumowujących sytuację hydrologiczną w ciągu najbliższych 8 tygodni;
- monitorowanie wód śródlądowych, mórz i oceanów dotyczy potencjalnych zagrożeń dotyczących zabezpieczenia zbiorników wodnych i otoczenia tych zbiorników; może być prowadzone z wykorzystaniem danych satelitarnych, lotniczych, w tym BSP (bezzałogowe statki powietrzne) w sposób ciągły (głównie satelitarne) oraz w sytuacji alarmowej (lotniczy);
- zastosowanie danych w technologii hiperspektralnej pozyskiwanych z pułapu lotniczego, w tym BSP pozwala w sposób ciągły lub w sytuacji alarmowej monitorować rozkład parametrów opisujących stan jakości wód, takich jak: przezroczystość, mętność, zawartość chlorofilu, rozwój sinic, zawartość węgla. Może mieć to podstawowe znaczenie dla oceny zagrożeń zanieczyszczeń śródlądowych wód powierzchniowych;
- system satelitarnego monitorowania stanu środowiska wód Bałtyku SatBałtyk wykorzystuje dane z ponad dwudziestu sensorów pracujących na pokładach kilkunastu satelitów, umożliwiając dostęp m.in. do map wynikowych rozkładów temperatury, stanu dynamicznego powierzchni morza, stężenia chlorofilu i innych pigmentów, zakwitów alg, plam zanieczyszczeń, w tym ropy naftowej;
- dosyć powszechne jest wykorzystanie danych radarowych w monitorowaniu występowania i rozprzestrzeniania się plam oleju i innych zanieczyszczeń chemicznych mórz i oceanów.

6.6. Leśnictwo

Piotr Wężyk

Lasy mają zwykle charakter rozległych powierzchni, często porastają obszary o trudnej rzeźbie terenu, dlatego w procesie inwentaryzacji ich zasobów, jak również w zrównoważonym zarządzaniu i monitorowaniu licznych zagrożeń – od czynników abiotycznych (wiatry, susza), biotycznych (np. owady) czy antropogenicznych (np. emisje przemysłowe) – wykorzystanie zobrazowań teledetekcyjnych stało się kluczowe.

Łączna powierzchnia lasów świata wynosi około 40 milionów km², co powoduje, że przeciętna lesistość krajów kształtuje się na poziomie około 31%. Do krajów o największej powierzchni lasów należą: Rosja (20% globalnych zasobów lasów), Brazylia (12%), Kanada (9%), USA (8%) oraz Chiny (5%) (Foresteurope, 2020). Kraje Unii Europejskiej z powierzchnią lasów liczącą około 1,61 mln km² stanowią zaledwie około 4% łącznej powierzchni lasów świata. W naszej strefie klimatyczno-geograficznej lasy są chyba najmniej zniekształconą przez człowieka formacją przyrodniczą stanowiącą niezbędny czynnik do utrzymania równowagi ekologicznej. Jednocześnie są formą użytkowania gruntów, która zapewnia produkcję biologiczną przedstawiającą wartość rynkową. Lasy są dobrem ogólnospołecznym, kształtującym jakość życia człowieka (Zajączkowski i in., 2019).

Obliczona według standardu międzynarodowego lesistość Polski w 2018 roku wynosiła 30,9% (9,43 mln ha, tj. 0,23% lasów w skali globalnej oraz 6% powierzchni lasów Unii Europejskiej) i była niższa od średniej europejskiej wynoszącej w roku 2015 – 32,8%, a z uwzględnieniem lasów Federacji Rosyjskiej – 44,7% (Zajączkowski i in., 2019).

O ile w ciągu ostatniej dekady powierzchnia lasów świata zmniejszyła się o około 336 090 km², tj. o około 0,84% (Hansen i in., 2010), to w tym samym okresie w Polsce, zaobserwowano wzrost powierzchni lasów o około 2300 km², a zatem o blisko 2,5% (Zajączkowski i in., 2019). Tym samym lesistość Polski wzrosła w okresie 10 lat z 28,8% (2005) do 29,5% (2015). Nie oznacza to jednak, że powierzchnia lasów w Polsce jest wystarczająca. Na mieszkańca Polski przypada średnio 0,24 ha lasów, co w porównaniu z Finlandią (4,23 ha/1 mieszkańca) nie jest zadowalającą wartością (BDL, 2020).

Lasy poza znaczeniem gospodarczym (produkcja surowca drzewnego) mają ogromne znaczenie w przypadku pełnienia funkcji ochronnych (np. przeciwoerozyjnych, przeciwwietrznych), ale przede wszystkim biorą udział w regulacji klimatu, zapewniają odpowiednią retencję wód opadowych w zlewni (intercepcja opadu, zrównoważona gospodarka wodna), pełnią funkcje biocenotyczne, edukacyjne, rekreacyjne i szereg innych, tzw. pozaprodukcyjnych. Do nich można zaliczyć również udział lasu w kształtowaniu jednostek krajobrazowych. Historyczne uwarunkowania działalności człowieka, klimat i warunki glebowe spowodowały taki, a nie inny układ płatów lasów, które są niezmiernie istotną klasą pokrycia terenu.

Choć PGL Lasy Państwowe, które gospodarują na 7,11 mln ha, co stanowi 77% całkowitej powierzchni lasów w Polsce, dysponują bardzo zaawansowanym systemem GIS opartym na Leśnej Mapie Numerycznej (LMN) oraz bazach danych Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP), a co 10 lat wykonywane są cyfrowe ortofotomapy lotnicze RGB oraz CIR (25 cm GSD), to jednak coraz więcej jednostek zauważa pilną potrzebę bieżącego monitorowania lasów właśnie przy wykorzystaniu efektywnych rozwiązań, jakimi są zobrazowania satelitarne. Monitorowanie lasów pod kątem ich fenologii, składu gatunkowego, akumulacji biomasy, sekwestracji dwutlenku węgla,

Łagodzenia zmian klimatu, stanu zdrowotnego, faz rozwojowych (wieku) oraz funkcji gospodarczych czy krajobrazowych może być realizowane właśnie przy wykorzystaniu zobrazowań satelitarnych i to zarówno średniorozdzielczych Sentinel-2 (10/20 m GSD), wysokorozdzielczych PlanetScope Dove (3,0 m GSD) czy obrazów o bardzo wysokiej rozdzielczości, jak np. WorldView-3 MAXAR (0,31 m GSD, a ostatnio po zaawansowanych przetworzeniach obrazu nawet 15 cm GSD).

Lasy przez swój wielkopowierzchniowy charakter i sposób prowadzenia monitoringu oraz inwentaryzacji (zwykle sieci powierzchni próbnych) mogą być idealnym przykładem dobrych praktyk w stosowaniu aktualnej, kompletnej i wiarygodnej informacji, jaką niosą ze sobą zobrazowania satelitarne. Do głównych grup czynników powodujących zagrożenia dla lasów w Polsce, jakie mogą być monitorowane przy użyciu teledetekcji, można zaliczyć: pożary leśne, wiatry nawalne, szkodniki owadzie, choroby grzybowe oraz szereg innych kompleksowych czynników, które oddziałują ze wzmożoną siłą w sytuacji postępujących zmian klimatycznych (np. suszy glebowej) czy ich interakcji z imisjami przemysłowymi lub zanieczyszczeniami pochodzącymi choćby ze spalania paliw (np. tlenki azotu z komunikacji).

6.6.1. Globalny monitoring lasów

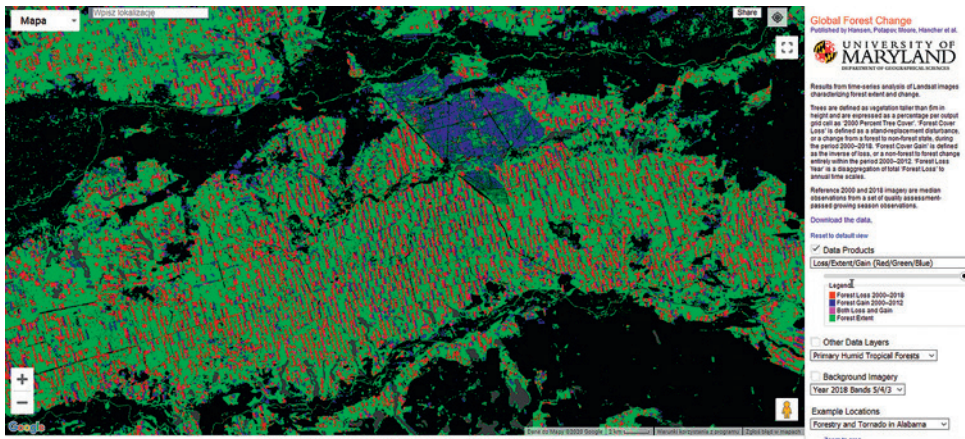
Spadek lesistości na poszczególnych kontynentach, jaki nastąpił w ostatnich dekadach, ponad wszelką wątpliwość wpłynął na obniżenie usług ekosystemowych świadczonych przez lasy, jak również przyczynił się bezpośrednio do zaburzeń globalnego klimatu. Wycinanie lasów obniżyło drastycznie ich bioróżnorodność, ograniczyło występowanie rzadkich gatunków roślin i zwierząt, stało się przyczyną erozji i widocznych skutków zmiany klimatu (pustynnienie) przez spadek możliwości magazynowania węgla i retencji wód opadowych. Do niedawna brak było rzetelnych informacji na temat stanu postępujących wylesień na różnych kontynentach, występujących najczęściej na skutek działalności człowieka, ale też innych czynników abiotycznych (np. pożarów) i biotycznych (np. owadów). Pojawienie się nowoczesnych metod przetwarzania w chmurach obliczeniowych serii wieloczasowych obrazów satelitarnych, stworzyło nowe możliwości analityczne do wykorzystania danych na temat bilansu wylesień/zalesień w modelowaniu globalnych zmian klimatu, biomasy czy redukcji poziomu CO₂.

Do niedawna w monitoringu globalnym wykorzystywano tylko dane o stosunkowo niskiej rozdzielczości przestrzennej, takie jak obrazy wielospektralne MODIS (250–1000 m GSD) czy NOAA (1100 m GSD). Dużą zmianę w szczegółowości opracowań przyniosły wyniki badań zakończonych stworzeniem algorytmów umożliwiających przetwarzanie obrazów z długich serii obserwacyjnych satelitów Landsat (NASA). Były one prowadzone przez zespół naukowców w ramach projektu *Global Forest Change* (GFC) pod kierunkiem prof. Matthew Hansena (Uniwersytet Maryland, USA). W pierwszym etapie opracowano przemiany, jakie dokonały się w globalnej pokrywie leśnej dla okresu 2000–2012, bazując na rozdzielczościach przestrzennych obrazów Landsat 5 TM /7 ETM+ oraz 8 LDCM (30 m GSD), wykazując zmiany typu: strata (ang. *loss*), tj. wylesienie (ang. *deforestation*) oraz zysk (ang. *gain*) czyli zalesienie (ang. *afforestation*). Dla potrzeb projektu sklasyfikowano około miliona scen satelitarnych Landsat, w tym około 600 000 Landsat 5 TM /7 ETM+ oraz 400 000 Landsat 5, 7 oraz 8 (dla aktualizacji 2011–2015). Globalna analiza zmian w masie lasów jako jednej z najważniejszych klas typów pokrycia terenu, oparta na przetwarzaniu obrazów Landsat, uległa diametralnej poprawie dzięki:

- poprawie rozdzielczości przestrzennej map wynikowych,
- skwantyfikowaniu powierzchni wylesień i zalesień,
- uruchomieniu klasyfikacji obrazu w środowisku chmury obliczeniowej,
- raportowaniu rocznej dynamiki o wylesieniach w poszczególnych krajach czy regionach oraz nakreśleniu trendów,
- zastosowaniu jednej spójnej metodyki i obiektywnych danych teledetekcyjnych.

Wylesienia traktowane są w analizach obrazów Landsat jako zaburzenie lub utrata zwarcia poziomego (okapu drzewostanu, ang. *canopy*) na podstawie zmiany wartości współczynnika odbicia w poszczególnych kanałach spektralnych rejestrowanych przez sensor satelity. Zalesienia z kolei definiowane są przez algorytm jako proces odwrotny, tj. przemianę (transformację) terenów bez pokrywy roślinnej (bardzo niskie wartości NDVI) na obszary z roślinnością o charakterze zbiorowisk leśnych (wyższe wartości wskaźnika NDVI).

W latach 2000–2012 łącznie 2,3 mln km² zostało pozbawionych pokrywy drzew, przy równolegle wprowadzanych zalesieniach (głównie plantacje drzew szybkorosnących) na obszarze 0,8 mln km². Wyniki prac grupy badaczy (Hansen i in., 2013) udostępnione zostały w serwisie mapowym (ryc. 6.40) wspieranym przez infrastrukturę informatyczną firmy Google LLC (Global Forest Change, 2020).



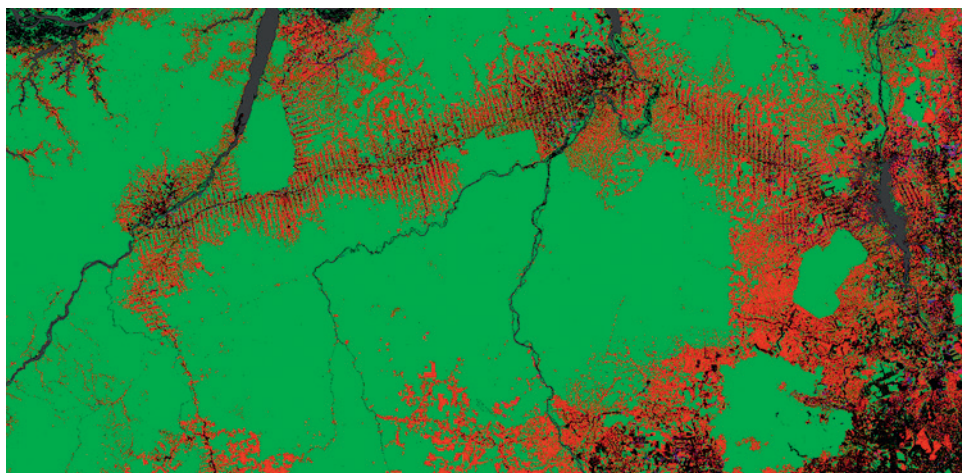
Ryc. 6.40. Portal mapowy Global Forest Change. Legenda: kolor czerwony – wylesienia (zręby zupełne); kolor niebieski – zalesienia; kolor fioletowy – wylesienia i zalesienia w okresie 2000–2018 łącznie (źródło: Global Forest Change, 2020)

Najwięcej wylesień w latach 2000–2013 notowano w obszarach o klimacie zwrotnikowym (lasy deszczowe) i podzwrotnikowym, ale także w umiarkowanym i borealnym. W lasach tropikalnych stwierdzono łącznie 32% powierzchni wszystkich globalnych wylesień, z czego prawie połowa miała miejsce w Ameryce Południowej, szczególnie w Argentynie, Paragwaju i Boliwii. W ostatnich latach tempo średnich rocznych wylesień w Brazylii spadło co prawda o 1318 km²/rok, co wskazywało na największe zahamowanie rocznego ubytku lasów, który w latach 2003–2004 osiągał niemal 40 000 km² rocznie.

Dzięki zobrazowaniom satelitarnym największy przyrost wylesień na świecie wykazano na obszarze Indonezji, gdzie sięgał on 1021 km²/rok, przy rocznym średnim poziomie wahającym się od < 10 000 km² (lata 2000–2003) do > 20 000 km² (lata 2011–2012).

Według badań grupy naukowców z Uniwersytetu Maryland (Hansen i in. 2013) to jednak na obszarze Rosji odnotowano największe straty w pokrywie leśnej ze wszystkich analizowanych krajów na świecie. Na dużych szerokościach geograficznych (strefa borealna), obserwuje się mniejszą dynamikę powrotu lasu (zalesienia, sukcesja) na utracone tereny (np. po pożarach, huraganach czy rabunkowej gospodarce), co powodowane jest głównie uwarunkowaniami klimatycznymi.

Celem kartowania pokrycia terenu przez lasy na rozległych obszarach kontynentów jest uzyskanie spójnych globalnych statystyk, które mają ogromne znaczenie i użyteczność w skali lokalnej, a to z kolei przekłada się na informację w skali regionalnej i globalnej. Brazylia jest w skali światowej chlubnym wyjątkiem pod względem redukcji wylesień (ryc. 6.41), co wynikało z wprowadzonej polityki kontroli licencji na eksplorację lasów Amazonii oraz plantacji drzew szybkorosnących (głównie eukaliptusów i sosen). Pomimo że jest ona druga na liście krajów z największą powierzchnią wylesień, to inne państwa, w tym: Malezja, Kambodża, Wybrzeże Kości Słoniowej, Tanzania, Argentyna i Paragwaj, przodują we względnej powierzchni wylesień na swoich terytoriach.



Ryc. 6.41. Fragment obszaru w Amazonii (Brazylia) na portalu GFC. Kolor czerwony: postępujące wylesienia w lasach deszczowych, kolor zielony: lasy deszczowe, kolor szary: wody (źródło: Global Forest Change, 2020)

Wylesianie dużych obszarów globu (np. na potrzeby plantacji soi lub pastwiska dla bydła) oraz postępująca degradacja lasów (np. wycinanie cennych gatunków drzew w lasach deszczowych) odpowiada aż za około 20% rocznej emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Wartość ta przewyższa ilość CO₂ wytwarzanego przez światowy transport. Głównie dla państw rozwijających się stworzono specjalny program, pod patronatem ONZ, dotyczący kompensacji emisji przemysłowych przez zalesienia wprowadzane w tych krajach. Program Redukcji Emisji Dwutlenku Węgla z Wylesień i Degradacji (ang. *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*, REDD+) służy głównie lokalnym inicjatywom mającym na celu przeciwdziałanie dalszym wylesieniom i degradacji lasu, również dzięki wykorzystywaniu zobrazowań satelitarnych w programach kontroli zasobów leśnych i bioróżnorodności. Komisja Europejska przeznaczająca około 25 milionów euro rocznie na inicjatywy pilotażowe REDD+ w Azji, Afryce i Ameryce Łacińskiej. Poza Komisją Europejską także FAO (Food and Agriculture Organi-

zation of the United Nations) wspiera kraje rozwijające się w opracowywaniu systemów do monitorowania lasów (ang. *National Forest Monitoring Systems*, NFMS), które mają na celu uzyskanie wiarygodnych informacji o zasobach leśnych i ich zaimplementowanie w tworzeniu krajowych polityk leśnych, planowaniu i prowadzeniu zrównoważonego rozwoju. Systemy NFMS posiadają funkcje pomiarowe, sprawozdawcze i weryfikacyjne (ang. *measurement, reporting and verification*, MRV) dostarczają wysokiej jakości i wiarygodnych danych na temat lasów, w tym szacunków sekwestracji węgla, obejmują m.in. satelitarne systemy monitorowania terenu (ang. *Satellite Land Monitoring Systems*, SLMS).

Wyników badań scen satelitarnych Landsat nie można analizować całkowicie bezkrytycznie, gdyż zdarzają się obszary, które przed rokiem 2000 zostały przekształcone na plantacje (np. eukaliptusów czy palm oleistych) i włączono je do tzw. „maski lasu” na początku analizowanego okresu (początek analiz rok 2000). W takich przypadkach zawsze będzie występować pewien problem z przyjęciem definicji obszaru leśnego i uznania ich pochodzenia. Problem w określaniu bilansu zysków i strat w powierzchni lasów dotyczy przyjęcia odpowiedniego kryterium wysokości lasu. Dane wysokościowe w skali globalnej pochodzą z systemów o stosunkowo małej precyzji (niewielka gęstość próbkowania laserowego instrumentu GLAS na satelicie ICESat-1, NASA) choć w miarę dużej dokładności pionowej (ok. 1,0 m rzędna wysokościowa). W warunkach Polski niżowej i drzewostanów sosnowych (ok. 69% powierzchni) użytkowanych zrębami zupełnymi lub gniazdowymi, odnawianymi w kolejnym roku po pozyskaniu drewna, przed dłuższy czas nie są klasyfikowane przez algorytm (Hansen i in., 2013) jako obszary zalesione (ang. *gain*), a to ze względu na fakt, iż uprawa leśna potrzebuje około 6–10 lat, aby uzyskać całkowite zwarcie koron i wysokości kilku metrów, co pozwala na jej identyfikację na obrazie satelitarnym jako las. Ta skomplikowana sytuacja detekcji młodych upraw leśnych (czy odnowień naturalnych na wylesionych powierzchniach) poprawi się prawdopodobnie znacznie dopiero wtedy, kiedy zostaną wykorzystane obrazy o wyższej rozdzielczości przestrzennej jak Sentinel-2 lub PlanetScope, Pleiades i inne oraz modele wysokościowe np. TerraSAR-X i TanDEM-X (DLR), które posłużą do opracowania mapy maski lasów w skali globalnej pod nazwą: Global TanDEM-X forest map (Geoservice DLR, 2020). Niewątpliwie warstwa ta (ryc. 6.42) wymaga walidacji i aktualizacji na podstawie danych wielospektralnych, ale i wysokościowych (np. ICESat-2 czy GEDI)

Badania lasów w skali globalnej wymagają dostępu do ciągłej rejestracji obrazów satelitarnych udostępnianych nieodpłatnie, po ich wstępnym przetworzeniu (korekcja geometryczna i radiometryczna). Dobrym przykładem źródła tego typu danych z długiego okresu (od 1972) jest program Landsat, a w przyszłości będzie z pewnością program Copernicus (np. Sentinel-2 od 2015 roku), który rejestruje obrazy ze znacznie większą rozdzielczością przestrzenną, czasową i spektralną. Biorąc pod uwagę zmieniające się podejście do udostępniania danych przestrzennych (ich uwalnianie) oraz możliwości przetwarzania setek tysięcy czy milionów scen satelitarnych w rozwiązaniach działających w chmurze obliczeniowej, przyszłość rozwoju metod teledetekcyjnych badań lasów należy postrzegać bardzo optymistycznie. Dobrym przykładem współpracy pomiędzy instytucją naukową (Uniwersytet w Maryland) a firmą komercyjną (Google LLC) jest udostępnienie wyżej opisanego algorytmu grupy badaczy Hansen i in. (2013) w chmurze obliczeniowej Google Earth Engine (GEE), w celu automatycznego przetwarzania szeregów czasowych obrazów satelitarnych w skali globalnej, pod kątem przemian klas pokrycia terenu. Skrypt ten udostępniono nieodpłatnie użytkownikom GEE (ID UMD/hansen/global_forest_change_2018_v1_6).

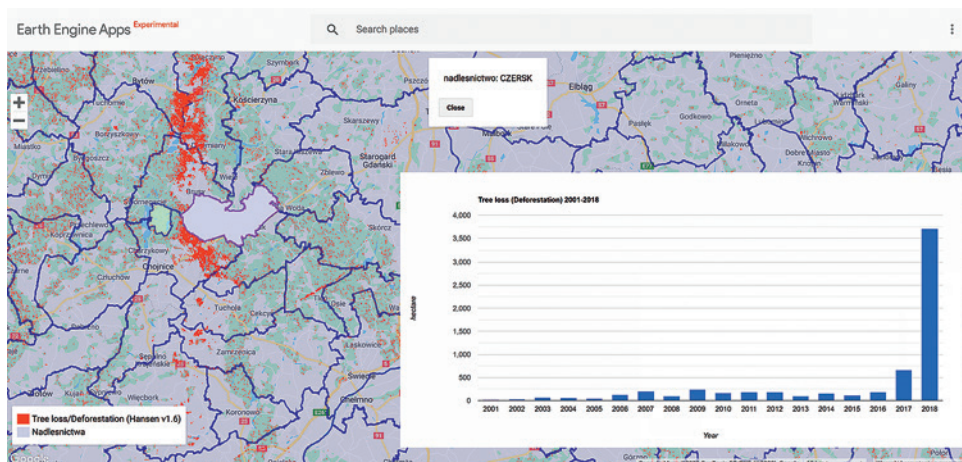
Dane opracowane przez zespół Hansena (2013) są obecnie dostępne dla lat 2000–2018 w postaci gotowych do pobrania plików z serwera GFC, w siatce 10 stopni (zakres: 180W–180E; 90N–60S). Każdy fragment obrazu (tzw. *tile*) zawiera 7 plików tematycznych (8 bit) o rozdzielczości przestrzennej 30 m GSD (odpowiada ok. 1 sek. geograf.). Dostępne są m.in. dane na temat wylesienia, zalesienia, zwarcia pokrywy drzew (dla obszarów o roślinności > 5 m wysokości). Obliczenia oparto na analizie (mediana) kanałów spektralnych: 3 (Red), 4 (NIR), 5 (SWIR) oraz 7 (SWIR) satelitów Landsat TM 5 oraz 7 ETM+ pozyskiwanych w okresach bezchmurnych w okresie wegetacji.

Przykładem prawidłowego zaimplementowania danych satelitarnych dla potrzeb prowadzenia zrównoważonej gospodarki leśnej jest demonstracja wykorzystania portalu GFC (Global Forest Change). Dane zgromadzone w chmurze obliczeniowej Google mogą służyć bezpośrednio służbom PGL Lasy Państwowe w celu monitorowania postępu prowadzonych prac uprzętających, np. po zaistnieniu zdarzeń kłęskowych. Jednym z dobrych przykładów mogą być zmiany pokrycia terenu, jakie dokonały się na obszarze Borów Tucholskich na skutek nawałnicy z 11/12 sierpnia 2017 roku. Huraganowy wiatr zniszczył drzewostany w pasie blisko 300 km długości, o łącznej powierzchni około 79 000 ha. Całkowitemu uszkodzeniu uległo ok. 39 000 ha drzewostanów (Wężyk i in., 2019). Zniszczenia zostały sklasyfikowane przez algorytm GFC na podstawie serii obrazów Landsat 8 LDCM pochodzących przede wszystkim z roku 2018. W tym roku dokonano właśnie głównych prac uprzętnięcia drzewostanów zniszczonych przez huragan (ryc. 6.43).



Ryc. 6.43. Rozmiar wylesień (kolor: turkus) w Borach Tucholskich w roku 2018 spowodowanych nawałnicą z 2017 roku (źródło: Global Forest Change, 2020)

Dane z klasyfikacji wykonanej na obrazach Landsat 8 algorytmem Hansen i in. (2013) dostępne są nieodpłatnie dla obszaru całego globu (w tym również dla Polski) w aplikacji Google Earth Engine (GEE). Odpowiednio zmodyfikowany skrypt z tym algorytmem (autor: Karolina Zięba-Kulawik, UR Kraków), działający w środowisku GEE umożliwia przeprowadzenie analizy przestrzennej GIS polegającej na przecięciu granic administracyjnych wybranego nadleśnictwa (PGL LP) z wynikami klasyfikacji w ubytkach lasu w okresie 2000–2018 (ryc. 6.44). Gdy wskazujemy odpowiednie nadleśnictwo na mapie (zaimportowana warstwa Shapefile Esri z granicami administracyjnymi do chmury obliczeniowej), system dokonuje obliczeń na zgromadzonych danych przestrzennych i wyświetla wykres, który użytkownik może wyeksportować np. do formatu *.csv. W ten



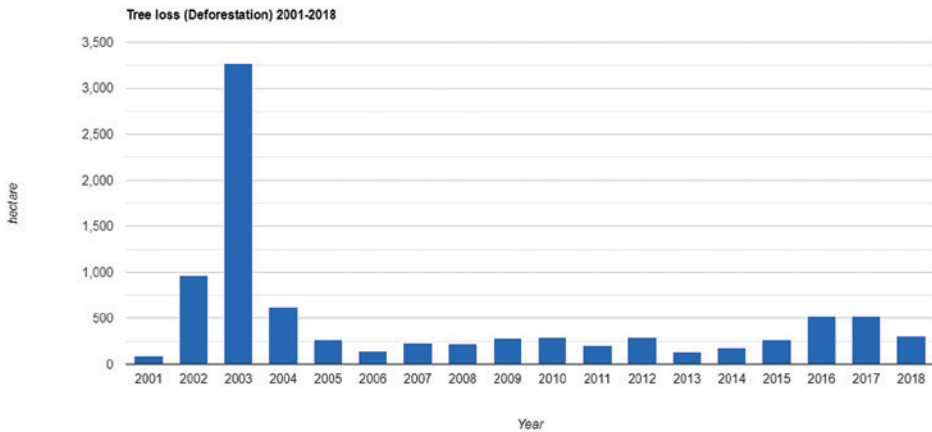
Ryc. 6.44. Wyniki analizy (Tree Loss/Deforestation) przeprowadzonej dla Nadleśnictwa Czersk (RDLP Toruń) dla okresu 2001–2018 (źródło: opracowanie własne Karolina Zięba-Kulawik 2019, Laboratorium Geomatyki, KZZL, WL UR Kraków)

sposób można analizować na mapie okresy wystąpienia dużych wylesień na skutek katastrof (np. pożary lub huragany).

Kontynuując wątek katastrof w Borach Tucholskich z roku 2017 – jeśli posługujemy się aplikacją GEE, to w prosty sposób możemy prześledzić gwałtowny wzrost powierzchni wylesień, jakie miały miejsce na obszarze kilku nadleśnictw w tym rejonie. Gwałtowny skok łącznej powierzchni użytkowania (cięć uprzątających) związany jest z pracami porządkującymi te powierzchnie wiatrołomowe pod przyszłe zalesienia (ryc. 6.44). Analizując poniższy wykres (ryc. 6.44), można wyciągnąć wniosek, że zanim powierzchnia leśna zniszczona przez huragan (powalone drzewa) zostanie zakwalifikowana do klasy „ubytek”, to najpierw musi być uprzątnięta. Proces fizjologicznego obumierania koron drzew (możliwy do detekcji na obrazach satelitarnych po jakimś czasie) może potrwać kilka tygodni aż do kilku miesięcy (zależy od pory roku i gatunku drzewa). Inaczej jednak proces detekcji zmian przebiega w sytuacji pożaru lasu, a szczególnie części koron drzew i zniszczenia całego drzewostanu. W takiej sytuacji, wykorzystując odpowiednie wskaźniki roślinności, można sklasyfikować spaloną powierzchnię natychmiast po zdarzeniu, jeśli tylko pozyskane zostanie zobrazowanie satelitarne.

Innym przykładem wykorzystania archiwalnych danych satelitarnych Landsat jest analiza wylesień, a w istocie tempa usuwania zniszczonych drzewostanów po przejściu huraganu w rejonie Puszczy Piskiej (Nadleśnictwo Pisz). Wygenerowany w aplikacji GEE wykres (ryc. 6.45), wyraźnie wskazuje na rok 2003 oraz towarzyszące mu lata 2002 i 2004 jako te o najwyższym rozmiarze wylesień (zmiana/strata, ang. *loss*). Huragan miał miejsce w Piszach w lipcu 2002 i tylko niewielką część zniszczonych drzewostanów udało się tam uprzątnąć jeszcze w tym samym roku (około 1000 ha). Główne prace uprzątające (ponad 3000 ha) przesunęły się ze względów logistycznych na rok 2003 (ryc. 6.45).

Przykładów wykorzystania zobrazowań satelitarnych dla potrzeb leśnictwa, szczególnie w sytuacjach wystąpienia zdarzeń kłęskowych, jest znacznie więcej. Warto może przypomnieć pierwszą implementację w Polsce obrazów teledetekcyjnych pochodzących z nanosatelitów PlanetScope Dove (4 kanały spektralne, 3,0 m GSD), pozyskanych trzeciego dnia po przejściu nawałnicy w Borach Tucholskich (Wężyk i in., 2019). Na pod-



Ryc. 6.45. Ubytki w powierzchni drzewostanów na obszarze Nadleśnictwa Pisz w latach 2001–2018 (GEE, 2020). Na osi pionowej (Y) – zaznaczono łączną powierzchnię uprzętniętych drzewostanów [ha] (źródło: opracowanie własne Karolina Zięba-Kulawik 2019, Laboratorium Geomatyki, KZZL, WL UR Kraków)

stawie automatycznej analizy obrazu (metoda GEOBIA, rozdział 2.3.3) oraz analizy wielu zmiennych (wskaźniki roślinności, wartości kanałów spektralnych przed i po huraganie) i uczenia maszynowego dokonano predykcji zasięgu poszczególnych klas uszkodzeń drzewostanów sosnowych (4 klasy w odstopniowaniu co 25%) z niewielkim błędem (RMSE 7,1%, ME 1,9%, R^2 0,82) dla poziomego wydzielenia leśnego. Wyniki zastosowanej analizy GEOBIA udowodniły możliwość błyskawicznego użycia scen satelitarnych w sytuacjach klęskowych – już po kilku dniach. Pierwszy dostępny obraz Sentinel-2, niestety, ze względu na złe warunki pogodowe, był dostępny dopiero po kilkudziesięciu dniach od huraganu. W tej samej pracy autorzy (Wężyk i in., 2019) wykorzystali wysokorozdzielczy obraz satelitarny Kompsat-3 (4 kanały spektralne; PAN 0,7m GSD, MS 2,8m GSD) zarejestrowany 31 sierpnia 2017 roku. Pomimo prawie 4 razy większej – w stosunku do obrazów PlanetScope Dove – rozdzielczości przestrzennej oraz 2 tygodnie późniejszej akwizycji (zapoczątkowane zmiany fizjologiczne w koronach zniszczonych sosen), wyniki klasyfikacji okazały się niemal identyczne (RMSE 8%, ME 3,2%, R^2 0,81) dla predykcji klasy uszkodzenia na poziomie wydzielenia leśnego. Należy jednak nadmienić, że w analizie GEOBIA wykorzystane zostały chmury punktów IPC (Image based Point Cloud) wygenerowane metodą dopasowania zdjęć lotniczych wykonanych we wrześniu 2017 roku (25 cm GSD, Metashape Agisoft, SfM) oraz dane ALS LiDAR z 2012 roku po to, aby stworzyć Model Koron Drzew (MKD) przed i po huraganie.

Poza przykładem dotyczącym wielkopowierzchniowych zniszczeń drzewostanów po huraganie, można wymienić wykorzystanie fuzji obrazów Sentinel-2 oraz fotogrametrycznych chmur punktów (IPC) do szacowania biomasy drzewostanów sosnowych (Hawryło i Wężyk, 2018).

Inne praktyczne zastosowanie zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 może dotyczyć określania stopnia defoliacji drzewostanów sosnowych powodowanego przez szkodniki owadzie i inne czynniki środowiskowe (Hawryło i in., 2018). Na 50 powierzchniach obserwacyjnych wytyczonych na obszarze Puszczy Noteckiej, przy wykorzystaniu pomiarów dGNSS, określono procent ubytku igieł (defoliację) w koronie sosen dzięki ich obserwacji w terenie. Autorzy, stosując zaawansowane analizy statystyczne, w tym

algorytmy uczenia maszynowego (ML) i lasów losowych (RF), ustalili, że kombinacje różnych wskaźników roślinności obliczone na podstawie obrazów Sentinel-2 pozwalają na ocenę defoliacji z błędem zaledwie 12%. Najlepsze wyniki osiągnięto dla wskaźnika roślinności GNDVI (Green NDVI) oraz MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index).

Jedną z pierwszych prac przeglądowych dotyczących wykorzystania wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych w leśnictwie opublikowana została 16 lat temu przez Zajączkowskiego i Wężyka (2004). Kolejne prace badawcze na temat wykorzystania wysokorozdzielczych wielospektralnych zobrazowań teledetekcyjnych w celu wyznaczenia stref uszkodzeń przemysłowych drzewostanów bazowały na scenach satelitarnych QuickBird (DigitalGlobe) i implementacji klasyfikacji nadzorowanej (Kozioł i Wężyk, 2005). Z kolei wykorzystanie analizy obiektowej obrazu (GEOBIA) i wysokorozdzielczych scen satelitarnych dla potrzeb inwentaryzacji lasu było przedmiotem publikacji Wężyka i in. w 2004 roku. Zagadnienia automatycznej detekcji procesów wtórnej sukcesji zbiorowisk roślinnych o charakterze leśnym na terenach rolniczych, na których zaprzestano ich użytkowania, na podstawie wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych QuickBird były przedmiotem badań, które prowadzili m.in. Wężyk i de Kok (2005). Przemiany stanu zdrowotnego lasów w Beskidach (Barszcz i in., 1995), czy w Tatrach (Ochtyra, 2020) należą do stosunkowo częstych tematów badawczych bazujących na wykorzystaniu scen satelitarnych Landsat.

6.6.2. Monitoring pożarów lasów

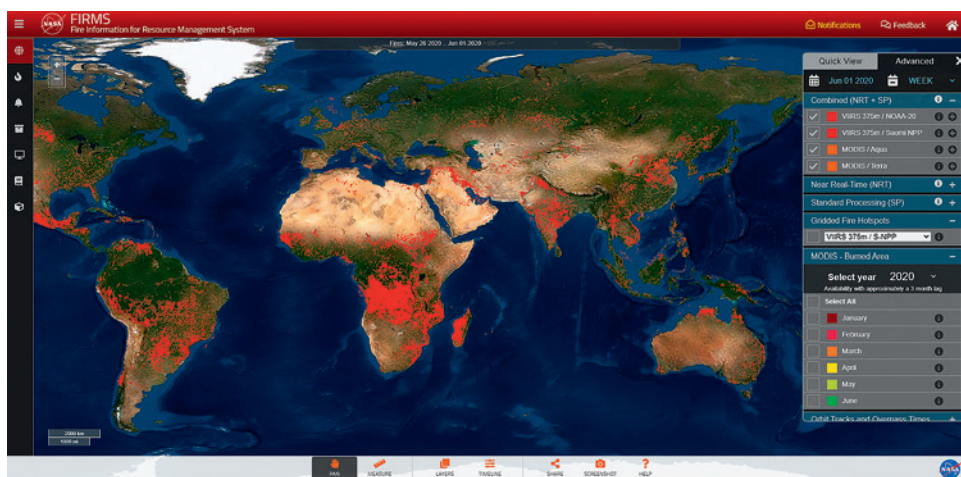
Monitorowanie zagrożeń pożarami leśnymi rozległych ekosystemów Amazonii, Syberii czy terenów północnej Kanady i Alaski, ale również Skandynawii czy trudno dostępnych obszarów Australii czy Ameryki Płd. realizowane jest zarówno przez NASA (portal programu FIRMS), jak i ESA (portal programu EFFIS) w skali globalnej i regionalnej, oraz przez inne agencje kosmiczne. Dla potrzeb detekcji satelitarnej źródeł pożarów leśnych rejestrowane jest głównie promieniowanie w zakresie podczerwieni termalnej definiowanej często jako MID (Mid Infrared) lub szerzej jako TIR (Thermal InfraRed). Służą do tego pasywne radiometry do pomiaru temperatury radiacyjnej: instrument TIRS (Landsat 8, zakres: 10–12 μm), ASTER (kanały nr 10–14, zakres: 8–11 μm), AVHRR (NOAA, kanały: 3–5, zakres: 3,3–12,5 μm) oraz MODIS (Terra/Aqua, 17 kanałów TIR, zakres: 3,7–14,3 μm).

Amerykański program informacji o pożarach lasów – FIRMS

Program FIRMS (Fire Information for Resource Management System, NASA) (ryc. 6.46), opiera swoje funkcjonowanie na sensorach MODIS umieszczonych na satelitach Terra i Aqua, VIIRS na statku SUOMI NPP oraz AVHRR na satelicie NOAA-20, które wielokrotnie w czasie doby pozyskują dane o anomaliiach temperaturowych na powierzchni Ziemi. Dzięki systemowi monitorowania pożarów dane z ostatnich 24 h, 48 h oraz 72 h obserwacji prowadzonych dla całego globu ziemskiego prezentowane są w portalu (FIRMS, 2020). Możliwe jest także uzyskanie mapy predykcji zagrożenia pożarowego na następne 7 dni na podstawie numerycznych modeli prognozy pogody i trendów palności biomasy. Algorytmy służące detekcji pożarów porównują temperaturę potencjalnego pożaru z temperaturą pokrycia terenu wokół niego. Jeśli różnica temperatur przekracza określony próg, potencjalny pożar jest potwierdzany jako pożar aktywny lub „gorący punkt”.

Sensory MODIS zamontowane na satelitach Terra EOS AM-1 oraz Aqua EOS PM-1 wykrywają pożary jako obszary wyraźnie cieplejsze niż ich bezpośrednie otoczenie. Umożliwiają one identyfikację i kartowanie aktywnych pożarów. Rozdzielczość przestrzenna piksela w zakresie termalnym wynosi 1000 m (1 km GSD). Informacje uzupełniające na temat sensorów MODIS dostępne są pod linkiem (Earthdata, 2020).

Sensor VIIRS (Visible InfraRed Imaging Radiometer Suite) zamontowany został m.in. na pokładzie satelity SUOMI National Polar-orbiting Partnership (SNPP). Wykorzystuje on algorytmy do detekcji aktywnych pożarów, podobne do tych używanych przez sensor MODIS, ale w zakresie 3,9–4,1 μm (MID). Sensor VIIRS zapewnia jednak lepszą rozdzielczość przestrzenną (375 m GSD) w porównaniu do obrazów z detektorów MODIS (1 km GSD). Szerokość rejestrowanej sceny VIIRS obejmuje 3060 km, a sensor jest w stanie wykrywać znacznie mniejsze ogniska pożarów i pozwala na określanie precyzyjnych granic aktywnych, rozległych pożarów.



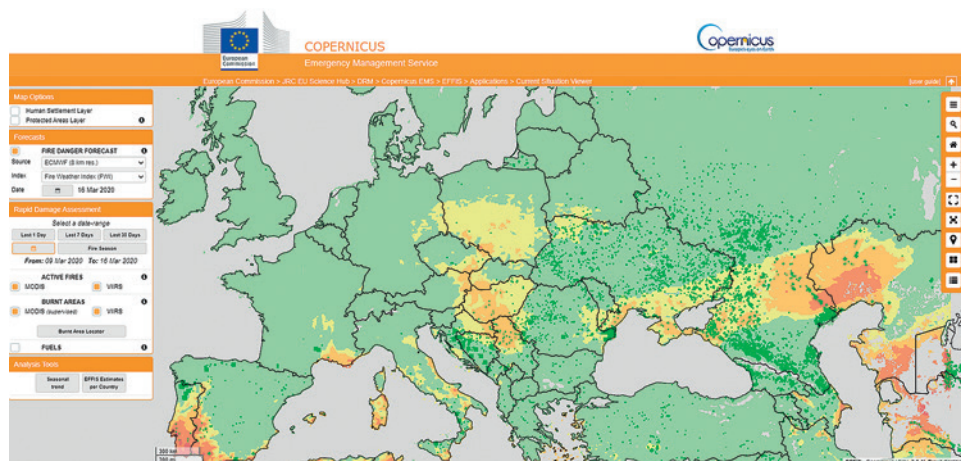
Ryc. 6.46. Strona główna portalu mapowego programu FIRMS (źródło: FIRMS, 2020)

Instrument MODIS zamontowany na pokładzie satelitów Terra i Aqua gromadzi dane na temat pożarów nieprzerwanie, zapewniając globalne pokrycie co około 1–2 dni (rozdzielczość czasowa). Satelita Terra (EOS AM-1) przechodzi nad równikiem około godziny 10:30 i 22:30 każdego dnia, a satelita Aqua (EOS PM-1) po południu około 13:30 i 01:30 rano. Istnieją co najmniej 4 codzienne obserwacje sensora MODIS dla prawie każdego obszaru położonego na równiku, przy czym liczba obserwacji rośnie (z powodu nakładających się orbit) w miarę zbliżania się do biegunów. Instrument VIIRS (Suomi-NPP oraz NOAA-20), który także nieprzerwanie gromadzi dane, umożliwia około 15% pokrycie kolejnych obrazów z kolejnych orbit, zapewniając pełne pokrycie globalne co 12 godzin. Dzięki orbicie okołobiegunowej na średnich szerokościach geograficznych można się go spodziewać nawet 3–4 razy dziennie.

Europejski System Informacji o Pożarach Lasów – EFFIS

Odpowiedzią Komisji Europejskiej na zagrożenia pożarami leśnymi w Europie jest stworzenie Europejskiego Systemu Informacji o Pożarach Lasów (ang. *European Forest Fire Information System*, EFFIS, ryc. 6.47). Wspiera on służby odpowiedzialne za ochronę lasów przed pożarami w krajach UE oraz zapewnia Komisji Europejskiej i Parlamentowi

Europejskiemu aktualne i wiarygodne informacje na temat pożarów lasów na obszarach Europy oraz z nią sąsiadujących. W 2015 roku system EFFIS stał się jednym z ważnych modułów zarządzania dla służb ratunkowych w ramach programu UE Copernicus EMS (Emergency Management Services) znanych jako serwisy EFFIS: prognoza zagrożenia pożarem oraz wykrywanie aktywnych pożarów.



Ryc. 6.47. Okno portalu EFFIS jako części programu EMS (Emergency Management Service) Copernicus UE. Dane dla dnia 16.03.2020 (źródło: EFFIS, 2020)

EFFIS ma charakter internetowego systemu informacji geograficznej (GIS), który dostarcza danych w czasie rzeczywistym, a także gromadzi archiwalne informacje dotyczące występowania pożarów lasów na terenie Europy, Bliskiego Wschodu i Afryki Północnej. Monitoring w ramach systemu EFFIS składa się z następujących modułów (Copernicus Emergency Management Service, 2020):

1. oceny zagrożenia pożarowego,
2. szybkiej oceny szkód (w tym aktywne wykrywanie pożaru, ocena nasilenia pożaru i ocena szkód związanych z pokryciem terenu),
3. oceny emisji i rozproszenia dymu,
4. oceny potencjalnej straty gleby,
5. oceny stopnia regeneracji roślinności,
6. przekazywania wiadomości pożarowych.

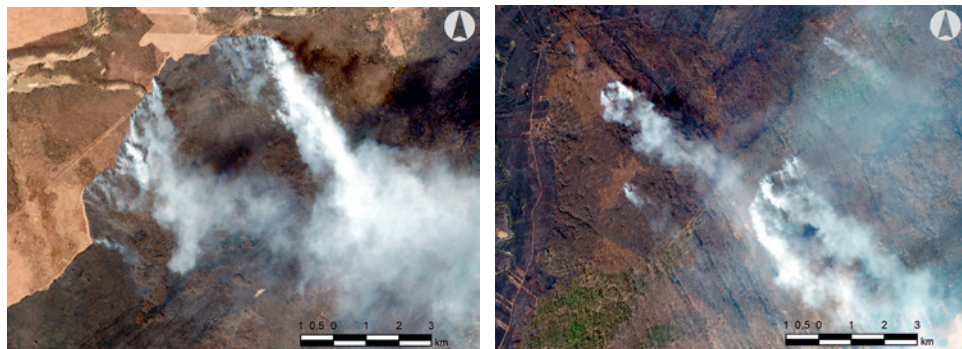
System EFFIS działa na podstawie danych meteorologicznych otrzymywanych z Europejskiego Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF) i francuskich służb meteorologicznych (MeteoFrance). Jako podstawową metodę oceny poziomu zagrożenia pożarowego w całej Europie wykorzystuje się indeks FWI (Fire Weather Index). Mapy zagrożenia pożarowego dostarczane są z rozdzielczością przestrzenną numerycznych map prognozy pogody, tj. ok. 8 km (ECMWF) oraz 10 km (MeteoFrance). Aby umożliwić porównanie występującego zagrożenia w zależności od lokalizacji dla wszystkich państw członkowskich UE wprowadzono jednolity system podziału zagrożenia pożarowego na 6 klas: bardzo niskie, niskie, średnie, wysokie, bardzo wysokie i ekstremalne. Od 2019 roku na platformie EFFIS wprowadzono również system oceny zagrożenia (ang. *National Fire*

Danger Rating System, NFDRS), a także umożliwiono porównanie wskaźnika FWI z innymi wskaźnikami wykorzystywanymi na świecie do oceny zagrożenia pożarowego, m.in. McArthur Forest Fire Danger Index (MARK-5) i Keetch-Byram Drought Index (KBDI).

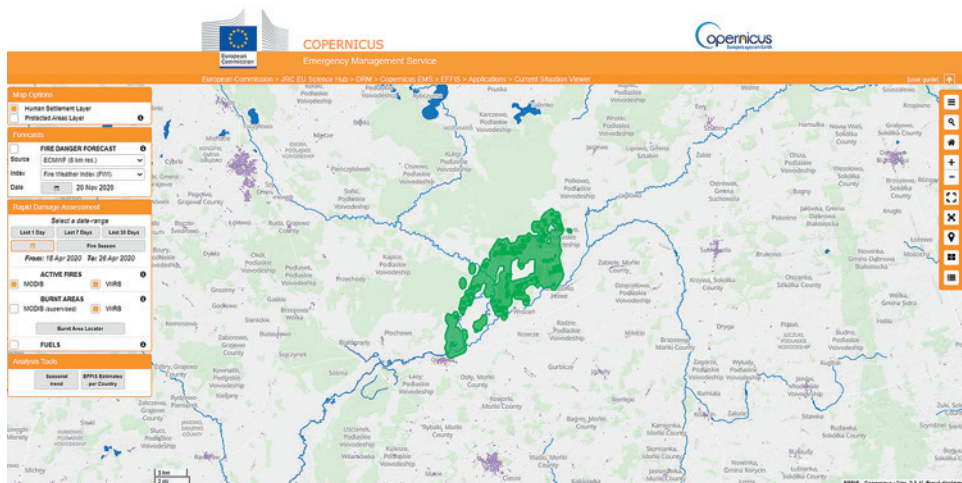
Do detekcji aktywnych pożarów System EFFIS wykorzystuje dane z programu FIRMS realizowanego przez NASA. Aktywne pożary są lokalizowane na podstawie anomalii termicznych zidentyfikowanych z wykorzystaniem danych satelitarnych MODIS (Terra, Aqua) oraz VIIRS (NASA/NOAA). Informacje o występujących pożarach są aktualizowane 6 razy dziennie i udostępniane są na platformie EFFIS w ciągu 2–3 godzin od pozyskania zobrazowań satelitarnych. W zależności od źródła danych, ich rozdzielczość przestrzenna wynosi 1 km (MODIS) lub 375 m (VIIRS).

System umożliwia predykcję występowania pożarów z kilkudniowym wyprzedzeniem, wykorzystując do tego celu numeryczne prognozy pogody. System EFIS posiada bogatą bazę raportów o pożarach, generowaną dla każdego kraju członkowskiego UE. Spalone obszary lasów można wyświetlać na mapie aktualnego zagrożenia pożarowego.

19 kwietnia 2020 roku na obszarze Biebrzańskiego Parku Narodowego doszło do bardzo groźnego pożaru, który w ciągu kilku dni objął swoim obszarem niemal 6000 ha. Kolejne ogniska pożarów wysokich traw i trzcinowisk były rejestrowane z przestrzeni kosmicznej przez kilka dni przez satelity o średniej rozdzielczości: Sentinel-2, o bardzo wysokiej rozdzielczości SkySat (0,7 m GSD, Planet) (ryc. 6.48), ale także systemy z sensorami czułymi w zakresie termalnym (NOAA, Terra, Aqua oraz Suomi NPP oraz Landsat 8) (ryc. 6.49).



Ryc. 6.48. Fragment płonących zbiorowisk trawiastych nad Biebrzą na obrazach SkySat Planet (źródło: Planet Labs, oprac. Piotr Wężyk, ProGea 4D; 2020)



Ryc. 6.49. Wizualizacja pożarzystka (kolor: zielony poligon) w Biebrzańskim Parku Narodowym z kwietnia 2020 roku oraz lokalizację pojedynczych pożarów (zielone trójkąty) zarejestrowane przez sensory VIIRS oraz MODIS na portalu EFFIS 2020 (źródło: EFFIS, 2020)

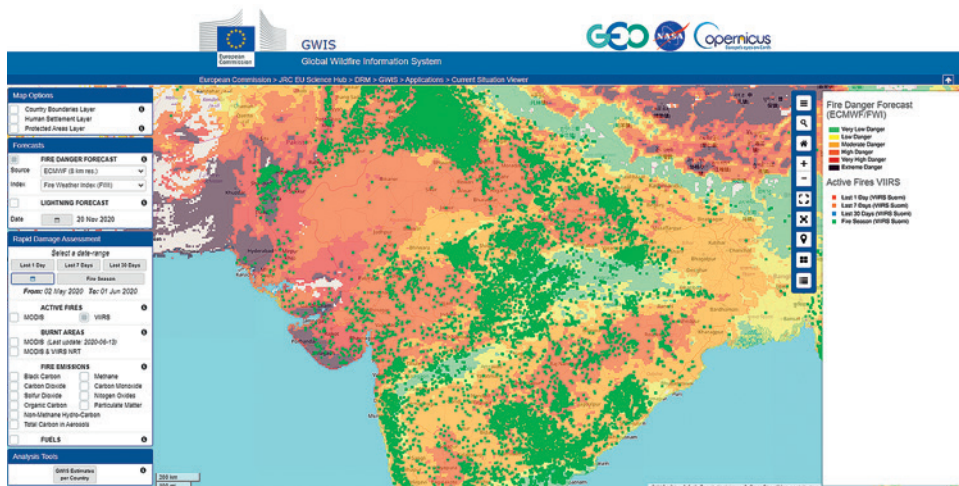
6.6.3. Globalny system informacji o pożarach – GWIS

Globalny system informacji o pożarach GWIS (Global Wildfire Information System) jest wspólną inicjatywą GEO (Group on Earth Observation) oraz programu Copernicus. W nowym programie na lata 2020–2022 GWIS będzie miał na celu rejestrowanie istniejących źródeł informacji o pożarach na poziomie regionalnym i krajowym, aby zapewnić kompleksowy obraz i ocenę ich skutków na całym świecie. Należyte funkcjonowanie mają mu zagwarantować narzędzia wspierające operacyjne zarządzanie pożarami od skali krajowej do globalnej. GWIS opiera się na bieżących działaniach programów EFFIS, GTOS, GOFC-GOLD (zespół GOFC Fire IT) oraz powiązanych sieciach regionalnych, uzupełnia istniejące działania na całym świecie, gromadząc informację o pożarach. Rozwój GWIS jest wspierany przez organizacje partnerskie i agencje kosmiczne. Wsparcie dla GWIS zostało właśnie uruchomione przez NASA za pośrednictwem programu ROSES. Dostęp do ogólnosiwiatowych informacji na temat pożarów jest dostępny pod linkiem (GWIS, 2020).

Użytkownik portalu GWIS poza standardowym wyświetleniem informacji o miejscach objętych pożarem w ciągu ostatnich 24 godzin, 7 i 30 dni ma też możliwość wizualizacji emisji gazów, jakie uwolniły się podczas pożaru. System posiada też moduł do wykonywania analiz liczby i powierzchni pożarów dla wskazanego kraju oraz przedziału czasowego (ryc. 6.50).

W podsumowaniu niniejszego rozdziału można sformułować następujące wnioski:

- zobrazowania satelitarne ze względu na możliwość rejestrowania zwykle dość rozległych obszarów (uzależnione głównie od rozdzielczości przestrzennej sensora; np. szerokość 1 sceny: NOAA – 2900 km; Sentinel-2 – 290 km; Landsat – 185 km) idealnie nadają się do obserwowania lasów mających charakter wielkopowierzchniowych elementów krajobrazu;



Ryc. 6.50. Portal GWIS – predykcja pożarów w Azji w dniu 01.06.2020 roku oraz detekcja istniejących pożarów wstecz do 30 dni (źródło: GWIS, 2020)

- globalny monitoring lasów, odgrywających podstawowe znaczenie w regulacji klimatu Ziemi, prowadzony jest w oparciu o analizy szeregów czasowych obrazowań satelitarnych (np. z misji Landsat NASA) – co pozwala na śledzenie trendów przemian gospodarczych, społecznych, ekonomicznych jako efektów wdrażania polityk i programów międzynarodowych (np. REDD+ program ONZ – Redukcji Emisji z Wylesiania i Degradacji Lasów) na portalach mapowych (np. Global Forest Watch; CORINE LC EEA Copernicus);
- wykorzystanie automatycznych algorytmów (np. Forest Global Change; FGC) opartych na gromadzonych przez lata archiwalnych danych satelitarnych umożliwia prowadzenie ciągłego monitoringu wylesień oraz zalesień zarówno decydom, jak i organizacjom pozarządowym, ale także międzynarodowym organizacjom;
- zagrożenia abiotyczne i biotyczne, ale także antropogeniczne, często w sposób kompleksowy wpływające na ekosystemy leśne, są możliwe do detekcji na obrazach satelitarnych;
- w zależności od typu zagrożenia (np. gradacje owadów), jego skutków (rozpad drzewostanów świerkowych pod wpływem kornika drukarza), czy zasięgu (lokalne, regionalne) stosowane są obrazowania wielospektralne o różnej rozdzielczości (np. WorldView-2; Planet Scope; Sentinel-2);
- obrazowanie satelitarne, szczególnie w optycznym zakresie rejestracji, nadają się bardzo dobrze do określania wybranych parametrów biometrycznych i taksacyjnych: zasięgu formacji leśnych, typu drzewostanów (liściaste, iglaste), wieku drzewostanów (po teksturze i wysokości drzew), zwarcia poziomego koron (w zależności od rozdzielczości przestrzennej systemu rejestrującego oraz wielkości koron drzew – korelacja z wiekiem), struktury pionowej (obecność pięter drzewostanu, podszytów, podrostów – dzięki technologii SLS), stanu zdrowotnego (w tym defoliacji i kondycji – witalności; wskaźniki roślinności: np. NDVI), szacowania biomasy na bazie zaawansowanych modeli uczenia maszynowego; wykrywania pojedynczych koron drzew (obrazowania VHRS – precyzyjne leśnictwo plantacyjne), określania stref oddziaływania przemysłu na lasy, genero-

- wania map fenologicznych i wpływu zmian klimatu na zagrożenia dla lasów;
- zobrazowania mikrofalowe (radar) w obserwacjach lasów znajdują swoje zastosowanie szczególnie w przypadku dużego zachmurzenia (radar nie ma żadnych problemów z penetracją przez chmury) lub zadymienia (np. na skutek pożarów leśnych), pozwalają na prowadzenie ciągłych obserwacji obszarów, które uległy zniszczeniu (np. huraganowe wiatry, pożary), nielegalnej wycinki lasów deszczowych;
 - powszechna dostępność do danych rejestrowanych w rozdzielczości czasowej jednego dnia (niebawem kilkadziesiąt obrazów dziennie) w skali globalnej pozwala na implementację obrazów satelitarnych do prac z zakresu inwentaryzacji i urządzania lasu, jak i planowania pozyskania i zabiegów hodowlanych oraz ich monitorowania (wykonanie i efektywność zabiegów);
 - wysokorozdzielcze zobrazowania satelitarne nadają się do automatycznej analizy obiektowej (GEOBIA) w celu poprawy efektywności procesów aktualizacji baz danych geometrycznych (np. Leśna Mapa Numeryczna) czy opisowych (np. SILP w PGL LP), szczególnie w sytuacjach kłęskowych;
 - na różnych szczeblach administracji oraz w poszczególnych organizacjach i agencjach zarządzających leśnictwem, środowiskiem i ochroną przyrody należy wypracować spójny schemat postępowania z wykorzystaniem danych satelitarnych zarówno optycznych, mikrofalowych, SLS LiDAR, jak i meteorologicznych, w celu lepszego zarządzania zasobami naturalnymi kraju;
 - globalne obserwowanie anomalii temperatury radiacyjnej powierzchni Ziemi oraz aktualne mapy zasięgów lasów oraz ich parametrów biometrycznych (np. zasobność, gatunki, siedliska) pozwalają na efektywne wykorzystanie informacji o zagrożeniach pożarowych przez wykorzystanie takich platform mapowych jak FIRMS, EFFIS czy GWIS;
 - rozwój technologiczny niosący ze sobą zwiększenie rozdzielczości przestrzennej, spektralnej, radiometrycznej i czasowej doprowadzi w krótkim czasie do powszechnego stosowania obrazów teledetekcyjnych w leśnictwie plantacyjnym, lasów gospodarczych oraz na obszarach chronionych (np. parki narodowe, rezerваты, obszary Natura 2000 i in.) zarówno na poziomie wydawania decyzji, jak i wykorzystania informacji satelitarnej w systemach GIS (często aplikacje mobilne).

6.7. Środowisko

W ostatnich latach wraz ze wzrostem świadomości społeczeństwa i rozwojem nowoczesnych technologii geoinformatycznych, coraz istotniejszy staje się dostęp do informacji o stanie różnych komponentów środowiska. Poza śledzeniem prognoz pogody, dużego znaczenia nabierają także informacje o elementach środowiska mających wpływ na nasze zdrowie, takie jak jakość powietrza – rozumiana zarówno jako zanieczyszczenia antropogeniczne (np. zawartość pyłu zawieszonego PM pochodzącego np. z pożarów lasów), jak i stężenia pyłków roślin, co bywa niezwykle istotne dla osób zmagających się z alergiami wziewnymi. Mieszkańcy dużych miast zainteresowani są natomiast obecnością terenów zielonych w pobliżu swojego miejsca zamieszkania, co zwiększa jakość życia w dynamicznie rozwijających się aglomeracjach. Obecnie istnieją już, ale też wciąż są tworzone, nowe serwisy udostępniane zarówno przez przeglądarki internetowe, jak również przez aplikacje mobilne, które pozwalają na dostęp zainteres-

sowanych mieszkańców do informacji o jakości środowiska, w jakim żyją. Serwisy te, podobnie jak projekty realizowane przez jednostki naukowe czy samorządy, często korzystają z dostępu do danych satelitarnych lub z produktów ich przetworzeń, stając się, podobnie jak prognozy pogody, częścią informacji docierających do nas każdego dnia, np. dzięki aplikacjom w telefonach komórkowych.

6.7.1. Serwis Monitorowania atmosfery (Copernicus Atmosphere Monitoring Service)

Piotr Wężyk, Katarzyna Bajorek-Zydroń

Serwis monitorowania atmosfery Copernicus (CAMS) zapewnia dostęp do informacji dotyczących zanieczyszczenia powietrza, zdrowia, energii słonecznej, gazów cieplarnianych i zmian klimatu na świecie. Dostarcza informacji w czasie rzeczywistym, wykorzystując dane satelitarne (obserwacje meteorologiczne oraz obserwacje stanu atmosfery), pomiary naziemne oraz wiedzę specjalistyczną dotyczącą jakości powietrza, energii słonecznej i roli gazów cieplarnianych i cząstek atmosfery w zmianach klimatu. Dane te wraz z modelami atmosfery pozwalają na wygenerowanie zmiennych atmosferycznych takich jak temperatura, stężenie ozonu i ilość aerozoli, a następnie tworzenie prognoz na kolejne dni.

Obserwacje wykorzystywane w usługach CAMS można podzielić na:

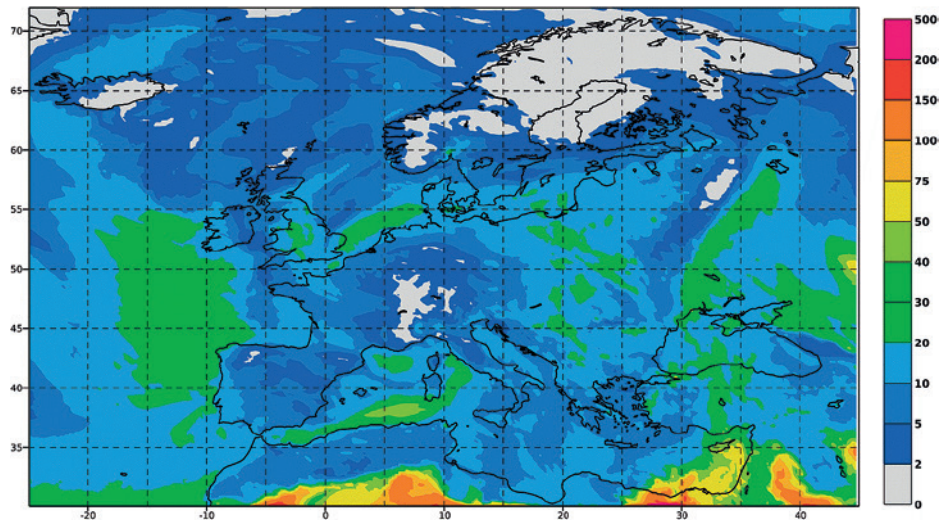
1. Obserwacje satelitarne – dotyczące zawartości gazów i aerozoli w atmosferze rejestrowane przez detektory zamontowane na satelitach:
 - EOS-Aura (instrumenty: MLS, OMI), EOS-Terra (instrument: MOPITT), EOS-Aqua oraz EOS-Terra (instrument: MODIS) – stężenia ozonu (O_3), dwutlenku azotu (NO_2), dwutlenku siarki (SO_2), tlenku węgla (CO), cząstek aerozoli;
 - NOAA-19 (instrument: SBUV-2) – profil pionowy ozonu;
 - METOP-B, METOP-C (instrument: IASI) – stężenie tlenku węgla (CO_2);
 - METOP-A, METOP-B (instrumenty: GOME-2, PMAp) – stężenie dwutlenku azotu (NO_2), dwutlenku siarki (SO_2), ozonu (O_3), liczba cząstek aerozoli;
 - Sentinel 5P (instrument: TROPOMI) – stężenie ozonu (O_3).
2. Naziemne obserwacje referencyjne – wykorzystywane do poprawy jakości codziennych prognoz, oceny jakości prognoz i monitorowania wymiany dwutlenku węgla (CO_2), metanu (CH_4) i podtlenku azotu (N_2O) na powierzchni Ziemi:
 - pomiary jakości powietrza w miastach i wokół miast,
 - pomiary wykonane samolotami komercyjnymi i badawczymi,
 - pomiary pionowego rozkładu zanieczyszczeń i aerozoli przy wykorzystaniu sond balonowych lub instrumentów naziemnych.

Produkty opracowywane na zasadzie modelowania matematycznego w ramach usługi CAMS (ryc. 6.51) obejmują informacje nt.:

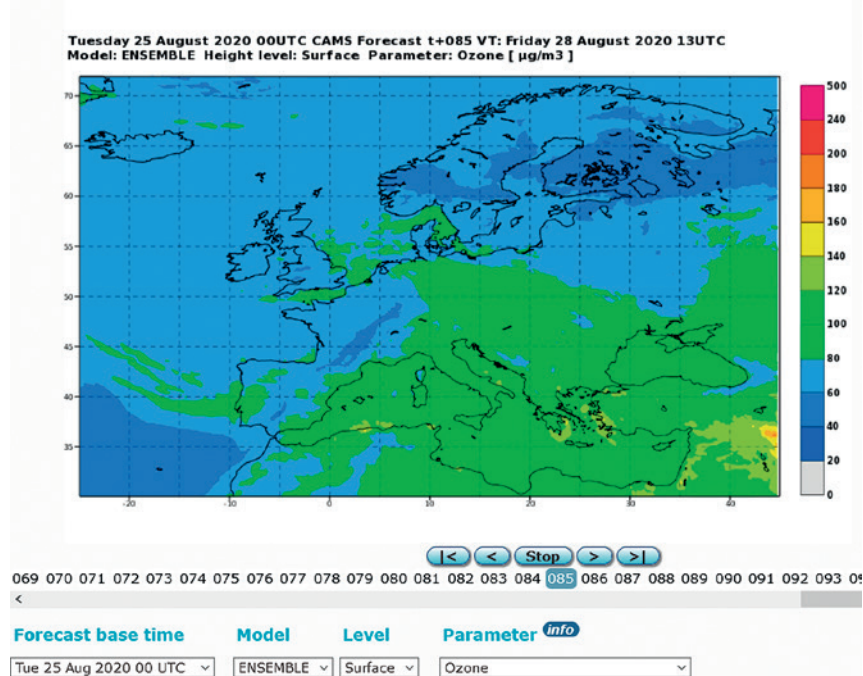
- jakości powietrza w Europie (ryc. 6.54) i transportu zanieczyszczeń na dalekie odległości na całym świecie;
- ilości energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi w danej lokalizacji i po uwzględnieniu danych dotyczących zachmurzenia i ilości aerozoli w powietrzu, opłacalności instalowania farm słonecznych czy paneli montowanych na dachach budynków;

- warstwy ozonowej (ryc. 6.52, 6.53) i ilości promieniowania ultrafioletowego docierającego do powierzchni Ziemi;
- mapowania możliwych ognisk epidemii i chorób;
- zmian klimatu na świecie.

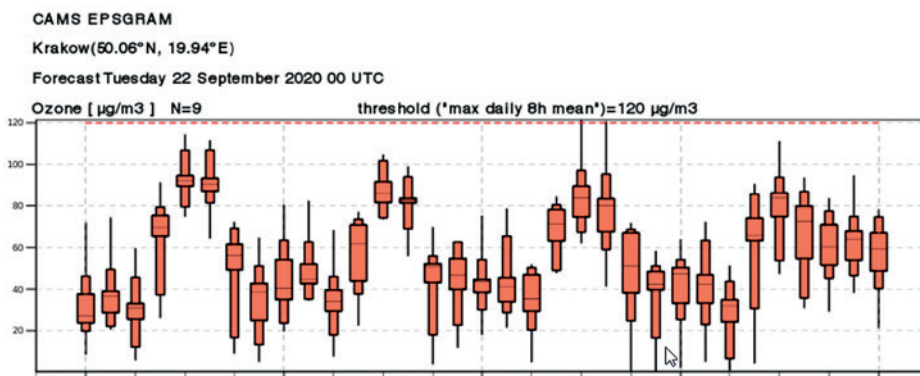
Friday 06 March 2020 00UTC CAMS Forecast t+000 VT: Friday 06 March 2020 00UTC
 Model: ENSEMBLE Height level: Surface Parameter: PM10 Aerosol [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]



Ryc. 6.51. Mapa koncentracji PM10 w Europie w dniu 06.03.2020 roku (źródło: CAMS EU, 2020)



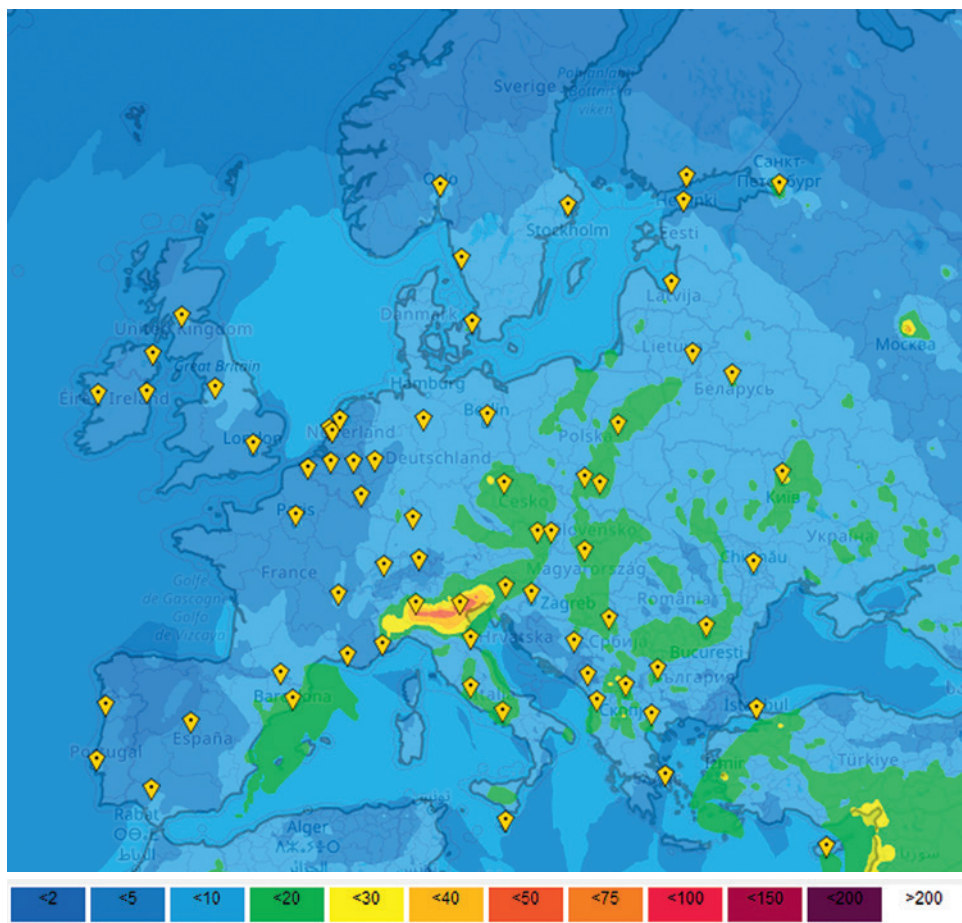
Ryc. 6.52. Mapa stężeń ozonu (O_3) w Europie w dniu 25.08.2020 o godzinie 08:45 (źródło: CAMS EU, 2020)



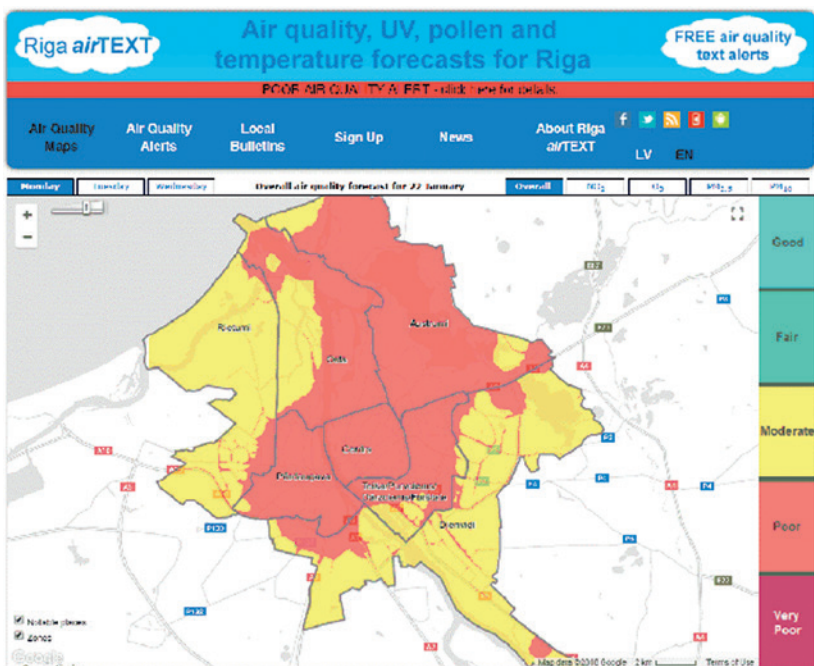
Ryc. 6.53. Prognoza stężeń ozonu (O_3) w dniu 22.09.2020 dla aglomeracji Krakowa (źródło: CAMS EU, 2020)

Prognozy dostarczane przez CAMS w skali regionalnej i lokalnej są wykorzystywane w wielu aplikacjach nieodpłatnych i komercyjnych, w tym np.:

- Riga airTEXT (ryc. 6.55) – nieodpłatna aplikacja (dostępna przez portal lub w wersji mobilnej) dostarczająca trzydniową prognozę jakości powietrza dla miasta Ryga (Łotwa). Zarejestrowani użytkownicy otrzymują powiadomienia SMS lub e-mail z informacją o prognozie, w szczególności alerty o prognozowanych podwyższonych stężeniach zanieczyszczeń;
- BreezoMeter – serwis internetowy, dostępny również przez aplikację mobilną, który łączy technologię dużych zbiorów danych i uczenia maszynowego, aby zapewnić intuicyjne, spersonalizowane informacje o jakości powietrza i stężeniu pyłków firmom i konsumentom na całym świecie;
- MeteoPollen – aplikacja informująca o przewidywanym poziomie stężenia pyłków traw, brzozy i drzew oliwnych we Francji;
- PASYFO – aplikacja do prognozowania osobistych objawów alergii, dostępna za pośrednictwem strony internetowej i aplikacji mobilnej na Litwie i Łotwie;
- Mon Toit Solaire – zintegrowany internetowy system wspomaganie decyzji dotyczący rozwoju fotowoltaicznej produkcji energii na dachach. System symuluje i oblicza potencjał energetyczny projektu dachu fotowoltaicznego i zapewnia wiarygodne informacje techniczne i ekonomiczne. Usługa jest wdrażana w Tuluzie, z dużym potencjałem rozszerzenia na inne miasta we Francji (ryc. 6.56)



Ryc. 6.54. Mapa prognozowanej średniej koncentracji pyłu zawieszonego PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) w dniu 21.10.2020 roku wraz z lokalizacją wybranych miast w serwisie CAMS do monitorowania jakości powietrza. Miasta w Polsce: Warszawa, Kraków i Katowice (źródło: CAMS EU, 2020)



Ryc. 6.55. Mapa aplikacji Riga airTEXT przedstawiająca jakość powietrza w Rydze, bazująca na serwisie CAMS Copernicus (źródło: CAMS Riga, 2020)

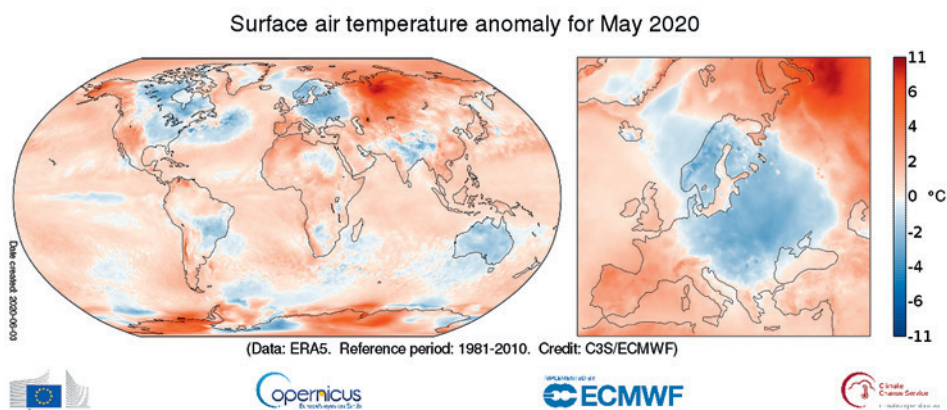


Ryc. 6.56. Widok okna aplikacji Mon Toit Solaire do analiz solarnych (źródło: MTS 2020)

6.7.2. Zmiana klimatu (Copernicus Climate Change Service)

Serwis Monitorowania Zmian Klimatu (ang. *Copernicus Climate Change Service, C3S*) zapewnia dostęp do informacji teledetekcyjnych dotyczących obserwowanych zmian klimatu. Dane satelitarne oparte są w głównej mierze na danych ze zrealizowanych już misji Sentinel (w listopadzie 2020 roku na orbicie LEO umieszczono Sentinel-6), które dostarczają naukowych dowodów nt. zmiennych geofizycznych potwierdzających zachodzące zmiany klimatu Ziemi. Poza tymi informacjami, pochodzącymi od całej rodziny satelitów Sentinel (ESA), wykorzystywane są także dane rejestrowane przez inne sensory satelitów misji towarzyszących, takich jak EUMETSAT, NOAA czy Terra/Aqua (NASA). Na podstawie danych satelitarnych obliczane są wskaźniki klimatyczne, które pozwalają na obserwowanie wzrostu temperatury lądów i oceanów, zmiany poziomu mórz i oceanów czy też określenie dynamiki topnienia pokrywy lodowej.

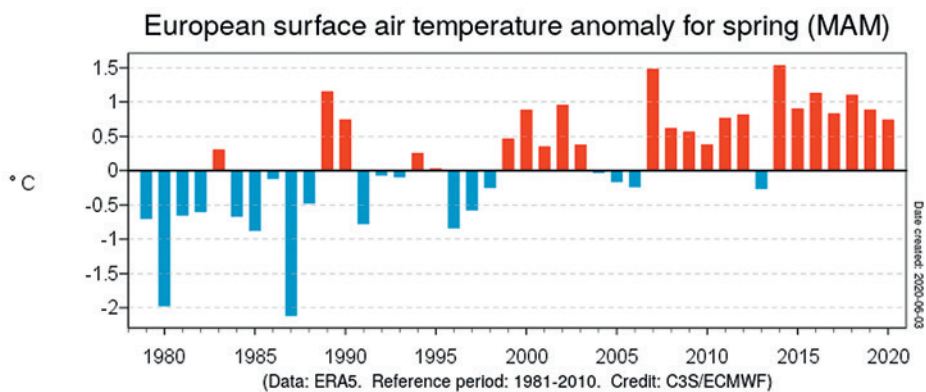
Serwis C3S publikuje dane w postaci biuletynu klimatycznego pozwalającego m.in. prześledzić anomalie przebiegu temperatury powietrza w ostatnich 30 latach obserwacji (ryc. 6.57, 6.58), zapisanych w bazie danych. Serwis zapewnia również dostęp do repozytoriów danych meteorologicznych i klimatycznych, umożliwiając użytkownikom prowadzenie analiz dostosowanych do ich potrzeb.



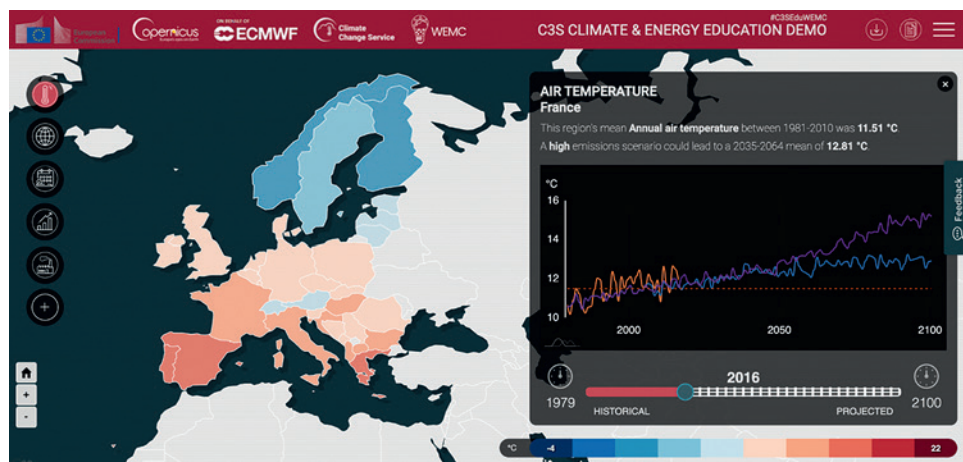
Ryc. 6.57. Anomalia globalnej temperatury powietrza w maju 2020 roku na tle okresu pomiarowego 1981–2010; re-analiza klimatyczna ERA-5 (źródło: Copernicus S, 2020)

Serwis C3S dostarcza także prognoz klimatycznych, czyli symulacji klimatu Ziemi w przyszłych dziesięcioleciach (zwykle do 2100 r., ryc. 6.59). Opracowywane są one w oparciu o zakładane prognozy stężeń gazów cieplarnianych, aerozoli i innych składników atmosfery, które wpływają na równowagę radiacyjną planety.

W ramach C3S opracowano i udostępniono użytkownikom portal z danymi Climate Data Store (CDS), który daje możliwość skorzystania z przygotowanych narzędzi tzw. *Toolbox* oraz *Climate Data Store API*. Oferowany interfejs programistyczny aplikacji (API) pozwala użytkownikom zintegrować oferowane produkty we własnych rozwiązaniach informatycznych.



Ryc. 6.58. Anomalie temperatury powietrza w Europie dla wiosny (marzec–maj) w porównaniu z okresem referencyjnym 1981–2010 (źródło: Copernicus S, 2020)

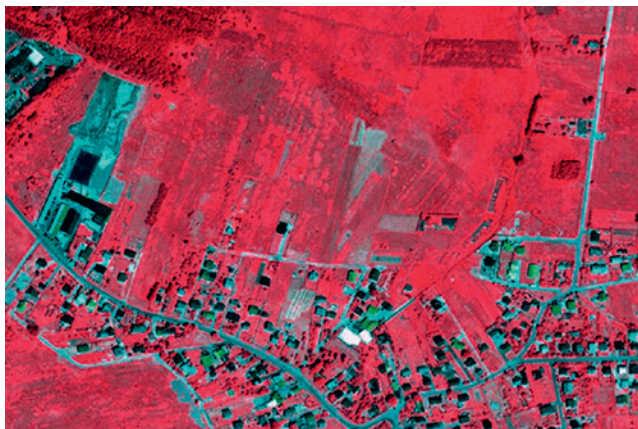


Ryc. 6.59. Prognozowanie średniorocznych zmian temperatury dostępne na portalu C3S (źródło: C3S demonstrator, 2020)

6.7.3. Przykłady zastosowań zobrazowań satelitarnych w zakresie analiz środowiska

Piotr Wężyk, Sylwia Szporak-Wasilewska, Katarzyna Bajorek-Zydroń

Przykładem praktycznego wykorzystania zobrazowań satelitarnych w zakresie analiz środowiska w Polsce mogą być projekty geoinformatyczne realizowane od kilkunastu lat przez Urząd Miasta Krakowa. W latach 2006–2007 została opracowana *Mapa roślinności rzeczywistej miasta Krakowa i wyznaczenie obszarów przyrodniczo najcenniejszych niezbędnych do zachowania równowagi ekosystemu miasta*. Realizacja projektu polegała na kartowaniu szaty roślinnej Krakowa na obszarze ponad 330 km². Do analizy obiektowej GEOBIA (patrz rozdział 3.3.5) obrazów satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej: IKONOS-2 (zachodnia część miasta – 2005 rok) oraz QuickBird-2 (wschodnia część miasta – 2006 rok) wykorzystano oprogramowanie eCognition (Trimble GeoSpatial). Poza półautomatyczną analizą GEOBIA klas pokrycia terenu (LULC), obrazy IKONOS-2 wykorzystano również do generowania kompozycji barwnych CIR (Colour InfraRed). Wydruki te (ryc. 6.60) generowane na podkładach map ewidencji gruntów i budynków (EGiB) uzupełniały nawigację GPS, ułatwiając botanikom orientację w terenie, a także pozwoliły na bardziej precyzyjne kartowanie płatów roślinności. W wyniku prac powstała mapa zbiorowisk roślinnych oraz innych wydzieleń zielonej infrastruktury (np. parków, zieleńców, skwerów, zieleni przyulicznej, terenów zainwestowanych), na którą naniesiono (z wykorzystaniem pomiarów GPS) także stanowiska roślin chronionych zinwentaryzowanych podczas wykonywania zdjęć fitosocjologicznych (Dubiel i Szwagrzyk, 2008). Mapa roślinności rzeczywistej Krakowa od samego początku jej opracowania była upubliczniona w internetowych serwisach mapowych (Wężyk i Wańczyk, 2008) i jest wciąż wykorzystywana przez pracowników Urzędu Miasta Krakowa jako jedna z istotnych warstw informacyjnych systemu GIS stosowanego w tym urzędzie. Opracowanie to jest bardzo istotne w złożonym procesie wydawania decyzji administracyjnych (głównie w zakresie nowo powstającej zabudowy i często towarzyszących jej zmian tzw. klasoużytków). W przypadku stwierdzenia występowania

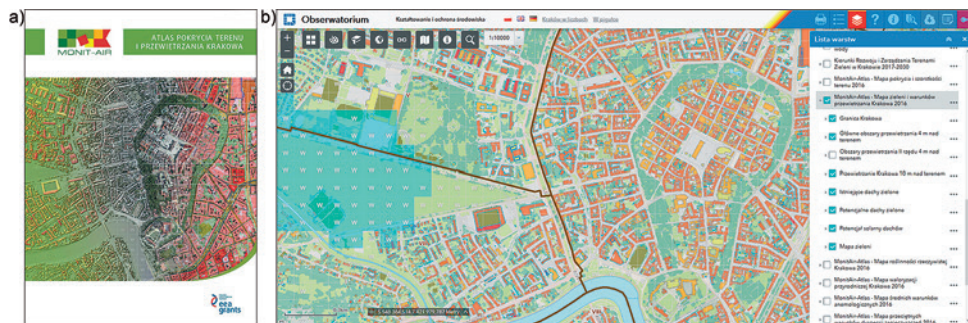


Ryc. 6.60. Fragment kompozycji CIR (IKONOS-2; GSD 1,0 m pan-sharpened; 2005 rok) południowego obszaru Krakowa, wykorzystany do kartowania terenowego *Mapy roślinności rzeczywistej Krakowa* (źródło: ProGea Consulting)

roślin chronionych na analizowanej działce, wymagana jest od inwestora szczegółowa inwentaryzacja przyrodnicza.

Przytoczony przykład implementacji danych satelitarnych, a mianowicie *Mapa roślinności rzeczywistej Krakowa* z roku 2007, w latach 2015–2016 została poddana weryfikacji oraz aktualizacji w ramach projektu pt. *Zintegrowany system monitorowania danych przestrzennych dla poprawy jakości powietrza w Krakowie* (akronim: MONIT-AIR; konsorcjum Urząd Miasta Krakowa, Wydział Kształtowania Środowiska, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB). W ramach projektu MONIT-AIR wykorzystano dane teledetekcyjne w celu zrealizowania szeregu prac kartograficznych oraz zasilenia baz danych służących modelowaniu matematycznemu przewietrzania. W ramach projektu, poza wspomnianą aktualizacją *Mapy roślinności rzeczywistej*, opracowano także szczegółowe mapy pokrycia terenu (LULC) Krakowa i jego okolic na trzech różnych poziomach szczegółowości. W tym celu wykorzystano wysokorozdzielcze zobrazowania satelitarne WorldView-2 (DigitalGlobe, Maxar Technologies) oraz chmury punktów ALS LiDAR ALS (ISOK) oraz dane GIS (wektorowe i rastrowe z UM Kraków), przeprowadzając analizę obiektową (GEOBIA) zintegrowanych danych (ang. *data fusion*). Na podstawie wygenerowanych segmentów klas pokrycia terenu przeprowadzono szereg analiz przestrzennych GIS, w tym, m.in. określono potencjał solarny dachów budynków, obliczono wskaźniki jakości życia (np. stopień wypełnienia przestrzeni miejskiej zielenią wysoką) w poszczególnych dzielnicach, czy opracowano mapę przeciętnych warunków dyspersji zanieczyszczeń w zależności od sytuacji meteorologicznej (cyklonalnej). Jednym z produktów opracowanych w ramach projektu MONIT-AIR była mapa drzew (roślinności wysokiej) bazująca na wariancie znormalizowanego numerycznego modelu pokrycia terenu (zNMPT; w przypadku drzew/drzewostanu stosuje się nazwę MKD – Model Koron Drzew) oraz zobrazowaniach satelitarnych WorldView-2 (MAXAR). W ramach projektu powstało kartograficzne opracowanie w formie drukowanej i cyfrowej pt. *Atlas pokrycia terenu i przewietrzania Krakowa* pod redakcją Bajorek-Zydroń i Wężyk (2016). Wszystkie mapy tematyczne z *Atlasu...* prezentowane są użytkownikom na stronach internetowych serwisu OBSERWATORIUM MSIP UM Krakowa (MSIP Kraków, 2020) (ryc. 6.61).

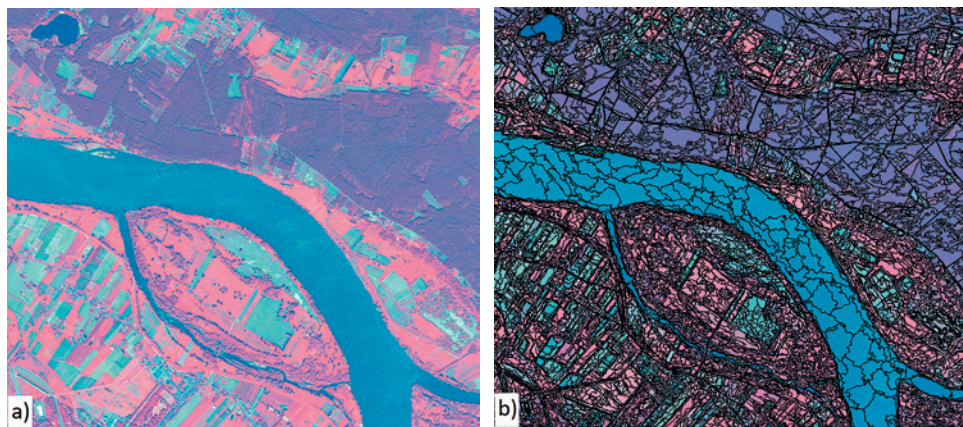
Zobrazowania satelitarne dzięki swoim zaletom, czyli m.in. możliwości akwizycji rozległych obszarów w bardzo krótkim czasie, stanowią doskonały materiał do wykorzystania przez administrację publiczną w procesie opracowywania map pokrycia i użytkowania terenu (LULC), jak również do analiz dynamiki przemian związanych z rozwojem



Ryc. 6.61. Publikacja wyników projektu MONIT-AIT (EEA Grants) jako a) wydawnictwo książkowe *Atlas pokrycia terenu i przewietrzania Krakowa* oraz b) interaktywna kompozycja mapowa: Mapa zieleni i warunków przewietrzania Krakowa (źródło: MSIP Kraków, 2020)

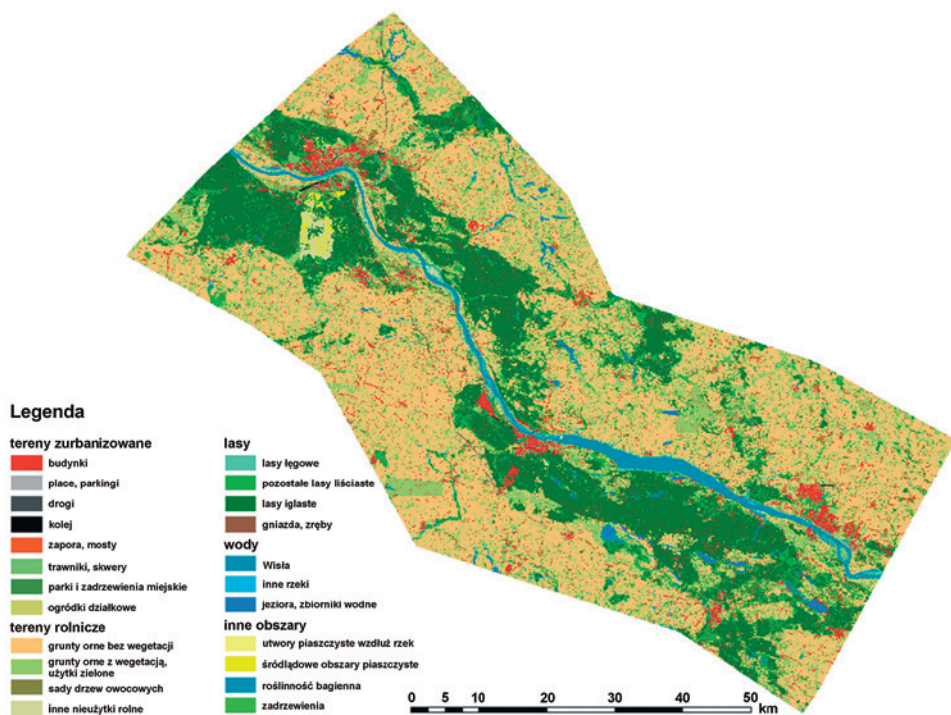
miast i regionów. Szczególnie w sytuacji dużych inwestycji, dla których wymagane jest przygotowanie Ocen Oddziaływania na Środowisko (OOS), wykorzystanie aktualnych zobrazowań satelitarnych wspartych danymi GIS może przynieść bardzo wiele korzyści. Przykładem wdrożenia danych teledetekcyjnych do procesu OOS był projekt pod nazwą *Vistula Study*, którego jednym z celów było stworzenie aktualnych map LULC dla opracowań tematycznych tworzonych na potrzeby przygotowania studium oddziaływania na środowisko stopnia wodnego na Środkowej Wiśle, planowanego do wybudowania za Włocławkiem. Wykorzystana w klasyfikacji LULC analiza obiektowa obrazu (GEOBIA) bazowała na fuzji danych optycznych (satelitarnych, fotolotniczych: ortofotomap RGB i CIR), chmur punktów LiDAR ALS oraz warstw GIS w formacie wektorowym lub rastrowym (Wężyk i in., 2012).

W projekcie *Vistula Study* analizie poddano kilka serii czasowych wysokorozdzielczych (5,0 m GSD) zobrazowań satelitarnych RapidEye (BlackBridge, Planet Labs.) posiadających poza kanałami RGB oraz bliskiej podczerwieni (NIR) również pasmo tzw. czerwieni krawędziowej (ang. *RedEdge*), tj. zakres spektralny szczególnie przydatny w detekcji i kartowaniu zbiorowisk roślinnych. Jako efekt analizy GEOBIA (ryc. 6.62) oraz GIS powstawały serie czasowe map LULC dla obszaru przyszłej inwestycji przy wykorzystaniu aktualnych wysokorozdzielczych zobrazowań satelitarnych oraz danych fotolotniczych (Wężyk i in., 2012), (ryc. 6.63).



Ryc. 6.62. Analiza obiektowa (GEOBIA) obrazów satelitarnych RapidEye (5,0 m GSD; Planet):
a) kompozycja CIR (kanały 532), b) automatycznie wygenerowane segmenty
(źródło: *Vistula Study*; Ove Arup, ProGea Consulting, 2012)

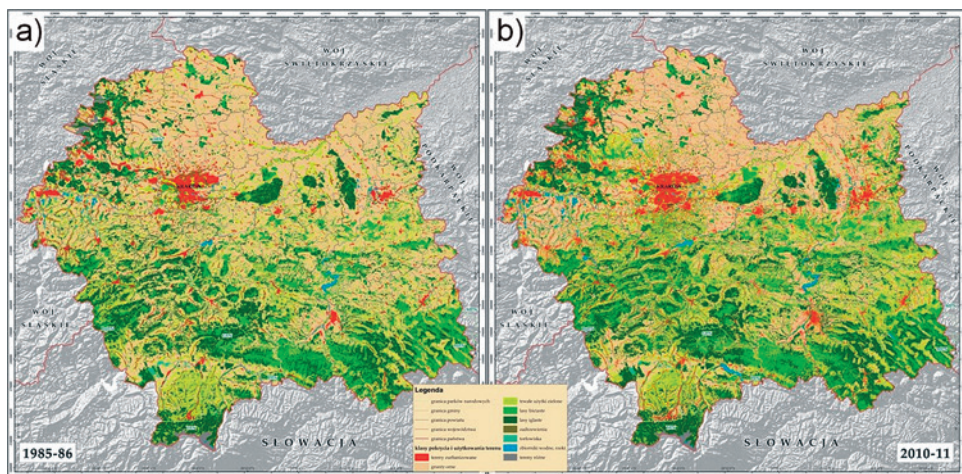
Innym przykładem opracowania wykorzystującego zobrazowania satelitarne do określenia klas pokrycia terenu były projekty wykonywane w latach 2010–2012 na zlecenie Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego. W ramach jednego z nich opracowano mapę zmian klas pokrycia Małopolski dla okresu 25 lat (lata: 1986–2011), wykorzystując w tym celu analizę obiektową (GEOBIA) zobrazowań satelitarnych Landsat (NASA) o średniej rozdzielczości przestrzennej (sceny z lat: 1986/1987 oraz 2010/2011; 30 m GSD) oraz wysokorozdzielczych obrazów RapidEye (sceny z lat: 2010/2011; 5,0 m GSD; BlackBridge). W wyniku analizy GEOBIA otrzymano 10 klas pokrycia i użytkowania terenu, tj. grunty orne, użytki zielone, tereny zurbanizowane, rzeki i ciekі, zbiorniki wodne, lasy iglaste, lasy liściaste, zadrzewienia i zakrzewienia, torfowiska oraz inne tereny.



Ryc. 6.63. Mapa klas pokrycia i użytkowania terenu (stan na 09.2010) wykonana na podstawie analizy GEOBIA obrazów satelitarnych RapidEye GSD 5,0 m (źródło: Vistula Study; Ove Arup, ProGea Consulting, 2012)

Wykazano, że w okresie 25 lat na obszarze Małopolski nastąpiło znaczne zwiększenie powierzchni lasów (+4,4%) oraz terenów zurbanizowanych (+2,4%), głównie kosztem ubytków w powierzchni gruntów rolnych (-3,6%) oraz trwałych użytków zielonych (-1,2%). Otrzymane wyniki (ryc. 6.64) pozwoliły sformułować wniosek, że zmiany jakie zaszły w ciągu 25 lat oraz te, z jakimi wciąż mamy do czynienia na terenie województwa małopolskiego, pokrywają się z ogólnymi kierunkami i trendami przemian krajobrazu obserwowanymi w Polsce w ostatnich trzech dekadach. Są to m.in. procesy sukcesji wtórnej zbiorowisk roślinnych o charakterze leśnym na gruntach, na których zaprzestano produkcji rolnej oraz obszary związane z rozwojem zabudowy oraz inwestycjami infrastruktury drogowej i kolejowej. Zastosowanie automatycznej klasyfikacji obiektowej (GEOBIA) oraz analiz przestrzennych GIS pozwoliło na realizację tego opracowania dla obszaru ponad 15 000 km² w ciągu zaledwie kilku tygodni (Wężyk i in., 2013).

Dynamiczne zmiany, jakie zachodzą w krajobrazie, mogą być monitorowane w sposób półautomatyczny na podstawie serii wieloczasowych obrazów satelitarnych i innych danych przestrzennych zasilających bazy danych (np. dane fotolotnicze: ortofotomapy, chmury punktów LiDAR czy dane GIS). Wyniki tego typu projektów mogą być wykorzystywane nie tylko przez planistów, ale także przez specjalistów z innych dziedzin, takich jak: leśnictwo, rolnictwo, hydrologia, turystyka, ekologia czy biologia. Przemiany społeczno-gospodarcze, jakich można doświadczyć w ostatnich dekadach, często prowadzą do zaprzestania użytkowania rolniczego gleb o dość słabej bonitacji lub trudnych warunkach gospodarowania (duże spadki terenu, uwarunkowania środo-

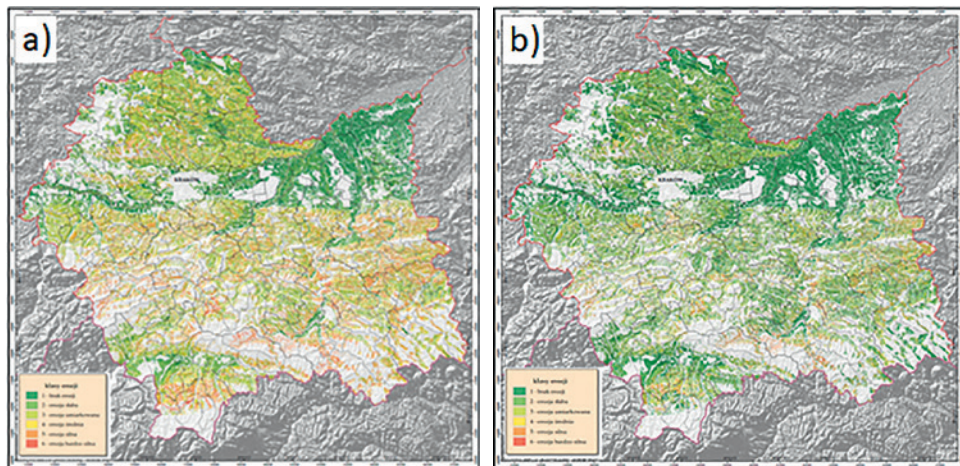


Ryc. 6.64. Mapy klas pokrycia terenu (LULC) Małopolski wykonane na podstawie analiz GEOBIA scen satelitarnych dla okresów: a) 1985–1986 oraz b) 2010–2011 (źródło: Wężyk i in., 2013)

wiskowe i in.). W efekcie tych procesów obserwujemy wzrost powierzchni nieużytków, a w kolejnych latach procesy wtórnej sukcesji o charakterze zbiorowisk leśnych. Ma to z jednej strony swoje zalety związane ze zwiększeniem sekwestracji dwutlenku węgla, wzmocnieniem retencji opadów atmosferycznych czy wzrostem bioróżnorodności (choć są tu wyjątki), ale pamiętać należy też o bezpieczeństwie żywnościowym kraju oraz o przemianach krajobrazu zachodzących niekoniecznie w odpowiednim kierunku. Nie bez znaczenia dla środowiska są procesy wtórnej sukcesji leśnej postępujące często spontanicznie na obszarach przemysłowych, np. w rejonach po wydobyciu węgla brunatnego czy siarki, a mogą one być dokumentowane i monitorowane na obrazowaniach satelitarnych np. Sentinel-2 ESA (Szostak i in., 2019).

Bezpieczeństwo żywnościowe bywa uzależnione od zagrożenia wynikającego z ryzyka i podatności gleb na erozję. Wykorzystując analizę obiektową (GEOBIA) oraz pozyskane w latach 2010–2011 zobrazowania satelitarne RapidEye (5 kanałów spektralnych; 5,0 m GSD; BlackBridge), a także dane fotolotnicze (ortofotomapy RGB; GSD 0,25 m) dokonano weryfikacji i poddano procesowi aktualizacji cyfrową mapę glebo-rolniczą województwa małopolskiego. Tego typu mapy opracowywano w latach 60. i 70. ubiegłego wieku metodami tradycyjnej kartografii i metod gleboznawczych. Mapa ta została poddana wektoryzacji, jednak wciąż przedstawiała sytuację klas pokrycia terenu sprzed około 40 lat. Na podstawie zaktualizowanej mapy glebo-rolniczej oraz NMT, wykorzystując analizy przestrzenne GIS (tzw. model RUSLE), opracowano wynikową mapę potencjalnego zagrożenia gleb Małopolski erozją wodną. Inicjatywa utworzenia w skali województwa takiej mapy numerycznej była związana m.in. z intensywnymi opadami deszczu i powodzią, która nawiedziła Małopolskę w 2010 roku. Poza opracowaniem cyfrowej mapy erozji aktualnej oraz potencjalnej, przygotowano także szereg szczegółowej dokumentacji pochodnej. Dla obszaru każdej gminy obliczono m.in. aktualny wskaźnik pokrywy roślinnej, współczynnik podatności gleb na erozję wodną, wskaźnik długości i nachylenia stoku (indeks morfometryczny; ang. *LS*), a także przygotowano odpowiednie zalecenia dotyczące ochrony gruntów rolniczych (w skali

gmin i powiatów). Przeprowadzona ocena zagrożenia gleb województwa małopolskiego erozją potencjalną wykazała, iż jedynie 15% powierzchni terenów użytkowanych rolniczo nie jest w zasadzie zagrożone erozją wodną. Potencjalnie średnie lub wyższe zagrożenie erozyjne, mogące skutkować trwałą degradacją profilu glebowego, dotyczyło w roku 2011 aż 28,6% terenów rolnych województwa małopolskiego (Drzewiecki i in. 2014).



Ryc. 6.65. Mapa zagrożenia a) erozją potencjalną oraz b) erozją aktualną gleb Małopolski (źródło: Drzewiecki i in., 2014)

W ostatnich latach dane teledetekcyjne wykorzystywane są coraz powszechniej do inwentaryzacji i oceny stanu zasobów przyrodniczych. Celem ich stosowania jest przede wszystkim pozyskanie kluczowych dla danego obszaru informacji pozwalających na skuteczne zarządzanie zasobami przez wcześniejszą ilościową i jakościową ocenę wpływu realizowanych zabiegów ochronnych w Parkach Narodowych i Krajobrazowych, rezerwach przyrody czy na obszarach chronionych w ramach programu ESE Natura 2000. Decyzje podejmowane przy wsparciu teledetekcji satelitarnej pozwalają na poprawę statusu ochrony cennych siedlisk, dzięki poznaniu procesów warunkujących ich istnienie oraz wpływu czynników zagrażających ich istnieniu. Spośród najczęściej spotykanych zastosowań teledetekcji wyróżnić można:

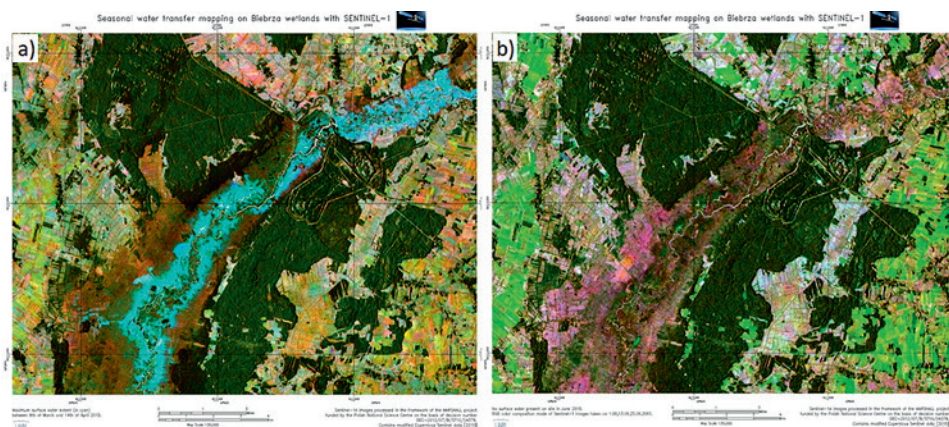
- ocenę stanu siedlisk, dynamiki i kierunku zmian zachodzących w ich obrębie w powiązaniu z oceną zagrożeń dla ich trwałości,
- ocenę stopnia oddziaływania terenów graniczących na środowisko przyrodnicze obszaru chronionego,
- inwentaryzację hydrograficzną obejmującą identyfikację wód powierzchniowych, ale także przekształcenia sieci hydrograficznej wpływające na warunki wodne, a tym samym florę i faunę,
- ocenę warunków hydrologicznych obejmującą określenie zasięgu i dynamiki zalewów, detekcję lokalnych podtopień z analizą przyczyn, ocenę wilgotności gleb w kluczowych dla siedlisk fazach wegetacji, czy ocenę współzależności procesów hydrologicznych intercepcji, transpiracji i ewaporacji,
- inwentaryzację i analizę zmian zagospodarowania terenu w zakresie użytkowania gruntów, zabudowy i dróg z oceną presji urbanizacyjnej powodującej zaniechanie tradycyjnych sposobów użytkowania gruntów w krajobrazie rolniczym,

- zanikanie gatunków roślin (ubożenie składu gatunkowego), zwierząt i ich ostoi,
- ocenę stopnia zagrożenia wnikaniem obcych inwazyjnych gatunków roślin,
- ocenę dynamiki rodzimych gatunków ekspansywnych,
- inwentaryzację roślinności lądowej z opracowaniem map roślinności rzeczywistej i siedlisk Natura 2000 oraz identyfikację gatunków,
- charakterystykę zróżnicowania roślinności z wykorzystaniem teledetekcyjnych parametrów biofizycznych i strukturalnych z oceną kondycji,
- ocenę ognisk gradacyjnych szkodników,
- identyfikację i ocenę dynamiki sukcesji pierwotnej i wtórnej roślinności drzewiastej i krzewów,
- detekcję i inwentaryzację obszarów objętych kłeską żywiolową z monitoringiem następstw, w tym obszarów wypalonych w wyniku pożarów, zniszczonych przez huragany,
- charakterystykę geologiczną i geomorfologiczną z oceną przekształcenia rzeźby terenu wywołaną zjawiskami naturalnymi i antropogenicznymi.

Zmiany klimatu i obserwowane w ostatnim czasie zmniejszanie się zasobów wodnych prowadzi do zagrożenia degradacją ekosystemów, dla których woda jest czynnikiem odgrywającym największą rolę w kształtowaniu się warunków siedliskowych, jak i jest czynnikiem warunkującym ich istnienie. Zaliczamy do nich przede wszystkim ekosystemy dolin rzecznych i mokradła.

Analiza związków pomiędzy lokalnymi procesami hydrologicznymi (głównie transferem wody i stagnacją), sukcesją roślinności na równinie zalewowej, a warunkami siedliskowymi dla zwierząt, szczególnie ptaków brodzących oraz ichtiofauny w wybranych starorzeczach, były tematem projektu MARSHALL realizowanego w latach 2012–2017 przez zespół naukowców Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. W projekcie badano cechy ekohydrologiczne wybranych starorzeczy w celu określenia zmian wywołanych zmiennymi w czasie i przestrzeni zasięgami zalewów (patrz rozdział 6.5.2).

W projekcie MARSHALL monitorowano także łączność hydrologiczną pomiędzy starorzeczami a nurtem rzeki, aby ocenić jakość wody i bioróżnorodność obszaru chro-



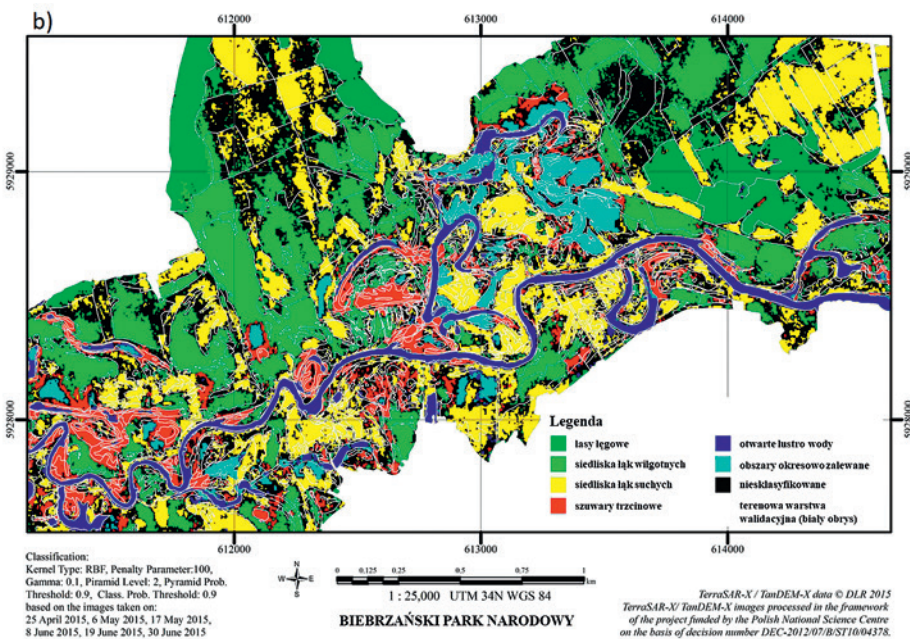
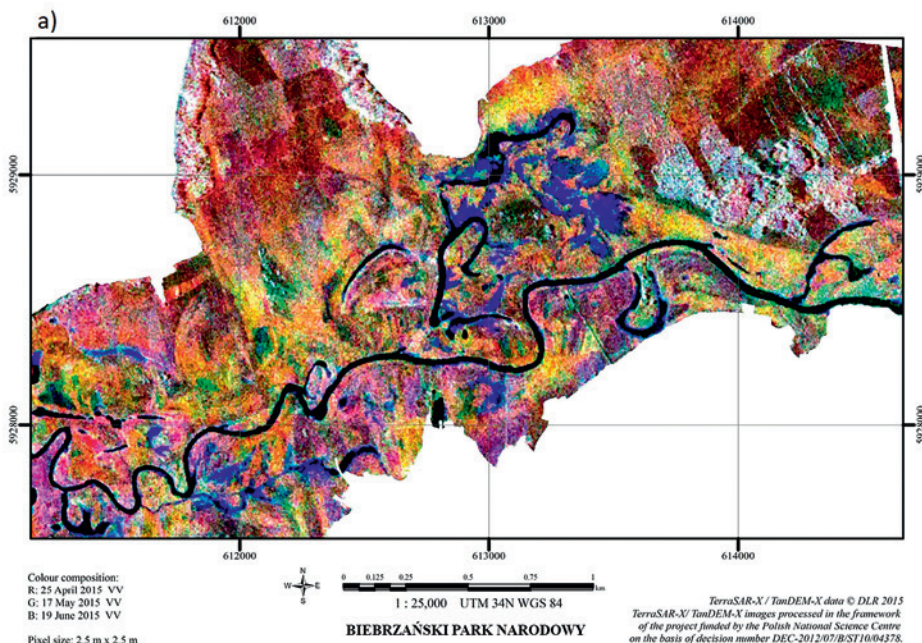
Ryc. 6.66. Mapowanie zasięgu zalewu w dolinie Biebrzy na podstawie danych Sentinel-1 (ESA).
 a) maksymalny zasięg zalewu (kolor: turkusowy) pomiędzy 09.03–14.04.2015
 i b) brak zalewu w 19.06.2015; (źródło: Mróz i Mleczko 2018a)

nionego. Wykorzystano w tym celu informację zarówno o zasięgu, jak i czasie trwania zalewów, pozyskując dane w różnych okresach (ryc. 6.66, patrz również ryc. 6.35 w rozdziale 7.5.2). Projekt opierał się w znacznej mierze na eksperymentalnych danych mikrofalowych z misji TerraSAR-X/TanDEM-X (TSX/TDX) oraz Sentinel-1A. Obejmował on również ewaluację przydatności obrazów mikrofalowych SAR pozyskanych w pasmach C i X do kartowania obszarów mokradeł (ryc. 6.67). Badania nad danymi SAR były wspierane przez zobrazowania VNIR (kamera hiperspektralna Rikola) oraz RGB (kompaktowa kamera) wykonywane z pułapu BSP.

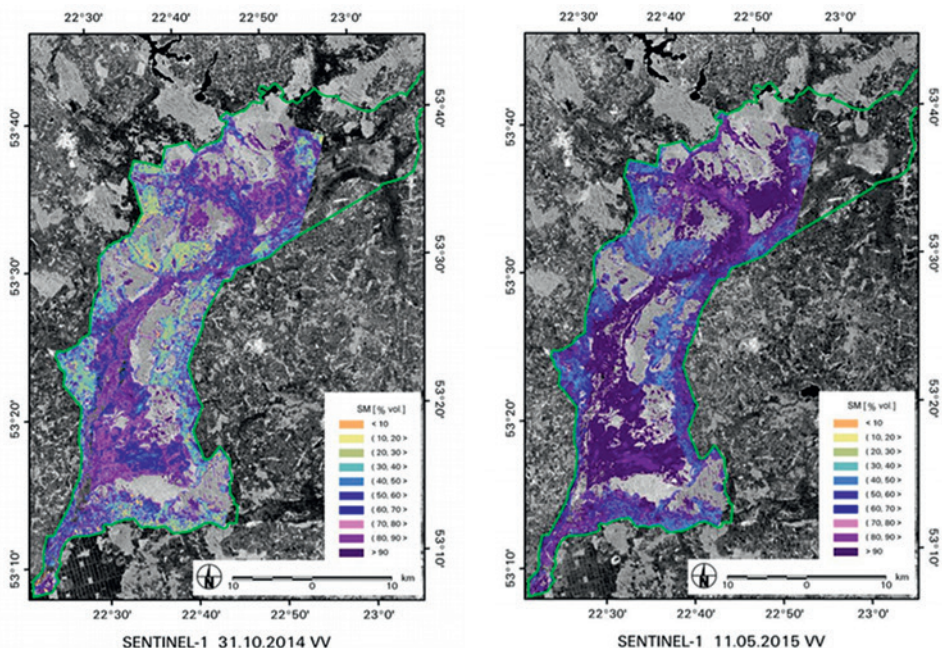
Wyniki projektu pozwoliły stwierdzić, że przy zastosowaniu podejścia wieloczasowego, odpowiedniej selekcji danych satelitarnych oraz połączeniu amplitudy z entropią możliwe jest uzyskanie zadawalających map wiosennych zalewów w dolinie do celów predykcji warunków życia ichtio- i awifauny (Mróz i Mleczek, 2018b).

Innym przykładem badań wykorzystujących teledetekcję satelitarną, których celem było opracowanie skutecznych metod monitorowania obszarów mokradłowych w Polsce, był projekt POLWET (System monitorowania obszarów mokradeł RAMSAR z wykorzystaniem danych satelitarnych) prowadzony przez Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie (IGiK) w latach 2015–2017. Jego nadrzędnym celem było opracowanie systemu monitorowania obszarów mokradeł objętych Konwencją z RAMSAR i stworzenie serwisu informacyjnego udostępniającego produkty tematyczne do zastosowań operacyjnych, tj. mapy wskaźników wspomagających proces monitorowania, ochrony i zarządzania mokradłami. Projekt wykorzystywał dane teledetekcyjne Sentinel-2 i Landsat 8 na potrzeby opracowania map pokrycia terenu i detekcji zmian (zbiorowisk roślinnych i użytkowania); dane z Sentinel-2 (10 m GSD), Landsat 8 (30 m GSD), Proba-V (100 m GSD), Terra MODIS, NOAA AVHRR (1 km GSD) do oceny kondycji roślin przy wykorzystaniu wskaźników roślinności (NDVI i VCI; *Vegetation Condition Index*) oraz obrazy Landsat 8 i Terra MODIS i NOAA AVHRR do oceny kondycji roślin przy wykorzystaniu wskaźników temperaturowych (TCI; *Temperature Condition Index*); a także dane radarowe z Sentinel-1 (10m) i Envisat/ASAR (12,5 m GSD) do opracowania map struktury roślinności, wilgotności gleb (ryc. 6.68) i prognozowania wpływu zmian na stan środowiska przyrodniczego, jak również na potrzeby opracowania map wód powierzchniowych i analizy zasięgu zalewów (Dąbrowska-Zielińska i in., 2019).

Dzięki zdolnościom retencyjnym obszarów mokradłowych, a przede wszystkim ekosystemom torfowiskowym, woda stanowić może od 75 do 85% ich objętości, a to oznacza, że w torfie w Polsce może być zmagazynowane nawet 35 mld m³ wody, z czego 480 mln m³ wyparowuje do atmosfery w procesie ewapotranspiracji, a także około 1,4% odpływa powierzchniowo lub wgłębnie (Dajdok i Pawlaczyk, 2009). Pomimo przedstawianych szacunków, ilość zasobów wodnych przekazywana do otoczenia tylko w postaci pary wodnej jest jednym z wciąż słabo zbadanych procesów hydrologiczno-klimatycznych mówiących o funkcjonowaniu torfowisk. W badaniach środowiskowych ewapotranspiracja daje pogląd na reżim energetyczny, który odzwierciedla charakter przepływu transpiracyjnego, jak i produkcji pierwotnej w warunkach dostatecznego uwilgotnienia. Opracowanie metod, modeli i procedur obliczeniowych dla ewapotranspiracji w różnych warunkach klimatycznych, hydrologicznych i fizjograficznych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii jest niezbędne dla potrzeb prognoz hydrologicznych, planowania gospodarki wodnej, czy ochrony cennych przyrodniczo siedlisk (Jaworski, 2004). Dzięki badaniom naukowym prowadzonym nad ewapotranspiracją możliwe jest chociażby oszacowanie skutków przewidywanych negatywnych zmian klimatu.



Ryc. 6.67. Kompozycja barwna RGB obrazów TSX „Sigma Naught” (SN) z polaryzacją HH zarejestrowanych w dniach: 25.04, 17.05. oraz 19.06. 2015 (a) oraz mapa wynikowa klasyfikacji pokrycia terenu wykonana metodą SVM (Support Vector Machines; dokładność 83% OAA oraz 0,80 Kappa) (b) (źródło: Mróz i Mleczko, 2018b)



Ryc. 6.68. Przykładowe mapy zmienności wilgotności gleby na obszarze Dolnej i Środkowej Biebrzy w różnym czasie (31.10.2014 i 11.05.2015) opracowane na podstawie danych Sentinel-1 (ESA). Kolorem fioletowym i niebieskim oznaczono obszary o najwyższej wilgotności odpowiadające terenom mokradłowym w dolinie Biebrzy (Dąbrowska-Zielińska i in., 2016)

Obecnie rozdzielczość przestrzenna, czasowa, a przede wszystkim spektralna obrazów satelitarnych umożliwia skuteczne monitorowanie i analizowanie procesów parowania wody na dużych obszarach. Metody szacowania ewapotranspiracji z wykorzystaniem teledetekcji satelitarnej opierają się najczęściej na bilansie energetycznym powierzchni czynnej, zwanym również bilansem cieplnym lub bilansem ciepło-radiacyjnym determinującym wymianę energii pomiędzy powierzchnią Ziemi a atmosferą (wzór 6.3):

$$LE = R_n - G - H \quad (6.3)$$

gdzie:

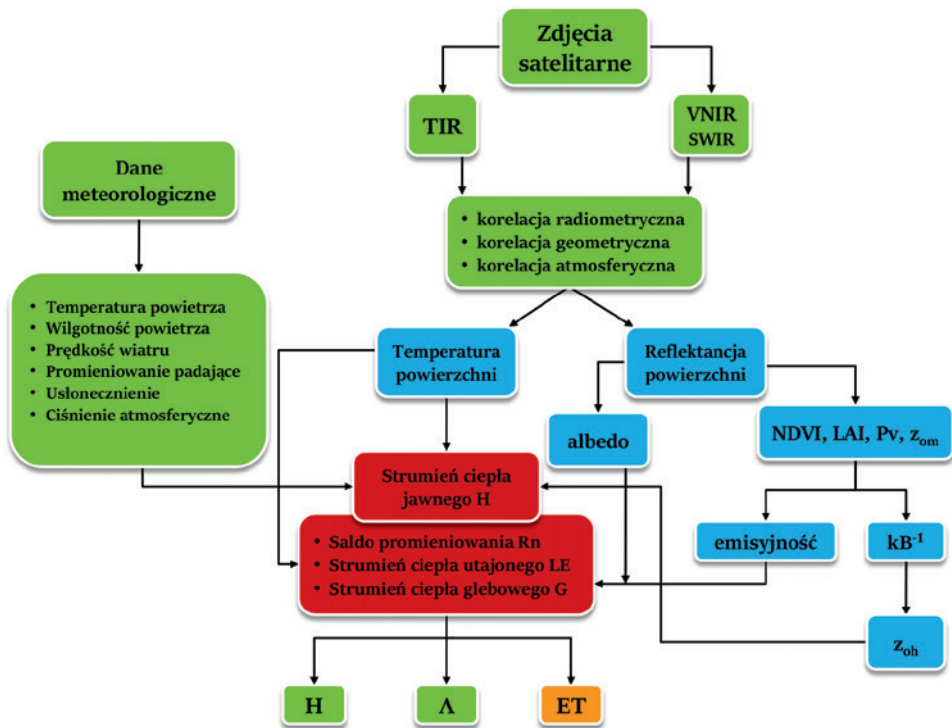
R_n – saldo promieniowania [W/m^2];

LE – turbulencyjny strumień ciepła utajonego (ilość ciepła zużyta na parowanie [W/m^2];

H – turbulencyjny strumień ciepła jawnego [W/m^2];

G – strumień ciepła w glebie [W/m^2].

Przykładowy model szacowania ewapotranspiracji z wykorzystaniem zobrazowań satelitarnych wymaga trzech zestawów danych (ryc. 6.69). Pierwszy zestaw składa się z map opracowanych na podstawie danych teledetekcyjnych obejmujących albedo powierzchni terenu, zdolność emisyjną podłoża, temperaturę powierzchni, znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności (NDVI), frakcyjne pokrycie powierzchni terenu roślinnością (P_v), wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści (LAI) oraz aerodynamiczną szorstkość powierzchni (Z_0). W analizach z powodzeniem mogą być wykorzystane takie



Ryc. 6.69. Schemat szacowania ewapotranspiracji (ET) z wykorzystaniem teledetekcyjnego modelu bilansu cieplnego SEBS (*Surface Energy Balance System*).
Przykładowy dla obszaru Doliny Dolnej Biebrzy (Szporak-Wasilewska, 2012)

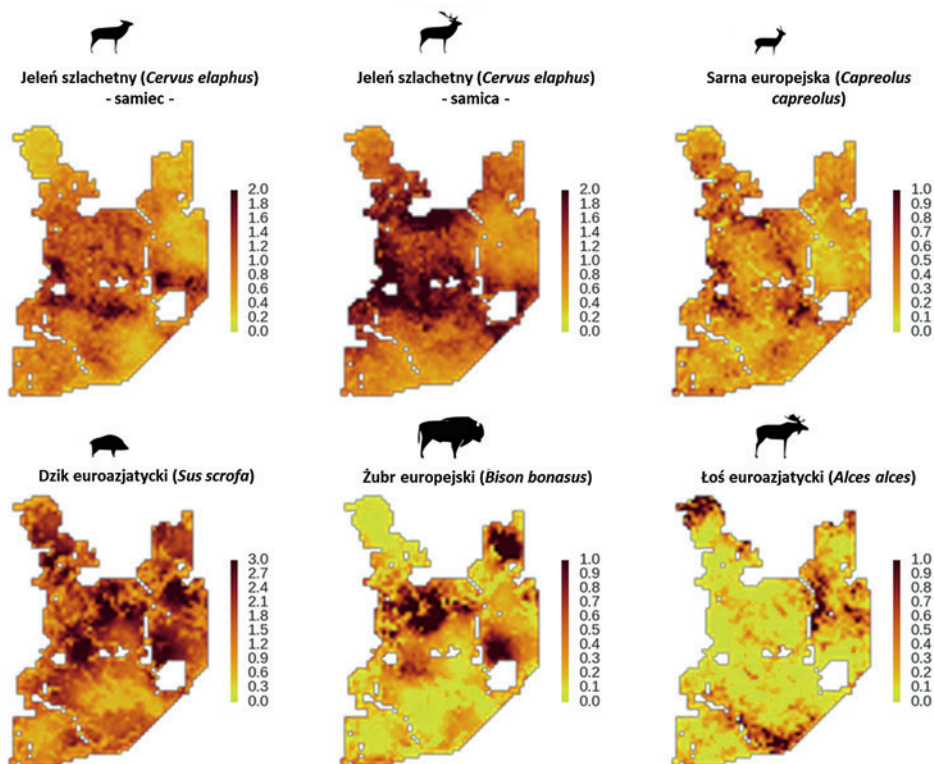
zobrazowania satelitarne jak Terra MODIS, Landsat czy Sentinel-2, posiadające kanały z zakresu widzialnego, bliskiej i średniej podczerwieni oraz z zakresu termalnego. Drugi zestaw dotyczy danych meteorologicznych takich jak: ciśnienie atmosferyczne, temperatura powietrza, wilgotność i prędkość wiatru na wysokości referencyjnej. Ta ostatnia odnosi się do wysokości stacji meteorologicznej dokonującej pomiaru w obrębie obszaru badań. Trzeci zestaw danych dotyczy promieniowania padającego w zakresie krótko- i długofalowym. Wynikiem modelu jest mapa przestrzennej zmienności ewapotranspiracji (np. w milimetrach na dobę).

Zagrażające ekosystemom dolin rzecznych i mokradeł przesuszenie stało się przyczynkiem do podjęcia badań mających na celu nie tylko skuteczny monitoring procesów parowania i zagrożenia suszą, ale także związaną z przesuszeniem zwiększoną emisją gazów cieplarnianych. Przykładem może być projekt realizowany w Biebrzańskim Parku Narodowym w latach 2017–2020 przez IGiK w Warszawie, mający na celu określenie bilansu węgla przy zastosowaniu sensorów radarowych (Sentinel-1) i optycznych (Sentinel-2 oraz Sentinel-3). Określono wpływ biomasy i wilgotności gleby na wymianę węgla pomiędzy ekosystemem bagiennym a atmosferą i zbadano warunki środowiskowe, w jakich następuje emisja dwutlenku węgla do atmosfery na obszarach mokradłowych (IGiK, 2020). W analizach wykorzystano parametry biofizyczne opracowane na podstawie zobrazowań satelitarnych Sentinel-2 i Sentinel-3, takie jak: temperatura radiacyjna powierzchni, wilgotność gleby, wskaźniki roślinności

(np. *Red Edge Diff Veg Index*, NDVI, EVI i in. wyprowadzone w trakcie badań), LAI, biomasę oraz pokrywa roślinna. Obliczono także gęstość strumienia ciepła utajonego oraz jawnego z zastosowaniem temperatury powierzchni czynnej z danych satelitarnych Sentinel-3. Dane mikrofalowe Sentinel-1 posłużyły do szacowania wilgotności gleby i wilgotności roślin. Uzyskane wyniki porównano z danymi ze stacji kowariancji wirów zlokalizowanej w Basenie Środkowym.

Teledetekcja satelitarna stwarza duże możliwości w przypadku prowadzenia modelowania nisz środowiskowych różnych gatunków zwierząt przez ocenę zarówno czynników biotycznych, jak i abiotycznych. Ciekawym przykładem zastosowania teledetekcji w tym aspekcie był projekt realizowany przez Instytut Biologii Ssaków PAN (IBS PAN) w Białowieży, w którym badano wpływ tych czynników na przestrzenne rozmieszczenie dużych ssaków kopytnych Puszczy Białowieskiej (Bubnicki i in., 2019). W analizach wykorzystano zarówno zobrazowania satelitarne, jak i lotnicze skanowanie laserowe (ALS) oraz zdjęcia z fotopułapek. Na podstawie analiz tych materiałów opracowano modele rozmieszczenia gatunków dużych roślinożerców i ich nisz środowiskowych w Puszczy Białowieskiej.

W analizach uwzględniono również parametry opisujące jakość siedlisk, ryzyko drapieżnictwa (w oparciu o model użytkowania przestrzeni przez wilki) oraz czynniki związane z działalnością człowieka (m.in. odległość do zabudowy oraz współczynnik



Ryc. 6.70. Wynikowe mapy zmienności w przewidywanym użytkowaniu krajobrazu dla pięciu badanych gatunków zwierząt kopytnych (powierzchnie o względnej gęstości). Skala przedstawia oczekiwaną liczbę osobników korzystających z danej komórki siatki krajobrazu (piksel 25 ha) w okresie próbkowania (źródło: Bubnicki i in., 2019)

zagęszczenia dróg). W analizach wykorzystano między innymi obrazy satelitarne RapidEye (5 m GSD) do określenia procentowego udziału gatunków drzew iglastych i liściastych przy wykorzystaniu klasyfikatora Support Vector Machine (SVM). Opracowana przez IBS PAN metodyka może z powodzeniem być wykorzystana w praktyce w procesie zarządzania populacjami dziko żyjących zwierząt oraz przyczyniać się do minimalizowania ich konfliktów z gospodarką leśną (Bubnicki i in., 2019).

W podsumowaniu niniejszego rozdziału można sformułować następujące wnioski:

- obserwowanie wybranych parametrów środowiska naszej planety z przestrzeni kosmicznej daje obiektywny, aktualny, mierzalny i niezależny obraz procesów i zjawisk związanych w przemianami środowiska życia naszej cywilizacji;
- sensory umieszczone na platformach satelitarnych są w stanie zdalnie pozyskiwać informacje o temperaturze radiacyjnej oceanów, mórz, wód, lądów, wilgotności gleby, zanieczyszczeniach pyłowych (np. PM10) czy gazowych (np. stężenie NO₂, SO₂ czy O₃) atmosfery, skażeniach promieniotwórczych, kierunku i sile wiatru, wysokości fal, poziomie oceanów czy stężeń pyłków roślin, które zasilając modele matematyczne, mogą prowadzić do ważnych wniosków i przeciwdziałań dalszej degradacji środowiska publikowanych np. w ramach serwisu CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service);
- implementacja danych satelitarnych o jakości powietrza, wody i wybranych parametrach meteorologicznych jest strategiczna w zakresie ochrony zdrowia ludności i utrzymania jakości życia na odpowiednim poziomie. Dane te powinny być dystrybuowane licznymi kanałami komunikacji od instytucji do administracji publicznej i dalej do ludności w ramach np. serwisu C3S (Copernicus Climate Change Service);
- dane z obserwacji satelitarnych oraz komponentu naziemnego (np. meteorologiczne dane referencyjne) gromadzone w ogromnych repozytoriach bazodanowych otwierają naukowcom nowe możliwości ich szerokiego wykorzystania z użyciem zaawansowanych algorytmów oraz zasobów infrastruktury obliczeniowej (np. rozwiązania GRID) w celu modelowania złożonych zjawisk klimatycznych podlegających dynamicznym przemianom (np. wędrowki tornad, nawalnych wiatrów, tsunami);
- zarówno gospodarka światowa, bezpieczeństwo żywnościowe i zdrowotne mieszkańców poszczególnych krajów, jakość ich życia w zmieniającym się środowisku w dużym stopniu są już uzależnione od strumienia informacji płynącego nieustannie z sensorów teledetekcyjnych (obrazowych, meteorologicznych i innych pomiarowych);
- odpowiedzialne zarządzanie i monitorowanie dynamiki zmian zachodzących w środowisku naturalnym wymaga wspierania procesu podejmowania decyzji wiarygodnymi informacjami teledetekcyjnymi. W Polsce znane są liczne projekty wdrożeniowe wykorzystujące dane satelitarne do kartowania klas pokrycia terenu w miastach, w tym szczególnie roślinności w aglomeracjach miejskich, modeli cyrkulacji powietrza i zanieczyszczeń w aglomeracjach, modeli nasłonecznienia, kartowania rzadkich siedlisk chronionych w ramach ESE Natura 2000, badań w zakresie dynamiki populacji zwierząt i ich migracji, czy badań w zakresie zarządzania zasobami wodnymi pod kątem zmian klimatycznych;
- wykorzystanie serii wieloczasowych obrazów satelitarnych (np. Landsat) umożliwia analizowanie dynamiki przemian zachodzących w skali np. województwa

czy regionu na przestrzeni wielu dziesięcioleci i podejmowania odpowiednich strategii rozwoju czy zabezpieczenia odpowiedniego zrównoważonego funkcjonowania tych obszarów (np. weryfikacja zagrożenia erozyjnego gleb rolniczych; transformacje gospodarcze, przemiany użytkowania Ziemi, rekultywacje obszarów przemysłowych i in.);

- zarządzanie zasobami środowiska naturalnego w sposób odpowiedzialny i zrównoważony w perspektywie zmian klimatycznych wymaga natychmiastowego włączenia danych satelitarnych do procesów decyzyjnych w administracji publicznej z korzyścią dla wszystkich stron.

6.8. Zarządzanie kryzysowe

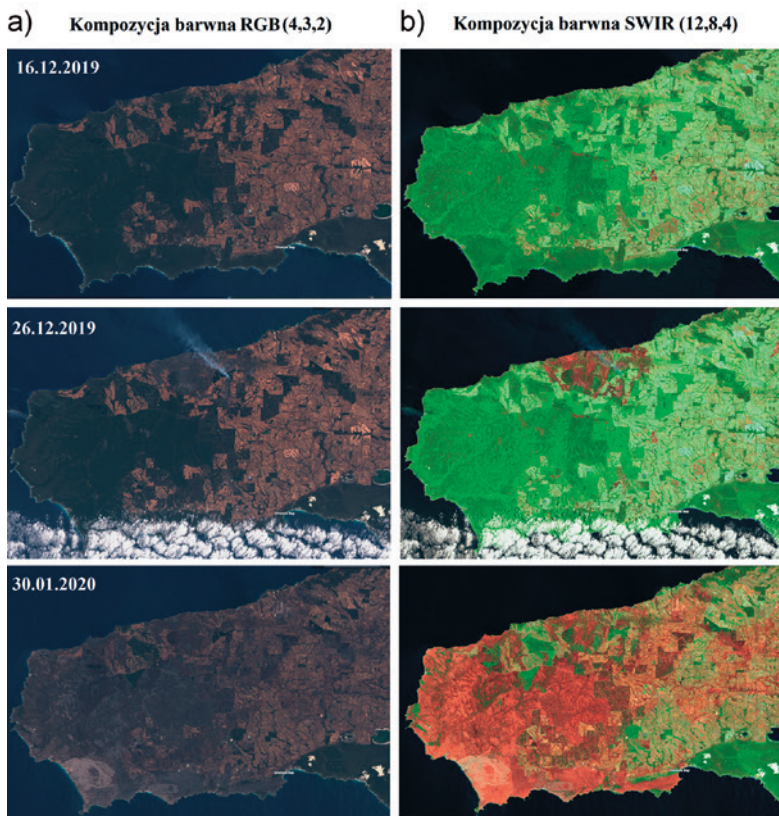
Joanna Jaskuła, Mariusz Sojka, Rafał Wróżyński

Zobrazowania satelitarne posiadają bardzo duży potencjał informacyjny i są szeroko stosowane w zarządzaniu kryzysowym. Dostępne źródła satelitarne umożliwiają przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym oraz opracowywanie dokładnych i aktualnych map dla każdego obszaru zainteresowania pod kątem zarządzania kryzysowego (m.in. występowania pożarów, huraganów, powodzi). Dostarczanie aktualnych i wiarygodnych informacji znajduje szerokie zastosowanie we wszystkich fazach zarządzania kryzysowego, zarówno w monitorowaniu zjawisk kryzysowych i planowaniu działań ratunkowych, jak i szacowaniu ich negatywnych skutków. Zastosowanie technik teledetekcyjnych ma również bardzo istotne znaczenie dla opracowywania planów bezpieczeństwa obszaru, umożliwiając w sposób wiarygodny przeprowadzenie oceny ryzyka wystąpienia określonego zjawiska, nawet dla terenów trudno dostępnych oraz dużych powierzchni. W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane przykłady zastosowań zobrazowań satelitarnych w zarządzaniu kryzysowym wynikającym z wystąpienia naturalnych zjawisk – pożarów, huraganów oraz powodzi. Dodatkowo czytelnikowi przybliżono również zastosowanie danych teledetekcyjnych w przypadku zarządzania kryzysowego związanego z ochroną granic Unii Europejskiej – serwis bezpieczeństwo granic.

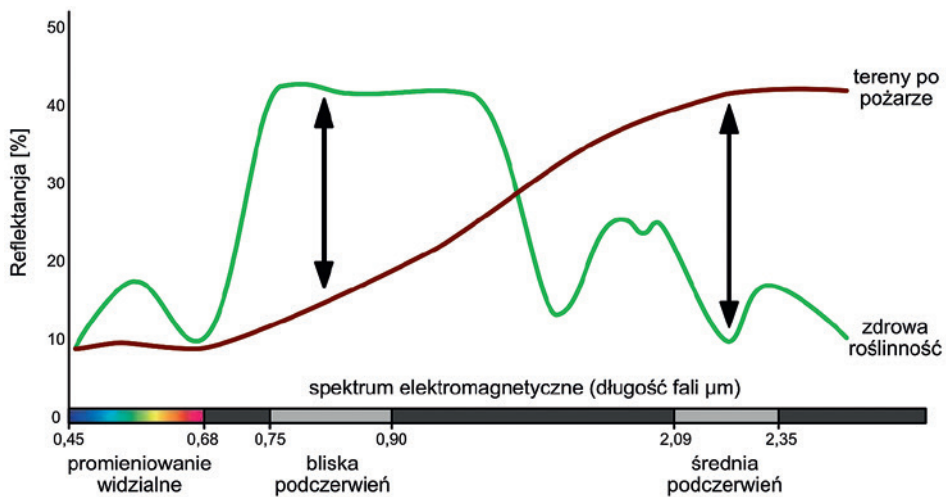
6.8.1. Analiza skutków pożaru lasów

Przykładem pożarów o zasięgu ponadlokalnym mogą być zjawiska kłęskowe, jakie miały miejsce w Australii na przełomie 2019/2020 roku. Jednym ze szczególnie dotkniętych tym żywiołem obszarów była Wyspa Kangura zlokalizowana na południu Australii, gdzie według szacunków pożar pochłonął ok. 155 tys. ha lasów (1/3 powierzchni wyspy). Zasięg przestrzenny pożaru lasu i buszu dobrze obrazują kompozycje obrazów satelitarnych Sentinel-2 z wykorzystaniem kanałów RGB i SWIR (ryc. 6.71).

W celu określenia przestrzennego zasięgu obszaru objętego pożarem oraz przeanalizowania skutków pożaru wykorzystuje się różnice pomiędzy krzywymi spektralnymi opracowanymi dla obszarów leśnych oraz obszarów dotkniętych pożarem (ryc. 6.72). Najwyższe różnice pomiędzy krzywymi spektralnymi występują w zakresach bliskiej (NIR) i średniej (SWIR) podczerwieni (Lopez Garcia i Caselles, 1999). Roślinność o dobrej kondycji charakteryzuje się wysokimi wartościami odbicia w zakresie NIR i niskimi



Ryc. 6.71. Kolejne fazy pożaru lasów (kolor czerwony) na Wyspie Kangura (Australia) zarejestrowane przez satelitę Sentinel-2: a) kompozycja w barwach rzeczywistych (RGB), b) kompozycja z wykorzystaniem kanału SWIR (źródło: opracowanie własne)



Ryc. 6.72. Krzywe spektralne dla terenów przed i po pożarze (źródło: Wróżyński, na podstawie US Forest Service, 2020)

wartościami odbicia w zakresie SWIR. Natomiast na obszarze objętym pożarem występuje odwrotna sytuacja, niskie wartości odbicia w NIR i wysokie wartości odbicia w SWIR.

Biorąc pod uwagę powyższe różnice, opracowany został znormalizowany wskaźnik pożarów (ang. *Normalized Burn Ratio*, NBR), który jest wykorzystywany do określenia zasięgu przestrzennego i skutków pożaru:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (6.4)$$

Analiza skutków pożaru przeprowadzana jest na podstawie skali opracowanej przez Amerykańską Służbę Geologiczną (USGS). W celu dokonania oceny skutków pożarów obliczany jest wskaźnik dNBR będący różnicą wartości wskaźnika NBR dla okresów przed i po wystąpieniu pożaru (Berndt i in., 2019). Obliczone wartości wskaźnika dNBR pozwalają na określenie skutków pożaru w następującej skali: małe (0,1–0,269), umiarkowane (0,27–0,439), średnie (0,44–0,659) i duże (0,66–1,3).

$$R = NBR_{\text{przed pożarem}} - NBR_{\text{po pożarze}} \quad (6.5)$$

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat, w badaniach dotyczących analizy skutków pożaru wykorzystywano dane optyczne i radarowe (Chuvieco i in., 2019). Do tej pory do detekcji zasięgu i skutków pożarów stosowano satelitę Envisat (ESA), JPSS (NOAA), Landsat 1-8 (NASA/ USGS), PROBA V (ESA), Sentinel-1,-2,-3 (ESA), SPOT (CNES) oraz MODIS (NASA).

Przeprowadzone badania wykazały, że zobrazowania satelitarne umożliwiają wychwycenie zarówno pojedynczych, jak i grupowych pożarów. W przypadku zastosowania zobrazowań satelitarnych o mniejszej rozdzielczości, kilka ognisk małych pożarów występujących obok siebie może zostać zinterpretowane jako jeden duży pożar. Znaczna niepewność szacowania skutków małych pożarów wynika zatem ze stosowania zobrazowań o niewystarczającej rozdzielczości przestrzennej, tj. średniorozdzielczych lub niskorozdzielczych.

Jednym z najnowszych rozwiązań stosowanych do analizy pożarów jest wykorzystanie metody automatycznego kartowania powierzchni i skutków pożarów (Lasaponara i in., 2018) bazującej na danych uwzględniających:

- obrazy satelitarne Sentinel-2, na podstawie których obliczono wartość dNBR;
- wyniki analizy opartej o lokalny indeks do analiz statystycznych (ang. *Local Index for Statistical Analyses*, LISA), w tym m.in. zastosowanie statystyki Morana, która pozwala na identyfikację stopnia pożaru powiązanego z typami pokrycia roślinności oraz na przeprowadzenie automatycznej klasyfikacji nasilenia pożaru przy uwzględnieniu analizy statystycznej rozkładu przestrzennego dNBR;
- wyniki klasyfikacji nienadzorowanej.

Zastosowanie analizy statystycznej i klasyfikacji nienadzorowanej umożliwia wiarygodną ocenę skutków występowania pożarów, uwzględnia się zarówno położenie regionów geograficznych, jak i występujące różnice w strukturze lasów. Dzięki zastosowaniu metody zaproponowanej przez Lasaponara i in. (2018) opracowano automatyczne podejście, które umożliwia dokonanie oceny skutków pożarów, niezależnie od regionów geograficznych czy istniejących ekosystemów. Dodatkowo zastosowanie tego rozwiązania pozwoliło na opracowanie automatycznej metody, która wymaga jedynie

dostępności do zobrazowań satelitarnych Sentinel-2, bez potrzeby posiadania mapy pokrycia terenu, która często nie jest dostępna w tej samej rozdzielczości przestrzennej, co dane satelitarne. Dotychczasowe badania wykazały również, że wykorzystanie w modelu danych Sentinel-2 pozwoliło w sposób wiarygodny opracować mapy pożarów wykorzystywane do oceny ich skutków oraz do podjęcia działań wspomagających zarządzanie obszarem dotkniętym pożarem.

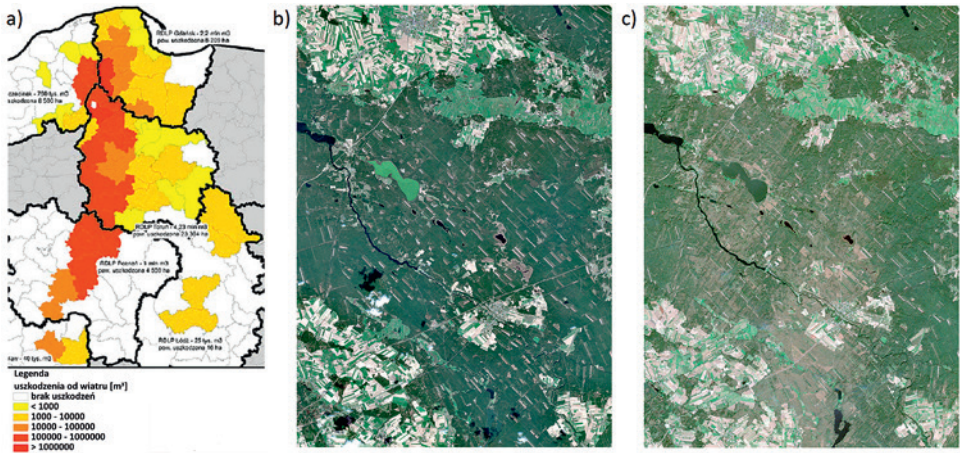
Poza systemami monitorowania globalnego i regionalnego, bardzo istotne znaczenie ma detekcja pożarów i ich skutków na poziomie lokalnym. Jednym z przykładów takiego zastosowania zobrazowań satelitarnych jest pożar w Biebrzańskim Parku Narodowym z kwietnia 2020 roku. Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK-PAN) wykorzystało dane z satelitów Landsat 7 i Landsat 8 oraz europejskiego satelity Sentinel-3 do bieżącego monitorowania zasięgu i skutków pożaru. Wykorzystane zobrazowania umożliwiły dokonanie oceny rozprzestrzeniania się pożaru i m.in. wykazały, że 20 kwietnia 2020 roku obszar pożaru wynosił 528 ha, w ciągu kolejnej doby powierzchnia objęta pożarem powiększyła się niemal trzykrotnie (1486 ha), a 22 kwietnia 2020 roku obszar pożaru obejmował już powierzchnię 4175 ha. Zobrazowania satelitarne Landsat umożliwiły wskazanie zarówno położenia, jak i rozmiaru czoła pożaru. Na obrazach z 21 kwietnia 2020 roku czoło pożaru składa się z kilku odcinków, z których 2 największe miały długość mieszczącą się w przedziale od 1 do 2 km. Dzięki dużej rozdzielczości czasowej analizowanej serii obrazów satelitarnych ustalono kierunek przemieszczania się linii ognia. Miało to niezwykle istotne znaczenie z punktu widzenia zaplanowania działań służących ograniczeniu rozprzestrzeniania się ognia oraz zapewnieniu bezpieczeństwa zagrożonym obszarom.

6.8.2. Analiza skutków huraganu

Występujące na całym świecie huragany są najczęstszą przyczyną zniszczeń obszarów leśnych. Obszary zniszczone przez huragany są w sposób szczególny podatne na występowanie pożarów. Zwiększona częstotliwość występowania huraganów w ostatnich latach wymaga podjęcia działań umożliwiających dokonanie oceny szkód leśnych w ujęciu lokalnym, regionalnym oraz globalnym. Ma to istotne znaczenie dla wyboru odpowiedniego sposobu gospodarowania prowadzonego na obszarze dotkniętym huraganem, w tym zagospodarowania materiału drzewnego oraz planowania działań służących odbudowie lasu.

Wielkość strat poniesionych na skutek przejścia huraganów jest określana na podstawie danych zebranych przez nadleśnictwa, m.in. określa się powierzchnię obszaru objętego zniszczeniami i masę drewna. Według danych Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe, tylko w wyniku huraganu stulecia w Polsce w sierpniu 2017 roku całkowita strata masy drewna z uszkodzonych terenów była równa 8,6 mln m³, a łączna powierzchnia szkód wyniosła ponad 100 tys. ha, z czego blisko 30 tys. ha określono jako obszar do całkowitego odnowienia (ryc. 6.73).

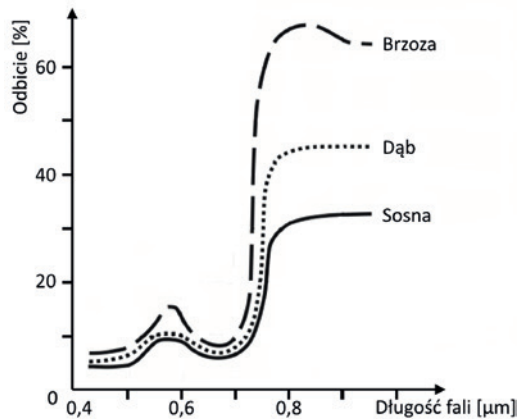
Analiza powierzchni dotkniętej huraganem jest często prowadzona z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych niskiego, średniego i wysokiego pułapu. Dzięki dostępności do danych satelitarnych o coraz lepszej rozdzielczości przestrzennej i czasowej, ocena skutków przejścia huraganów może być przeprowadzana w dokładniejszy i szybszy sposób w porównaniu do pomiarów tradycyjnych. Zaletą zobrazowań satelitarnych – w porównaniu do danych pozyskiwanych z niższego pułapu – jest możliwość rejestrowania



Ryc. 6.73. Powstałe szkody na terenie Polski (a) wraz z przykładowym obszarem przed (b) i po (c) huraganie w sierpniu 2017 roku (źródło: BDL, 2020 i opracowanie własne na podstawie zobrazowań satelitarnych Sentinel-2)

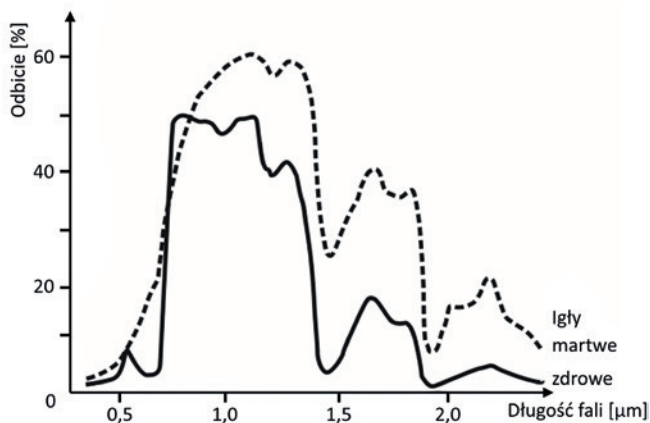
jednorazowo większej powierzchni oraz możliwość wielokrotnego przeprowadzenia pomiarów w okresie od kilku do kilkunastu dni (rozdzielczość czasowa). Dodatkową zaletą może być również nieodpłatność zobrazowań. Ocena jakościowa i ilościowa prowadzona jest z wykorzystaniem sensorów radiometrycznych. Niezależnie od licznych zalet, przydatność optycznych zobrazowań satelitarnych ogranicza zachmurzenie.

Analiza danych satelitarnych dla obszarów leśnych opiera się na założeniu, że poszczególne gatunki roślin odbijają promieniowanie elektromagnetyczne w charakterystyczny i niepowtarzalny sposób (ryc. 6.74).



Ryc. 6.74. Krzywe spektralne gatunków drzew leśnych (źródło: Zawila-Niedźwiecki, 2013, za: Guyot, 1985)

W przypadku zjawisk ekstremalnych (np. susza, huragan) zakłada się również, że ich wpływ na zmianę kondycji rośliny odzwierciedla modyfikacja odbicia spektralnego (ryc. 6.75).



Ryc. 6.75. Krzywe spektralne sosen zdrowych i martwych (źródło: Zawila-Niedźwiecki, 2013, oryginał: Guyot, 1985)

Ilość dostępnych danych satelitarnych wymaga zautomatyzowania procesu ich analizy. Do tej pory nie opracowano dla lasów jednolitego algorytmu przetwarzania zobrazowań satelitarnych umożliwiającego dokonanie szybkiej oceny kondycji lasu pod względem utraty masy i objętości, a także zmian w jego strukturze (Wang i in., 2010). W większości badań wykorzystywano dane satelitarne, na podstawie których obliczono zmianę lub znormalizowaną zmianę wybranych wskaźników roślinności i wartość tę przyjmowano jako wskaźnik szkód. Dodatkowo w poprzednich badaniach nie przeprowadzono analizy dokładności oceny zniszczeń lasów w zależności od wybranego wskaźnika roślinności. W literaturze naukowej opisywane są metodyki wyznaczania uszkodzonych obszarów na podstawie danych satelitarnych, które można podzielić na dwie główne kategorie, a mianowicie uwzględniające zmiany zawartości chlorofilu oraz oparte na obserwacji zmian zawartości wody w roślinach. Podejścia te są stosunkowo proste do wdrożenia i interpretacji, nawet w przypadku badań na dużą skalę.

Do najczęściej stosowanych wskaźników roślinności stosowanych w ocenie wpływu huraganu na obszary leśne należą Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI) oraz Normalized Difference InfraRed Index (NDII). Najczęściej stosowanym wskaźnikiem do oceny kondycji roślinności jest NDVI. W celu analizy wpływu huraganu na obszary leśne, wskaźnik NDVI oblicza się dla zobrazowań satelitarnych z okresu przed i po wystąpieniu zjawiska. Ocenę skutków huraganu przeprowadza się na podstawie dNDVI, będącego różnicą wartości wskaźnika NDVI przed i po wystąpieniu huraganu.

W badaniach skutków huraganów na obszarach leśnych wykorzystywano do tej pory dane teledetekcyjne z kilkunastu satelitów. Empiryczny model zbudowany na podstawie danych NOAA AVHRR i Landsat TM zastosowano do określenia zależności między typem lasu a czasem trwania oraz prędkością huraganu, aby opisać szkody wyrządzone przez huragan w zależności od typu lasów (Ramsey i in., 2001). Dane o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (2,4 m) z satelity QuickBird zastosowano do oszacowania strat, jakie wystąpiły w koronach drzew w wyniku przejścia cyklonu Monica w północnej części Australii (Staben i Evans, 2008). Z kolei dane satelitarne MODIS i Landsat wykorzystano do badania zaobserwowanych wzorców występujących szkód związanych

z występowaniem cyklonów tropikalnych (Negrón-Juárez i in., 2014). Zastosowanie metody klasyfikacji obrazów do wykrywania zmian po wielokrotnych uderzeniach cyklonu tropikalnego w Bangladeszu przeanalizowano przy użyciu danych SPOT-5 (Hoque i in., 2016). Zobrazowania satelitarne Landsat 8 i Sentinel-2 wykorzystano do oceny zmienności przestrzennej zniszczeń dokonanych pod wpływem huraganu Maria na lasy Puerto Rico oraz wskazania czynników wpływających na ich zmienność (np. typy pokrycia terenu, wysokość terenu) (Hu i Smith, 2018). W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano również, że na obszarze o prawie całkowicie zniszczonym drzewostanie występuje homogeniczna tekstura, a jego charakterystyka odbicia spektralnego zmienia się z charakterystycznej dla roślinności (przed huraganem) na zbliżoną do pokrywy glebowej (po huraganie). Większość badań dotyczących monitorowania zjawisk ekstremalnych wykorzystuje dane z możliwie jak najkrótszego okresu przed i po wystąpieniu huraganu. Skutki huraganu są zauważalne w krótkim czasie, niemniej jednak analiza długoterminowego wpływu huraganu (lub odporności na niego) ma istotne znaczenie dla lepszego zrozumienia zaburzeń ekosystemowych.

Zalecanym sposobem klasyfikowania zobrazowań satelitarnych jest połączenie klasyfikacji cyfrowej z analizą wizualną. Interpretacja wizualna jest bardziej dokładna, natomiast klasyfikacja cyfrowa szybsza. Połączenie obu metod nazywane jest klasyfikacją hybrydową, gdzie obszary jednorodnie spektralnie (o dowolnej powierzchni) są wyznaczane w sposób automatyczny, a obszary niejednorodne (np. drzewostany wielopiętrowe) klasyfikuje się jedynie na podstawie interpretacji wizualnej. Dzięki zastosowaniu klasyfikacji hybrydowej uzyskany wynik analiz jest bardziej wiarygodny i mniejsza ryzyko przenikania się wydzielanych klas. Niezależnie od zastosowanej metodyki przetwarzania, w wypadku każdej analizy zobrazowań satelitarnych konieczna jest weryfikacja wyników na podstawie pomiarów terenowych.

6.8.3. Serwis bezpieczeństwo granic (EUROSUR Frontex)

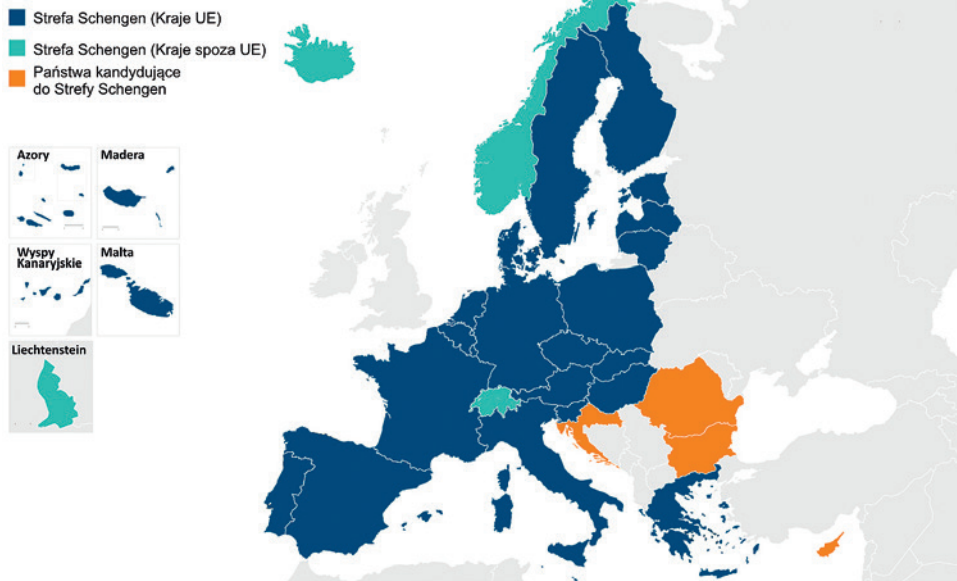
W związku z kryzysem migracyjnym na świecie w ostatnich latach, ochrona granic i kontrola napływu imigrantów stała się jednym z priorytetów Unii Europejskiej (UE). Warunki określone w Traktacie Lizbońskim (art. 77, V Traktat) wskazują na konieczność rozwijania możliwości swobodnego przemieszczania się wewnątrz granic UE z jednoczesnym zapewnieniem skutecznej ochrony i nadzoru przy przekraczaniu granic zewnętrznych. Polityka bezpieczeństwa prowadzona na terenie UE skupia się w szczególności na granicach strefy Schengen (Balawajder, 2018) (ryc. 6.76).

Celem utworzonej w 2004 roku Europejskiej Agencji Straży Granicznej i Przybrzeżnej (Frontex) jest zapewnienie współpracy państw członkowskich UE oraz stowarzyszonych w strefie Schengen w celu ochrony granic Unii, obejmujące m.in.: rozlokowanie jednostek organów ścigania w terenie, przeprowadzanie analiz ryzyka i oceny narażenia na napływ nielegalnych imigrantów i produktów, operacje powrotne (odsyłanie imigrantów), wymianę informacji wywiadowczych o działalności przestępczej, prowadzenie badań i szkoleń, poszukiwanie i ratowanie osób na granicach morskich oraz bieżące monitorowanie sytuacji wraz z działaniami szybkiego reagowania (ryc. 6.77b).

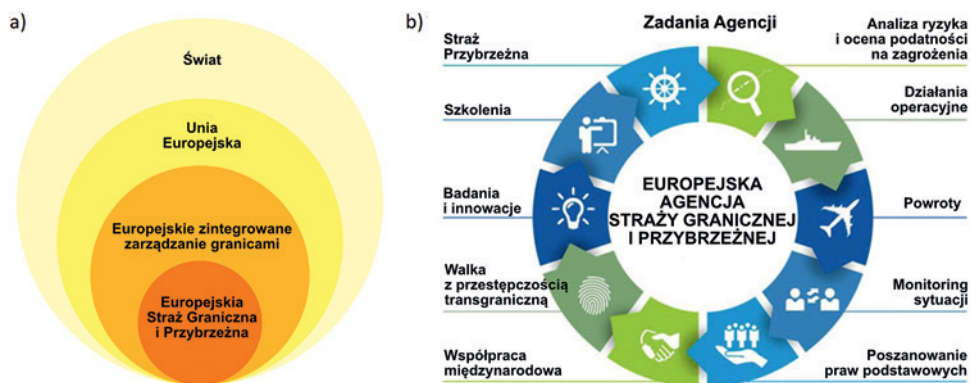
Działanie Agencji Frontex jest finansowane z budżetu Unii Europejskiej oraz państw stowarzyszonych w ramach strefy Schengen. Jednym z najistotniejszych osiągnięć Frontexu, jest funkcjonowanie Europejskiego Systemu Nadzoru Granicznego (European Border Surveillance System, EUROSUR), łączącego krajowe systemy nadzoru państw

członkowskich (ryc. 6.77a). System EUROSUR rozpoczął funkcjonowanie w 2013 roku na podstawie Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady z 22 października 2013 roku (Dz. U. UE L. 2013.295.11).

Strefa Schengen



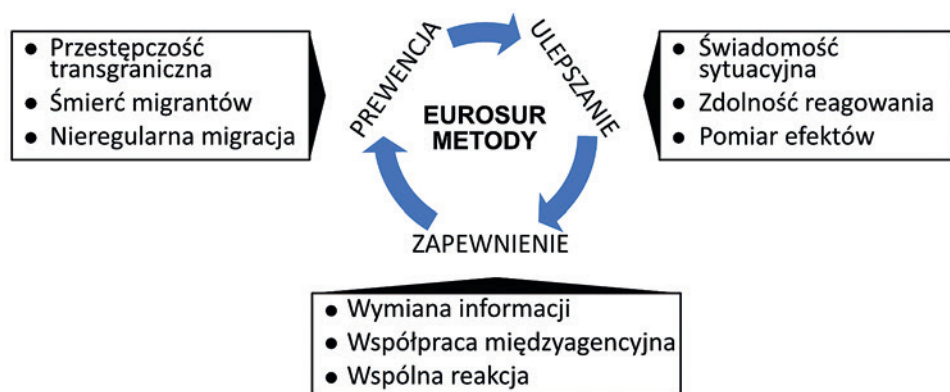
Ryc. 6.76. Państwa należące do strefy Schengen (źródło: EU, 2020)



Ryc. 6.77. Struktura (a) oraz podstawowe zadania (b) Europejskiej Agencji Straży Granicznej i Przybrzeżnej (źródło: Frontex, 2020)

Europejski System Nadzoru Granicznego ma na celu poprawę świadomości sytuacyjnej oraz zwiększenie zdolności reagowania na zdarzenia występujące na granicach lądowych i morskich. Ponadto celem nadrzędnym jest ochrona bezpieczeństwa i życia napływających migrantów. Do podstawowych zadań EUROSURu należy monitorowa-

nie, śledzenie, identyfikowanie i przechwytywanie osób nielegalnie napływających do UE oraz podejmowanie działań zapobiegających temu zjawisku (ryc. 6.78).



Ryc. 6.78. Metody EUROSUR (źródło: Frontex, 2020)

Zgodnie z rozporządzeniem sankcjonującym funkcjonowanie Europejskiego Systemu Nadzoru Granicznego, każde państwo członkowskie było zobowiązane do utworzenia krajowego centrum koordynacyjnego (ang. *National Coordination Centre, NCC*), działania i pozyskiwania informacji od wszystkich organów odpowiedzialnych za ochronę granic zewnętrznych. Każde państwo członkowskie na podstawie prowadzonego monitoringu utrzymuje obraz sytuacyjny (składający się z warstwy zdarzeniowej, operacyjnej i sytuacyjnej) oraz następnie przekazuje go organom nadrzędnym. Agencja Frontex pozyskuje informacje ze wszystkich krajów i na ich podstawie tworzy europejski obraz sytuacji, który zawiera informacje o sytuacji na granicach europejskich i obszarze przygranicznym.

Funkcjonowanie EUROSUR umożliwia państwom członkowskim szybką wymianę informacji w celu zorganizowania niezbędnej współpracy i wspólne reagowanie na bieżące wydarzenia. Do podstawowych narzędzi wykorzystywanych do monitorowania i identyfikowania zagrożenia na granicach lądowych i morskich należą zobrazowania satelitarne. Agencja Frontex w ramach działalności EURUSURU finansuje funkcjonowanie systemów informatycznych ułatwiających wymianę informacji i nawiązywanie współpracy z innymi organami, m.in. Centrum Satelitarnym Unii Europejskiej, aby optymalnie wykorzystać zasoby i systemy informacyjne całej UE. Dodatkowo, w 2017 roku Agencja Frontex wprowadziła dodatkowe narzędzia kontroli w postaci systemu nadzoru granic typu EFS (Eurosur Fusion) uwzględniającego wielofunkcyjny nadzór lotniczy, który dostarcza danych w czasie rzeczywistym. Gromadzenie aktualnych danych umożliwia prowadzenie analiz oraz podjęcie natychmiastowych działań w zakresie lokalizacji, przechwytywania i ratownictwa. Wprowadzenie nowych usług, obejmujących m.in. analizę obrazów satelitarnych i kontrolę w terenie, przyczyniło się do znacznego wzrostu wykorzystania danych z rozpoznania obrazowego przez analityków Agencji Frontex i państw członkowskich. Zgodnie z rocznym sprawozdaniem z działalności za 2017 roku, funkcjonowanie systemu EFS i aplikacji sprawozdawczej (ang. *Joint Operation Reporting Application*), przyczyniło się do wykrycia 42 890 incydentów. W ramach funkcjonowania EUROSUR tylko w 2017 roku pozyskano 809 optycznych obrazów satelitarnych (wzrost o 125% w porównaniu z 2016 rokiem) oraz 1230 obrazów z satelitarnego systemu wykrywania statków (wzrost o 96% w porównaniu z 2016 rokiem). Dodatkowo zanotowa-

no 123 zgłoszenia dotyczące 60 śledzonych statków (wzrost rzędu 86% w porównaniu z 2016 rokiem), a także 341 uruchomionych procesów wykrywania anomalii w ruchu statków. W ramach usług Frontex, do realizowania programów związanych z bezpieczeństwem granic wykorzystywane są zarówno dane radarowe, jak i optyczne z satelitów Sentinel. Niezwykle istotnym źródłem danych są zobrazowania radarowe z satelity Sentinel-1, które umożliwiają analizę i monitoring obszarów w sposób ciągły, pozyskują informacje w dzień i w nocy, w każdych warunkach pogodowych. Niezależność od warunków pogodowych sprawia, że zobrazowania Sentinel-1 są jednym z głównych źródeł danych dla usług nadzoru obszarów morskich, podczas gdy dane pozyskane z satelity Sentinel-2 wykorzystywane są często do tworzenia i aktualizowania map referencyjnych, służących do wyznaczania m.in. potencjalnych dróg nielegalnego przekraczania granic lądowych UE.

Frontex wykorzystuje dane satelitarne pozyskiwane w ramach programu Copernicus m.in. do monitorowania i nadzoru granic zewnętrznych UE, wykrywania nielegalnej migracji, zwalczania przestępczości transgranicznej i terroryzmu. Zobrazowania satelitarne są wykorzystywane w monitorowaniu granic, stanowią pierwszy etap weryfikacji zdarzeń występujących na obszarach zagrożonych. W przypadku detekcji potencjalnego zagrożenia, informacje uzyskane na podstawie danych satelitarnych są walidowane na podstawie danych lotniczych (ryc. 6.79).



Ryc. 6.79. Nielegalne łodzie imigrantów wykryte na podstawie zobrazowań satelitarnych i zwalidowane przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych (źródło: Institute for Environmental Solutions, Łotwa)

Jak wynika ze Sprawozdania Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie Ewaluacji Europejskiego Systemu Nadzorowania Granic z dnia 12 września 2018 roku, wykorzystanie danych teledetekcyjnych w ramach EUROSUR (Frontex, 2018b) przyczyniło się m.in. do:

- zwalczania przestępczości transgranicznej (w listopadzie 2014 roku grecka straż przybrzeżna na podstawie uzyskanych danych wywiadowczych wykryła prom samochodowy przewożący nielegalne towary o wartości ponad 30 mln euro; we wrześniu 2015 roku, na podstawie obserwacji i śledzenia nietypowego zachowania na morzu zatrzymano statek, na którym wykryto około 5000 sztuk broni i 500 000 nabojów przemycanych do Libii; w lipcu 2017 roku na podstawie monitoringu teledetekcyjnego przechwycono największą w historii hiszpańskich organów celnych liczbę przemycanych papierosów);
- ratowania życia migrantów (we wrześniu 2016 roku dzięki wykorzystaniu nawigacji satelitarnej i obrazu satelitarnego obszaru wskazanego przez służby udało się odnaleźć zaginioną łódź i w ramach akcji poszukiwawczo-ratowniczej uratować 35 migrantów, w tym kobiety i dzieci; w czerwcu 2017 roku dane satelitarne

przyczyniły się do namierzenia niewielkich łodzi (5–7 m) i po potwierdzeniu pozycji statków uratowana 73 migrantów; w październiku 2017 roku dzięki analizie danych teledetekcyjnych w ramach akcji poszukiwawczo-ratowniczych uratowano łącznie 716 migrantów, natomiast w listopadzie 2017 roku 314 osób);

- poprawy zdolności reagowania państw członkowskich (dzięki informacjom uzyskanym od krajowych ośrodków koordynacji, na terenie Szwajcarii w międzynarodowych pociągach towarowych wykryto migrantów zagrożonych wystąpieniem hipotermii i ciężkich obrażeń).

Według dokumentu programowego na lata 2019–2021 najbliższe wyzwania stawiane Agencji Frontex, w tym systemowi EUROSUR, związane są z m.in. rozwijaniem wykorzystania obrazowań satelitarnych do przeprowadzenia analiz ryzyka i oceny narażenia (Frontex, 2018a).

6.8.4. Ochrona przeciwpowodziowa

W wyniku zachodzących zmian klimatycznych katastrofy naturalne są coraz powszechniejszym zjawiskiem na całym świecie. Istnieje wiele rodzajów zjawisk ekstremalnych, z których powodzie są najbardziej niszczycielskie i powszechne, powodując liczne straty ludzkie oraz szkody ekonomiczno-gospodarcze. Podobnie jak w przypadku innych zjawisk ekstremalnych, trudno jest im zapobiec, możliwe jest jednak podjęcie działań w celu zminimalizowania ich skutków dzięki odpowiedniemu zarządzaniu w ochronie przeciwpowodziowej (analizie ryzyka, zasięgu i skutków powodzi). Z powodu dużego zasięgu przestrzennego i zmienności czasowej, skuteczna i dokładna analiza ryzyka, zasięgu i skutków powodzi wymaga dostępu do dokładnych i aktualnych informacji (Faisal i Khan, 2017). Tradycyjne zarządzanie w ochronie przeciwpowodziowej uwzględnia dane pochodzące ze stacji pomiarowych, jednak należy zwrócić uwagę, że pomiary terenowe są czasochłonne i wymagają dużych nakładów finansowych. Zobrazowania satelitarne są wykorzystywane w analizie ryzyka, zasięgu i skutków powodzi od 1970 roku dzięki dostępności danych z satelity Landsat. Głównymi zaletami obrazowań satelitarnych jest możliwość pozyskania aktualnych danych przestrzennych w krótkich odstępach czasu z dużego obszaru dzięki sensorom satelitarnym rejestrującym obraz w wielu zakresach spektralnych i na kilku platformach. Dodatkowo, powtarzalność rejestracji obszarów przez sensory satelitarne umożliwia monitorowanie zmian oraz analizę zasięgu historycznych powodzi.

Zarządzanie w ochronie przeciwpowodziowej obejmuje wiele modułów, takich jak ocena ryzyka powodziowego, system wczesnego ostrzegania, ocena szkód, a także planowanie ograniczania ryzyka. Zobrazowania satelitarne są wykorzystywane w każdym z elementów ochrony, m.in. do precyzyjnego monitorowania powodzi w czasie zbliżonym do rzeczywistego, do skrócenia czasu uzyskania informacji o zagrożeniu w systemie wczesnego ostrzegania przed powodzią oraz do dostarczania dokładnych i zaawansowanych danych wejściowych do modeli hydrologicznych (Skakun i in., 2014).

Ryzyko powodziowe

Przeprowadzenie oceny ryzyka powodziowego jest pierwszym krokiem ochrony. Ocena ryzyka powodziowego obejmuje działania mające na celu oszacowanie wielkości i intensywności opadów deszczu, kartowanie i monitorowanie zasięgu powodzi oraz określenie podatności terenu na zagrożenie. Wprowadzenie tych parametrów ma

znaczenie dla opracowania wiarygodnych modeli hydraulicznych, w których dane satelitarne odgrywają ważną rolę jako parametry wejściowe.

Najważniejszym etapem prognozowania powodzi jest określenie intensywności i wielkości opadów. Oszacowania tych parametrów na podstawie danych satelitarnych w zakresie widzialnym i podczerwieni dokonano już w 1978 roku przy zastosowaniu Geostacjonarnego Operacyjnego Satelity Środowiskowego (GEOS-1) i Applications Technology Satellite 3 (ATS-3) (Griffith i in., 1978). W tych badaniach podjęto próbę identyfikowania chmur deszczowych na podstawie jasności odbicia i temperatury chmury, a także korelacji tych cech z opadami deszczu. Do określenia wzorca i intensywności opadów deszczu wykorzystano również dane z satelity NOAA z wykorzystaniem:

- zakresów widzialnych do oszacowania grubości chmury,
- zakresu średniej podczerwieni (ang. *Mid InfraRed*, MIR) do identyfikowania cząsteczek i kształtu kropli deszczu,
- zakresu TIR do pomiaru temperatury chmur (Lensky i Rosenfeld, 1997).

Uruchomienie misji Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), a następnie zastąpienie jej wspólną misją JAXA i NASA – Global Precipitation Measurement (GPM), miało istotne znaczenie dla szacowania wielkości opadu (Rahman i Di, 2017). W porównaniu do wcześniejszej misji, GPM dostarcza dokładniejszych danych w ujęciu czasowym i przestrzennym. Ponadto GPM zapewnia także większy zasięg globalny od 65°N do 65°S w porównaniu do zasięgu TRMM (od 50°N do 50°S) (Rahman i Di, 2017).

Monitorowanie zasięgu powodzi

Kartowanie i monitorowanie zasięgu powodzi prowadzono zarówno na podstawie danych optycznych, jak i radarowych pozyskiwanych z pułapu satelitarnego. Ze względu na fakt, że w rozdziale 6.5.2 omówiono już wykorzystanie danych radarowych w monitorowaniu wód powierzchniowych, w niniejszej części skupiono się przede wszystkim na danych optycznych. Do sezonowego i długoterminowego monitorowania powodzi wykorzystywano m.in. zobrazenia Landsat w zakresie NIR. Istotną wadą tego rozwiązania jest to, że w zakresie NIR obszary wodne i te o utwardzonej powierzchni wykazują podobne wartości odbicia, co jest spowodowane odbijaniem bardzo niskiej energii w tym zakresie widma elektromagnetycznego. Ze względu na to podobieństwo, zakres NIR nie może być optymalnie stosowany na obszarach zurbanizowanych i do analizy powodzi miejskich (Rahman i Di, 2017). Przeprowadzone analizy wykazały, że skutecznym rozwiązaniem tego problemu jest uwzględnienie zarówno zakresu NIR, jak i MIR. Wykazano, że współczynnik odbicia od utwardzonych powierzchni różni się od odbicia wody w paśmie MIR i założono, że jeśli łączna wartość dwóch zakresów jest niska, należy zaklasyfikować ten obszar jako wodę, w przeciwnym razie jako powierzchnię utwardzoną (Wang i in., 2002). Kartowanie powierzchni powodzi na podstawie zobrażeń Landsat cechowało się 5% błędem (Rango i Salomonson, 1974). Do analizy zasięgu powodzi wykorzystywano również zobrazenia satelitarne SPOT. Wykazano, że dane satelitarne SPOT dostarczane co 2,5 dnia znajdują zastosowanie do monitorowania powodzi występujących na małych obszarach. Podobnie jak w przypadku satelitów Landsat, obszar pokryty wodą jest wyznaczany na podstawie wartości odbicia w zakresach NIR i MIR. Wykazano, że minimalna wykrywalna powierzchnia terenu objęta powodzią w przypadku satelity SPOT jest równa 0,6 ha (Chidley i Drayton, 1986). Kolejnym źródłem zobrażeń satelitarnych przydatnych do obserwowania zasięgu terytorialnego powodzi jest program Indian Remote Sensing (IRS), który dostarcza danych wielospek-

tralnych o średniej rozdzielczości przestrzennej (23–70 m). Obecne w ramach programu IRS satelity IRS-1B, IRS-1C, IRS-P3 i IRS-1D dostarczają bieżących informacji w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Poza tym do monitorowania powodzi wykorzystywane są również zobrazowania satelitarne ASTER o rozdzielczości przestrzennej w przedziale 15–90 m. W ostatnich latach coraz popularniejszym źródłem danych optycznych są zobrazowania satelitarne Sentinel-2 o rozdzielczości przestrzennej 10–60 m i czasowej 3–5 dni. Ze względu na dużą dynamikę powodzi do monitorowania zmian stosowane są satelity o rozdzielczości czasowej od kilku do kilkudziesięciu godzin (Tangdamrongsub i in., 2016), np. AVHRR (Terra i Aqua) oraz MODIS. Dostęp do danych o wysokiej rozdzielczości czasowej ma szczególnie istotne znaczenie podczas powodzi błyskawicznych, których czas trwania wynosi kilka godzin. W przypadku danych satelitarnych o niskiej rozdzielczości czasowej kartowanie zasięgu powodzi może wykazywać jedynie 20% zgodności z zasięgiem rzeczywistym, co wynika z opóźnienia czasowego rejestracji powodzi (Brivio i in., 2002). Ze względu na niską rozdzielczość przestrzenną, zobrazowania satelitarne AVHRR i MODIS powinny być stosowane jedynie dla kartowania powodzi o dużym zasięgu.

Na podstawie wartości odbicia w różnych zakresach optycznych do detekcji obszaru powodzi bardzo często oblicza się wskaźniki wodne. Najczęściej stosowanym wskaźnikiem jest Normalized Difference Water Index (NDWI), który wykorzystuje wartości odbicia w zakresie zieleni i NIR (Gao, 1996; Robak i in., 2016). Do innych wskaźników należą m.in. Flood Area Index (FAI) oraz omówiony we wcześniejszych rozdziałach wskaźnik NDVI. Jako kolejne rozwiązanie stosuje się wizualną interpretację obrazów przed i po powodzi, mającą praktyczne zastosowanie jedynie dla kartowania powodzi o niewielkiej powierzchni. Dodatkowo należy również zwrócić uwagę na to, że jest to metoda, która dostarcza wyników o dużej niepewności, w szczególności w przypadku zmętnionej wody powodziowej niosącej materiał ziemny, która często jest klasyfikowana łącznie z terenami pokrytymi odkrytą glebą.

Pomimo wielu przykładów zastosowania satelitarnych zobrazowań optycznych, wciąż istnieje kilka wyzwań związanych z ich wykorzystaniem do kartowania i monitorowania powodzi. Największym problemem związanym z danymi optycznymi jest brak możliwości zobrazowania powierzchni terenu w warunkach nawet częściowego zachmurzenia. Dodatkowo, możliwość wykorzystania obrazów optycznych jest również uzależniona od rodzaju terenu, na którym wystąpiła powódź. Oprócz problemów związanych z powierzchniami utwardzonymi, odbijane promieniowanie w zakresie optycznym nie może również przenikać przez korony drzew, w związku z czym tak pozyskane dane są bezużyteczne w monitorowaniu powodzi na terenach zadrzewionych. Pomimo coraz większej popularności danych radarowych, ich stosowanie też posiada ograniczenia związane m.in. z rozpraszaniem odbicia na terenach zabudowanych.

Niezależnie od wymienionych ograniczeń dotychczasowe badania niezaprzeczalnie dowodzą, że wykorzystanie zobrazowań satelitarnych umożliwia określenie zasięgu powodzi i ocenę jej skutków w bardziej szczegółowym wymiarze w stosunku do innego rodzaju danych, np. pomiarów naziemnych. Prowadzone pomiary terenowe mają punktowy charakter i nie umożliwiają prawidłowej oceny zasięgu zjawiska w skali przestrzennej. Rozwój technik teledetekcyjnych i dostęp do wielu źródeł danych satelitarnych umożliwia ocenę powierzchni powodzi i jej zmienności czasowej w nieporównywalnie dokładniejszy i bardziej przystępny sposób. Wykorzystanie zobrazowań satelitarnych przyczynia się dodatkowo do wzrostu częstotliwości pozyskiwania danych z całego zasięgu występowania powodzi.

Pozyskiwanie danych do budowania modeli wysokościowych

W ramach oceny ryzyka wystąpienia powodzi bardzo często określa się podatność terenu na zagrożenie, w szczególności uwzględniając ukształtowanie i typ pokrycia terenu. Numeryczne modele wysokościowe (ang. *Digital Elevation Model*, DEM) są niezbędnym parametrem w modelowaniu powodziowym, służą np. do określenia współczynnika i kierunku spływu, a także wyznaczenia powierzchni zlewni. Dane wysokościowe terenu o mniejszej dokładności mogą być pozyskiwane z pułapu satelitarnego. Przeprowadzone pomiary z satelitów ERS, SPOT i RADARSAT umożliwiają pozyskanie danych wysokościowych w rozdzielczości przestrzennej 3–10 m, nawet na dużych obszarach o złożonej budowie. Dzięki otwartym systemom (ASTER) i (SRTM) można pozyskać dane o rozdzielczości przestrzennej w przedziale 15–90 m.

Poza dostarczaniem danych do opracowania DEM, sensory satelitarne są również wykorzystywane do opracowań map pokrycia terenu. Zobrazowania satelitarne pozwalają na identyfikowanie gruntów rolniczych, lasów, łąk, lasów i obszarów zabudowanych. Dokładność uzyskanych wyników jest ściśle powiązana z rozdzielczością przestrzenną satelitów. W przypadku powodzi występujących na mniejszych obszarach o mniejszej homogeniczności, wymagana jest bardziej szczegółowa klasyfikacja użytkowania gruntów, która umożliwi dokładne odwzorowanie obszarów zagrożonych powodzią. Ze względu na konieczność określenia dokładnej struktury obiektów (np. budynków) znajdujących się na obszarach zagrożonych powodzią, w przypadku powodzi miejskich stosuje się obrazy satelitarne o bardzo wysokiej rozdzielczości, np. Ikonos, WorldView, QuickBird i GeoEye. Dane dostarczane z tych satelitów charakteryzują się szczegółowością informacji na poziomie poniżej metra, umożliwiają dokładną identyfikację kształtu i wielkości obiektów, co ma niezwykle istotne znaczenie dla określenia ich bezpieczeństwa i wytrzymałości po przejściu fali powodziowej.

System wczesnego ostrzegania przed powodzią

System wczesnego ostrzegania odgrywa niezwykle istotną rolę dla bezpieczeństwa zagrożonych obszarów. Prawidłowe funkcjonowanie systemu może zmniejszyć straty związane z wystąpieniem powodzi, a także umożliwia podjęcie działań służących ewakuacji oraz umożliwiających jak najszybszy powrót do prawidłowego funkcjonowania na terenach dotkniętych powodzią. Systemy wczesnego ostrzegania opierają się na bezpośrednich obserwacjach i analizie częstotliwości powodzi, a także wynikach uzyskanych z modeli hydrologicznych. Ze względu na znacznie niższe koszty otrzymywania danych w porównaniu z pomiarami naziemnymi, wiele funkcjonujących systemów wykorzystuje dane satelitarne, zarówno na poziomie globalnym, jak i kontynentalnym oraz lokalnym. Globalny system IFNET (International Flood Network) wykorzystuje szacowanie wielkości opadów na podstawie pomiarów satelitarnych do prognozowania i ostrzegania przed powodzią. Ze względu na fakt, że analiza skutków powodzi na poziomie lokalnym wymaga dokładnych informacji o obiektach (umożliwiających m.in. dokładne odwzorowanie budynków i infrastruktury technicznej), w wielu przypadkach zastosowanie systemów globalnych jest niewystarczające. Jest to przede wszystkim spowodowane tym, że systemy globalne, ze względu na większy obszar analizy, nie dostarczają informacji o zasięgu powodzi z uwzględnieniem struktury zabudowy każdego z miast. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami lokalny system ostrzegania przed powodzią, uwzględniający pomiary satelitarne, jest w stanie przyspieszyć wydanie ostrzeżenia o możliwości nadejścia powodzi z wyprzedzeniem od 2 do 8 dni przed wystąpie-

niem zjawiska (Rahman i Di, 2017). Dane satelitarne mogą również odgrywać ważną rolę w prawidłowej dystrybucji pomocy humanitarnej oraz ewakuacji.

Ocena szkód powodziowych

Zobrazowania satelitarne odgrywają ważną rolę w ocenie szkód wywołanych wystąpieniem powodzi. Ocena szkód w czasie rzeczywistym umożliwia oszacowanie utraty własności, a także zmniejszenie liczby nieuzasadnionych wniosków ubezpieczeniowych. Dzięki przeanalizowaniu zobrazowań satelitarnych przed i po wystąpieniu powodzi można uzyskać informacje na temat jakości plonów i wielkości strat wywołanych przejściem fali powodziowej i oszacować straty w rolnictwie. Różnią się one w zależności od rodzaju uprawy, stanu wzrostu roślinności, a także warunków glebowych. W zależności od wielkości obszaru dotkniętego powodzią, do oszacowania strat na obszarach rolniczych wykorzystuje się zobrazowania satelitarne z sensorów o różnej dokładności (Sentinel, Landsat, AVHRR). Standardowa analiza obejmuje porównanie wartości wskaźnika NDVI dla upraw dotkniętych powodzią ze standardową krzywą wskaźnika.

Wzrastające zagrożenie wystąpienia powodzi zarówno w skali lokalnej, jak i globalnej, spowodowało konieczność opracowania międzynarodowych strategii działania dotyczących oceny zagrożenia i ograniczenia ryzyka wystąpienia powodzi. Na terenach państw członkowskich UE podjęto decyzję o opracowaniu jednolitych wytycznych i zasad postępowania, aby zminimalizować konsekwencje tego zjawiska. W celu określenia kompleksowego podejścia do zarządzania ryzykiem występowania powodzi, w 2007 roku opracowano Dyrektywę Powodziową (Dyrektywa 2007/60/WE), która zobligowała państwa członkowskie do sporządzenia wstępnej oceny ryzyka powodziowego, map zagrożenia i ryzyka powodziowego oraz planów zarządzania ryzykiem powodziowym. Dodatkowo, w celu ochrony przed powodzią, na terenie UE opracowano również Europejski System Informowania o Powodziach (ang. *European Flood Awareness System*, EFAS).

Podsumowując opis przykładów praktycznego zastosowania danych satelitarnych w zarządzaniu kryzysowym, można sformułować następujące wnioski:

- obrazy satelitarne znajdują szerokie zastosowanie we wszystkich fazach zarządzania kryzysowego, zarówno w monitoringu zjawisk kryzysowych, planowaniu działań ratunkowych, jak i szacowaniu ich negatywnych skutków;
- niewystarczająca rozdzielczość przestrzenna obrazów satelitarnych może być ograniczeniem w wykorzystaniu danych satelitarnych do analizy występowania i skutków zjawisk ekstremalnych o małym zasięgu przestrzennym;
- ze względu na rozdzielczość czasową, optyczne dane satelitarne (np. Sentinel-2, Landsat 8) są wykorzystywane przede wszystkim do oceny skutków wystąpienia zjawisk ekstremalnych, w mniejszym stopniu do analizy m.in. przejścia powodzi błyskawicznych lub czasowego rozwoju pożarów;
- do określenia przestrzennego zasięgu obszaru objętego pożarem oraz analizy skutków pożaru wykorzystuje się różnice pomiędzy krzywymi spektralnymi opracowanymi dla obszarów leśnych oraz obszarów dotkniętych pożarem; najwyższe różnice pomiędzy krzywymi spektralnymi występują w zakresach bliskiej (NIR) i średniej (SWIR) podczerwieni;
- analizę wpływu huraganu na obszary leśne oblicza się dla zobrazowań satelitarnych z okresu przed i po wystąpieniu zjawiska; do najczęściej stosowanych wskaźników roślinności stosowanych w ocenie wpływu huraganu na obszary

- leśne należą NDVI, EVI, NDI;
- Frontex, w ramach działalności serwisu bezpieczeństwa granic (EUROSUR), wykorzystuje optyczne i radarowe dane satelitarne do monitorowania i nadzoru granic UE, wykrywania nielegalnej migracji, zwalczania przestępczości transgranicznej i terroryzmu; zobrazowania satelitarne stanowią pierwszy etap weryfikowania zdarzeń występujących na obszarach zagrożonych;
 - w ramach ochrony przeciwpowodziowej zobrazowania satelitarne są wykorzystywane do określenia ryzyka powodziowego, monitorowania powierzchni powodzi, budowy systemu wczesnego ostrzegania przed powodzią oraz przy ocenie szkód powodziowych;
 - badanie wpływu zjawisk ekstremalnych (m.in. powodzi, pożarów) może być z powodzeniem wykonywane z wykorzystaniem danych satelitarnych o średniej rozdzielczości przestrzennej (Sentinel-2, Landsat 8) oraz satelitów o wysokiej i bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej; podstawowym ograniczeniem związanym z zastosowaniem optycznych obrazów satelitarnych jest zachmurzenie;
 - zachmurzenie nie stanowi ograniczenia w wykorzystaniu satelitów radarowych (np. Sentinel-1) do zastosowań z zakresu zarządzania kryzysowego; dostarczają one danych z powierzchni Ziemi w każdych warunkach pogodowych (m.in. w okresach długotrwałych opadów deszczu i podczas występowania powodzi);
 - dane dostarczane z satelitów radarowych (np. Sentinel-1) umożliwiają analizę i monitoring obszarów w sposób ciągły, niezależnie od pory dnia (pozyskują informacje zarówno w dzień, jak i w nocy), co jest niezmiernie istotne w monitorowaniu bezpieczeństwa granic czy w nadzorze obszarów morskich.

6.9. Ochrona zabytków i dziedzictwa kulturowego

Rafał Zapłata

W poniższym rozdziale skupiono się na przekrojowym omówieniu zastosowania danych satelitarnych w badaniu i ochronie (szeroko rozumianego) dziedzictwa kulturowego, jak również w zarządzaniu nim. W pierwszej części prezentowany jest potencjał zobrazowań radarowych – technologii różnicowej interferometrii radarowej (PSInSAR), z ukierunkowaniem na historyczne obiekty inżynieryjne. W kolejnej części omówiono przekrojowo zagadnienie klasyfikacji pokrycia i użytkowania terenu w odniesieniu do danych satelitarnych, z ich praktycznym (przykładowym) zastosowaniem w działaniach na rzecz zasobów kulturowych. W ostatniej części prezentowane są zagadnienia związane z monitorowaniem światowego dziedzictwa w kooperacji z Europejską Agencją Kosmiczną. Przekrojowa charakterystyka zastosowania danych satelitarnych ilustrowana jest przykładami z literatury przedmiotu, jak i przykładami potencjalnego zastosowania tytułowych technologii.

Dane satelitarne to rosnący z roku na rok potencjał informacyjny dla środowisk zajmujących się ochroną zabytków i dziedzictwa kulturowego. Jednak dopiero od niedawna zasób ten charakteryzuje się wysoką jakością i różnorodnością danych (np. coraz większa rozdzielczość przestrzenna, coraz lepsze walory pomiarowe i interpretacyjne uzyskiwane np. dzięki danym radarowym), oferując możliwość szerszego stosowania w badaniu czy monitorowaniu dóbr kultury. Już w ostatnich dekadach XX wieku bada-

cze sięgali po zobrazowania satelitarne, a w XXI wieku niejako wpisali na trwałe zobrazowania optyczne, jak i inne dane satelitarne do praktyki badawczej i konserwatorskiej. Można podawać liczne przykłady odkrywania nowych zabytków m.in. w badaniach archeologicznych (np. Lasaponara i Masini, 2007), przykłady kartowania dóbr kultury wraz z otoczeniem, a także monitorowania ich stanu zachowania, procesów destrukcyjnych toczących zabytkową architekturę (np. Zeni i in., 2011). Dziedzictwo kulturowe to również historyczne założenia zieleni, w tym m.in. parkowe i ogrodowe, a także rezerwy czy parki narodowe stanowiące światowe dziedzictwo ludzkości. Ta grupa dóbr kultury również w specyficzny sposób jest badana i monitorowana za pomocą zobrazowań satelitarnych. Najogólniej mówiąc, w ochronie dziedzictwa kulturowego teledetekcja satelitarna staje się obecnie jednym z komponentów wieloelementowych systemów (często opartych na nieinwazyjnych metodach badawczych) badania, zarządzania czy monitorowania.

W Polsce przykładem zastosowania metod teledetekcyjnych jest kilka projektów naukowych. Jednym z nich jest projekt (częściowo związany z obiektem światowego dziedzictwa UNESCO – zwłaszcza z dziedzictwem przyrodniczym) *Projekt LIFE+ ForBioSensing PL Kompleksowy monitoring dynamiki drzewostanów Puszczy Białowieskiej z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych* (Stereńczak i in., 2017). „Projekt ma na celu opracowanie i zastosowanie metody monitoringu dużego obiektu leśnego z wykorzystaniem innowacyjnych technik i danych. Dzięki zastosowaniu najnowszych technik analiz ekosystemów leśnych możliwe będzie pozyskanie unikalnego dla Puszczy Białowieskiej zbioru danych przestrzennych i drzewostanowych. Połączenie danych teledetekcyjnych i fotogrametrycznych (np. LIDAR, obrazy satelitarne itp.) z pomiarami naziemnymi oferuje możliwość kompleksowego ujęcia dynamiki drzewostanów (lub homogenicznych fragmentów leśnych) tego cennego przyrodniczo obiektu leśnego. Rozpoznanie zmian struktury i składu gatunkowego, zachodzących w lasach Puszczy Białowieskiej pozwoli na zidentyfikowanie czynników warunkujących te procesy, ich dynamiki oraz wdrażanie odpowiednich przedsięwzięć ochronnych do działań praktycznych Parku i Nadleśnictw” (ForBioSensing, 2020).

Kolejną inicjatywą to projekt *Zastosowanie skaningu laserowego oraz teledetekcji w ochronie, badaniu i inwentaryzacji dziedzictwa kulturowego. Opracowanie nieinwazyjnych, cyfrowych metod dokumentacji i rozpoznawania zasobów dziedzictwa architektonicznego i archeologicznego* (Osińska-Skotak i Zapłata, 2014). W ramach tej inicjatywy interdyscyplinarny zespół badawczy podjął działania m.in. w odniesieniu do zabytkowej architektury czy zabytków archeologicznych. Celem badań było m.in. opracowanie metody inwentaryzacji i rozpoznawania zasobów dziedzictwa kulturowego oraz jego stanu zachowania. Prace opierały się na metodach teledetekcji, w tym wysokorozdzielczych i wielospektralnych zobrazowaniach satelitarnych, a także lotniczych i pomiarach naziemnych. W ramach badań m.in. poszukiwano nowych kierunków inwentaryzacji w sektorze ochrony i badania zabytków, analizowano procesy destrukcyjne substancji zabytkowej, procesy stokowe oraz badano przemieszczenia zabytkowych elementów architektonicznych. Celem pośrednim projektu była konfrontacja potrzeb związanych z ochroną dziedzictwa kulturowego z możliwościami nowoczesnych technologii, a także selekcja rozwiązań technicznych, czy też sprawdzenie możliwości kompleksowego zastosowania technologii teledetekcyjnych w ochronie dziedzictwa kulturowego (Zapłata, 2013).

Innym przykładowym projektem jest *Archaeological application of Earth Observation techniques (ArchEO)*, którego celem była identyfikacja warunków sprzyjających analizie

stanowisk archeologicznych i krajobrazów z zastosowaniem technik satelitarnych. Projekt koncentrował się na regionie Europy Środkowej, który charakteryzuje się krajobrazami silnie przekształconymi antropogenicznie, z dużym odsetkiem gruntów rolnych, co w określonych warunkach gruntowych (np. korzystny typ upraw, wilgotność, głębokość gleby, podłoże skalne, zabiegi rolnicze, lokalne procesy biologiczne itp.) sprzyja opracowaniu znaków umożliwiających identyfikację pozostałości archeologicznych (Ruciński i in., 2015).

Przykładem zastosowania interferometrii radarowej są badania obszaru, gdzie znajduje się kolejny obiekt światowego dziedzictwa UNESCO w Polsce – Kopalnia Soli „Wieliczka” (Wąsowski i in., 2008). Prace przyczyniły się do zidentyfikowania wielu potencjalnych radarowych punktów pomiarowych, co umożliwiło monitorowanie przemieszczeń powierzchni terenu w rejonie Wieliczki, a tym samym wykazanie ciągłego osiadania terenu odpowiadającemu zasięgowi podziemnej kopalni soli (Wąsowski i in., 2009).

6.9.1. Przykłady zastosowania technologii interferometrii różnicowej PSInSAR w monitorowaniu przemieszczeń obiektów inżynierskich – historycznych

Marek Mróz

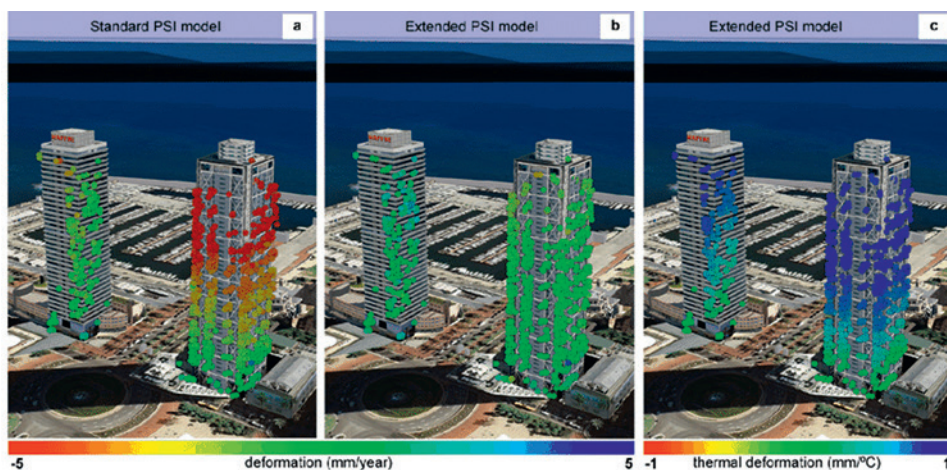
Dziedzictwo kulturowe, zwłaszcza zabytki nieruchome, których znaczą część stanowią budynki, obiekty przemysłowe, militarne itp., narażone jest na różnorodne działania i procesy powodujące trwałe lub czasowe zniszczenia (zmiany np. deformacje) substancji zabytkowej, jak i otoczenia zasobów zabytkowych. W związku z powyższym koniecznym wydaje się poszukiwanie, jak i wdrażanie do działań ochronnych nowych technologii, które pozwolą m.in. analizować czy monitorować stan zachowania tych obiektów. Bez wątplenia do takich metod należy zaliczyć interferometrię różnicową PSInSAR, która jest niezwykle obiecującą, nadal mało znaną i rzadko stosowaną technologią w środowiskach naukowo-konserwatorskich np. w Polsce.

Jednym z zasadniczych problemów związanych z zabytkową architekturą są przemieszczenia tego typu obiektów, wynikające np. z osiadania gruntu, powodujące często nieodwracalne zniszczenia dziedzictwa kulturowego. Zatem istotne dla tego typu obiektów wydają się wszelkie metody prowadzące do rozpoznawania destrukcji już na początkowym etapie, a które pozwalają z bardzo dużą dokładnością odnotować np. obniżenia budynków lub ich fragmentów czy ich otoczenia. Powstające spękania, szczeliny itp., stanowią jedynie przykłady zachodzących procesów destrukcyjnych, a w zasadzie są ich rezultatem. W związku z powyższym zasadne wydaje się zapobieganie takim procesom, a przede wszystkim eliminowanie przyczyn na jak najwcześniejszych etapach.

Przyczyny ww. destrukcji są różnorodne, jak i różnorodne są współczesne sposoby ich obserwowania, zarówno w odniesieniu do obiektów zabytkowych, jak i współczesnych. Osiadania i uszkodzenia budynków, osiadania i przemieszczenia nasypów kolejowych, dróg, autostrad, konstrukcji mostowych, deformacje konstrukcji budowlanych, itd. wywoływane przez podziemną eksploatację kopalni, podziemne prace inżynierskie, obniżenie poziomu wód gruntowych, użycie niewłaściwych materiałów budowlanych i kruszyw w drogownictwie lub nawet deformacje termiczne mogą być monitorowane z wysoką precyzją metodami PSInSAR/PSI. Przykłady przedstawiono poniżej, a załączono

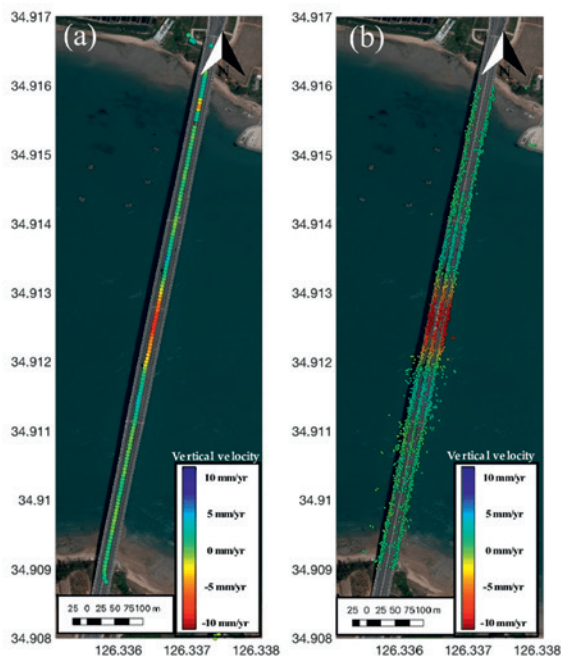
na literatura może stanowić bogate źródło informacji technicznych. Na poniższym rysunku (ryc. 6.80) przedstawiono przykład wyznaczania osiadania wieżowca w Barcelonie (Hiszpania). Osiadanie to powodowane było obniżeniem poziomu wód gruntowych powstałym po ich wypompowaniu w trakcie prac budowlanych w pobliżu. Osiadanie obiektów, czyli przemieszczenie pionowe, oznacza ich oddalenie od satelity (nawet tylko o milimetry), dlatego ma zawsze znak ujemny, a na większości opracowań przedstawiane jest kolorem czerwonym. Czasami jednak nie dochowuje się tej zasady i skala barw może być odwrócona lub nawet inna. Czytelnik powinien być świadomy, że może napotkać takie sytuacje w opracowaniach inżynierskich i powinien być na to wyczulony.

Przy stosowaniu techniki PSI należy pamiętać, że mówimy o przemieszczeniach wolnozmiennych, które mogą trwać latami, a więc oprócz przemieszczeń całkowitych w danym okresie podaje się również ich prędkość w mm/rok. Przedstawiony na rycinie (ryc. 6.80) przykład pokazuje, że dokładność tej techniki jest tak wysoka, że pozwala wykrywać i uwzględniać w obliczeniach przemieszczeń również wpływ „ekspansji termicznej” – rozszerzania się budynku pod wpływem wysokich temperatur.



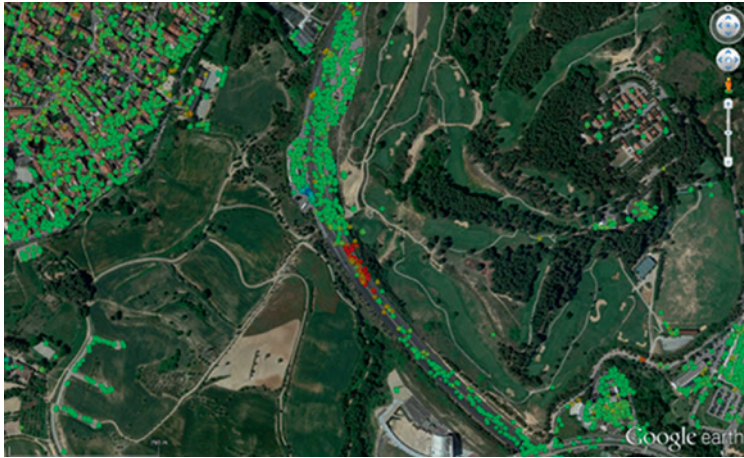
Ryc. 6.80. Prędkość deformacji wysmukłych budynków wyznaczana na podstawie danych COSMO SkyMed z uwzględnieniem składowej termicznej (źródło: Crosetto i in., 2013)

Poniżej zaprezentowano wyniki badań deformacji mostu metodami PSI z wykorzystaniem dwóch satelitów: Sentinel-1 i COSMO SkyMed (ryc. 6.81). W obu przypadkach uzyskano zbliżone wyniki podawane jako prędkość deformacji (ok. 10 mm/rok) na środkowym przęśle mostu. Należy jednak podkreślić, że w przypadku stosowania danych o wyższej rozdzielczości przestrzennej (np. TerraSAR-X, COSMO SkyMed) uzyskuje się więcej tzw. PS-ów, czyli stabilnych rozpraszaczy (ang. *permanent scatterers*). Może to mieć znaczenie w pracach inżynierskich wymagających większej precyzji w lokalizowaniu punktów niestabilnych w czasie. Generalnie, bezpłatne dane (obrazy) Sentinel-1 dystrybuowane w ramach programu Copernicus są niezwykle atrakcyjnym materiałem do zastosowań interferometrycznych, szczególnie w badaniach wielkopowierzchniowych deformacji na terenach dużych aglomeracji czy nawet całych regionów.

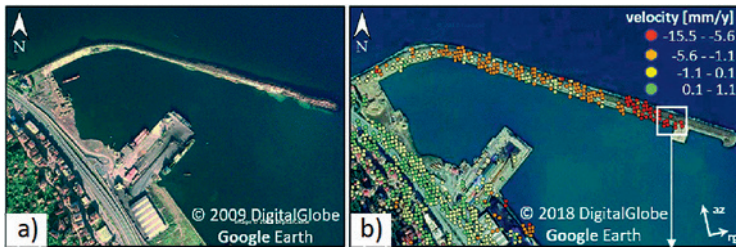


Ryc. 6.81. Prędkość deformacji mostu (maks. 10 mm/rok) na podstawie danych a) Sentinel-1 oraz b) COSMO SkyMed (źródło: Jung i in., 2019)

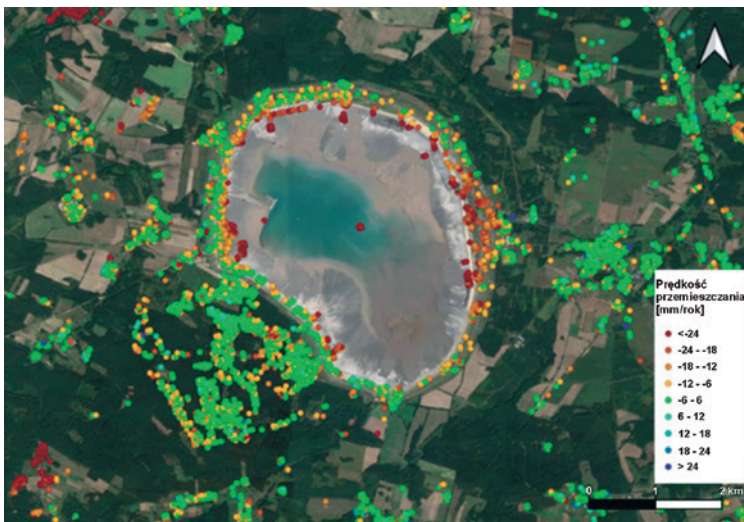
Wyznaczenie deformacji metodą PSI fragmentu autostrady w okolicach Barcelony przedstawiono poniżej (ryc. 6.82). Większość wyznaczonych punktów PS ma kolor zielony oznaczający brak przemieszczeń zarówno dla dłuższego odcinka autostrady, jak i otaczających obiektów na terenach zurbanizowanych. Tylko pewien fragment autostrady pokryty jest kropkami w kolorze czerwonym oznaczającym w tym przypadku przemieszczenia rzędu 7,5 mm na rok. Takie wyniki mogą świadczyć o użyciu do budowy niewłaściwych materiałów lub wpływie podłoża gruntowego na zachowanie całej konstrukcji. Podobny przykład zilustrowano na rysunku (ryc. 6.83), który przedstawia deformację odcinka falochronu. Informacje takie są bardzo cenne dla inżynierów i osób zarządzających eksploatacją infrastruktury. Z kolei na rycinie 6.84 przedstawiono przykład wyznaczania deformacji zbiornika poflotacyjnego Żelazny Most w dość krótkim okresie jego rozbudowy. Wyznaczono deformacje ukośne z jednej orbity (tu ASC – orbita wstępująca), które są rzędu 20 mm w okresie 5 miesięcy. Przykład ten pokazuje, że największe deformacje zanotowano w punktach PS zidentyfikowanych na koronie wału. Należy przy tym zaznaczyć, że pierwotnie wyznaczone deformacje w metodzie PSI są zawsze deformacjami w kierunku obrazowania, czyli deformacjami ukośnymi i konieczne jest zintegrowanie obserwacji z orbity wstępującej i zstępującej. Dopiero zsynchronizowanie obu grup obserwacji pozwala na wyznaczanie składowych przemieszczenia pionowego i poziomego.



Ryc. 6.82. Deformacja fragmentu autostrady wyznaczana na podstawie danych TerraSAR-X – 7,5 mm/rok (źródło: Crosetto, 2017)



Ryc. 6.83. Prędkość deformacji falochronu [15 mm/rok] (velocity [mm/y]) (źródło: Erten i Rossi, 2019)



Ryc. 6.84. Prędkość deformacji terenu przy zbiorniku Żelazny Most na podstawie obrazów Sentinel-1 z okresu wrzesień–grudzień 2019 (źródło: Crosetto CTTC, 2019)

6.9.2. Klasyfikacja pokrycia i użytkowania terenu (LULC) w działaniach na rzecz ochrony dziedzictwa kulturowego i krajobrazów kulturowych

Rafał Zapłata, zespół ProGea 4D

Klasyfikację pokrycia i użytkowania terenu (ang. *Land Use Land Cover*, LULC) na bazie danych satelitarnych należy rozpatrywać w odniesieniu do dóbr kultury jako element wieloaspektowej polityki na rzecz ochrony i zarządzania dziedzictwem kulturowym, wzmacniającej swój potencjał dzięki wykorzystaniu kolejnych metod nieinwazyjnych. Ponadto rozpoznawanie zasobów kulturowych za pośrednictwem m.in. danych teledetekcyjnych należy również postrzegać jako element wspierający – wspomagający klasyfikację pokrycia terenu. Zróżnicowanie szaty roślinnej (np. sezonowo występującej), bezpośrednio powiązane z zalegającymi pod powierzchnią terenu zabytkami archeologicznymi, może stanowić istotny element wyjaśniania i rozumienia zachodzących zjawisk, a tym samym różnic wzrostu czy kondycji roślinności – czyli zróżnicowania pokrycia terenu.

Zobrazowania satelitarne, zwłaszcza optyczne (w szczególności o wysokiej i bardzo wysokiej rozdzielczości), mają wielorakie zastosowanie w przypadku dziedzictwa kulturowego i naturalnego. Służą m.in. monitorowaniu stanu zachowania obiektów zabytkowych wraz z ich otoczeniem, są podstawą kartowania pokrycia powierzchni terenu, jak również wspierają rozpoznawanie obiektów zabytkowych na podstawie tzw. wyróżników roślinnych np. w badaniach archeologicznych. Dane satelitarne poddane przetworzeniom i analizom służą m.in. powstawaniu produktów pochodnych, którymi są np. mapy klasyfikacji pokrycia i użytkowania terenu, będące również podstawą do analizy czy monitorowania dóbr kultury i środowiska. Zasoby teledetekcyjne sprawdzają się m.in. w:

- uzupełnianym (wobec innych metod, zwłaszcza nieinwazyjnych) rozpoznawaniu obiektów zabytkowych (np. lokalizacja zasięgu występowania zabytków archeologicznych czy ich elementów składowych w przypadku złożonych i wieloelementowych konstrukcji),
- wsparciu działań inwentaryzacyjnych dziedzictwa kulturowego (np. wyznaczenie i kartowanie zasięgów – granic ochrony obiektów zabytkowych),
- aktualizowaniu danych dotyczących obiektów zabytkowych wraz z ich otoczeniem (np. budowanie systemów bazodanowych w ramach działań konserwatorskich czy bieżące kartowanie elementów historycznych założeń zieleni),
- wsparciu procesów analitycznych dotyczących stanu zachowania obiektów zabytkowych (np. analiza procesów destrukcyjnych – osuwiska itp. przy wsparciu danych radarowych), jak i monitorowaniu materialnego dziedzictwa kulturowego wraz z najbliższym otoczeniem np. śledzenie zmian (często nielegalnego i niekontrolowanego) użytkowania terenu w miejscu występowania dziedzictwa kulturowego oraz w najbliższym otoczeniu zabytków,
- prognozowaniu i przewidywaniu potencjalnych zagrożeń dla zabytków (np. powódzie czy susze mające bezpośredni wpływ na stan zachowania obiektów zabytkowych).

Poza tym dane satelitarne z powodzeniem stosowane są w pracach analitycznych, planistycznych czy koncepcyjnych wykonywanych na rzecz krajobrazów kulturowych

(np. analiza zagrożeń w procesie planowania szlaków turystycznych ukierunkowanych na eksponowania zabytków).

Materiałne zasoby kulturowe, takie jak: zabytki archeologiczne, dawne układy ruralistyczne, pozostałości budownictwa obronnego, obiekty techniki – dziedzictwo przemysłowe (postindustrialne), historyczne parki i ogrody (historyczne założenia zieleni) itp., są zasobem, który nie jest w pełni rozpoznany w Polsce i na świecie, ani też nie jest w pełni zinwentaryzowany. Zatem uwzględnienie zobrazowań satelitarnych (zwłaszcza wysokorozdzielczych i wieloczasowych) pozwala wzmocnić procedury rozpoznawania, np. nowych zabytków czy historycznych układów przestrzennych lub też wzbogacić procedury dookreślania nieznanymi dotąd elementów wieloelementowych założeń, jak również zasięgu występowania znanych obiektów zabytkowych.

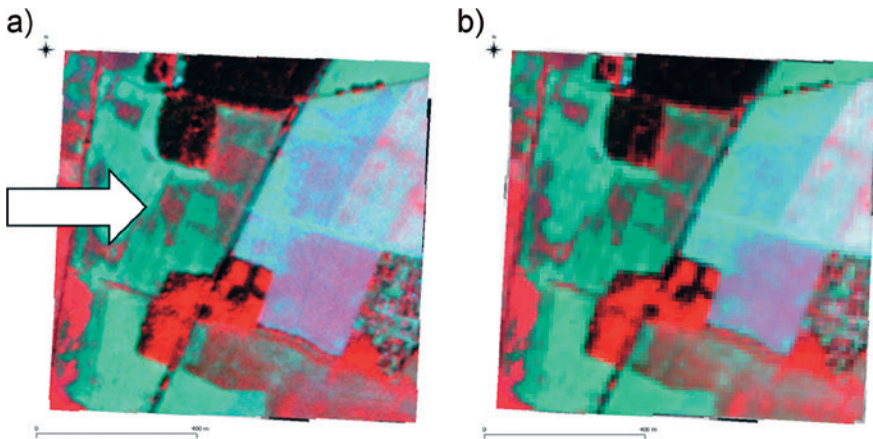
Pod względem analizowania, diagnozowania czy monitorowania stanu zachowania dziedzictwa kulturowego dane satelitarne z powodzeniem mogą być użyteczne w odniesieniu do:

- nielegalnych budów czy wykopów wykonywanych na obszarze występowania zabytków (np. archeologicznych);
- rozwoju, ale i niszczenia roślinności w historycznych założeniach zieleni czy obiektach światowego dziedzictwa;
- potencjalnych zagrożeń lub już zaistniałych, w przypadku historycznej zabudowy czy zabytków przemysłowych (np. osuwiska, zapadliska, powodzie);
- długoczasowych zmian, jakie zachodzą przy zabytkach i ich otoczeniu (np. wyniesienia obiektów rezydencjalno-obronnych) w skali roku, lat czy dekad.

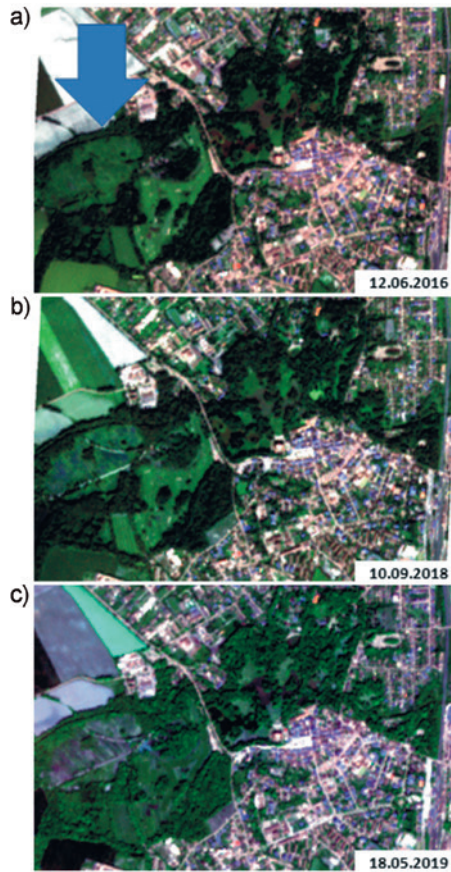
Starając się ukazać potencjał zobrazowań satelitarnych – produktów pochodnych (LULC), sięgnijmy po kilka przykładów ich zastosowania (lub potencjalnego zastosowania) w określonych sytuacjach.

Zabytki archeologiczne rozpoznawane są od lat m. in. na bazie zdjęć lotniczych i tzw. wyróżników roślinnych, glebowych, wilgotnościowych itp. Nie inaczej jest z zobrazowaniami satelitarnymi (zwłaszcza wysokiej rozdzielczości), które pozwalają rozpoznawać nowe obiekty, jak i monitorować już znane. Przykładem tego typu analizy i rozpoznawania zasobów kulturowych ilustruje obserwacja wyróżników roślinnych na zobrazowaniach satelitarnych Planet z 25 czerwca 2019 roku (GSD 3 m) oraz Sentinel-2 z 25 czerwca 2019 roku (GSD 10 m) (ryc. 85). Odnosi się ona do reliktyw miasta średniowiecznego (z charakterystycznym, czworokątnym układem), zlokalizowanego w woj. wielkopolskim w okolicach Szamotuł (Pietrzak i Rączkowski, 2006). Przykładem tego typu badań są przywoływane w poniższym tekście jedne z pierwszych projektów z terenu Polski, realizowane w ramach badań archeologicznych z zastosowaniem zobrazowań satelitarnych (Osińska-Skotak i Zapłata, 2014; Ruciński i in., 2015).

Analiza, inwentaryzacja czy monitorowanie historycznych założeń zieleni to kolejny obszar potencjalnego zastosowania zobrazowań satelitarnych. Przykładem może być zespół pałacowo-parkowy w Pszczynie z XVIII wieku, dla którego (na bazie wieloczasowych danych satelitarnych – map pokrycia terenu) możemy obserwować zmiany (ryc. 6.86) szaty roślinnej czy jej kondycji. Przedstawione zobrazowania satelitarne w postaci kompozycji barwnej RGB, pochodzące z lat 2016–2019, pozwalają zaobserwować np. zmiany wegetacyjne roślinności – zmiany na powierzchni terenu, co widoczne jest na terenach występowania łąk parkowych. Wieloczasowe dane pozwalają analizować i rejestrować zmienność założenia parkowego. Obraz z 2016 roku ukazuje



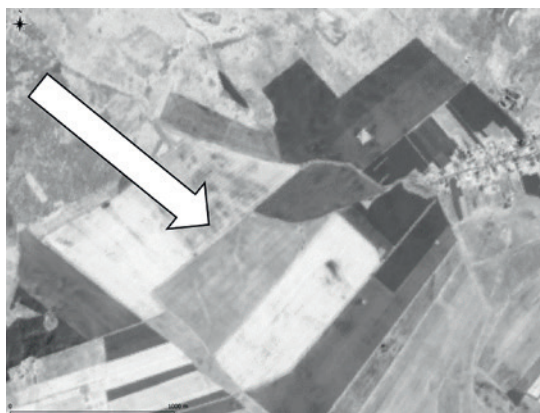
Ryc. 6.85. Relikty dawnego miasta w okolicach Szamotuł (woj. wielkopolskie): a) obraz PlanetScope Dove (25.06.2019, GSD 3 m, CIR) oraz b) Sentinel-2 (25.06.2020, GSD 10 m, CIR)



Ryc. 6.86. Zespół pałacowo-parkowy w Pszczynie (woj. śląskie): na kompozycji barwnej RGB Sentinel-2 z 12 czerwca 2016 roku (a), RGB z 10 września 2018 roku (b) oraz (c) kompozycji barwnej RGB z 18 maja 2019 roku

dość jednolity charakter powierzchni łąki we wschodniej części parku. Na zobrazowaniu z maja 2019 roku, można zaobserwować podobną sytuację jak z roku 2018, charakterystyczny, liniowy układ łąki (pasy NE-SW) oraz mozaikowy rozkład roślinności łąkowej, co należy wiązać ze zróżnicowaną kondycją roślin w określonych miejscach. Obraz ukazuje również strefowość roślinności łąkowej, jaka charakteryzuje omawiany obszar, być może wynikającą z występowania naturalnych lub antropogenicznych struktur pod powierzchnią terenu.

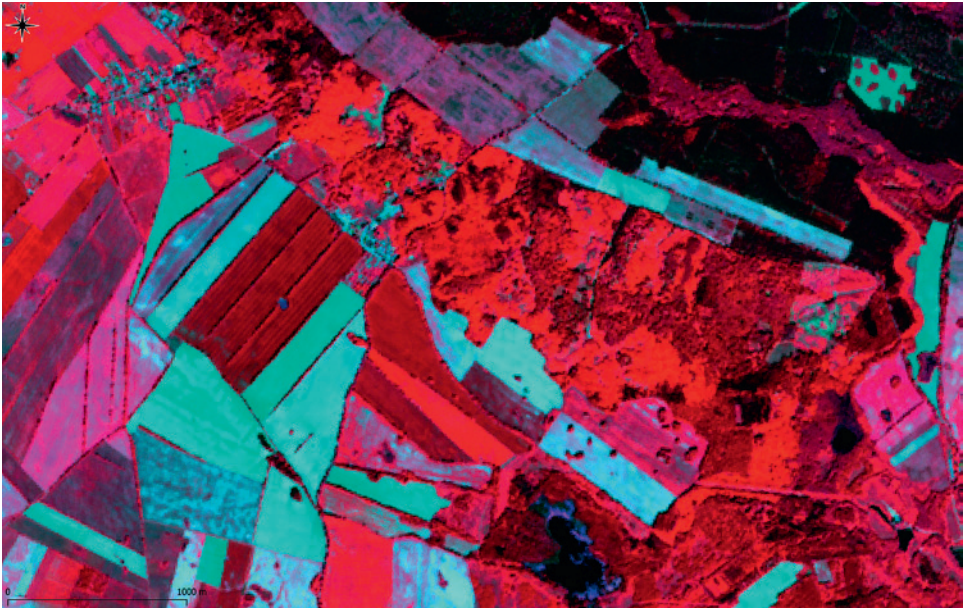
Również analiza tzw. paleośrodowiska, dawnych obiektów naturalnych (występujących w kontekście obiektów antropogenicznych) otwiera możliwości analityczne i inwentaryzacyjne dla danych teledetekcyjnych. Także na podstawie wyróżników roślinnych możliwa jest detekcja tego typu pozostałości, które stanowiły niegdyś elementy krajobrazu kulturowego. Przykładem są m.in. tereny w okolicach miejscowości Kurowo w pow. koszalińskim w woj. zachodniopomorskim, gdzie obserwujemy liczne obiekty naturalne będące elementem dawnego otoczenia siedlisk ludzkich (ryc. 6.87).



Ryc. 6.87. Okolice miejscowości Kurowo, woj. zachodniopomorskie. Analiza elementów paleośrodowiska oraz podpowierzchniowych struktur antropogenicznych lub naturalnych. Zobrazowanie Sentinel-2 (GSD 10 m, CIR)

Dla dawnych układów przestrzennych – np. układów ruralistycznych (wiejskich) – zyskujemy dodatkowy zasób danych i możliwości w zakresie inwentaryzacji czy szerokopłaszczyznowej analizy przeszłych i współczesnych krajobrazów kulturowych. Przykładem są układy historycznych pól (Rączkowski, 2015) w woj. zachodniopomorskim, w pow. koszalińskim w miejscowości Cebulino, zachowane jeszcze częściowo w pierwotnym układzie (ryc. 6.88).

Dane satelitarne, zwłaszcza radarowe, znajdują swoje zastosowanie również w analizowaniu zaistniałych lub potencjalnych procesów niszczących obszary lub obiekty zabytkowe. Do takich zaliczamy m.in. osuwiska czy zapadliska, które bezpośrednio wpływają na stan zachowania zabytków archeologicznych, dawnej zabudowy czy zabytków architektury. Szereg badań prowadzonych w Polsce, m.in. przez Państwowy Instytut Geologiczny, dostarcza danych i wyników ukazujących niszczący wpływ ww. procesów, jak to ma miejsce np. w przypadku licznych zasobów kulturowych na terenie województwa podkarpackiego czy małopolskiego (Zapłata, 2016; Laskowicz i Mrozek, 2019). Dane radarowe stwarzają również potencjał w zakresie stabilności i powstających deformacji architektury zabytkowej (Negula i in., 2015).



Ryc. 6.88. Przykład dawnych – historycznych układów ruralistycznych (wiejskich) – układy historycznych pól. Woj. zachodniopomorskie, pow. koszaliński, okolice miejscowości Cebulino. Kompozycja CIR Sentinel-2 GSD 10 m

6.9.3. Monitorowanie światowego dziedzictwa

Rafał Zapłata

„Konwencja w sprawie ochrony światowego dziedzictwa kulturalnego i naturalnego” (Konwencja, 1972) w swych zapisach wskazuje kierunki i działania, które są realizowane dzięki projektom ESA. W dokumencie czytamy m.in., że państwa będące stronami Konwencji będą starały się „rozвивać studia i badania naukowe i techniczne oraz doskonalić metody interwencyjne, które pozwolą sprostać niebezpieczeństwom zagrażającym jego dziedzictwu kulturalnemu lub naturalnemu; przedsięwziąć odpowiednie środki prawne, naukowe, techniczne, administracyjne i finansowe w celu identyfikacji, ochrony, konserwacji, rewaloryzacji i ożywiania lub odtwarzania tego dziedzictwa”. Zwłaszcza zapisy o badaniach naukowych i technicznych stanowią bezpośrednią podstawę dla takich inicjatyw jak „Satellites to focus on UNESCO World Heritage Sites”.

Monitorowanie światowego dziedzictwa UNESCO to szereg działań służących zachowaniu, a także analizowaniu stanu zachowania obiektów kulturowych, w ramach których wykorzystuje się ciągle rozwijające się technologie, czego przykładem jest wspomniany projekt Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA). 18 czerwca 2003 roku miało miejsce podpisanie przez ESA i Organizację Narodów Zjednoczonych ds. Oświaty, Nauki i Kultury UNESCO „Open Initiative on the Use of Space Technologies to Support the World Heritage Convention” – „Otwartej inicjatywy dotyczącej wykorzystania technologii kosmicznych do wspierania Konwencji Światowego Dziedzictwa”. Inicjatywa jest otwarta dla wszystkich instytucji posiadających wiedzę specjalistyczną w zakresie pod-

stawowych technologii kosmicznych, a jej misją jest stworzenie kooperacyjnego mechanizmu dzielenia się istniejącą wiedzą i technologią kosmiczną przez poszczególne państwa z państwami członkowskimi, które np. nie posiadają tych technologii, w celu wspierania krajów rozwijających się w monitorowaniu obiektów światowego dziedzictwa (Alvarado i Langston, 2014).

Zdaniem wielu specjalistów znaczna część obiektów światowego dziedzictwa UNESCO – dziedzictwa kulturowego, przyrodniczego i mieszanego, a więc dzieła natury i człowieka, jest zagrożona (Stewart i in., 2013). W związku z powyższym powstała idea „Open Initiative” – „Otwartej inicjatywy”, której zadaniem jest opracowanie produktów i usług opartych na obserwowaniu Ziemi w celu zaspokojenia potrzeb informacyjnych różnych organizacji – krajowych i międzynarodowych. Organizacje te, zajmujące się ochroną i konserwacją różnorodnych zagrożonych obiektów światowego dziedzictwa, zyskały zatem zasób informacyjny poprzez otwartą współpracę agencji kosmicznych, instytucji badawczych, organizacji pozarządowych (NGO) i sektora prywatnego (Stewart i in., 2013). Celem tych projektów jest poprawa działań związanych z ochroną dziedzictwa dzięki:

- stosowaniu technologii kosmicznych w monitorowaniu i analizowaniu dziedzictwa, celem wsparcia zarządzania zasobami;
- opracowaniu narzędzi do zarządzania każdym obiektem;
- inicjowaniu działań na rzecz jak najlepszego wykorzystania coraz to nowszych i dostępnych technologii;
- przyczynianiu się do rozwoju koncepcji dziedzictwa cyfrowego (ang. *digital heritage*) poprzez opracowanie nowych narzędzi i aplikacji. Open Initiative zrzesza kilkudziesięciu partnerów, w tym agencje kosmiczne, uniwersytety, instytuty badawcze i organizacje sektora prywatnego (Stewart i in., 2015).

Przykładami inicjatyw związanych z działalnością ESA są m.in.:

- Projekt HORUS *Heritage Retrieval and Observation Under Sand* (Horus, 2020). Cel projektu to świadczenie innowacyjnych usług dla użytkownika końcowego – Centrum Dokumentacji Dziedzictwa Kulturowego i Przyrodniczego (CULTNAT), aby mogło ono analizować, monitorować i kontrolować dziedzictwo archeologiczne Egiptu. Wyniki projektu to m.in. określenie lokalizacji zabytków archeologicznych, znanych w przeszłości, a obecnie niemających dokumentacji (HORUS, 2020).
- Projekt ArchEO *Archaeological application of Earth Observation techniques*, realizowany w Polsce, miał na celu analizę, ocenę i poszerzenie wykorzystania technik obserwacji ziemi w odkrywaniu i analizowaniu dziedzictwa archeologicznego, z ukierunkowaniem na obszary Europy Środkowej (Ruciński i in., 2015).
- Projekt *Remote sensing for subsurface archaeological feature detection*. W ramach tego projektu analizowano różne dane pochodzące z różnorodnych sensorów m.in. ALOS PALSAR, Envisat/ASAR i COSMO SkyMed, celem rozpoznawania zabytków archeologicznych z obszaru śródziemnomorskiego. Innym celem projektu byłoby wykorzystanie wrażliwości obserwacji SAR na nierówności oraz właściwości dielektryczne powierzchni, które mogły wskazywać istnienie podziemnych struktur (Stewart i in., 2013).
- Projekt związany z Historycznym Centrum Sighisoara w Rumuni, którego celem było m.in. ustalenie stabilności i wielkości deformacji zabytkowego centrum wraz z pomiarem prędkości przemieszczania się poszczególnych elementów dziedzictwa kulturowego (Nagula i in., 2015).

W ramach działań ESA organizowane są konferencje i szkolenia z zakresu teledetekcji satelitarnej, ukierunkowane na zastosowania ww. danych w badaniach archeologicznych (warsztaty i inicjatywy podejmowane wspólnie z Europejskim Stowarzyszeniem Ośrodków Teledetekcji (European Association of Remote Sensing Laboratories, EARSel).

Te i wiele innych projektów realizujących cele projektu ESA *Satellites to focus on UNESCO World Heritage Site*, wpisuje się w działania:

- upowszechniające i propagujące stosowanie technologii satelitarnych w ochronie obiektów światowego dziedzictwa UNESCO;
- rozwijające tytułowe techniki i dane;
- ochrony, monitorowania i badania na rzecz dziedzictwa kulturowego.

Istotnym wkładem Otwartej Inicjatywy jest również stanowienie prawa (ang. *soft law*) i prowadzenie polityki kosmicznej na rzecz innowacyjnych procesów negocjacji i zawierania porozumień, a dalej tworzenie specjalistycznej sieci kosmicznej z ukierunkowaniem na osiągnięcie określonego celu, np. badawczego. Tzw. *soft law* – miękkie prawo – dotyczy niewiążących instrumentów prawnych, których celem jest ułatwienie integracji i rozwoju ram prawnych, m.in. tych uznawanych przez Radę Gospodarczą i Społeczną ONZ (United Nations Economic and Social Council). UNESCO jako organizacja ustanawiająca standardy, „może formułować i wspierać nieobowiązkowe zasady postępowania za pomocą tych miękkich (niewiążących) instrumentów i porozumień, które mają na celu ułatwienie integracji i rozwoju istniejących ram prawnych ONZ, rezolucji i celów ze szczególnymi uwzględnieniem współpracy międzynarodowej – w szczególności w przypadku wykorzystania technologii kosmicznych z korzyścią dla wszystkich narodów, wspierania wzajemnie akceptowalnych warunków współpracy oraz wymiany danych, informacji i wiedzy z teledetekcji” (Alvarado i Langston, 2014).

W podsumowaniu należy stwierdzić, że:

- omawiane zasoby teledetekcyjne należy traktować jako kolejną, wspomagającą technologię w nieinwazyjnych badaniach i działaniach związanych z ochroną i zarządzaniem materialnym dziedzictwem kulturowym (zwłaszcza zabytkami nieruchomymi np. architektury, archeologicznymi, techniki) wraz z jego najbliższym otoczeniem, często w powiązaniu z ochroną i zarządzaniem dobrami środowiska;
- niewystarczająca rozdzielczość przestrzenna darmowych zobrazowań satelitarnych (np. Sentinel-2) może stanowić ograniczenie w ich wykorzystaniu przy rozpoznawaniu i inwentaryzowaniu zabytków nieruchomych – archeologicznych, jednak stanowi element uzupełniający dla innych metod wiodących w tych działaniach (np. fotografii lotniczej, skanowania laserowego, wysokorozdzielczych zobrazowań satelitarnych);
- można zaobserwować ogromny potencjał omawianych danych satelitarnych (obrazów radarowych) w analizowaniu uszkodzeń budynków zabytkowych lub zabytków archeologicznych, a także osiadaniu czy przemieszczaniu terenu, na którym znajdują się obiekty zabytkowe, jak i ich najbliższego otoczenia;
- w przypadku dziedzictwa przyrodniczego lub obiektów o charakterze przyrodniczo-kulturowym (np. historyczne założenia zieleni – parki czy ogrody) należy sięgnąć po rozwiązania proponowane w rozdziałach dotyczących gospodarki leśnictwa czy środowiska;
- z perspektywy wszystkich działań na rzecz dziedzictwa kulturowego i przyrod-

niczego omawiane zasoby teledetekcyjne charakteryzują m.in. znaczące dla działań związanych z rozpoznawaniem (poszukiwaniem np. zabytków archeologicznych) czy monitorowaniem otoczenia zasobów kulturowych: nieodpłatność i dostępność, wielospektralność i wieloczasowość, (zwiększająca się) rozdzielczość przestrzenna, nieinwazyjność i komplementarność wobec innych metod nieinwazyjnych.

7. Trendy w teledetekcji satelitarnej

Piotr Wężyk

Teledetekcja satelitarna staje się coraz bardziej powszechna, a wręcz niezbędna w codziennym życiu, szczególnie w przypadku monitorowania przebiegu zjawisk katastroficznych, czy tworzenia numerycznej prognozy pogody na podstawie pomiarów zdalnych oraz modeli matematycznych. Zdalna, automatyczna obserwacja Ziemi, łącznie z procesem przesyłania i przetwarzania danych teledetekcyjnych, pozwala na szybkie reagowanie na negatywne skutki klęsk żywiołowych (np. powodzi, pożarów lasów, trzęsień ziemi, tsunami, huraganów, burz piaskowych, suszy i in.), które z coraz większą częstotliwością pojawiają się na naszym globie. Dane teledetekcyjne znajdują również zastosowanie w obserwacjach procesów i zjawisk przebiegających mniej dynamicznie. Wykorzystywane są m.in. do monitorowania stanu upraw rolniczych w zakresie prognozowania plonów, szacowania strat, wykrywania chorób i szkodników, inteligentnego nawożenia i nawadniania upraw (tzw. rolnictwo precyzyjne). Ponadto, dane satelitarne stosowane są z powodzeniem do wspierania zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych, np. eksploatacji lasów czy zużycia wody, kontroli rozwoju obszarów megapolis, monitorowania parametrów meteorologicznych i środowiskowych (np. jakość powietrza i wód, topnienie lodowców). Ciągła obserwacja zjawisk i obiektów jest niezbędna do budowania świadomości otaczającego nas świata i zrozumienia przemian, jakie w nim zachodzą lokalnie, regionalnie oraz globalnie.

Europejska Agencja Kosmiczna dokonała podziału dotychczasowej aktywności naszej cywilizacji w kosmosie na cztery fazy. Kosmos 1.0 (ang. *Space 1.0*) to pierwszy, najdłuższy okres działalności człowieka w kosmosie, obejmujący wszystkie wcześniejsze obserwacje astronomiczne i prace teoretyczne nad lotami kosmicznymi. Faza Kosmos 2.0 (ang. *Space 2.0*) rozpoczęła się w roku 1957 od wyniesienia pierwszego satelity, Sputnika 1 przez Rosjan, a jej kulminacją był amerykański program Apollo i lądowanie na Księżycu. Można zaryzykować stwierdzenie, że w tym okresie eksploracja kosmosu była domeną dwóch supermocarstw: Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej (USA) oraz Związku Socjalistycznych Republik Radzieckich (ZSRR) i opierała się przede wszystkim na wzajemnej konkurencji. Faza Kosmos 3.0 (ang. *Space 3.0*) przesunęła akcenty na wzmocnienie współpracy zagranicznej, czego efektem było powstanie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Zasadniczym trendem kształtującym przyszłość obserwacji Ziemi jest obecnie demokratyzacja kosmosu, która wprowadza nas w kolejną fazę rozwoju eksploracji przestrzeni okołoziemskiej, czyli fazę Kosmos 4.0 (ang. *Space 4.0*). W tym okresie poważną rolę odgrywać będą nie tylko rządowe agencje kosmiczne, ale także firmy komercyjne, instytucje naukowo-badawcze, organizacje pozarządowe, a nawet inicjatywy studenckie. Kosmos 4.0 to całkowicie nowa era – nowe pole ewolucji sektora kosmicznego, obejmujące poza obszarem rejestracji obrazów i innych danych przestrzennych, także obszar przetwarzania danych z wykorzystaniem takich technik jak sztuczna inteligencja (ang. *Artificial Intelligence, AI*), uczenie maszynowe (ang. *Machine Learning, ML*), analityka wielkich zbiorów danych (ang. *Big Data*), Internet rzeczy (ang. *Internet of Things, IoT*), czy przetwarzanie w chmurach obliczeniowych (ang. *cloud processing*). Nowa era to także zmienione relacje pomiędzy podmiotami sek-

tora kosmicznego, oparte o współpracę pomiędzy rządami, agencjami, nauką, sektorem prywatnym i społeczeństwem.

W erze Kosmosu 4.0 silnie zarysowały się tendencje rozwoju technologicznego w kierunku:

- zwiększania rozdzielczości przestrzennej sensorów, czyli dążenia do rozróżniania jak najmniejszych szczegółów terenowych na rejestrowanym obrazie,
- poszerzenia ilości i podniesienia jakości informacji rejestrowanej w poszczególnych pasmach spektralnych (rozdzielczość spektralna),
- skrócenia czasu rewizyty (zwiększenie rozdzielczości czasowej) satelity nad obiektem zainteresowania,
- zwiększenia liczby satelitów na orbicie i ich miniaturyzacji (mikro- i nanosatelity) prowadzącej do powstania wielkich konstelacji satelitów,
- przyspieszenia dostępu do informacji pozyskiwanych z orbity okołoziemskiej (komunikacja i przetwarzanie obrazu na orbicie),
- tworzenia konstelacji satelitów meteorologicznych uzupełniających się tematycznie (np. A-train, NASA)
- budowy badawczych stacji orbitalnych (jak ISS) i laboratoriów (DISCOVER),
- obniżenia orbit statków kosmicznych w celu prowadzenia permanentnych obserwacji (np. pseudosatelity – HAPS),
- rozwoju innowacyjnej analityki gromadzonych ogromnych archiwów danych teledetekcyjnych (ang. *Big Data*) prowadzonej w chmurach obliczeniowych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, w tym uczenia maszynowego, kreowania masowego popytu na produkty analityki danych z obserwacji Ziemi, dostępnych na urządzeniach mobilnych.

Zwiększanie rozdzielczości przestrzennej

Pomimo znaczącego podniesienia w ostatniej dekadzie rozdzielczości przestrzennej i spektralnej obrazowań satelitarnych, zwiększenia możliwości manewrowania i kierowania systemów sensorów satelitów na cel, czy też osiągnięcia wysokich dokładności w ustalaniu położenia satelity na orbicie względem Ziemi (np. dzięki StarTracker, GNSS, wykorzystania laserów naziemnych) – systemy satelitarne wciąż posiadają jedno poważne ograniczenie, jakim są prawa fizyki. W przypadku niskich orbit (LEO) satelity muszą poruszać się z dużą prędkością po orbitach okołobiegunowych, by nie spaść na Ziemię. Satelity nie są więc w stanie zawisnąć nad określonym punktem terenowym w celu prowadzenia całodobowego monitoringu (np. płonącej rafinerii). Jedynie te znajdujące się na odległej orbicie geostacjonarnej (GEO), oddalonej o niemal 36 000 km od powierzchni Ziemi, mogą stale prowadzić obserwacje danego obiektu lub zjawiska. Przy takim umieszczeniu satelity nie można jednak spodziewać się rozdzielczości przestrzennej obrazowań na poziomie kilkudziesięciu centymetrów, czyli takich jakie obecnie oferują satelity komercyjne z orbit LEO (np. satelita WorldView-3 firmy Maxar w kanale PAN – 0,31 m GSD, czy indyjski satelita CartoSAT-3 – 0,25 m GSD). Aby uzyskać rozdzielczość 1,0 m GSD z orbity GEO, należałoby zbudować potężne obiektywy ze złożonymi systemami lusterek, co jest technicznie bardzo trudne do wykonania, nawet dla wysoko wyspecjalizowanych w tej dziedzinie konstruktorów.

Klasyfikacja systemów zdalnego obrazowania ze względu na ich rozdzielczość przestrzenną na bardzo wysokorozdzielcze (ang. *Very High Resolution*, VHR), wysokorozdzielcze (ang. *High Resolution*, HR) lub średniorozdzielcze (ang. *Medium Resolution*, MR) jest

bardzo subiektywna. W dużej mierze zależy ona od odbiorcy danych satelitarnych i jego potrzeb. W porównaniu do danych satelitów organizacji NOAA czy EUMETSAT (MetOp) o rozdzielczości przestrzennej 1 km GSD, jakimi na co dzień posługują się meteorolodzy, obrazy dostarczane przez satelitę agencji NASA – Landsat 8 (30 m GSD) mogą się wydawać obrazami wysokorozdzielczymi. Tymczasem, dla specjalistów z zakresu planowania przestrzennego czy geodezji, ta sama wielkość piksela – 30 m – jest często niewystarczająca ze względu na obowiązujące wytyczne techniczne lub przepisy prawa określające standardy techniczne wykorzystania danych do realizacji zadań publicznych. Istotą rzeczy dla wspomnianego meteorologa jest m.in. możliwość modelowania parametrów klimatu w skali globalnej z wykorzystaniem obrazów satelitarnych o rozmiarze piksela rzędu kilometra, pozyskiwanych co 15 minut z orbity GEO. Takich parametrów rozdzielczości czasowej nie mogą jeszcze zapewnić satelity na orbitach LEO, choć wkrótce ma się to zmienić dzięki planowanym nowym konstelacjom.

Niewątpliwie jednak dążenie do osiągnięcia jak najmniejszej wielkości piksela obrazu satelitarnego będzie postępowało i to nie tylko w sektorze obronności, ale także wśród komercyjnych dostawców danych, takich jak Maxar czy Airbus Defence and Space. Dla przykładu, zapowiadana na 2020 rok przez tę ostatnią firmę konstelacja Neo Pléiades, ma oferować wielospektralne zobrazowania satelitarne o rozdzielczości 0,30 m GSD. W ostatnim czasie pojawiły się także obrazy bazujące na wysokorozdzielczych obrazach WorldView-3 (Maxar; GSD 0,30 m), które po przetworzeniu specjalistycznymi algorytmami uzyskały piksel 0,15 m.

Zwiększanie rozdzielczości czasowej

Czas rewizyty satelity da się skrócić przez zastosowanie systemów optycznych zdalnie kierowanych na obiekt będący przedmiotem zainteresowania. W taki sposób wielu operatorów satelitarnych stara się uatrakcyjnić swoją ofertę proponując możliwość rejestracji obrazów systemem teleskopów odchylnym od pionu nawet o 30° (ang. *off-nadir*). Uchylenie systemu rejestrującego nawet o kilka stopni powoduje zwiększenie rozdzielczości czasowej, czyli daje możliwość częstszego obrazowania obszaru na Ziemi (skrócenia okresu ponownego przelotu z np. trzech do dwóch dni). Niemniej jednak skutkuje to obniżeniem dokładności i jednorodności geometrycznej zobrazowania. W pewnych sytuacjach, np. przy monitorowaniu pożarów lasów, kąt wychylenia kamery (sensora) i w konsekwencji uzyskane niższe parametry dokładnościowe, nie są aż tak istotne, jak w projektach wymagających większej precyzji określenia położenia obiektów, szczególnie obiektów wysokich na potrzeby wykonywania ortofotomap dla miast czy np. infrastruktury kolejowej.

Innym sposobem na zwiększenie rozdzielczości czasowej jest zwiększenie liczby bliźniaczych satelitów na tej samej orbicie. Jednym z pierwszych takich projektów była niemiecka konstelacja RapidEye (ryc. 7.1), działająca od 2009 do 2020 roku. Konstelację stanowiło pięć identycznych satelitów pozyskujących codziennie obrazy o rozdzielczości przestrzennej 5,0 m GSD w pięciu kanałach spektralnych. W satelitach RapidEye po raz pierwszy wykorzystano kanał czerwieni krawędziowej (ang. *RedEdge*).

W analogiczny sposób, w celu zmniejszenia czasu rewizyty z dziesięciu do pięciu dni, zastosowano konstelacje bliźniaczych satelitów (A i B) w rodzinie Sentinel (ESA).

Dominującym obecnie trendem, prowadzącym do osiągnięcia wysokiej rozdzielczości czasowej, jest tworzenie wielkich konstelacji, określanych często mianem chmar satelitów. Wymaga to jednak równomiernego rozmieszczenia na orbicie dziesią-



Ryc. 7.1. Konstelacja pięciu satelitów RapidEye na orbicie LEO
(źródło: Satimagingcorp, 2020; Image Copyright © BlackBridge)

tek i więcej nanosatelitów. Rozdzielczość czasowa satelitów w ujęciu historycznym wzrastała dość powoli, poczynając od 16 dni dla obrazów Landsat (NASA), przez kilka dni dla IKONOS-2 (Space Imaging), po codzienne rejestracje satelitów RapidEye lub PlanetScope Dove. Dziś zmierza ona do czterdziestokrotnej (lub nawet większej) częstotliwości obserwacji danego terenu każdego dnia z pokładów takich konstelacji, jak np. BlackSky (opisanej poniżej). Największy obecnie dostawca obrazów satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości, firma Maxar, poinformowała o rozpoczęciu projektu, którego celem jest zbudowanie wraz z Arabią Saudyjską konstelacji sześciu satelitów Scout. Rewizyty satelitów konstelacji nad danym obiektem zaplanowano na 30–40 razy dziennie, a rozdzielczość przestrzenna ma wynosić $< 0,9$ m GSD. Pozwoli to firmie Maxar na uzupełnienie oferty zobrazowań o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej (np. WorldView-3 0,3 m GSD), ale dla stosunkowo niewielkich obszarów (np. miasta), o zobrazowania o bardzo wysokiej rozdzielczości czasowej i nieco mniejszej, choć wciąż bardzo wysokiej, rozdzielczości przestrzennej. Flota satelitów Maxar będzie wymieniana od 2021 roku na nową konstelację satelitów o nazwie WorldView Legion, które zastąpią z czasem WorldView-2 oraz -3, a także uszkodzony WorldView-4, należące do grupy dużych satelitów ważących > 1000 kg. Przejściowo większa liczba aktywnych satelitów Maxar spowoduje skrócenie okresu między kolejnymi zobrazowaniami danego obszaru.

Do opracowania precyzyjnej prognozy pogody częstotliwość pozyskiwania danych pomiarowych, w tym satelitarnych, jest kluczowa. Numeryczne prognozy pogody wymagają ciągłych obliczeń z wykorzystaniem sztucznej inteligencji, zasilanych archiwalnymi i aktualnymi obserwacjami naziemnymi i satelitarnymi. Im częściej dane są pozyskiwane, tym większą zgodność z rzeczywistością zyskuje prognoza.

Niektóre obliczenia bazują na danych z satelitów meteorologicznych niskich orbit okołobiegunowych (np. NOAA AVHRR 15–19; MetOp A, B, C; Suomi-NPP czy MODIS Terra i Aqua) dostarczających obrazy np. dwa razy na dobę. Firma Airbus Defence and Space, konstruująca europejskie satelity MetOp, opracowuje już nową konstelację satelitów MetOp-SG, która od 2021 roku ma przyczynić się do poprawy numerycznego prognozowania pogody i wspomóc badania nad klimatem. Dwa bliźniacze satelity MetOp-SG A i B będą wykorzystywać aż dziesięć różnych instrumentów, działających w paśmie widma ultrafioletu (UV), światła widzialnego (VIS), podczerwonego (NIR oraz SWIR) oraz mikrofalowego (instrument ASCAT). Inne współczesne technologie satelitar-

ne służące do badania klimatu Ziemi wykorzystują orbity geostacjonarne GEO (NOAA GOES-E, -W; Meteosat 8–11; FY3), z których dane mogą być pozyskiwane co 15 minut.

Kolejne rozwiązanie stanowi oddalona od Ziemi o ponad 1,8 mln km stacja badawcza DSCOVR (Deep Space Climate Observatory) należąca do NOAA oraz NASA. Posiada ona możliwość, m.in. monitorowania warstw ozonu oraz wiatru słonecznego w czasie rzeczywistym, co ma kluczowe znaczenie dla systemów infrastruktury publicznej na powierzchni Ziemi (np. elektrowni, telekomunikacji, lotnictwa i systemów GNSS) oraz prawidłowej pracy innych satelitów.

Chmury satelitów

Przykładem największej w dziejach cywilizacji konstelacji satelitarnej jest PlanetScope Dove (firmy Planet Labs), którą tworzą nanosatelity typu CubeSat o rozmiarze 3U, tj. $30 \times 10 \times 10$ cm (ryc. 7.2). Początkowo satelity Dove (3,0 m GSD; cztery kanały spektralne RGB + NIR) dostarczane były na Międzynarodową Stację Kosmiczną (ISS) wraz z innymi transportami cargo i wystrzeliwane przez astronautów w zaplanowanym terminie z zacumowanego do ISS kontenera. Oczywiście w sytuacji specyficznej inklinacji ($51,6^\circ$) orbity ISS nie było możliwości umieszczenia nanosatelitów Dove na docelowych dwóch orbitach okołobiegunowych, ale rozwiązanie to pozwoliło przetestować możliwości operacyjne systemu. Na orbitach umieszczono już łącznie powyżej 400 nanosatelitów Dove. Obecnie konstelacja tworzona jest przez ponad 150 sprawnych nanosatelitów wykonujących co półtorej sekundy zdjęcia w czterech kanałach spektralnych (RGB + NIR) z dwóch niskich orbit (550 km nad Ziemią). Nanosatelity codziennie rejestrują terytorium wszystkich kontynentów Ziemi. Dla każdego miejsca na lądzie zgromadzono od 2016 roku co najmniej 800 obrazów. Eksploracja takiego zasobu jest niewątpliwie wyzwaniem dla analityków w zakresie rozwoju metod automatycznej klasyfikacji obrazów z wykorzystaniem sieci neuronowych i innych algorytmów uczenia maszynowego na ogromnych zbiorach danych.



Ryc. 7.2. Nanosatelita PlanetScope Dove (pol. Gołębica) o wymiarach $30 \times 10 \times 10$ cm (tzw. 3U CubeSat; fot. P. Wężyk)

Firma BlackSky (Spaceflight Inc.) zamierza uruchomić konstelację 60 satelitów pozyskujących codziennie od 40 do 70 obrazowań tego samego obszaru. Rozdzielczość przestrzenna tych satelitów ma wynosić $< 1,0$ m GSD. Testy z wykorzystaniem 44-kilo-

gramowych satelitów Pathfinder-1 oraz -2 zostały już przeprowadzone. Pełna konstelacja BlackSky ma zapewnić rewizytę satelitów co około 18 minut dla terenów położonych na szerokościach geograficznych USA, Europy i północnych Chin (ryc. 7.3). Planuje się umieszczanie na orbitach od 18 do 20 satelitów rocznie, więc stworzenie pełnej konstelacji BlackSky zajmie około trzech lat.



Ryc. 7.3. Planowane trajektorie przelotów konstelacji satelitów BlackSky (źródło: Nasini i Oddone, 2018)

Maxar, jeden z największych operatorów wysokorozdzielczych systemów teledetekcyjnych, zapowiada stworzenie systemu Legion (wymiana istniejącej floty: WorldView-1, -2 oraz -3) oraz wprowadzenie nowej konstelacji Scout, kilkudziesięciu satelitów (rozdzielczość terenowa około 0,8 m GSD) służących do obserwacji dużych portów i miast z częstotliwością 30–40 razy dziennie.

Najbardziej znana obecnie konstelacja satelitów telekomunikacyjnych Starlink (SpaceX, Elon Musk), składa się (od 18 sierpnia 2020 roku) z ponad 600 satelitów, które wkrótce stworzą chmurę 4400 jednostek (etap I) (ryc. 7.4). Wyniki pierwszych testów prędkości (SpeedTest, Ookla) wykazały, że prędkość pobierania łącza internetowego Starlink wahała się w zakresie od 35 Mbps do 60 Mbps, a wysyłania danych oscylowała w granicach od 4,6 Mbps do 17,7 Mbps (przy konstelacji zaledwie 597 z 12 000 docelowych satelitów w 2027 roku).



Ryc. 7.4. Chmura satelitów Starlink (SpaceX) umieszczona w rakiecie nośnej (źródło: SpaceX, 2020)

Firma OneWeb (jedyne konkurent firmy Space-X i jej konstelacji), miała stworzyć globalny Internet za pomocą konstelacji 700 satelitów, jednak w końcu marca 2020 roku ogłosiła swą upadłość.

Dynamicznie rozwija się także branża raket nośnych, szczególnie w sektorze firm prywatnych. Rakiety są niezbędne by szybko i tanio umieszczać chmury nanosatelitów na orbicie. W niedalekiej przeszłości, firma OneWeb planowała wykorzystywać rakiety Launcher One (Virgin Galactic) w celu zastąpienia uszkodzonych satelitów na orbicie nowymi egzemplarzami. Start tych raket odbywał się w nietypowy sposób – były one bowiem wynoszone w powietrze pod skrzydłem samolotu Boeing 747 i uruchamiane po ich odłączeniu od statku powietrznego.

Firma Planet Labs planuje podczas kolejnych trzech startów, wynieść kolejne nanosatelity PlanetScope (3U) na orbitę LEO wykorzystując innowacyjne rozwiązanie firmy Rocket Labs (Nowa Zelandia), polegające na użyciu raket Electron, których silniki pracują dzięki pompom elektrycznym. Z kolei firma SpaceX, w celu obniżenia kosztów wyniesienia wykorzystuje ponownie człony rakiety Falcon 9, po ich powrocie na Ziemię (autonomiczne lądowanie na platformach pływających). W Europie, stosunkowo niedawno, bo w 2012 roku, wprowadzono raketę nośną Vega (ESA), na paliwo stałe, w celu umieszczania na orbicie LEO stosunkowo niewielkich satelitów, takich jak Pléiades, Sentinel-2B czy PW-Sat1.

Postępujący rozwój branży telekomunikacyjnej w sektorze kosmicznym, a także innowacyjny postęp w obszarze środków wynoszenia satelitów na orbitę, wywierają istotny wpływ na systemy satelitarnej obserwacji Ziemi, stwarzając nowe możliwości w zakresie m.in. zwiększenia częstotliwości obrazowania, przyspieszenia transmisji danych i ich udostępniania w skali globalnej.

Zwiększanie rozdzielczości spektralnej

Nie wszystkich odbiorców danych satelitarnych zadowolają zobrazowania satelitarne zarejestrowane standardowo w czterech kanałach spektralnych (RGB oraz NIR). Badania naukowe prowadzone w zakresie ochrony środowiska, z wykorzystaniem danych satelitarnych, opierają się na wykorzystaniu wielu niestandardowych zakresów spektrum. Jednocześnie wśród użytkowników rośnie świadomość możliwości technologicznych w zakresie pozyskania i przetwarzania danych satelitarnych. Jednym ze współczesnych wyzwań ludzkości jest zapewnienie zrównoważonej produkcji rolniczej przy gwałtownie rosnącej liczbie ludności na naszej planecie. Jednym z rozwiązań tego problemu może być rolnictwo precyzyjne, które do oceny kondycji upraw, przewidywania wysokości plonu lub określenia ryzyka jego utraty wymaga stosowania zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji w procesie przetwarzania tysięcy scen satelitarnych.

Na orbitach okołoziemskich znajduje się obecnie kilka platform rejestrujących zobrazowania w kilku lub kilkunastu zakresach spektralnych. Zaliczyć do nich można takie satelity jak Sentinel-2 (13 kanałów spektralnych), czy WorldView-3 (8 kanałów spektralnych + 8 SWIR + 12 CAVIS (Clouds, Aerosols, Vapors, Ice, & Snow)). Nanosatelity PlanetScope SuperDove obrazują w ośmiu zakresach spektralnych, a już wkrótce w nowej konstelacji liczba rejestrowanych kanałów wzrośnie do 13 i będą one identyczne jak w instrumencie Sentinel-2. Firma Airbus Defence and Space zapowiada rozpoczęcie w 2020 roku umieszczania na orbicie satelitów Neo Pléiades charakteryzujących się bardzo wysoką rozdzielczością przestrzenną 0,30 m GSD w kanale panchromatycznym oraz aż sześcioma kanałami spektralnymi.

W latach 2000–2017 na orbicie funkcjonował satelita Hyperion (EO-1, NASA), który posiadał aż 220 kanałów spektralnych przy rozdzielczości przestrzennej 30 m GSD, obrazując powierzchnię Ziemi co około 16–30 dni. W niedalekiej przyszłości planowane jest uruchomienie wielu misji hiperspektralnych. Przykładowo satelita EnMap (GFZ-DLR) wyposażony będzie w skaner rejestrujący w 244 kanałach spektralnych z rozdzielczością przestrzenną 30 m GSD. Innym przykładem misji obrazowania hiperspektralnego jest budowany satelita SHALOM (Izrael). Będzie on rejestrował promieniowanie aż w 277 kanałach spektralnych (10 m GSD). W lipcu 2020 roku ESA podpisała kontrakt z firmą Thales Alenia Space, jako głównym wykonawcą budowy satelity CHIME (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment), inaczej nazywanym Sentinel 10. Jest to misja obserwacji Ziemi w ramach programu Copernicus, której celem będzie pozyskiwanie danych hiperspektralnych głównie z myślą o rolnictwie i badaniach środowiska.

Satelita CHIME należy obok misji CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer), CO2M (Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring), CRISTAL (Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter), LSTM (Copernicus Land Surface Temperature Monitoring) oraz ROSE-L (L-band Synthetic Aperture Radar) do tzw. misji wysokiego priorytetu (ang. *High-Priority Candidate Missions*, HPCM). Każda z nich obejmuje zaprojektowanie i budowę dwóch satelitów – podstawowego oraz jego następcy. Szacowany koszt budowy nowych satelitów Sentinel wynosi 2,55 mld euro.

Ilość danych, jaka ma być rejestrowana przez sensory nowych generacji satelitów może być więc nie lada wyzwaniem dla użytkownika. Z drugiej strony, mogą one pozwolić na lepsze poznanie zjawisk zachodzących na powierzchni Ziemi i w atmosferze.

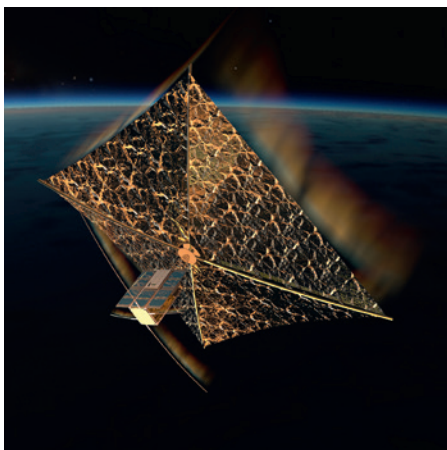
Miniaturyzacja

Im mniejsze i lżejsze są satelity, tym więcej można ich wysłać na orbitę podczas jednego startu rakiety. Nie bez znaczenia jest również ich los po zakończeniu misji. Im są mniejsze, tym łatwiej ulegają spaleniowi w atmosferze, jednak ze względu na bardzo niewielką wagę możliwości sterowania nimi są niewielkie. Dobrym przykładem nanosatelitów są naukowe prototypy CubeSat wykonywane wspólnie przez polskich studentów często przy współpracy z CBK-PAN oraz wybranymi polskimi firmami. Należą do nich nanosatelity PW-Sat (o rozmiarze 1U) oraz PW-Sat2 (2U) z innowacyjnym żaglem deorbitacyjnym (ryc. 7.5), który w przyszłości może przyczynić się do rozwiązania problemu rosnącej ilości śmieci kosmicznych. Obydwa satelity zaprojektowane i stworzone zostały przez studentów Politechniki Warszawskiej. Innym przykładem jest nanosatelita KRAKSat stworzony przez studentów Uniwersytetu Jagiellońskiego i Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie we współpracy z firmą SatRevolution. Inne polskie konstrukcje to: Światowid (SatRevolution 2U, waga około 2 kg), Heweliusz oraz Lem (waga 6 kg). Wśród małych satelitów wyróżnia się również: mikrosatelity (10–100 kg) oraz mniejsze od nanosatelitów picosatelity (0,1–1,0 kg) oraz femtosatelity (< 100 g).

Do mikrosatelitów możemy zaliczyć flotę SkySat (wcześniejsza nazwa: TerraBella SkyBox). Obecnie na orbicie znajduje się 13 satelitów SkySat, które dostarczają obrazy o rozdzielczości 0,72 m GSD w zakresie PAN oraz w czterech kanałach spektralnych RGB i NIR. Kamery na satelitach SkySat mają możliwość rejestracji poklatkowej obiektu i wykonywania filmów o długości do kilkudziesięciu sekund z kompensacją ruchu satelity, dzięki czemu nie następuje rozmazanie obrazu. Koncepcja połączenia konstelacji o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej (SkySat) z satelitami o wysokiej rozdzielczości

(PlanetScope Dove) firmy Planet Labs nie jest jedynym takim projektem. Podobne przedsięwzięcie realizuje firma Maxar (Legion oraz Scout).

Do mikrosatelitów, ze względu na wagę, zalicza się również statki kosmiczne ICEYE-X2 (ryc. 7.6), czyli innowacyjne wysokorozdzielcze satelity mikrofalowe polsko-fińskiej spółki.



Ryc. 7.5. Wizualizacja nanosatellity PW-Sat2 (Politechnika Warszawska) z żaglem deorbitacyjnym (źródło: PW-Sat2, 2018)



Ryc. 7.6. Mikrofalowy satelita ICEYE-X2 (źródło: ICEYE, 2020)

Inną zapowiadaną konstelacją jest konstelacja 16 satelitów OptiSAR z sensorami wielospektralnymi (wysoko- i średniorozdzielczymi) oraz mikrofalowymi do codziennego obrazowania Ziemi firmy UrtheCast, która specjalizuje się w analizie obrazów dla potrzeb rolnictwa w skali światowej.

Na rynku operatorów satelitów mikrofalowych w roku 2020 zadebiutowała też amerykańska firma Capella Space, umieszczając na orbicie LEO pierwszego (Sequoia) z 36 zapowiadanych statków z sensorem SAR (Synthetic Aperture Radar). Duża ilość satelitów na orbicie ma zapewnić obrazowanie niemal w czasie rzeczywistym (co około 30 min) z rozdzielczością przestrzenną 0,50 m GSD.

Niewątpliwie obecny trend panujący w konstrukcji satelitów, polegający na zmniejszaniu ich rozmiarów (łącznie z panelami słonecznymi), miniaturyzacji instrumentów, elektroniki, nośników pamięci i innych elementów zostanie utrzymany w następnych latach. Miniaturyzacja przynosi bowiem znacznie większe możliwości operacyjne chmur nanosatelitów w stosunku do pojedynczych wielotonowych obiektów. Przede wszystkim jednak to koszty i czas ich budowy będą decydowały o konkurencyjności tych innowacyjnych rozwiązań w stosunku do sprawdzonych w przeszłości dużych satelitów (np. WorldView-2 firmy Maxar). Miniaturyzacja nie spowoduje jednak, że przestaną być produkowane duże satelity, które pod wieloma względami są nie do zastąpienia (np. możliwość sterowania, pozyskiwanie obrazów o bardzo wysokiej rozdzielczości, wieloletni cykl życia na orbicie). Jednocześnie miniaturyzacja jest szansą dla wielu innowacyjnych firm typu startup, które nie posiadają potencjału wielkich korporacji czy agencji kosmicznych, ale przy istniejącej ofercie usług umieszczania na orbicie satelitów (np. firmy SpaceX) są w stanie realizować swoje pomysły przyczyniając się do rozwoju branży kosmicznej i szybko reagować na bieżące potrzeby użytkowników.

Pseudosatelity

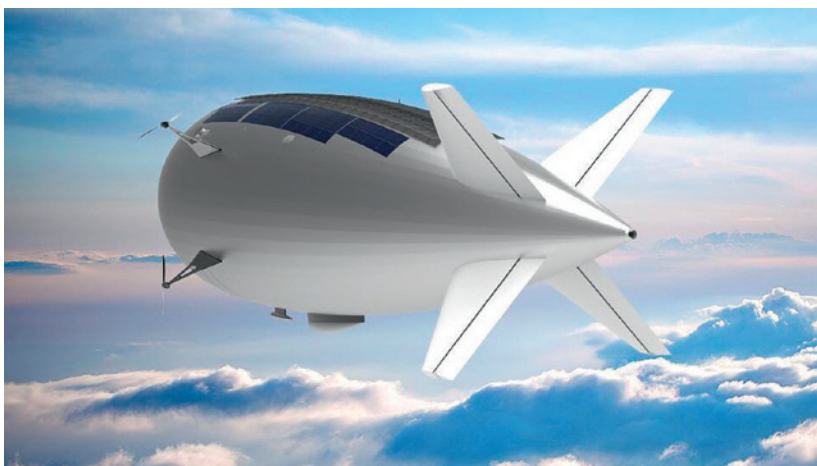
Obecnie kilka firm opracowuje bezzałogowe platformy latające, które mogą pozostawać na dużych wysokościach rzędu 20–100 km przez wiele tygodni czy miesięcy. Są one nazywane pseudosatelitami dużych wysokości (ang. *High Altitude Pseudo-Satellite*, HAPS) i najczęściej przybierają one formy:

- bezzałogowych statków słonecznych – zasilanych energią słoneczną, które mogą pozostawać w powietrzu przez miesiąc, krążąc wokół tego samego miejsca (projekt Helios NASA). Drony słoneczne zyskały na nowo popularność, m.in. dzięki projektowi Aquila, którego celem było zapewnienie łączności z Internetem w odległych miejscach świata. Jednym z najbardziej zaawansowanych obecnie projektów jest budowa i eksploatacja drona Zephyr S (Airbus Defence and Space) o masie około 75 kg, rozpiętości skrzydeł 25 m i możliwości transportu ładunków do 12 kg na wysokość 20 km (ryc. 7.7). Rekord długości lotu drona wynoszący 25 dni, ustanowiony został w 2018 roku. Firma Airbus Defence and Space opracowuje obecnie większą wersję pseudosatelity pod nazwą Zephyr T.



Ryc. 7.7. Pseudosatelita Zephyr-S HAPS napędzany energią słoneczną (źródło: Airbus, 2020)

- balonów stratosferycznych – przykładem takiego rozwiązania może być projekt Loon (Google), którego zadaniem jest udostępnianie sieci internetowej w rejonach nieposiadających odpowiedniej naziemnej infrastruktury (np. Amazonia). Pseudosatelity tego rodzaju utrzymują się w powietrzu przez wiele miesięcy. Nie posiadają one typowego napędu w postaci śmigieł, a sterowanie nimi odbywa się na zasadzie wypełniania ich wnętrza (drugiego balonu) powietrzem cięższym od gazu znajdującym się w balonie głównym, czyli przez zmiany jego kształtu i ciężaru. W ten sposób balony HAPS zmieniają wysokość by wykorzystywać wiatry, które mają przemieszczać je we właściwych kierunkach. Innym przykładem tego typu statku powietrznego jest przypominający sterowiec Stratobus firmy Thales Alenia Space (ryc. 7.8), o długości 115 m i szerokości 34 m. Może on przetransportować ładunki (w tym sensory i nadajniki) o wadze do 250 kg. Stratobus napędzany jest energią słoneczną (moc paneli fotowoltaicznych wynosi 5kW).



Ryc. 7.8. Pseudosatelita Stratobus (źródło: Thales Group, 2015)

Analityka danych teledetekcyjnych

Przyszłość sektora kosmicznego w obszarze obserwacji Ziemi nie zależy wyłącznie od rozwoju i aktywności firm, które konstruują satelity (segment kosmiczny), ale również od podmiotów oferujących zaawansowaną analitykę danych teledetekcyjnych.

Analityka danych (ang. *data science*) to nowa dziedzina wywodząca się z analizy statystycznej i eksploracji danych. Analityka danych to złożone działania, wymagające przeprowadzenia analizy biznesowej w celu zdefiniowania problemu, doboru i przygotowania danych oraz zapewnienia do nich dostępu, opracowania rozwiązania informatycznego i nadzoru nad bazowymi procesami i architekturą, opracowania i wdrożenia modeli i analiz w aplikacjach i produktach. Dane pochodzące z teledetekcyjnej obserwacji Ziemi są bardzo różnorodne (sensory), pozyskiwane różnymi systemami z różnych pułapów. Wspólne wykorzystanie tych danych, ich analiza i interpretacja, a także włączenie do analizy danych o innym pochodzeniu (np. statystyczne, społeczne) daje szansę na pozyskanie unikalnej informacji o zjawiskach, procesach i obiektach oraz trendach przy analizach wieloczasowych. Zaawansowana analiza danych wiąże się z wykorzystaniem technik *Big Data*, sztucznej inteligencji w tym uczenia maszynowego, Internetu rzeczy, nowoczesnych języków programowania, metod statystycznych itp.

Wiele organizacji wykorzystuje analitykę danych do budowania przewagi konkurencyjnej wynikającej z doskonalenia produktów i usług. W ostatnim czasie wiodące firmy komercyjne zajmujące się obserwacją Ziemi, dostrzegając potencjał informacyjny danych satelitarnych, poszerzyły swoją ofertę o usługi związane z analizą danych dla potrzeb rolnictwa, leśnictwa, obronności, gospodarki przestrzennej i innych gałęzi gospodarki oraz obszarów życia społecznego. Obserwujemy zatem gwałtowny rozwój rynku danych, produktów i usług coraz częściej odpowiadających wprost na konkretne potrzeby użytkowników, a także odnoszących się do globalnych, współczesnych wyzwań. W tym samym czasie rośnie liczba punktów dostępowych do gromadzonych archiwów danych oraz zwiększa się liczba oferowanych aplikacji wykorzystujących różne metodyki przetwarzania geodanych. Co więcej, podejmowane są pierwsze próby realizacji obliczeń bezpośrednio na orbicie – na pokładzie satelitów, z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji. We wrześniu 2020 roku Europejska Agencja Kosmiczna wyniosła na orbitę nanosatelitę, za pomocą którego zostanie przetestowana metodyka mająca na celu selekcję pozyskiwanych obrazów pod kątem stopnia zachmurzenia. W wyniku tej analizy na Ziemię będą transferowane wyłącznie te zobrazowania, które zachowują zdefiniowane parametry techniczne, w tym dopuszczalny poziom zachmurzenia. Nowe rozwiązania technologiczne testowane w związku z wprowadzaniem na orbitę chmar satelitów telekomunikacyjnych (Starlink, SpaceX) przyczynią się w przyszłości również do przyspieszenia transferu danych obrazowych do stacji naziemnych, a co za tym idzie, skrócenia znacząco czasu oczekiwania użytkownika na produkt. Jednym z rozwiązań przyspieszających wytworzenie produktu końcowego (np. mapy pokrycia terenu) może być innowacyjne rozwiązanie planowane do implementacji na nanosatelitach REC (SatRevolution). Polega ono na wykonywaniu procesu klasyfikacji obrazu z wykorzystaniem uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji bezpośrednio w samym nanosatelicie jeszcze na orbicie Ziemi.

Epilog

Rozwój technologii kosmicznych oraz systemów obserwacji Ziemi, jeszcze w stonkowo niedalekiej przeszłości był determinowany głównie wyścigiem zbrojeń, a jeszcze wcześniej działaniami wojennymi. Współcześnie, to jednak globalne problemy ludzkości stają się impulsem do poszukiwań nowych rozwiązań technologicznych. Skutki zmian klimatu, wzrastające zanieczyszczenie środowiska, znaczny przyrost ludności w wielu rejonach świata i inne procesy prowadzące do pogorszenia jakości życia lub wzrostu zagrożenia egzystencji i zdrowia ludzi, często wynikające z sytuacji kryzysowych, lub jak ostatnio powodowanych pandemią wirusa SARS-CoV-2 – paradoksalnie wpływają na przyspieszenie rozwoju technologii kosmicznych i metod pozyskiwania danych o środowisku Ziemi. Techniki satelitarne, a także metody zaawansowanego przetwarzania oraz analityki ogromnych ilości różnorodnych zbiorów danych (w tym obrazowych i meteorologicznych), przyczyniają się bowiem do lepszego zrozumienia zachodzących zjawisk i procesów oraz ich skutecznego monitorowania, rejestrowania i prognozowania.

Dobrym przykładem polityki wychodzącej naprzeciw tym wyzwaniom jest nowy program „Destination Earth” (DestinE), którego implementacja, przy dużej synergii z programem kosmicznym czy projektami Horizon Europe, planowana jest przez Komisję Europejską już od 2021 roku. Celem tego programu jest opracowanie precyzyjnego cyfrowego modelu zjawisk zachodzących na Ziemi do monitorowania i stymulowania naturalnych zjawisk i czynników antropogenicznych oraz przygotowanie i przetestowanie scenariuszy, umożliwiających zrównoważony rozwój ludzkości, przy zapewnieniu wsparcia europejskiej polityki środowiskowej. Program DestinE stanowi wkład w takie inicjatywy jak: Strategia Cyfrowa (ang. *Digital Strategy*) oraz Europejski Zielony Ład (ang. *Green Deal*).

W skali globalnej efektem programu będzie uwolnienie potencjału cyfrowego modelowania fizycznych zasobów Ziemi oraz powiązanych z nimi zjawisk, takich jak: zmiany klimatu, wodne/morskie środowisko, obszary polarne, kriosfera itp., co ma przyspieszyć „zieloną transformację” i wesprzeć inicjatywy zapobiegania dalszej degradacji środowiska czy katastrof środowiskowych. Program jest kluczowym komponentem polityki europejskiej w zakresie otwartych danych publicznych (ang. *European Strategy for Data*). Inicjatywa DestinE będzie przede wszystkim otwarta na świadczenie usług dla administracji publicznej krajów członkowskich UE. Stopniowo jednak użytkownikami zgromadzonych zasobów staną się też naukowcy oraz przedsiębiorcy. Zasoby danych gromadzone metodami teledetekcyjnymi, w tym obserwacje i produkty satelitarne będą stanowiły wkład w budowę cyfrowego modelu Ziemi.

Eksploatacja kosmosu, ukierunkowana na jego wykorzystanie przez mieszkańców Ziemi, staje się obecnie powszechna. Coraz więcej krajów na całym świecie uczestniczy w przedsięwzięciach mających na celu obserwację Ziemi i badanie przestrzeni kosmicznej. Poza coraz wnikliwszą analizą zjawisk zachodzących na Ziemi i w przestrzeni kosmicznej oraz przekraczaniem granic poznania otaczającej nas rzeczywistości, coraz bardziej realne stają się powszechne kosmiczne loty turystyczne, eksploatacja innych planet Układu Słonecznego, a w tym ich kolonizacja lub eksploatacja zasobów naturalnych. Osiągnięcie tak ambitnych celów jakie stawiają przed sobą rządy poszczególnych państw, operatorzy systemów satelitarnych i prywatni inwestorzy, staje się możliwe do zrealizowania dzięki szerokiej, międzynarodowej współpracy, zaangażowaniu naukowców, przedsiębiorców oraz zainteresowaniu obywateli.

Lektura podręcznika, przygotowanego przez interdyscyplinarny zespół ekspertów, umożliwi czytelnikowi zdobycie rzetelnych podstaw teoretycznych w zakresie satelitarnych obserwacji Ziemi, stanowiąc jednocześnie kompendium aktualnej wiedzy nt. dostępności danych teledetekcyjnych oraz ich praktycznych zastosowań w różnych dziedzinach administracji, gospodarki czy nauki. Zgromadzona w tej książce gruntowna wiedza teledetekcyjna, stwarza polskiej administracji publicznej możliwość realnego włączenia się w nurt światowych i ogólnoeuropejskich inicjatyw realizowanych pod hasłem „*myśl globalnie – działaj lokalnie*” (ang. *Think global, act local*).

Wyrażenie to jest używane w kontekście wyzwań środowiskowych, więc jeśli czytelnik–decydent, pragnie dokonać mądrych zmian i ulepszeń służących środowisku, a nie może lub nie chce dłużej czekać na wprowadzenie globalnego prawodawstwa i związanych z nim konkretnych działań, to najlepszym rozwiązaniem będzie dokonanie zmian na poziomie lokalnym, w jego bezpośrednim otoczeniu. Działania lokalne bowiem, zaczynają rozwiązywać to, co zwykle postrzegamy jako problem globalny.

Świadomość wykorzystania ogromnego potencjału informacyjnego zgromadzonego w obrazach i danych teledetekcyjnych, zwiększy z całą pewnością efektywność prac prowadzonych przez administrację publiczną na rzecz zrównoważonego zarządzania środowiskiem, przywracania lub podnoszenia komfortu życia oraz bezpieczeństwa obywateli planety Ziemia.

Tabela zbiorcza parametrów wybranych satelitów optycznych

Nazwa systemu	Właściciel	Orbita	Wysokość orbity [km]	Rok umieszczenia na orbicie	Rok zakończenia pracy (stan na XII 2020 r.)	Rodzicielstwo przestrzenne (PAN/MS)	Rodzicielstwo spektralne	Rodzicielstwo czasowe	Liczba satelitów w konstelacji
Systemy o niskiej rozdzielczości przestrzennej (GSD > 100 m)									
GOES (1 st Gen., 2 nd Gen., GOES-R (3 rd Gen.))	NOAA/NASA	GEO	35786	1975/ 2009/ 2015	nadal funkcjonuje	500 m (GOES-R 3 rd Gen.), /1 km (2 nd Gen.)	16 (GOES-R 3 rd Gen.) / 6 (GOES 2 nd Gen.)	15 minut	8
Meteosat	EUMETSAT	GEO	35786	1977	nadal funkcjonuje	1-3 km	HRV + 2 VIS + 2 IR + 2 WV + 2 NIR + 3 TIR	15 minut	4
MetOp	ESA/ EUMETSAT	SSO/LEO	827	2006	nadal funkcjonuje	1,1 km	VIS + NIR + SWIR + MIR + 2 TIR	1 dzień	3
Terra, Aqua (MODIS)	NASA	SSO/LEO	705	2000	nadal funkcjonuje	250 m – 1 km	2 CA + 15 MS + Cirrus + 2 SWIR + 5 MWIR + 2 WV + 9 TIR	16 dni	2
NOAA (15-, 18-, 19-, 20-)	NOAA	SSO/LEO	821-869	1979	nadal funkcjonuje	1,1 km	6 VIS + NIR + IR	15 minut	4
Sentinel-5P	ESA	SSO/LEO	824	2017	nadal funkcjonuje	5,5 km	2 UV + 2 VIS + 2 NIR + 2 SWIR	1 dzień	1
Suomi-NPP	NOAA/NASA	SSO/LEO	824	2011	nadal funkcjonuje	750 m	10 VNIR + 5 SWIR + 3 MIR + 3 TIR (VIIRS)	4 dni	1
Systemy o średniej rozdzielczości przestrzennej (GSD 10 – 100 m)									
ASTER	NASA	SSO/LEO	705	1999	nadal funkcjonuje	15 m VNIR / 30 m SWIR / 90 m TIR	4 VNIR + 6 SWIR + 5 TIR	16 dni	1
CBERS 4A	CRESDA, INPE	SSO/LEO	778	2014	nadal funkcjonuje	14 m MS / 55 m WFI	MS (MUX) / WFI	31 dni/ 5 dni	1
Gaofen-5	CNSA	SSO/LEO	705	2018	nadal funkcjonuje	30 m HS	HS	5 dni	1
HuanJing-1A/B	CNSA	SSO/LEO	650	2018	nadal funkcjonuje	30 m MS / 100 m HS	4 MS / 115 HS	4 dni	2
Landsat 1	NASA	SSO/LEO	917	1972	1978	60 m MSS / 80 m RBV	4 MSS + 3 RBV	18 dni	1
Landsat 2	NASA	SSO/LEO	900	1975	1982	60 m MSS / 80 m RBV	4 MSS + 3 RBV	18 dni	1

Landsat 3	NASA	SSO/LEO	917	1978	1983	40 m PAN / 80 m MSS	PAN + 4 MSS	18 dni	1
Landsat 4	NASA	SSO/LEO	705	1982	1993	30-80 m MS / 120 m TIR	6 MS + 1 TIR	16 dni	1
Landsat 5	NASA	SSO/LEO	705	1984	2013	30-80 m MS / 120 m TIR	6 MS + 1 TIR	16 dni	1
Landsat 7	NASA	SSO/LEO	705	1999	uszkodzony od 2003	15 m PAN / 30 m MS / 60 TIR	PAN + 4 MS + 2 SWIR + 1 TIR	16 dni	1
Landsat 8	NASA	SSO/LEO	705	2013	nadal funkcjonuje	15 m PAN / 30 m MS / 100 TIR	PAN + Coastal + 4 MS + 2 SWIR + 2 TIR + Cirrus	16 dni	1
Sentinel-2	ESA	SSO/LEO	786	2015/ 2017	nadal funkcjonuje	10 m MS / 20 m RE, SWIR / 60 m pozostałe	CA + 4 MS + 4 RE + WV + 3 SWIR	2-10 dni	2
Sentinel-3	ESA	SSO/LEO	814	2016/ 2018	nadal funkcjonuje	300 m OLCI / 500 m VIS, SWIR SLSTR / 1000 m MWIR, TIR SLSTR	21 MS OLCI / 9 MS SLSTR	27 dni	2
SPOT-1	CNES	SSO/LEO	832	1986	2003	10 m PAN / 20 m MS	PAN + 3 MS	1-3 dni	1
SPOT-2	CNES	SSO/LEO	832	1990	2009	10 m PAN / 20 m MS	PAN + 3 MS	1-3 dni	1
SPOT-3	CNES	SSO/LEO	832	1993	1996	10 m PAN / 20 m MS	PAN + 3 MS	1-3 dni	1
SPOT-4	CNES	SSO/LEO	832	1998	2013	10 m PAN / 20 m MS	PAN + 3 MS + SWIR	5 dni	1

Systemy o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (HRS, GSD 1 – 10 m)

CARTOSAT-1	ISRO	SSO/LEO	617	2005	nadal funkcjonuje	2,5 m PAN	PAN	5 dni	1
EROS-A	ISI	SSO/LEO	530	2000	2016	1,9 m PAN	PAN	4,5 dnia	1
Gaofen-1	CNSA	SSO/LEO	645	2013	nadal funkcjonuje	2,0 m PAN / 8,0 m MS	PAN + 4 MS	1 dzień	4
Gaofen-6	CNSA	SSO/LEO	634	2018	nadal funkcjonuje	2,0 m PAN / 8,0 m MS / 16 m RE	PAN + 4 MS + 2 RE	4 dni	1
PlanetScope Dove	Planet Labs	SSO/LEO	475	2016	nadal funkcjonuje	3,0 m MS	4 MS	1 dzień	> 140
RapidEye	RapidEye/ Planet Labs	SSO/LEO	630	2008	2020	5,0 m MS	5 MS	5,5 dnia	5
SPOT-5	CNES	SSO/LEO	832	2002	2015	2,5 oraz 5,0 m PAN / 10 m MS / 20 m SWIR	PAN + 3 MS + SWIR	2-3 dni	1
SPOT-6	CNES	SSO/LEO	694	2012	nadal funkcjonuje	1,5 m PAN / 6,0 m MS	PAN + 4 MS	1 dzień	1
SPOT-7	CNES	SSO/LEO	694	2014	nadal funkcjonuje	1,5 m PAN / 6,0 m MS	PAN + 4 MS	1 dzień	1
ZiYuan-3 01/02	CNSA	SSO/LEO	509	2012/ 2016	nadal funkcjonuje	2,1 PAN / 5,8 m MS	PAN + 4 MS	5 dni	2

Tabela zbiorcza parametrów wybranych satelitów optycznych – cd.

Nazwa systemu	Właściciel	Orbita	Wysokość orbity [km]	Rok umieszczenia na orbicie	Rok zakończenia pracy (stan na XII 2020 r.)	Rodzicielstwo przestrzenne GSD NADIR (PAN/MS)	Rodzicielstwo spektralna	Rodzicielstwo czasowa	Liczba satelitów w konstelacji
Systemy bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej (VHRS, GSD < 1 m)									
Aleph-1	Satellologic	SSO/LEO	480x498	2016	nadal funkcjonuje	0,9 m PAN / 0,9 m MS / 30 m HS / 90 m TIR	PAN + 4 MS + 600 HS + TIR	1,2 godz./ 15 min./ 5 min.	25/100/ 300 docelowo
BlackSky Global	BlackSky	SSO/LEO	555	2018	nadal funkcjonuje	0,7 m PAN / 0,7 VIS	PAN + VIS (NIR 2022)	10-15 min. docelowo	8/60 docelowo
CARTOSAT-2A, CARTOSAT-2B	ISRO	SSO/LEO	635	2008/ 2010	nadal funkcjonuje	0,8 m PAN	PAN	4 dni	2
CARTOSAT-2C	ISRO	SSO/LEO	519	2016	nadal funkcjonuje	0,6 m PAN	PAN	bd.	1
CARTOSAT-2D, – 2E, – 2F	ISRO	SSO/LEO	505	2017/ 2018	nadal funkcjonuje	0,6 m PAN / 2,0 m MS	PAN + 4 MS	4-7 dni	3
CARTOSAT-3	ISRO	SSO/LEO	509	2019	nadal funkcjonuje	0,25 m PAN / 1,3 m MS / 12 m HS	PAN + 4 MS / HS	bd.	1
EROS-B	ISI	SSO/LEO	530	2006	nadal funkcjonuje	0,65 m PAN	PAN	5-6 dni	1
EROS-C	ISI	SSO/LEO	510	2019	nadal funkcjonuje	0,38 m PAN / 0,76 m MS	PAN + 4 MS	bd.	1
Gaofen-2	CNSA	SSO/LEO	631	2014	nadal funkcjonuje	0,8 m PAN / 3,2 m MS	PAN + 4 MS	5 dni	1
Gaofen-7	CNSA	SSO/LEO	500	2019	nadal funkcjonuje	0,65 m PAN / 2,6 m MS	PAN + 4 MS	5 dni	1
GeoEye-1	GeoEye/ Maxar	SSO/LEO	681	2008	nadal funkcjonuje	0,41 m PAN / 1,65 m MS	PAN + 4 MS	1-3 dni	1
IKONOS-2	Spacelma- ging/Maxar	SSO/LEO	682	1999	2014	0,82 m PAN / 3,2 m MS	PAN + 4 MS	1-3 dni	1
Jilin-1	CNSA	SSO/LEO	535	2015	nadal funkcjonuje	0,5-0,92 m PAN / 2,8-4,2 m MS	PAN + 4 MS	2 razy dziennie	10

KOMPSAT-2	SI Imaging Services	SSO/LEO	685	2006	nadal funkcjonuje	1,0 m PAN / 4,0 m MS	PAN + 4 MS	3,5 dnia	1
KOMPSAT-3	SI Imaging Services	SSO/LEO	685	2012	nadal funkcjonuje	0,7 m PAN / 2,8 m MS	PAN + 4 MS	3,5 dnia	1
KOMPSAT-3A	SI Imaging Services	SSO/LEO	528	2015	nadal funkcjonuje	0,55 m PAN / 2,2 m MS	PAN + 4 MS	3,5 dnia	1
Pleiades-HR (1A/1B)	CNES	SSO/LEO	694	2011/ 2012	nadal funkcjonuje	0,7 m PAN / 2,8 m MS	PAN + 4 MS	1 dzień	2
QuickBird-2	DigitalGlobe/Maxar	SSO/LEO	450	2001	2015	0,61 m PAN / 2,4 m MS	PAN + 4 MS	1-3,5 dnia	1
SkySat (1-21)	Planet Labs	SSO/LEO	400/ 600	2013	nadal funkcjonuje	0,6 m lub 0,72m PAN / 0,81 m lub 1,0 MS	PAN + 4 MS	4-5 dni	21
SuperView 1-4 (Gaojing 1-4)	SpaceWil	SSO/LEO	530	2016	nadal funkcjonuje	0,5 m PAN / 2,0 m MS	PAN + 4 MS	2 dni	4
TripleSat (TPS)	ZIAT	SSO/LEO	651	2015	nadal funkcjonuje	0,8 m PAN / 3,2 m MS	PAN + 4 MS	1 dzień	3
WorldView-1	DigitalGlobe/Maxar	SSO/LEO	496	2007	nadal funkcjonuje	0,46 m PAN	PAN	1-4 dni	1
WorldView-2	DigitalGlobe/Maxar	SSO/LEO	770	2009	nadal funkcjonuje	0,46 m PAN / 1,86 m MS	PAN + 8 MS	1-4 dni	1
WorldView-3	DigitalGlobe/Maxar	SSO/LEO	617	2014	nadal funkcjonuje	0,31/0,15 m PAN / 1,24 m MS / 3,7 m SWIR / 30 m CAVIS	PAN + 8 MS + SWIR + CAVIS	ok. 1 dnia	1
WorldView-4	DigitalGlobe/Maxar	SSO/LEO	617	2016	2019	0,31 m PAN / 1,24 m MS	PAN + 4 MS	1-4 dni	1

Słownik akronimów

AI – sztuczna inteligencja (ang. *Artificial Intelligence*)

ALS – lotnicze skanowanie laserowe (ang. *Airborne Laser Scanning*)

AOT – mapa grubości optycznej atmosfery (ang. *Aerosol Optical Thickness*) opracowana na podstawie obrazów sensora MODIS

ARVI – wskaźnik roślinności służący do niwelowania negatywnego wpływu atmosfery (ang. *Atmospherically Resistant Vegetation Index*)

ASTER-GDEM – globalny model wysokościowy (ang. *ASTER Global Digital Elevation Model Version 3*) wygenerowany na podstawie optycznych zobrażeń satelitów ASTER

ATCOR – metoda przeprowadzania korekcji atmosferycznej obrazów teledetekcyjnych (ang. *Atmospheric & Topographic Correction*)

AWS – jeden z największych na świecie dostawców chmury obliczeniowej należący do korporacji Amazon (ang. *Amazon Web Service*)

BOA – współczynnik odbicia przy powierzchni Ziemi (ang. *Bottom of Atmosphere*)

BRDF – funkcja opisująca zależność współczynnika emisyjności od kąta rejestracji, polaryzacji, szorstkości powierzchni i od przestrzennego rozkładu emitowanego promieniowania (ang. *Bidirectional Reflectance/Radiance Distribution Function*)

C3S – Serwis Monitorowania Zmian Klimatu programu Copernicus (ang. *Copernicus Climate Change Service*)

CAMS – Serwis Monitorowania Stanu Atmosfery programu Copernicus (ang. *Copernicus Atmosphere Monitoring Services*)

CDI – zintegrowany wskaźnik suszy (ang. *Combined Drought Index*)

CGMS – system monitorowania stanu roślin uprawnych (ang. *Crop Growth Monitoring System*)

CIR – kompozycja w tzw. barwach zafałszowanych, w której wykorzystuje się kanał bardzo bliskiej podczerwieni (NIR) jako kolor czerwony i dokonuje przesunięcia barw (zielony kolor jako kanał czerwony i niebieski kolor jako kanał zielony); inaczej kompozycja FCC

CLMS – Serwis Monitorowania Obszarów Lądowych programu Copernicus (ang. *Copernicus Land Monitoring Service*)

CMEMS – Serwis Monitorowania Środowiska Morskiego programu Copernicus (ang. *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*)

Copernicus – program obserwacji Ziemi realizowany przez Komisję Europejską we współpracy z ESA, EUMETSAT, ECMWF, agencjami UE i instytutem badawczym Mercator

Océan. Utworzony w celu wsparcia działań z zakresu ochrony środowiska, ochrony ludności i bezpieczeństwa

CORINE LC – baza danych o pokryciu terenu dla obszaru Europy powstała w ramach programu CORINE (ang. *CORINE Land Cover*) nadzorowana przez Europejską Agencję Środowiska (ang. *Coordination of Information on the Environment*)

CSS – Serwis Bezpieczeństwa programu Copernicus (ang. *Copernicus Security Service*)

DAAC – program NASA służący gromadzeniu i udostępnianiu danych teledetekcyjnych w ramach baz danych NSIDC (ang. *Distributed Active Archive Center*)

DestinE - projekt Komisji Europejskiej polegający na stworzeniu precyzyjnego cyfrowego modelu Ziemi w celu monitorowania i symulowania zjawisk naturalnych i czynników antropogenicznych (ang. *Destination Earth*)

DIAS – usługi oparte na chmurze obliczeniowej zapewniające dostęp do danych i informacji programu Copernicus oraz umożliwiające przetwarzanie danych użytkownikowi (ang. *Data and Information Access Services*)

DInSAR – technika interferometrii różnicowej (ang. *Differential Interferometric SAR*)

DL – głębokie uczenie (ang. *Deep Learning*) – jedna z zaawansowanych metod stosowanych w klasyfikacji nadzorowanej

DN – wartość (liczba) zapisana w pikselu obrazu cyfrowego reprezentująca jasność (ang. *Digital Number*)

DOS – metoda korekcji atmosferycznej (ang. *Dark Object Substraction*) opierająca się na założeniu, że jasność obiektów ciemnych, których współczynnik odbicia powinny wynosić zero (np. obiekty całkowicie zacienione) jest spowodowana wstecznym rozpraszaniem atmosfery

DSI – wskaźnik intensywności suszy (ang. *Drought Severity Index*)

DTED – standard cyfrowych zestawów danych wysokościowych (ang. *Digital Terrain Elevation Data*) zastosowany w przypadku danych m.in. misji SRTM: Level-1 (ok. 30 cm GSD) lub Level-2 (ok. 90 m GSD)

ECMWF – Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) opracowujące m.in. numeryczne prognozy pogody

EDO – Europejskie Obserwatorium ds. Suszy (ang. *European Drought Observatory*)

EDRS – Europejski System Łączności Satelitarnej (ang. *European Data Relay Satellite*)

EEA – Europejska Agencja Środowiskowa (ang. *European Environment Agency*) – agencja UE odpowiedzialna za monitorowanie stanu środowiska naturalnego

EFAS – Europejski System Informowania o Powodziach (ang. *European Flood Awareness System*)

EFFIS – Europejski System Informacji o Pożarach Lasów (ang. *European Forest Fire Information System*)

EGNOS – Europejski System Satelitarny (ang. *European Geostationary Navigation Overlay Service*) podnoszący dokładność systemów GNSS: NAVSTAR-GPS, GALILEO oraz GLONASS. Inaczej regionalny system SBAS na obszarze Europy.

EIONET – Europejska Sieć Informacji i Obserwacji Środowiska (ang. *European Environment Information and Observation Network*)

EMS – usługa zarządzania kryzysowego (ang. *Scene Classification Map*) programu Copernicus

EO – programy obserwacji Ziemi (ang. *Earth Observation*)

EOSDIS – system danych i system obserwacji Ziemi NASA (ang. *Earth Observing System Data and Information System*)

EPIC – Europejski Wskaźnik Opadów (ang. *European Precipitation Index based on simulated Climatology*)

ERCC – Centrum Koordynacji Reagowania Kryzysowego (ang. *European Response and Coordination Centre*)

ERICHA – wskaźnik dla powodzi błyskawicznych oparty na danych opadowych generowanych z satelitów radarowych z programu OPERA (ang. *European Rainfall-Induced Hazard Assessment*)

ERTS – pierwotna nazwa programu Landsat – Satelita Ziemijskich Zasobów Technologicznych (ang. *Earth Resources Technology Satellite*)

ESA – Europejska Agencja Kosmiczna (ang. *European Space Agency*). Międzynarodowa organizacja 22 krajów europejskich (+ 3 stowarzyszonych, w tym Kanada), której celem jest eksploracja i wykorzystanie przestrzeni kosmicznej. Polska jest pełnoprawnym członkiem od 19.11.2012

ESM – europejska mapa osadnicza wykonana na podstawie klasyfikacji scen satelitarnych SPOT-5 i SPOT-6 (ang. *European Settlement Map*); inna nazwa to EUGHSL2016

ESM – paneuropejski numeryczny model powierzchni terenu będący składową serwisu CLMS

EU-HYDRO – baza serwisu CLMS zawierająca dane o europejskiej sieci rzek oraz model sieci hydrologicznej

EUMETSAT – Europejska Organizacja Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych odpowiedzialna za utrzymanie i wykorzystanie europejskich satelitarnych systemów obserwacji meteorologicznych zrzeszająca 31 państw (ang. *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*)

EUROSUR – Europejski System Nadzoru Granicznego (ang. *European Border Surveillance System*)

EUSPA – Agencja Unii Europejskiej ds. Programu Kosmicznego (ang. *European Union Agency for the Space Programme*); wcześniej znana jako GSA (ang. *European GNSS Agency*)

EVI – zoptymalizowany wskaźnik roślinności (ang. *Enhanced Vegetation Index*)

FAO – Organizacja Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (ang. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*)

FCC – kompozycja w barwach zafałszowanych (ang. *False Color Composite*), w której wykorzystuje się kanał bardzo bliskiej podczerwieni (NIR), często zwana też CIR

FIRMS – amerykański program o pożarach lasów (ang. *Fire Information for Resource Management System*)

FRONTEX – Europejska Agencja Straży Granicznej i Przybrzeżnej

fSCA – mapa pokrywy śnieżnej – jeden z zaawansowanych produktów wytworzonych na podstawie danych z satelity Landsat 8 (ang. *Fractional Snow Covered Area Science Product*)

FWF – analiza fali pełnej LiDAR (ang. *full waveform*)

FWI – Indeks pogodowy dla pożarów lasów, stosowany do szacowania ryzyka pożaru (ang. *Forest Fire Weather Index*)

GALILEO – europejski system nawigacji satelitarnej, stanowiący jeden z systemów GNSS

GCOS – Globalny System Obserwacji Klimatu (ang. *Global Climate Observing System*)

GEO – orbita geostacjonarna odległa o 35 786 km od powierzchni Ziemi (ang. *Geostationary Earth Orbit*);

GEOBIA – obiektowa analiza obrazów teledetekcyjnych (ang. *GEographic Object-Based Image Analysis*); synonim - OBIA

GEOSS – program Globalna Sieć Systemów Obserwacji Ziemi

GFC – projekt i portal mapowy (ang. *Global Forest Change*) przedstawiający zmiany pokrywy leśnej świata

GIS – Systemy Informacji Geograficznej (ang. *Geographic Information Systems*)

GloFAS – Globalny System Informowania o Powodziach (ang. *Global Flood Awareness System*)

GLONASS – rosyjski system nawigacji satelitarnej (ros. *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*)

GMES – Program Globalnego Monitorowania Środowiska i Bezpieczeństwa realizowany w Unii Europejskiej (ang. *Global Monitoring for Environment and Security*) – dawna nazwa obecnego programu Copernicus

GNDVI – wskaźnik roślinności Green NDVI

GNSS – Globalne Systemy Nawigacji Satelitarnej (ang. *Global Navigation Satellite Systems*), do których zaliczamy m.in.: GPS-NAVSTAR (USA), GALILEO (UE), GLONASS (Rosja) oraz BEIDOU-2 (Chiny)

GPS-NAVSTAR – Pierwszy system globalnej nawigacji satelitarnej (ang. *Global Positioning System - NAVigation Signal Timing And Ranging*) – program wojskowy USA udostępniony cywilnej administracji i innym użytkownikom

GSD – terenowa odległość próbkowania określająca rozdzielczość przestrzenną sensora (ang. *Ground Sampling Distance*)

HEO – silnie eliptycznie orbity (ang. *Highly Elliptical Orbits*)

HH – polaryzacja typu poziomego w radarach z syntetyczną aperturą (ang. *Horizontal Horizontal*)

HRL – wysokorozdzielcze warstwy tematyczne (ang. *High Resolution Layers*) prezentujące podstawowe formy pokrycia terenu państw europejskich przygotowane na zlecenie ESA

HS – obraz hiperspektralny posiadający kilkadziesiąt (> 40) i więcej kanałów spektralnych (ang. *hyperspectral*)

HV – polaryzacja typu poziomo-pionowego w radarach z syntetyczną aperturą (ang. *Horizontal Vertical*)

IACS – Zintegrowany System Zarządzania i Kontroli – system informatyczny unijnych dopłat bezpośrednich w Polsce w ramach Wspólnej Polityki Rolnej Unii Europejskiej, zarządzany przez Agencję Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa (ang. *Integrated Administration and Control System*)

IFOV – chwilowe pole widzenia, czyli stożkowy kąt widoczności detektora określający obszar na powierzchni Ziemi, który jest „widziany” z określonej wysokości w danym momencie (ang. *Instantaneous Field of View*)

InSAR – satelitarna interferometria radarowa – technika służąca do uzyskiwania informacji dotyczących względnych danych wysokościowych (ang. *Interferometric SAR*)

ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju, projekt mający na celu utworzenie systemu poprawiającego osłonę gospodarki, środowiska i społeczeństwa przed nadzwyczajnymi zagrożeniami, w szczególności przed powodzią

ISS – Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ang. *International Space Station*)

IST – urządzenie służące nawigacji na gwiazdy wykorzystywane w systemach SLS (ang. *Instrument Star Tracker*);

JRC – Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (ang. *Joint Research Centre*)

JRC MARS – Monitoring Zasobów Rolnictwa Wspólnego Centrum Badawczego Komisji Europejskiej (ang. *Joint Research Center Monitoring Agricultural Resources*)

LAI – wskaźnik powierzchni liści (ang. *Leaf Area Index*)

LEO – niskie orbity okołoziemskie (ang. *Low Earth Orbit*)

LiDAR – technologia skanowania laserowego (ang. *Light Detection And Ranging*)

LoS – kierunek obrazowania w interferometrii radarowej (ang. *Line of Sight*)

LULC – mapa pokrycia (obszary z naturalnym pokryciem) i użytkowania terenu (obszary antropogeniczne) (ang. *Land Use Land Cover*)

MDC – metoda najmniejszej odległości stosowana w klasyfikacji nadzorowanej (ang. *Minimum Distance Classification*)

MEO – średnia orbita okołoziemiska (ang. *Medium Earth Orbit*)

ML – uczenie maszynowe (ang. *Machine Learning*)

MLC – metoda największego prawdopodobieństwa stosowana w klasyfikacji nadzorowanej (ang. *Maximum Likelihood Classification*)

MS – obraz wielospektralny (ang. *multispectral*), umownie posiadający kilka do kilkunastu kanałów spektralnych

MSI – sensor do rejestracji wielospektralnej umieszczony na satelicie Sentinel-2 (ang. *MultiSpectral Instrument*)

MSI – wskaźnik stresu wodnego (ang. *Moisture Stress Index*)

MTCI – wskaźnik chlorofilu wyznaczony o dane z sensora MERIS (ang. *MERIS Terrestrial Chlorophyll Index*)

MW – zakres promieniowania mikrofalowego (ang. *MicroWave*)

NASA – amerykańska Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (ang. *National Aeronautics and Space Administration*)

NASADEM – globalny numeryczny model terenu opracowany przez NASA z wykorzystaniem danych misji SRTM zwalidowanych danymi ASTER – Global DEM oraz IceSat-1

NBLI – wskaźnik powierzchni odkrytych stosowany w analizach teledetekcyjnych gleb (ang. *Normalized Difference Bare Land Index*)

NBR – znormalizowany wskaźnik pożaru roślinności (ang. *Normalized Burn Ratio*)

NDBI – znormalizowany różnicowy wskaźnik zabudowy stosowany w analizach teledetekcyjnych terenów zainwestowanych (ang. *Normalized Difference Built-up Index*)

NDDI – znormalizowany różnicowy wskaźnik suszy (ang. *Normalised Difference Drought Index*)

NDII – znormalizowany wskaźnik różnicy w podczerwieni stosowany w analizach zobrazowań satelitarnych (ang. *Normalized Difference Infrared Index*)

NDRE – wskaźnik roślinności wykorzystujący zakres krawędzi podczerwieni (ang. *Normalized Difference RedEdge index*)

NDVI – znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności stosowany w analizach teledetekcyjnych roślinności (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*)

NDWI – znormalizowany różnicowy wskaźnik wody, stosowany w analizach obrazów satelitarnych (ang. *Normalized Difference Water Index*)

NIR – zakres promieniowanie elektromagnetycznego bliskiej podczerwieni (ang. *Near InfaRed*)

NMDI – wskaźnik stosowany do oceny stanu wilgotności gleby i zawartości wody w roślinach (ang. *Normalized Multi-Band Drought Index*)

NMPT – numeryczny model pokrycia terenu

NMT – numeryczny model terenu

NOAA – amerykańska Narodowa Agencja Oceanów i Atmosfery (ang. *National Oceanic and Atmospheric Administration*);

NOAA – seria niskorozdzielczych satelitów należących do NOAA służących do obserwacji różnych zjawisk przyrodniczych w skali globalnej

NSIDC – amerykańska Narodowa Baza Danych o Śniegu i Lodzie będąca jednostką naukowo-badawczą Uniwersytetu Kolorado w Boulder (ang. *National Snow and Ice Data Center*)

NWI – znormalizowany wskaźnik wody informujący o potencjale wody w komórkach roślin i glebie (ang. *Normalised Water Index*)

OBIA – obiektowa analiza obrazu (ang. *Object-Based Image Analysis*); synonim GEOBIA (ang. *GEographic OBIA*)

PAK – Polska Agencja Kosmiczna

PAN – obraz panchromatyczny (ang. *panchromatic*), jeden obraz zarejestrowany najczęściej w zakresie promieniowania widzialnego

PCA – analiza składowych głównych (ang. *Principal Component Analysis*)

PDGS – naziemny segment opracowania danych misji Sentinel (ang. *Payload Data Ground Segment*)

PEM – promieniowanie elektromagnetyczne

PolSAR – polarymetria radarowa (ang. *Polarimetric SAR*)

PSInSAR – technologia różnicowej interferometrii radarowej

QA – analiza dokładności procesu klasyfikacji (ang. *Quality Assessment*)

R – język programowania oraz środowisko do obliczeń statystycznych i wizualizacji ich wyników

RE – czerwień krawędziowa (ang. *RedEdge*) – zakres promieniowania elektromagnetycznego pomiędzy zakresem fal czerwonych (R) oraz bliskiej podczerwieni (NIR)

REI – indeks dróg (ang. *Road Extraction Index*)

RF – lasy losowe – jedna z zaawansowanych metod stosowanych w klasyfikacji nadzorowanej (ang. *Random Forest*)

RGB – kompozycja barwna w kolorach zbliżonych do naturalnych: R – czerwony (ang. *Red*); G – zielony (ang. *Green*); B – niebieski (ang. *Blue*)

RVI – wskaźnik roślinności (ang. *Ratio Vegetation Index*) lub uproszczony wskaźnik (ang. *Simple Ratio*)

S2GLC – międzynarodowy projekt finansowany przez ESA mający na celu stworzenie globalnej bazy danych o pokryciu terenu z wykorzystaniem zobrażeń pochodzących z satelity Sentinel-2 (ang. *Sentinel-2 Global Land Cover*)

SAM – jedna z metod klasyfikacji danych hiperspektralnych (ang. *Spectral Angle Mapping*)

SAR – radary z syntetyzowaną aperturą, czyli antenami wirtualnymi, inaczej zwanymi syntetyzowanymi, które symulowane są przez wykorzystanie ruchu postępowego platformy nośnej, uwzględniając w przetwarzaniu sygnału powstający z powodu tego ruchu efekt Dopplera, czyli dodatnie lub ujemne zmiany częstotliwości odbieranego sygnału (ang. *Synthetic Aperture Radar*)

SatBałtyk – satelitarny system monitoringu stanu środowiska Bałtyku

SAVI – wskaźnik roślinności służący do niwelacji negatywnego wpływu tła glebowego (ang. *Soil Adjusted Vegetation Index*)

SBAS – System wspomagający jakość pozycjonowania GNSS (ang. *Satellite-Based Augmentation System*)

SCL – korektor linii skanowania (ang. *Scan Line Corrector*)

SCL – produkt przetworzeń (ang. *Scene Classification Map*) obrazów satelity Sentinel-2 (ESA)

SLMS – satelitarne systemy monitorowania terenu (ang. *Satellite Land Monitoring Systems*)

SLR – radar obrazujący, który jest radarem „bocznego wybierania”, czyli instrumentem obrazującym ukośnie (ang. *Side-Looking Radar*)

SLS – technologia skanowania laserowego realizowana ze statków poruszających się na orbitach okołozemskich (ang. *Satellite Laser Scanning*)

SPEI – wskaźnik standaryzowanego opadu i parowania (ang. *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*)

- SR** – współczynnik odbicia powierzchni (ang. *Surface Reflectance*)
- SSO** – orbita heliosynchroniczna (ang. *Sun-Synchronous Orbit*)
- SST** – Europejskie Konsorcjum Obserwacja i Śledzenie Obiektów Kosmicznych (ang. *Space Surveillance and Tracking*)
- SST** – temperatura powierzchni morza (ang. *Sea Surface Temperature*)
- SVM** – wektory nośne – jedna z zaawansowanych metod stosowanych w klasyfikacji nadzorowanej (ang. *Support Vector Machine*)
- SWIR** – zakres promieniowania elektromagnetycznego średniej podczerwieni (ang. *Short Wave InfraRed*)
- TOA** – współczynnik odbicia na tzw. poziomie powyżej atmosfery (ang. *Top of Atmosphere Reflectance*)
- TVI** – wskaźnik roślinności (ang. *Transformed Vegetation Index*) używany do opisu biomasy przy pokryciu gleby roślinnością poniżej 50%, uwzględniający zarówno zawartość chlorofilu jak i biomasę
- UA** – Atlas Miast (ang. *Urban Atlas*) – baza danych komponentu lokalnego serwisu CLMS dotycząca użytkowania gruntów i pokrycia terenu dla funkcjonalnych obszarów miejskich (FUA)
- UI** – wskaźnik zabudowy stosowany w analizach teledetekcyjnych terenów zainwestowanych (ang. *Urban Index*)
- VARI** – jeden ze wskaźników roślinności służący do niwelowania negatywnego wpływu atmosfery (ang. *Visible Atmospheric Resistant Index*)
- VH** – polaryzacja typu pionowo-poziomego w radarach z syntetyczną aperturą (ang. *Vertical Horizontal*)
- VHR** – bardzo wysoka rozdzielczość (ang. *Very High Resolution*)
- VI** – wskaźnik (indeks) roślinności (ang. *Vegetation Index*)
- VIS** – zakres promieniowania elektromagnetycznego widzialny (ang. *VISible*) dla ludzkiego oka, fale widzialne
- VNIR** – zakres promieniowania elektromagnetycznego fal widzialnych i bliskiej podczerwieni (ang. *Visible & Near InfraRed*)
- VV** – polaryzacja typu pionowego w radarach z syntetyczną aperturą (ang. *Vertical Vertical*)
- WorldDEM** – globalny numeryczny model wysokościowy generowany w oparciu o dane mikrofalowe z satelitów TerraSAR-X i TanDEM-X

Literatura

- Advance Publications, [XX1] 1911. Syracuse Post Standard[XX2], s. 18. March 28, 1911.
- Aggarwal S., 2004. Principles of Remote Sensing. W: M.V.K. Sivakumar, P.S. Roy, K. Harmsen, S.K. Saha (red.), *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*. s. 23–39. World Meteorological Organisation, Geneva. <http://www.wamis.org/agm/pubs/agm8/WMO-TD1182.pdf>
- Airbus Defence and Space, 2019: <https://www.intelligence-airbusds.com/elevation-models/>
- Airbus, 2020. Airbus Defence and Space – Zephyr: <https://www.airbus.com/defence/uav/zephyr.html>
- Aldred D., Wang J., 2007. Object-oriented classification for urban building boundary extraction from IKONOS imagery. *Our Common Borders – Safety, Security, and the Environment Through Remote Sensing*. 28 October–1 November 2007, Ottawa, Ontario, Canada.
- ALOS, 2020: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm>
- Alvarado S.C., Langston S.M., 2014. Establishing a New International Space Cooperation Mechanism For Protecting World Heritage Sites. *Annals of Air and Space Law*, 39, 379–408.
- Amazon AWS, 2020. Amazon AWS Ground Station: <https://aws.amazon.com/ground-station/>
- Amazon Earth, 2020. Earth on AWS: <https://aws.amazon.com/earth/>
- AMMER, 2020: <https://www.kplabs.pl/en/ammer/>
- Arslan N., 2018. Assessment of oil spills using Sentinel 1 C-band SAR and Landsat 8 multispectral sensors. *Environmental Monitoring Assessment*, 190, 637. DOI: 10.1007/s10661-018-7017-4.
- Attila J., Koponen S., Kallio K., Lindfors A., Kaitala S., Ylöstalo P., 2013. Remote Sensing of Environment MERIS Case II water processor comparison on coastal sites of the northern Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment*, 128, 138–149. DOI: 10.1016/j.rse.2012.07.009.
- Atzberger C., Vuolo F., Klisch A., Rembold F., Meroni M., Mello M.P., Formaggio A.R., 2016. Agriculture. W: P. S. Thenkabail (red.), *Land Resources Monitoring, Modeling and Mapping with Remote Sensing*, s. 71–112. CRC Press Inc., Boca Raton, FL, USA. ISBN 9780367868970.
- Bajorek-Zydroń K., Wężyk P. (red.), 2016. Atlas pokrycia terenu i przewietrzania Krakowa. MONIT-AIR „Zintegrowany system monitorowania danych przestrzennych dla poprawy jakości powietrza w Krakowie”. s. 522. Urząd Miasta Krakowa. ISBN 978-83-918196-6-1.
- Balawajder G., 2018. Instytucjonalny wymiar ochrony granic zewnętrznych Unii Europejskiej w kontekście bezpieczeństwa państw członkowskich. *Pogranicze. Polish Borderlands Studies*, 6(1), 77–101.

- Ban Y., Gong P., Giri C., 2015. Global land cover mapping using Earth observation satellite data: Recent progresses and challenges. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 1–6. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.01.001.
- Bannari A., Rhinane H., Bahi H., 2018. Synergy between SMOS-MIRAS and Landsat-OLI/TIRS Data for Soil Moisture Mapping before, during, and after Flash-Flood Storm in Southwestern Morocco. W: T.V. Hromadka II, P. Rao (red.), *Topics in Hydrometeorology*, s. 1-24. OpenTech. DOI: 10.5772/intechopen.79554.
- Bargiel D., 2017. A new method for crop classification combining time series of radar images and crop phenology information. *Remote Sensing of Environment*, 198, 369–383. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.022.
- Barnes E., Clarke T., Colaizzi P., Haberland J., Kostrzewski M., Riley E., Moran M., Waller P., Choi C., Thompson T., Richards S., Lascano R., Li H., 2000. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status, and canopy density using ground-based multispectral data. *Proc. 5th Intern. Conf. on Precision Agriculture and Other Resource Management, ASA–CSSA–SSSA, Madison, WI*.
- Barszcz J., Kozak J., Wężyk P., Widacki W., 1995. Health Condition of Forest in the Silesian Beskid, Polish Carpathians Mountains. W: L. Beckel (red.) *Satellite Remote Sensing Forest Atlas of Europe*, 194–195. Justus Perthes, Gotha, Germany.
- BDL, 2020: <https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/o-lasach>
- Benz U.C., Hofmann P., Willhauck G., Lingenfelder I., Heynen M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58, 239–258. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002.
- Berndt E., White K., LaFontaine F., Fontenot R., 2019. Towards the Development of Real-Time Normalized Burn Ratio (NBR) and Delta NBR Imagery from GOES-16/17 and S-NPP. *NASA Technical Reports Server*. https://www.star.nesdis.noaa.gov/star/documents/meetings/2020JPSSGOES/Posters/A_21_Burnscar_GOESrandJPSSMeeting_Feb2020_KWhite.pdf.
- Bielecka E., Ciołkosz A., 1998. Powódź w dolinie Odry w 1997 r. w świetle interpretacji zdjęć satelitarnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, 45(97), 81–95.
- Bielecka E., Ciołkosz A., 2007. Wykorzystanie informacji o pokryciu terenu zawartych w bazach Corine Land Cover w gospodarce przestrzennej. *Roczniki Geomatyki*, 5(7), 27–38.
- Blaschke T., Hay G.J., Kelly M., Lang S., Hofmann P., Addink E., Queiroz Feitosa R., van der Meer F., van der Werff H., van Coillie F., Tiede D., 2014. Geographic object-based image analysis—Towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 180–191. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014.
- Blaschke T., Strobl J., 2001. What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, 14(6), 12–17.
- Boardman J., 1998. Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved

- subpixel target unmixing and rejection of false positives: Mixture Tuned Matched Filtering. AVIRIS 1998 Proceedings, JPL, California. https://aviris.jpl.nasa.gov/proceedings/workshops/98_docs/8.pdf.
- Boardman J.W., Kruse F.A., Green R.O., 1995. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. W: V.J. Realmuto (red.), Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Volume 2. TIMS Workshop, s. 23–26. JPL Publication 95–1.
- Bohatkiewicz J. (red.), 2008. Podręcznik dobrych praktyk wykonywania opracowań środowiskowych dla dróg krajowych. s. 192. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa-Kraków. ISBN 978-83-926079-2-2.
- Borge N.H., Leblanc E. 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76, 156–172. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00197-8.
- Borsa M., Zagajewski B., Kulawik B. 2017. Teledetekcja w planowaniu przestrzennym. s. 221. Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa. https://archiwum.miiir.gov.pl/media/54427/Teledetekcja_w_planowaniu_przestrzennym.pdf
- Brivio P.A., Colombo R., Maggi M., Tomasoni R., 2002. Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas. *International Journal of Remote Sensing*, 23(3), 429–441. DOI: 10.1080/01431160010014729.
- Bubnicki J.W., Churski M., Schmidt K., Diserens T.A., Kuijper D.P.J., 2019. Linking spatial patterns of terrestrial herbivore community structure to trophic interactions. *eLife*, 8, e44937. DOI: 10.7554/eLife.44937.
- Burek P., van der Knijff J., Roo A., 2013. LISFLOOD Distributed Water Balance and Flood Simulation Model. Revised User Manual, s. 142. European Commission Joint Research Centre. Report EUR 26162EN. DOI: 10.2788/24719.
- Calleja F., Ondiviela B., Galván C., Recio M., Juanes J.A. 2019. Mapping estuarine vegetation using satellite imagery: The case of the invasive species *Baccharis halimifolia* at a Natura 2000 site. *Continental Shelf Research*, 174, 35–47. DOI: 10.1016/j.csr.2019.01.002.
- Campbell J.B., Wynne R.H., 2011. Introduction to Remote Sensing. Fifth Edition. s. 667. Guilford Press, New York, USA. ISBN 9781609181765.
- CAMS EU, 2020: http://macc-raq-op.meteo.fr/index.php?category=ensemble&subensemble=hourly_ensemble&date=LAST&calculation-model=ENSEMBLE&species=o3&level=SFC&offset=000
- CAMS Riga, 2020: <https://atmosphere.copernicus.eu/airtext-air-quality-information-glance>
- Canadian Space Agency, 2020. RADARSAT-1: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat1/default.asp>

- CCRS, 2020. Canada Centre for Remote Sensing – Remote Sensing Tutorials
<https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>
- Chidley T.R.E., Drayton R.S., 1986. The use of SPOT-simulated imagery in hydrological mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 7(6), 791–799. DOI: 10.1080/01431168608954735.
- Chini M., Pelich R., Pulvirenti L., Pierdicca N., Hostache R., Matgen P., 2019. Sentinel-1 InSAR Coherence to Detect Floodwater in Urban Areas: Houston and Hurricane Harvey as A Test Case. *Remote Sensing*, 11, 107. DOI: 10.3390/rs11020107.
- Chuvieco E., Mouillot F., van der Werf G.R., San Miguel J., Tanasse M., Koutsias N., Heil A., 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225, 45–64. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.013.
- Clark R., Roush T., 1984. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, 89(B7), 6329–6340. DOI: 10.1029/JB089iB07p06329.
- Clark R.N., Gallagher A.J., Swayze G.A., 1990. Material Absorption Band Depth Mapping of Imaging Spectrometer Data Using a Complete Band Shape Least-Squares Fit with Library Reference Spectra. *Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop*. JPL Publication 90-54, 176-186.
- Congedo L., 2017. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.
<https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/>
- Copernicus Atmosphere, 2017: https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus_AtmosphereMonitoring_Feb2017.pdf
- Copernicus Atmosphere, 2020: <https://www.copernicus.eu/en/services/atmosphere>
- Copernicus CC, 2020: <https://www.copernicus.eu/en/services/climate-change>
- Copernicus E, 2020: <https://www.copernicus.eu/en/services/emergency>
- Copernicus EM, 2020: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/#zoom=2&lat=33.59119&lon=12.7482&layers=00B0T>
- Copernicus Emergency Management Service, 2020. Technical Background of the European Forest Fire Information System (EFFIS): <https://effis.jrc.ec.europa.eu/about-effis/technical-background/>
- Copernicus Hub, 2020: <https://scihub.copernicus.eu/>
- Copernicus Land, 2020: <https://www.copernicus.eu/en/services/land>
- Copernicus Marine, 2020: <https://www.copernicus.eu/en/services/marine>
- Copernicus pl, 2020: <https://www.copernicus.eu/pl>
- Copernicus S, 2020: <https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-january-2020>
- Copernicus SS, 2020: <https://www.copernicus.eu/en/services/security>

- Copernicus, 2020a: <https://www.copernicus.eu/pl/informacje-o-programie-copernicus>
- Copernicus, 2020b: <https://www.copernicus.eu/pl/praktyczne-wskazowki/jak-uzyskac-dostep-do-danych>
- Craig M., Atkinson D., 2013. A Literature Review of Crop Area Estimation. FAO Publication, Rome. http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/meetings_and_workshops/GS_SAC_2013/Improving_methods_for_crops_estimates/Crop_Area_Estimation_Lit_review.pdf.
- Creodias, 2020. Home Page – CREODIAS: <https://creodias.eu/>
- CropSpace, 2020: <https://nassgeodata.gmu.edu/CropScape/>
- Crosetto M., 2017. Niepublikowane materiały wykładowe profesora wizytującego UWM Olsztyn.
- Crosetto M., 2019. CTTC. Niepublikowane materiały z projektu ASMOW 2018-2021, finansowanego przez NCBiR.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthery N., Crippa B., 2013. Analysis of X-band very high resolution persistent scatterer interferometry data over urban areas. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 21–24. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W1-47-2013.
- CS3 demonstrator, 2020: <https://www.wemcouncil.org/wp/projects/c3s-climate-and-energy-education-demonstrator/>
- CSIRO, 2020. Centre for Earth Observation. About NovaSAR-1: <https://research.csiro.au/cceo/novasat/novasat-introduction/>
- Dąbrowska-Zielińska K., Bartold M., Gatkowska M., Gurdak R., 2019. POLWET – System monitorowania obszarów mokradeł Ramsar z wykorzystaniem danych satelitarnych. Seminarium dotyczące zastosowania danych satelitarnych do monitorowania obszarów chronionych. 8 marca 2019, Warszawa. http://www.igik.edu.pl/upload/Image/teledetekcja/Mokradla%20i%20laki/POLWET_GDOS_18032019.pdf
- Dąbrowska-Zielińska K., Budzyńska M., Tomaszewska M., Malińska A., Gatkowska M., Bartold M., Malek I., 2016. Assessment of Carbon Flux and Soil Moisture in Wetlands Applying Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 8(9), 756. DOI: 10.3390/rs8090756.
- Dąbrowska-Zielińska K., Ciołkosz A., Budzyńska M., Kowalik W., 2008. Monitorowanie wzrostu i plonowania zbóż metodami teledetekcji. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 16, 45–54.
- Dąbrowska-Zielińska K., Ciołkosz A., Kowalik W., Gruszczynska, M., 2001. Teledetekcyjna metoda oceny stanu rozwoju roślin uprawnych i szacowania plonów głównych zbóż w Polsce. *Teledetekcja środowiska*, 32, 40–60.
- Dąbrowska-Zielińska K., Goliński P., Jorgensen M., Mølmann J., Taff G., Tomaszewska M., Golińska B., Budzyńska M., Gatkowska M., 2015. New methodologies for grasslands monitoring. s. 30. *Proceedings of 23rd International Grassland Congress 2015 – Keynote Lecture (XXIII IGC 2015)*. 20-24 November 2015, New Delhi, India. Range Management Society of India, Jhansi, U.P. India.

- Dajdok Z., Pawlaczyk P. (red.), 2009. Inwazyjne gatunki roślin ekosystemów mokradłowych Polski. s. 168. Wydawnictwo Klubu Przyrodników, Świebodzin. ISBN 978-83-87846-69-5.
- De Kok R., Kozioł K., Wężyk P., 2005. Zastosowanie klasyfikacji obiektowej wysokorozdzielczych obrazów teledetekcyjnych oraz analiz przestrzennych GIS w kartowaniu drzewostanów. *Roczniki Geomatyki*, 3, 99–108.
- De Roo A., Wesseling C., Van Deursen W., 2000. Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model. *Hydrological Processes*, 14, 1981–1992. DOI: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<1981::AID-HYP49>3.0.CO;2-F.
- DeZan F., 2012. ESA Radar Remote Sensing Course 16-20/04/2012 Tartu (Estonia) SAR Interferometry. https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=226412&name=DLFE-2120.pdf
- DLR, 2008: https://www.dlr.de/EN/Home/home_node.html
- DP, 2020. D&P Instruments 2020: <http://www.dpinstruments.com/>
- Drzewiecki W., Wężyk P., Pierzchalski M., Szafrńska B., 2014. Quantitative and Qualitative Assessment of Soil Erosion Risk in Małopolska (Poland), Supported by an Object-Based Analysis of High-Resolution Satellite Images. *Pure Applied Geophysics*, 171, 867–895. DOI: 10.1007/s00024-013-0669-7.
- Dubayah R., Blair J.B., Goetz S., Fatoyinbo L., Hansen M., Healey S., Hofton M., Hurr G., Kellner J., Luthcke S., Armston J., Tang H., Duncanson L., Hancock S., Jantz P., Marselis S., Patterson P.L., Qi W., Silva C., 2020. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 1, 100002. DOI: 10.1016/j.srs.2020.100002.
- Dubiel E., Szwagrzyk J. (red.), 2008. Atlas roślinności rzeczywistej Krakowa. s. 160. Urząd Miasta Krakowa, Wydział Kształtowania Środowiska. ISBN 978-83-918196-1-6.
- Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim.
- Earth, 2020: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/seasat>
- Earthdata NASADEM, 2020: <https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem>
- Earthdata Search, 2020: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- Earthdata, 2020: <https://earthdata.nasa.gov/what-is-new-collection-6-modis-active-fire-data>
- EarthExplorer, 2020. USGS EarthExplorer: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Earthguide, 2020. Animated Energy Budget: <http://earthguide.ucsd.edu/earthguide/diagrams/energybalance/>
- Earthobservations, 2020: <http://www.earthobservations.org/gci.php>
- eCognition, 2020: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/ecognition>
- EDO, 2020: <https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000#>

EEA, 2012a. Urban Atlas 2012: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012>

EEA, 2012b. Street Tree Layer (STL) 2012: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/street-tree-layer-stl>

EEA, 2012c. Building Height 2012: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/building-height-2012>

EEA, 2012d. N2K 2012: <https://land.copernicus.eu/local/natura/natura-2000-2012>

EEA, 2012e: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/population-estimates-by-urban-atlas-polygon>

EEA, 2018. Urban Atlas 2018: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018>

EFAS, 2020a. European Flood Awareness System – EFAS: <https://www.efas.eu/european-flood-awareness-system-efas>

EFAS, 2020b. CEMS Flood monitoring and forecasting: https://www.efas.eu/efas_frontend/#/home

EFFIS, 2020: https://effis.jrc.ec.europa.eu/static/effis_current_situation/public/index.html

Emerton R.E., Stephens E.M., Pappenberger F., Pagano T.C., Weerts A.H., Wood A.W., Salamon P., Brown J.D., Hjerdt N., Donnelly C., Baugh C.A., Cloke H.L., 2016. Continental and global scaleflood forecasting systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(3), 391–418. DOI: 10.1002/wat2.1137.

Emery W., Yerasi A., Longbotham N., Pacifici F., 2014. Assessing paved road surface condition with high-resolution satellite imagery. IGARSS, Presentation. <https://www.slideserve.com/brook/assessing-paved-road-surface-condition-with-high-resolution-satellite-imagery>.

EN, 2020. The Engineering ToolBox, Emissivity Coefficients Materials: https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html

ENVI doc, 2020: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/supportedformats.html>

ENVI podręcznik, 2020: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/Tutorials.html>

ENVI, 2020: <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>

ENVISAT/ASAR Product Handbook, 2002. Issue 1.0., 20 August 2002. ESA.

EO Browser. EO Browser Sentinel Hub: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>

EO NASA, 2003. Earth Observatory NASA: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/ICESat>

eoPortal ALOS-2, 2020. ALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite-2; SAR mission) / Daichi-2. Credit: JAXA: https://directory.eoportal.org/documents/163813/5712308/ALOS2_Auto4F.jpeg

eoPortal ICEYE-X1, 2020: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/iceye-x1>

eoPortal Tandem-L, 2020: <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-l>

EOSDIS, 2020: <https://earthdata.nasa.gov/eosdis/science-system-description/eosdis-standard-products>

ERDAS formaty, 2020: <https://www.hexagongeospatial.com/technical-documents/imagine-data-format-by-product-tiers>

ERDAS moduły: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine-add-ons>

ERDAS podręcznik: <https://community.hexagongeospatial.com/t5/IMAGINE-eTraining/tkb-p/eTERdasImagine>

ERDAS, 2020: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine>

Erkkilä A.-L., Pölönen I., Honkavaara E., Lindfors A., Näsi T., 2020. Utilization of FPI based spectral imager in fresh water monitoring. http://view.24mags.com/sites/all/files/public_files/documents/mera/1fe19255c985c4ffd542f0c6a25ddd31/

Erten E., Rossi C., 2019. The worsening impacts of land reclamation assessed with Sentinel-1: The Rize (Turkey) test case. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 57–64. DOI: 10.1016/j.jag.2018.08.007.

ESA DIAS, 2020. DIAS | Copernicus: <https://www.copernicus.eu/en/access-data/dias>

ESA Enabling Support, 2020: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits

ESA Envisat, 2020. What is Envisat?: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat>

ESA eoPortal, 2020: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/smos#foot98%29>

ESA ERS, 2020: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/ERS_1_and_2

ESA ERS-2, 2020. ERS-2 satellite: <https://i.ytimg.com/vi/DhM5Ljr5Nfk/hqdefault.jpg>

ESA Missions, 2020. Missions News: <https://sentinel.copernicus.eu/web/sentinel/news/-/article/sentinel-3-validation-team-forge-ahead-with-satellite-data>

ESA RADARSAT-2, 2020. RADARSAT-2: https://earth.esa.int/documents/163813/203433/Radarsat2_Auto12

ESA S-1, 2020. Sentinel-1 – Missions – Sentinel Online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

ESA S-2 Products, 2020. Sentinel-2 Data Products: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products>

ESA S-2 Toolbox, 2020. The Sentinel-2 Toolbox: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-2>

ESA S-2 User Guide, 2020. Level-2: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3681608/Sentinel-2-Level-1C-2A-TOA-processing-full.png>

ESA S-2 User Guide, 2020a. Revisit and Coverage: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/266422/revisit-coverage.png>

ESA S-3, 2020. Sentinel-3 Mission: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3>

ESA S-5P ArabNubia, 2018. Sentinel-5P data now available to download: <https://blog.arabnubia.com/wp-content/uploads/2019/10/a.jpg>

ESA S-5P, 2014. Sentinel-5 Precursor: http://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2014/10/sentinel-5_precursor/14946699-1-eng-GB/Sentinel-5_Precursor.jpg

ESA Safety Security, 2020: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Surveillance_and_Tracking_-_SST_Segment

ESA Salinity Map, 2020: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2010/10/First_global_map_of_soil_moisture_and_ocean_salinity#.X7vRw2D_sG8.link

ESA SAR, 2020: <https://earth.esa.int/eogateway/activities/edap/sar-missions>

ESA, 2009. Ground Segment Coordination Report: https://wiki.services.eoportal.org/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=358

ESA, 2015. Sentinel-2 Satellite: https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2015/03/sentinel-2/15292660-1-eng-GB/Sentinel-2_pillars.jpg

ESA, 2018. Agile PROBA-1 rolls in its orbit to take images: http://m.esa.int/spaceinimages/Images/2011/10/Agile_Proba-1_rolls_in_its_orbit_to_take_images

ESM, 2017. European Settlement Map / ESM 2012 – Release 2017: <https://land.copernicus.eu/pan-european/GHSL/european-settlement-map/esm-2012-release-2017-urban-green>

ESOA, 2020: <https://www.esoa.net/technology/satellite-orbits.asp>

ESRI, 2020: <https://www.esri.com>

Esusza, 2020: <https://esusza.pl/>

EU, 2020: <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/security/20180216STO98008/strefa-schengen-ktore-panstwa-do-niej-naleza-i-ktore-staraja-sie-o-czlonkostwo>

EURACTIV, 2019: <https://www.euractiv.pl/section/institucje-ue/news/europejska-agencja-kosmiczna-z-rekordowym-budzetem/>

EUROPEAN COMMISSION 2000, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, 327, 1–72.

Explorer, 2020: https://en.wikipedia.org/wiki/Explorer_1

Faisal A., Khan H., 2017. Application of GIS and Remote Sensing in Disaster Management: a Critical Review of Flood Management. International Conference on Disaster Risk Mitigation, September 23 – 24, 2017, Dhaka, Bangladesh.

Ferreira J.G., Andersen J.H., Borja A., Bricker S.B., Camp J., Cardoso da Silva M., Garcés E., Heiskanen A.-S., Humborg Ch., Ignatiades L., Lancelot Ch., Menesguen A., Tett P., Hoepffner N., Claussen U., 2011. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(2), 117–131. DOI: 10.1016/j.ecss.2011.03.014.

Fieldsites, 2020: <https://www.fieldsites.se/>

FIRMS, 2020: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>

Florczyk A.J., Freire S., Kemper T., Pesaresi M., 2016. VGI in production of global human settlements layer from multi-temporal Landsat satellite imagery. The 6th Digital Earth Summit. 7-8 July 2016, Beijing, China.

ForBioSensing, 2020: <http://www.forbiosensing.pl>

Foresteurope 2020: <http://www.foresteurope.org/docs/fullsoef2015.pdf>

Frankowski P., 2016. Strategia Kosmiczna dla Europy. Unia Europejska.pl, 6, 21–26.

Frontex, 2018a. Dokument programowy na lata 2019–2021 z dnia 18 października 2018 r.

Frontex, 2018b. Roczne sprawozdanie z działalności za 2017 r. z dnia 29 maja 2018 r.

Frontex, 2020: <https://frontex.europa.eu/>

Gallego F.J., 2006. Review of the main remote sensing methods for crop area estimates. In Workshop Proceedings: Remote Sensing Support to Crop Yield Forecast and Area Estimates. ISPRS Archives. Stresa, Italy, 30 November–1 December 2006, Vol. 36, Part 8/W48, 65-70.

Gallego F.J., Craig M., Michaelsen J., Bossyns B., Fritz S. (red.), 2008. Best practices for crop area estimation with remote sensing. RC Scientific and Technical Reports. 5-6 June 2008, Ispra. DOI: 10.2788/31835.

Gao B.-C., 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

GEDI, 2018. First ICESat-2 Global Data Released: Ice, Forests and More: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/>

GEDI, 2020. GEDI Instrument Overview: <https://gedi.umd.edu/instrument/instrument-overview/>

GEE algorytmy, 2020: <https://developers.google.com/earth-engine/guides/>

GEE guides, 2020: <https://developers.google.cn/earth-engine/guides/register?hl=zh-cn>

GEE rejestracja, 2020: <https://earthengine.google.com/signup>

GEE, 2020. Google Earth Engine: <https://earthengine.google.com/>

GEO, 2018. Group on Earth Observation: <https://www.earthobservations.org/>

Geomatica materiały, 2020: <https://support.pcigeomatics.com/hc/en-us/categories/200339015-Tutorials>

- Geomatca, 2020: <https://www.pcigeomatics.com/>
- GeoMedia rozszerzenia, 2020: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/geomedia/geomedia-dynamic-gis-mapping-software-changing-world#:~:text=%20SPATIAL%20MODELER%20IN%20GEOMEDIA%20%201%20ENTERPRISE,Portfolio%20of%20products%20to%20comprise%20a...%20More%20>
- GeoMedia, 2020: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/geomedia>
- Geopandas, 2020: <https://geopandas.org/>
- Geoportal, 2020: <http://geoportal.gov.pl>
- Geoservice DLR, 2020: <https://geoservice.dlr.de/web/maps/tdm:forest>
- Geospatial Intelligence, 2020. TerraSAR-X and TanDEM-X: <https://geoint.com.au/productservice/satellite-imagery/terrasar-x-and-tandem-x-0-25m/>
- GIOŚ, 2020: <https://clc.gios.gov.pl/>
- Gisplay, 2019: <https://gisplay.pl/gis/7779-ile-satelitow-krazy-wokol-ziemi.html>
- Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Stark R., Rundquist D., 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote sensing of Environment*, 80(1), 76–87. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
- Global Forest Change, 2020: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>
- Głowienka E., 2014. Analiza porównawcza metod przetwarzania danych hiperspektralnych o zróżnicowanej dokładności. Rozprawa doktorska, AGH w Krakowie.
- GNU, 2020. GNU Project: <https://www.gnu.org/licenses/copyleft.html>
- Grabska E., 2017. Ocena możliwości wykorzystania satelitarnych danych optycznych i radarowych do identyfikacji typów użytków rolnych. *Prace Geograficzne*, 148, 135–155. DOI: 10.4467/20833113PG.17.006.6274.
- Gregg W.W., Casey N.W., 2004. Global and regional evaluation of the SeaWiFS chlorophyll data set. *Remote Sensing of Environment*, 93(4), 463–479. DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.012.
- Griffith C.G., Woodley W.L., Grube P.G., Martin D.W., Stout J., Sikdar D.N., 1978. Rain estimation from geosynchronous satellite imagery—visible and infra-red studies. *Monthly Weather Review*, 106, 1153–1171. DOI: 10.1175/1520-0493(1978)106<1153:REFGSI>2.0.CO;2.
- Gromny E., Lewiński S., Rybicki M., Malinowski R., Krupiński M., Nowakowski A., Jenerowicz M. 2019. Creation of training dataset for Sentinel-2 land cover classification. *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 111763D, 6 November 2019. DOI: 10.1117/12.2536773.
- Grunfeld Brook N.A., 2019. Introduction to SAR Interferometry – Generating a Digital Elevation Model. CONAE Training program. https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/SAR%20Disasters%20Part%203_0.pdf.

- Gu Y., Brown J.F., Verdin J.P., Wardlow B., 2007. A five year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34, L06407. DOI: 10.1029/2006GL029127.
- Gulácsi A., Kovács F., 2015. Drought Monitoring With Spectral Indices Calculated From MODIS Satellite Images In Hungary. *Journal of Environmental Geography*, 8, 11–20. DOI: 10.1515/jengeo-2015-0008.
- Gunter's Space, 2019: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/novasar-s.htm
- Gunter's Space Page, 2020. RCM 1, 2, 3 (Radarsat Constellation 1, 2, 3): https://space.skyrocket.de/doc_sdat/radarsat-constellation.htm
- GWIS, 2020: http://gwis.jrc.ec.europa.eu/static/gwis_current_situation/public/index.html
- Hansen M.C., Stehman S.V., Potapov P.V., 2010. Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(19), 8650–8655. DOI: 10.1073/pnas.0912668107.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J.R., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* 342, 850. DOI: 10.1126/science.1244693.
- Hanssen R.F., 2001. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol. 2. s. XVIII, 308. Springer Netherlands. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.
- Hardisky M.A., Klemas V., Smart R.M., 1983. The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 9, 77–84.
- Harris, 2020: <https://www.harrisgeospatial.com>
- Hawryło P., Bednarz B., Wężyk P., Szostak M., 2018. Estimating defoliation of Scots pine stands using machine learning methods and vegetation indices of Sentinel-2. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 194–205. DOI: 10.1080/22797254.2017.1417745.
- Hawryło P., Wężyk P., 2018. Predicting Growing Stock Volume of Scots Pine Stands Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Airborne Image-Derived Point Clouds. *Forests*, 9(5): 274. DOI: 10.3390/f9050274.
- Healey S.P., Hernandez M.W., Edwards D.P., Lefsky M.A., Freeman E., Patterson P.L., Lindquist E.J., and Lister A.J., 2015. CMS: GLAS LiDAR-derived Global Estimates of Forest Canopy Height, 2004-2008. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. DOI: 10.3334/ORNLDAAC/1271.
- Hein A. 2010. Processing of SAR data: fundamentals, signal processing, interferometry. s. XV, 291. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-09457-0. ISBN 978-3-642-05710-6.
- Hejmanowska B., 2002. Badania zmian współczynnika emisyjności piasku kwarcowego w zależności od jego granulometrii w przedziale 2-14 μm . *Geodezja*, 8(2), 295-303.

- Hejmanowska B., Mularz S., Gołda T., Pirowski T., Głowienka E., 2004. Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych zobrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru Tarnobrzeskiego Zagłębia Siarkowego. Projekt badawczy KBN nr 5T12E 005 25, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie. <http://home.agh.edu.pl/~galia/research/research.html>.
- Henderson F.M., Lewis A. J., 1998. Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing, vol. 2. s. 896. Wiley and Sons Inc. ISBN-10 0471294063.
- Herold M. 2020, Change detection and time series analysis – http://www.geo-informatie.nl/courses/grs20306/course/Schedule/lecture_herold_changedetection_time_series.pdf
- Hexagon Geospatial, 2020: <https://www.hexagongeospatial.com>
- Hildebrandt G., 1987. 100 Jahre forstliche Luftbildaufnahme – zwei Dokumente aus den Anfängen der forstlichen Luftbildinterpretation. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 55, 221-224.
- Hoppe E., Bruckno B., Campbell E., Acton S., Vaccari A., Stuecheli M., Bohane A., Falorni G., Morgan J., 2014. Transportation Infrastructure Monitoring using Satellite Remote Sensing. *Materials and Infrastructure*, 1, 185–198. DOI: 10.1002/9781119318583.ch14
- Hoque M.A.A., Phinn S., Roelfsema C., Childs I., 2016. Assessing tropical cyclone impacts using object-based moderate spatial resolution image analysis: a case study in Bangladesh. *International Journal of Remote Sensing*, 37(22), 5320–5343. DOI: 10.1080/01431161.2016.1239286.
- Horus, 2020: HORUS , Heritage Observation and Retrieval Under Sand, ESA Data User Element website, http://due.esrin.esa.int/page_project89.php
- Hościło A., Mirończuk A., Lewandowska A., 2016. Określenie rzeczywistej powierzchni lasów w Polsce na podstawie dostępnych danych przestrzennych. *Sylvan*, 160(8), 627–634. DOI: 10.26202/sylvan.2018024.
- Hościło A., Tomaszewska M., 2015. CORINE Land Cover 2012 – 4th CLC inventory completed in Poland. *Geoinformation Issues* 6, 1(6), 49–58. DOI: 10.34867/gi.2014.4.
- Hu T., Smith R.B., 2018. The impact of Hurricane Maria on the vegetation of Dominica and Puerto Rico using multispectral remote sensing. *Remote Sensing*, 10(6), 827. DOI: 10.3390/rs10060827.
- Huete A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of the Environment*, 25, 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- Hyperlab, 2019: <http://hyperlabsolution.com/>
- ICESat, 2020: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/>
- ICEYE, 2020. ICEYEPressRoom: <https://www.iceye.com/press/media-assets?hsCtaTracking=2146704c-b711-4888-9fe1-a504d46c481d%7C1e0a0357-dccd-4dcd-aa3f-322c230ccf33>
- IGIK Corine HRL, 2020: <http://www.igik.edu.pl/en/corine-hrl>

- IGIK Corine HRL2012, 2020: <http://www.igik.edu.pl/pl/corine-hrl-2012>
- IGIK Corine HRL2015, 2020: <http://www.igik.edu.pl/pl/corine-hrl-2015>
- IGIK LC, 2020: <http://www.igik.edu.pl/pl/corine-lc>
- IGIK, 2020: <https://www.igik.edu.pl>
- ImageJ Fiji, 2020: <https://imagej.net/Fiji>
- ImageJ Plugins, 2020: <https://imagej.nih.gov/ij/plugins/>
- ImageJ Użytkownik, 2020: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>
- ImageJ, 2020: <http://ij.ms3d.de/>
- IMGW Sat4Envi, 2020. Prototyp serwisu Sat4Envi: <https://sok-demo.grid.cyf-kr.edu.pl/login>
- IMGW, 2020. O projekcie – sat4envi: <http://sat4envi.imgw.pl/o-projekcie/>
- ImProc, 2020. Python in image processing: https://github.com/RemoteSys/student_imProc
- Instytut Geodezji i Kartografii, 2020. COSMO-SkyMed: URL: <http://www.igik.edu.pl/pl/a/COSMO-SkyMed>
- ISS, 2020: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Space_Station
- IU NASA, 2013. Imagine the Universe! Astronomer's Toolbox, NASA Goddard Space Flight Center: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- Jackson R.D., Clarke T.R., Moran M.S., 1992. Bidirectional calibration results for 11 spectralon and 16 BaSO₄ reference reflectance panels. *Remote Sensing of Environment*, 40, 231-239. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90005-5.
- Jarocińska A., Sławik Ł., Sabat A., Zagajewski B., Magnuszewski A., Ochtyra A., 2015. Wykorzystanie zobrazowań hiperspektralnych do monitoringu jakości wód Jeziora Zegrzyńskiego. Konferencja Środowisko Informacji, 7-8 października 2015 r., Centrum Nauki Kopernik, Warszawa. https://ekoportal.gov.pl/fileadmin/Ekoportal/Konferencja/2015/prezentacje/2.8_Anna_Jarocinska_Lukasz_Slawik_UW_MGGP_Aero.pdf.
- Jaworski J., 2004. Parowanie w cyklu hydrologicznym zlewni rzecznej. s. 422. *Polskie Towarzystwo Geofizyczne*, Warszawa. ISBN 83-91031-25-3.
- Jensen J. R., 2000. *Remote sensing of the environment. An earth resource perspective*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. ISBN-10 0131889508.
- Jensen J., Cowen D., 1999. Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, 611–622. DOI: 10.1002/9780470979587.ch22.
- Ji L., Peters A., 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87, 85–98. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00174-3.

- Jordan C.F., 1969. Derivation of leaf area index from quality measurements of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663–666. DOI: 10.2307/1936256.
- JRC TR, 2018: JRC Technical reports. Devos W., Lemoine G., Milenov P., Fasbender D. 2018. Technical guidance on the decision to go for substitution of OTSC by monitoring: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC112918>
- Jung J., Kim D.-j., Palanisamy Vadivel S. K., Yun S.-H., 2019. Long-Term Deflection Monitoring for Bridges Using X and C-Band Time-Series SAR Interferometry. *Remote Sensing*, 11(11), 1258. DOI: 10.3390/rs11111258.
- Kaggle, 2020: <https://www.kaggle.com/>
- Kaufman Y., Tanre D., 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing of the Environment*, 30(2), 261–270. DOI: 10.1109/36.134076.
- Kawecka B., Eloranta P.V., 1994. Zarys ekologii glonów wód słodkich i środowisk lądowych. s. 251. Wydawnictwo Naukowe PWN. ISBN 8301113200, 9788301113209.
- Keras, 2020: <https://keras.io/>
- Kerr Y.H., Jacqueline E., Al-Bitar A., Cabot F., Mialon A., Richaume P., Quesney A., Berthon L., 2013. CATDS SMOS L3 soil moisture retrieval processor algorithm theoretical baseline document (ATBD). s. 73. Report of CNES and CATDS, France.
- Khorram S., van der Wiele C.F., Koch F.H., Nelson S.A.C., Potts M.D., 2016. Remote Sensing: Past and Present. W: S. Khorram, C.F. van der Wiele, F.H. Koch, S.A.C. Nelson, M.D. Potts, *Principles of Applied Remote Sensing*, s. 1-20. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-22560-9_1.
- Kimes D.S., Smith J.A., Ranson K.I., 1980. Vegetation reflectance measurements as a function of solar zenith angle. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 46, 1563–1573.
- Konwencja, 1972. Konwencja w sprawie ochrony światowego dziedzictwa kulturalnego i naturalnego: https://www.unesco.pl/fileadmin/user_upload/pdf/Konwencja_w_sprawie_ochrony_Swiatowego_Dziedzictwa.pdf
- Korb A.R., Dybwad P., Wadsworth W., Salisbury J.W., 1996. Portable Fourier Transform Infrared Spectrometer for Field Measurements of Radiance and Emissivity. *Applied Optics*, 35(10), 1679–1692. DOI: 10.1364/AO.35.001679.
- Kosmonauta, 2020: <https://kosmonauta.net/2016/06/2016-ho3-drugi-ksiezyc-ziemi/>
- Kozioł M., 2008. Zastosowanie bazy danych CORINE Land Cover 2000 do analiz struktury krajobrazu wybranych obszarów chronionych w Polsce. *Klasyfikacja krajobrazu. Teoria i praktyka. Problemy Ekologii Krajobrazu*, 10, 279–285.
- Kozioł K., Wężyk P., 2005. Rola klasyfikacji nadzorowanej obrazów satelitarnych QuickBird w nowej koncepcji wyznaczania przemysłowych stref uszkodzeń drzewostanów na przykładzie Miasteczka Śląskiego. *Roczniki Geomatyki*, 3(2), 87–96.

- Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon P.J., Goetz A.F.H., 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, 44, 145–163. DOI: 10.1016/0034-4257(93)90013-N.
- Kurczyński Z., 2014a. Penetracja szaty roślinnej. Skanowanie pełną długością fali. W: P. Wężyk (red.), *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*, s. 70-75. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa. ISBN 978-83-254-2090-1.
- Kurczyński Z., 2014b. Skaner barymetryczny. W: P. Wężyk (red.), *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*, s. 68-69. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa. ISBN 978-83-254-2090-1.
- Kussul N., Lemoine G., Gallego F.J., Skakun S.V., Lavreniuk M., Shelestov, A.Y., 2016. Parcel-Based Crop Classification in Ukraine Using Landsat-8 Data and Sentinel-1A Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9, 2500–2508. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2560141.
- Land Copernicus CLC, 2020: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- Land Copernicus CLC2018, 2020: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>
- Land Copernicus Dane, 2020: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ>
- Land Copernicus DEM, 2020: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem>
- Land Copernicus Global, 2020: <https://land.copernicus.eu/global/>
- Land Copernicus HRL 2018 User Manual, 2020: <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/hrl-grassland-2018-user-manual>
- Land Copernicus HRL, 2020: <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers>
- Land Copernicus Hydro, 2020: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-hydro>
- Land Copernicus Local, 2020: <https://land.copernicus.eu/local>
- Land Copernicus LUCAS, 2020: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/lucas>
- Land Copernicus Pan-European, 2020: <https://land.copernicus.eu/pan-european>
- Land Copernicus RZ, 2020: <https://land.copernicus.eu/local/riparian-zones/riparian-zones-delineation>
- Land Copernicus UA, 2020: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018>
- Land Copernicus, 2020: <https://land.copernicus.eu/>
- Landsat 7 Handbook, 2019. Landsat 7 (L7) Data Users Handbook: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-7-data-users-handbook>

- Landsat 7 Handbook, 2020:
<https://www.usgs.gov/media/files/landsat-7-data-users-handbook>
- Landsat 8 Handbook, 2019. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>
- Landsat Explorer, 2020. ESRI Landsat Explorer: <https://livingatlas2.arcgis.com/landsatexplorer/>
- Landsat Science, 2020: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/round-she-goes-landsats-orbital-swath/>
- Landsat, 2020: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-1?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con
- Łapeta B., Struzik P., 2018. Planowane działania Krajowego Operatora Danych Copernicus w latach 2018-2019. Science, IMGW. <https://www.gov.pl/attachment/cc2b4cf4-74a6-4f72-b54b-04624aa251ae>
- Lasaponara R., Masini N., 2007. Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery. *Journal of Archaeological Science*, 34, 214–221. DOI: 10.1016/j.jas.2006.04.014.
- Lasaponara R., Tucci B., Ghermandi L., 2018. On the use of satellite sentinel 2 data for automatic mapping of burnt areas and burn severity. *Sustainability*, 10(11), 3889. DOI: 10.3390/su10113889.
- Laskowicz I., Mrozek T., 2019. Zagrożenia zabytków dziedzictwa kulturowego ruchami masowymi na obszarze Karpat. *Przegląd Geologiczny*, 67(5), 369–376.
- Lensky I.M., Rosenfeld D., 1997. Estimation of precipitation area and rain intensity based on the microphysical properties retrieved from NOAA AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 36(3), 234–242. DOI: 10.1175/1520-0450(1997)036<0234:EOPAAR>2.0.CO;2.
- Leonardo Company, 2020. COSMO-SkyMed: <https://www.leonardocompany.com/en/products/cosmo-skymed>
- Lesisz K., 2019. Analiza Rozwoju Aglomeracji Wrocławskiej w Latach 1999-2018 na podstawie zdjęć satelitarnych. Praca inżynierska, Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii.
- Lewińska K.E., 2009. Land cover classification using multi-temporal MODIS satellite data. *Roczniki Geomatyki*, 7(2), 75–81.
- Lewińska K.E., 2011. Porównanie klasyfikacji wieloczasowych zdjęć satelitarnych MODIS. *Teledetekcja Środowiska*, 46, 3–13.
- Lewiński S., 2006. Rozpoznanie form pokrycia i użytkowania ziemi na zdjęciu satelitarnym Landsat ETM+ metodą klasyfikacji obiektowej. *Roczniki Geomatyki*, 4, 139–152.
- Liu H.Q., Huete A., 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457–465. DOI: 10.1109/36.377946.

- Lopez Garcia M.J., Caselles V., 1999. Mapping Burns and Natural Reforestation using Thematic Mapper Data. *Geocarto International*, 6(1), 31–37. DOI: 10.1080/10106049109354290.
- Maitre H., 2008. *Processing of Synthetic Aperture Radar Images*. s. 400. Willey & Sons Inc. ISBN 978-1-84821-024-0.
- Marsop, 2020: <http://www.marsop.info/>
- Martinis S., Kuenzer C., Wendleder A., Huth J., Twele A., Roth A., Dech S., 2015. Comparing four operational SAR-based water and flood detection approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 36(13), 3519–3543. DOI: 10.1080/01431161.2015.1060647.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. W: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, s. 179–184. 17–22 January 1993, Anaheim, California. Boston, American Meteorological Society.
- MDA, 2020. RADARSAT Constellation Mission: https://mdacorporation.com/docs/default-source/brochures/isg/surveillance-and-intelligence/space-missions/radar/rcm_11110-r6.pdf?sfvrsn=19
- MicaSense, 2017. Uncovering Spectral Signatures in a Pecan Orchard: <https://micasense.com/uncovering-spectral-signatures-in-a-pecan-orchard/>
- Michigan Tech Volcanology: <http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/klyuchevskoi/images/kliuch-compare.html>
- Microsoft, 2020. AI for conservation: Microsoft AI for Earth: <https://www.microsoft.com/en-us/ai/ai-for-earth>
- Mikołajczyk P., 2015. Mapowanie i ocena ekosystemów i ich usług w Polsce. Konferencja Środowisko Informacji, 7-8 października 2015, Centrum Nauki Kopernik, Warszawa. https://ekoportal.gov.pl/fileadmin/Ekoportal/Konferencja/2015/prezentacje/0.2_Piotr_Mikolajczyk_UNEP-GRID.pdf
- Milton E.J., Schaepman M.E., Anderson K., Kneubuhler M., Fox N., 2009. Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 113, 92–109. DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.001.
- Ministerstwo Rozwoju, 2020: <https://www.gov.pl/web/rozwoj/europejska-agencja-kosmiczna-esa>
- Mleczek M., 2017. Teledetekcyjne metody POL-In-SAR w opracowaniu szczegółowych map trudnodostępnych obszarów mokradłowych. Rozprawa doktorska, UWM w Olsztynie.
- MLR, 2020: <https://mlr.mlr-org.com/>
- Moran M.S., Jackson R.D., Slater P.N., Teillet P.M., 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, 41(2-3), 169–184. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90076-V.

- Moriondo M., Maselli F., Bindi M., 2007. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 266–274. DOI: 10.1016/j.eja.2006.10.007.
- MPI, 2020: <https://mpi4py.readthedocs.io/en/stable/>
- Mróz M., Ciołkowska M., 2004. Porównanie możliwości identyfikacji upraw rolniczych na podstawie serii obrazów radarowych ENVISAT/ASAR/IMG i APG oraz wielospektralnych obrazów SPOT XS/XI. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 14.
- Mróz M., Mleczek M., 2018a. Remote Sensing methods for eco-hydrological research in the Biebrza floodplain. s. 165. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. ISBN 8381001153, 9788381001151.
- Mróz M., Mleczek M., 2018b. Wetland Mapping Using SAR Data from the Sentinel-1A and TanDEM-X Missions: A Comparative Study in the Biebrza Floodplain (Poland). *Remote Sensing*, 10 (1), 78. DOI:10.3390/rs10010078.
- MSIP Kraków, 2020: <https://msip.krakow.pl/>, MONITAIR, 2020: <https://www.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=81480b0233ab4163a376936410be9064>
- MTS, 2020: <https://atmosphere.copernicus.eu/mon-toit-solaire>
- Mueller R., Seffrin R., 2006. New methods and satellites: a program update on the NASS cropland data layer acreage program. Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates, *ISPRS archives*, 36-8/W48, 97–102.
- MultiSpec doc, 2020: <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/documentation.html>
- MultiSpec, 2020: <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/index.html>
- Mundi, 2020. Mundi Web Services: <https://mundiwebservices.com/>
- Murdzek R., Malik H., Leśniak A., 2018. The use of the DInSAR method in the monitoring of road damage caused by mining activities. *E3S Web of Conferences* 36(7), 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/20183602005.
- Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J.T., Votava P., Nemani R.R., Running S.W., 2002. Global Products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 214–231. DOI: 10.1016/S0034 – 4257(02)00074-3.
- Myneni, R.B., Knyazikhin Y., Glassy J., Votava P., Shabanov N., 2003. User's Guide FPAR, LAI (ESDT: MOD15A2) 8-day Composite NASA MODIS Land Algorithm. FPAR, LAI User's Guide. s. 17. Terra MODIS Land Team.
- Nalej M., 2019. Pokrycie terenu województwa łódzkiego w latach 2000-2018 w świetle danych Corine Land Cover. *Acta Geographica Lodziensia*, 109, 75–89. DOI: 10.26485/AGL/2019/109/5.
- Narine L., Popescu S., Neuenschwander A., Zhou T., Srinivasan S., Harbeck K., 2019. Estimating aboveground biomass and forest canopy cover with simulated ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 224, 1–11. DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.037.

NASA FB, 2019. NASA ICE: https://scontent-waw1-1.xx.fbcdn.net/v/t1.0-9/71311704_1161408637387225_8046022364586049536_o.png?_nc_cat=107&_nc_sid=8024bb&_nc_ohc=wB_YVQ58bPQAX-myFlu&_nc_ht=scontent-waw1-1.xx&oh=7a6b1b19535033d0f2a5520d26418e8b&oe=5FB45931

NASA L8, 2020. Landsat 8 Bands: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands>

NASA L9, 2020. Landsat 9 Overview: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/landsat-9-overview>

NASA Landsat, 2020. Landsat Looks and Sees: https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/news/landsat-history.html

NASA SIC, 2020. Satellite Imaging Corporation – LANDSAT 7 ETM+ Satellite Sensor: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat/>

NASA, 2009: https://www.nasa.gov/topics/earth/earthday/gall_tiros.html

NASA, 2015: https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_329.html

NASA, 2018: <https://www.nasa.gov/image-feature/apollo-8-earthrise>

NASA, 2019: https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/edu_iss.jpg

NASA, 2020: https://www.nasa.gov/pdf/449089main_White_Sands_Missile_Range_Fact_Sheet.pdf

Nasini R., Oddone A., 2018. BlackSky constellation: very high resolution optical data for multi-daily revisit. 24th MARS Conference, 21-22 November 2018, Dubrovnik. https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/14-black_sky.pdf

Negrón-Juárez R., Baker D.B., Chambers J.Q., Hurtt G.C., Goosem S., 2014. Multi-scale sensitivity of Landsat and MODIS to forest disturbance associated with tropical cyclones. *Remote Sensing of Environment*, 140, 679–689. DOI: 10.1016/j.rse.2013.09.028.

Negula I.D., Sofronie R., Virsta A., Badea A., 2015. Earth observation for the world cultural and natural heritage. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, 438–445. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.08.114.

Neupy, 2020: <http://neupy.com/pages/home.html>

Novelli, F., Spiegel, H., Sandén, T., & Vuolo, F., 2019. Assimilation of sentinel-2 leaf area index data into a physically-based crop growth model for yield estimation. *Agronomy*, 9 (5), 255–274. DOI: 10.3390/agronomy9050255.

NRCAN, 2015. Remote Sensing Tutorials, Natural Resources Canada: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/satellites-sensors/spatial-resolution-pixel-size-and-scale/9407>

NRCAN, 2019. Remote Sensing Tutorials, Natural Resources Canada: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/introduction/interactions-atmosphere/14635>

NSIDC, 2020. National Snow & Ice Data Center: <https://nsidc.org/data/icesat-2NSIDC>

- Ochtyra A., 2020. Forest Disturbances in Polish Tatra Mountains for 1985–2016 in Relation to Topography, Stand Features, and Protection Zone. *Forests*, 11, 579. DOI: 10.3390/f11050579.
- Odermatt D., Gitelson A., Brando V.E., Skotak M., 2012. Review of Constituent Retrieval in Optically Deep and Complex Waters from Satellite Imagery. *Remote Sensing of Environment* 118, 116–126. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.013.
- Onda, 2020. Home – ONDA DIAS: <https://www.onda-dias.eu/cms/>
- Open Hub, 2020. Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- Orfeo, 2020: <https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/index.html>
- Ortho tools, 2020: <https://pypi.org/project/orthorectification/>
- Orynbaikzy A., Gessner U., Conrad C., 2019. Crop type classification using a combination of optical and radar remote sensing data: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 40(3), 1–40. DOI: 10.1080/01431161.2019.1569791.
- Osińska-Skotak K., 2014. Teledetekcja w badaniach jakości wód śródlądowych. W: P. Hydzik, P. Walawender (red.), *Badania przestrzeni kosmicznej a innowacje i wzrost gospodarczy*, s.84–108. BD Center, sp. z o.o., Rzeszów. ISBN 978-83-937-3900-4.
- Osińska-Skotak K., Pluto-Kossakowska J., Fijałkowska A., 2013. Możliwości teledetekcyjnej kontroli utrzymania gruntów rolnych w dobrej kulturze rolnej (GAEC). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 25, 141–154. ISBN 978-83-61576-24-2.
- Osińska-Skotak K., Zapłata R., 2014. Analysis of usefulness of satellite image processing methods for investigations of cultural heritage resources. *Geoinformatica Polonia*, 14(1), 7–18. DOI: 10.1515/gein-2015-0001.
- Osmólska A., Hawryło P., 2018. Using a GEOBIA framework for integrating different data sources and classification methods in context of land use/land cover mapping. *Geodesy and Cartography*, 67(1), 99–116. DOI: 10.24425/118699.
- Pascucci S., Bassani C., Palombo A., Poscolieri M., Cavalli R., 2008. Road Asphalt Pavements Analyzed by Airborne Thermal Remote Sensing: Preliminary Results of the Venice Highway. *Sensors*, 8(2), 1278–1296. DOI: 10.3390/s8021278.
- PCI Geomatica, 2020: <https://www.pci-geomatics.com>
- Philipson, Philpot, 2012. *Remote Sensing Fundamentals, Passive Microwave*. http://ceeserver.cee.cornell.edu/wdp2/cee6100/6100_monograph/mono_10_Fa12_microwave.pdf (dostęp: 18.02.2020)
- Piekarczyk J., Wójtowicz M., Wójtowicz A., 2004. Wpływ nawożenia azotowego i odmian na charakterystyki spektralne łąnu rzepaku ozimego. *Rośliny Oleiste*, 15(1), 280–291.
- Pietrzak R., Rączkowski W., 2006. Zaginione miasto – historyczna zagadka i zdjęcia lotnicze. *Archeologia Żywa*, 4(38), 15–20.
- Podest E., 2018a. Basics of SAR. Applied Remote Sensing Training. ARSET NASA. <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session1-SAR-English.pdf>

- Podest E., 2018b. SAR Processing and Data analysis. Applied Remote Sensing Training. ARSET NASA. https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session2-SAR-English_0.pdf
- Polak R., 2020. Wykorzystanie obrazów Google Earth Engine w kontroli IACS. Praca magisterska, AGH w Krakowie.
- Popescu S., Zhou T., Nelson R., Neuenschwander A., Sheridan R., Narine L., Walsh K., 2018. Photon counting LiDAR: an adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 208, 154–170. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.019.
- Prasad A.K., Singh R., Tare V., Kafatos M., 2007. Use of vegetation index and meteorological parameters for the prediction of crop yield in India. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 5207–5235. DOI: 10.1080/01431160601105843.
- PSF, 2020: <https://www.python.org/>
- Puszyńska A., 2019. Basics of SAR. Applied Remote Sensing Training. Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska.
- PWN, 2020: <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/Kosmiczne-loty-zalogowe;446950.html>
- PW-Sat2, 2018. Satelita z misją, która pozwoli ograniczyć liczbę kosmicznych śmieci: <https://pw-sat.pl/projekt/>
- Python, 2020: <https://docs.python.org/3/license.html>
- PyTorch, 2020: <https://pytorch.org/>
- QGIS plugins, 2020: <https://plugins.qgis.org/plugins/?page=1&&>
- QGIS, 2020: <https://qgis.org/pl/site/>
- Qi J., Chehbouni J.Q., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshian S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119–126. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.
- R analizy, 2020a: <https://mgimond.github.io/megug2017/>
- R analizy, 2020b: <https://mgimond.github.io/Spatial/index.html>
- R Cluster, 2020: <https://cran.r-project.org/web/views/Cluster.html>
- R Machine Learning, 2020: <https://cran.r-project.org/web/views/MachineLearning.html>
- R task view, 2020: <https://cran.r-project.org/web/views/Spatial.html>
- R, 2020: <https://www.r-project.org/pobierania>
- Rączkowski W., 2015. Przeszłość uchwycona na fotografii: archeologiczny rekonesans lotniczy okolic Bobolic. W: M. Pawleta, R. Zapłata (red.), Nieinwazyjne rozpoznanie potencjału zasobów archeologicznych rejonu Bobolic, woj. zachodniopomorskie, s. 77–97. E-Naukowiec, Fundacja „5Medium”, Lublin. ISBN 978-83-941018-3-1.
- Rahman M.S., Di L., 2017. The State of the Art of Spaceborne Remote Sensing in Flood Management. *Natural Hazards*, 85(2), 1223–1248. DOI: 10.1007/s11069-016-2601-9.

- Ramsey III E.W., Hodgson M.E., Sapkota S.K., Nelson G.A., 2001. Forest impact estimated with NOAA AVHRR and Landsat TM data related to an empirical hurricane wind-field distribution. *Remote Sensing of Environment*, 77(3), 279–292. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00217-6.
- Rango A., Salomonson V.V., 1974. Regional flood mapping from space. *Water Resources Research*, 10(3), 473–484. DOI: 10.1029/WR010i003p00473.
- Ray S.S., Neetu M., 2017. Crop area estimation with Remote Sensing. W: J. Delincé (red.), *Handbook on Remote Sensing for Agricultural Statistics*, s. 131-160. *Global Strategy to improve Agricultural and Rural Statistics (GSARS)*, Rome.
- RAY, 2020: <https://github.com/ray-project/ray>
- Richards J.A. 2009. Remote sensing with imaging radar. s. XIX, 361. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-02020-9.
- RID, 2017. Projekt NCBiR – Rozwój Innowacji Drogowych – Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie, 2014-2017: <http://www.rid.agh.edu.pl/>
- Robak A., Gadawska A., Milczarek, M., Lewiński S., 2016. Wykrywanie wody na zdjęciach optycznych Sentinel-2 na podstawie wskaźników wodnych. *Teledetekcja Środowiska*, 55(2), 55–72.
- Rock B.N., Williams D.L., Vogehann J.E., 1985. Field and airborne spectral characterization of suspected acid deposition damage in R spruce (*Picea canadensis*) from Vermont. *Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*, Purdue University, Lafayette, IN, 71–81.
- Rossi S., Niemeier S., 2012. Drought Monitoring with estimates of the Fraction of Absorbed Photosynthetically-active Radiation (fAPAR) derived from MERIS. W: B. Wardlaw, M. Anderson, J. Verdin (red.), *Remote Sensing for Drought: Innovative Monitoring Approaches*, s. 95–116. CRC Press-Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.
- Rottensteiner F., Trinder J., Clode S., Kubik K., 2005. Using the Dempster–Shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection. *Information Fusion*, 6(4), 283–300. DOI: 10.1016/j.inffus.2004.06.004.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Greenbelt: NASA SP-351, 3010–3017.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 22 października 2013 r. ustanawiające europejski system nadzorowania granic (EUROSUR) (Dz. U. [UE] L. 2013.295.11).
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 czerwca 2018 r. ustanawiające program kosmiczny Unii i Agencję Unii Europejskiej ds. Programu Kosmicznego (COM/2018/447)
- Ruciński D., Rączkowski W., Niedzielko J., 2015. A Polish perspective on optical satellite data and methods for archaeological sites prospection, *Proc. SPIE 9535. Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015)*, 95350U (19 June 2015). DOI: 10.1117/12.2195497.

- SAGA GIS, 2020: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>
- SAGA Tutorial, 2017. Satellite Image Analysis and Terrain Modelling: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf
- SatBałtyk, 2015: <http://www.satbaltyk.pl/>
- Satimagingcorp, 2020: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/rapideye/>
- Schuster C., Schmidt T., Conrad C., Kleinschmit B., Förster M., 2015. Grassland habitat mapping by intra-annual time series analysis–Comparison of RapidEye and TerraSAR-X satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 25–34. DOI: 10.1016/j.jag.2014.06.004.
- SciHubUserGuide, 2020. Copernicus Open Access Hub User Guide: <https://scihub.copernicus.eu/userguide/BatchScripting>
- Scikit-learn, 2020: <https://scikit-learn.org/stable/>
- Se2WaQ, 2020: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/se2waq/#>
- Sentinel Playground, 2020: <https://www.sentinel-hub.com/explore/sentinelplayground/>
- Sentinel User Guides, 2020: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>
- SEOS, 2020a. Introduction to Remote Sensing: <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c01-p06.html>
- SEOS, 2020b Introduction to Remote Sensing: <https://seos-project.eu/remotesensing/remotesensing-c01-p03.html>
- Sepulcre-Canto G., Horion S.M.A.F., Singleton A., Carrao H., Vogt, J., 2012. Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 12(11), 3519–3531. DOI: 10.5194/nhess-12-3519-2012.
- Shahia K., Taherzadeha E., Shafri H.Z.M., 2015. A Novel Spectral Index to Automatically Extract Road Networks from Worldview-2 Satellite Imagery. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 27-33. DOI: 10.1016/j.ejrs.2014.12.003.
- Siegmund A., Menz G., 2005. Fernes nah gebracht – Satelliten – und Luftbildeinsatz zur Analyse von Umweltveränderungen im Geographieunterricht. *Geographie und Schule*, 27(154), 2-10.
- Skakun S., Kussul N., Shelestov A., Kussul O., 2014. Flood hazard and flood risk assessment using a time series of satellite images: A case study in Namibia. *Risk Analysis*, 34(8), 1521-1537. DOI: 10.1111/risa.12156.
- Ślapińska M., Berezowski T., Frąk M., Chormański J., 2016. Retrieval of water quality algorithms from airborne HySpex camera for oxbow lakes in north-eastern Poland. *EGU General Assembly 2016*, 17-22 April 2016, Vienna, Austria.
- Smith B.E., Fricker H.A., Holschuh N., Gardner A., Adusumilli S., Brunt K.M., Csatho B., Harbeck K., Huth A., Neumann T., Nilsson J., Siegfried M., 2019. Land ice height-retrieval algorithm for NASA's ICESat-2 photon counting laser altimeter. *Remote Sensing of the Environment*, 233, 111352. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111352.

- Smith P.J., Pappenberger F., Wetterhall F., Thielen del Pozo J., Krzeminski B., Salamon P., Muraro D., Kalas M., Baugh C., 2016. On the Operational Implementation of the European Flood Awareness System (EFAS). W: T.E. Adams III, T. C. Pagano (red.), *Flood Forecasting: A Global Perspective*, s. 313–348. Academic Press, USA. DOI: 10.1016/B978-0-12-801884-2.00011-6.
- SMOS, 2020, SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) Mission: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/smos#sensors>
- Snap, 2020: <http://step.esa.int/main/>
- Sobloo, 2020. sobloo | Beyond the Data. Creative Grounds: <https://sobloo.eu/>
- Spacenews, 2019. Italian Commitment to Next-gen Radar Satellites in Time to Avert Gap. Credit AIDA: https://spacenews.com/wp-content/uploads/2015/01/CosmoSkymed_AIAD-678x485.jpg
- Spacenews, 2020: <https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>
- SpaceX, 2020. Starlink: <https://spacex.com.pl/starlink>
- Spektrum, 2008: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_pl.svg#filehistory
- Sprawozdanie Komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie Ewaluacji Europejskiego Systemu Nadzorowania Granic z dnia 12 września 2018 r.
- Sputnik, 2020: https://pl.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1
- Staben G.W., Evans K.G., 2008. Estimates of tree canopy loss as a result of Cyclone Monica, in the Magela Creek catchment northern Australia. *Austral Ecology*, 33(4), 562–569. DOI: 10.1111/j.1442-9993.2008.01911.x.
- StatSoft, 2020. Internetowy Podręcznik Statystyki, Metoda wektorów nośnych: https://www.statsoft.pl/textbook/stathome_stat.html?https%3A%2F%2Fwww.statsoft.pl%2Ftextbook%2Fstsvm.html
- Stereńczak K., Kraszewski B., Mielcarek M., Piasecka Ż., 2017. Inventory of standing dead trees in the surroundings of communication routes – The contribution of remote sensing to potential risk assessments. *Forest Ecology and Management*, 402, 76–91. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.07.018.
- StereoMorph, 2020: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/2041-210X.12326>
- Stewart C., Lasaponara R., Schiavon G., 2013. ALOS PALSAR Analysis of the Archaeological Site of Pelusium. *Archaeological Prospection* 20, 109–116. DOI: 10.1002/arp.1447.
- Stewart C., Rast M., Sarti F., Arino O., 2015. ESA Activities in Earth Observation for Cultural Heritage Applications. *International Journal of Heritage in Digital Era*, 4, 325–338. DOI: 10.1260/2047-4970.4.3-4.325.
- Suanpaga W., Yoshikazu K., 2010. Riding Quality Model for Asphalt Pavement Monitoring Using Phase Array Type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR). *Remote Sensing*, 2, 2531–2546. DOI: 10.3390/rs2112531.

- Sun D., Hu C., Qiu Z., Cannizzaro J.P., Barnes B.B., 2014. Influence of a red band-based water classification approach on chlorophyll algorithms for optically complex estuaries. *Remote Sensing of Environment*, 155, 289–302. DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.035.
- Szkaradek K., 2017. Rozwój Krakowa w latach 1985-2011 na bazie obrazowań satelitarnych Landsat. Praca inżynierska, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej.
- Szostak M., Knapik K., Wężyk P., Likus-Cieślik J., Pietrzykowski M., 2019. Fusing Sentinel-2 Imagery and ALS Point Clouds for Defining LULC Changes on Reclaimed Areas by Afforestation Sustainability, 11, 1251. DOI:10.3390/su11051251.
- Szporak-Wasilewska S., 2012. Zastosowanie metod teledetekcyjnych dla szacowania ewapotranspiracji na przykładzie Dolnego Basenu rzeki Biebrzy. Rozprawa doktorska, SGGW w Warszawie.
- Szwagrzyk J. 2008. Analiza wykonywania dyrektyw UE 79/409/EWG w sprawie ochrony dzikich ptaków wraz z ich siedliskami oraz 92/43/EWG w sprawie siedlisk przyrodniczych oraz dzikiej fauny i flory oraz wnioski wynikające z tej analizy dla planowania urzędniowego. Maszynopis opracowany w ramach prac Zespołu Zadaniowego ds. nowelizacji Instrukcji Urządzenia Lasu, Kraków.
- Tangdamrongsub N., Ditmar P.G., Steele-Dunne S.C., Gunter B.C., Sutanudjaja E.H., 2016. Assessing total water storage and identifying flood events over Tonlé Sap basin in Cambodia using GRACE and MODIS satellite observations combined with hydrological models. *Remote Sensing of Environment*, 181, 162–173. DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.030.
- Telespazio Leonardo and Thales Company, 2020. COSMO-SkyMed Second Generation: the first images from the new satellite give us an even sharper picture of our Planet: <https://www.telespazio.com/en/news-and-stories-detail/-/detail/090320-cosmo-skymed-second-generation-the-first-images-from-the-new-satellite-give-us-an-even-sharper-picture-of-our-planet?f=%2Fhome>
- Tensorflow, 2020: <https://www.tensorflow.org/>
- Tetrault R., 2006. Access and Availability of Resourcesat-1 AWiFS Data for Agriculture. USDA Satellite Imagery Archive. <https://pdfs.semanticscholar.org/f63c/dfc640282de87fcf67999aed51b4ae36e78c.pdf>
- Thales Group, 2015. All About Stratobus: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/space-qa-all-about-stratobus>
- Thorsten M., Neumann T., Martino A., Abdalati W., Brunta K., Csatho B., Farrell S., Fricker H., Gardner A., Harding D., Jasinski M., Kwok R., Magruder L., Lubin D., Luthcke S., Morison J., Nelsona R., Neuenschwander A., Palm S., Popescu S., CKShum, Schutz B.E., Smith B., Yang Y., Zwally J., 2017. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 190, 260–273. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.029.
- Toming K., Kutser T., Uiboupin R., Arikas A., Vahter K., Paavel B., 2017. Mapping Water Quality Parameters with Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument imagery in the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 9(10), 1070. DOI: 10.3390/rs9101070.

- Traktat z Lizbony (2007/C 306/01) zmieniający Traktat o Unii Europejskiej i Traktat ustanawiający Wspólnotę Europejską z dnia 13 grudnia 2007 r.
- Tsyganskaya V., Martinis S., Marzahn P., Ludwig R., 2018. SAR-based detection of flooded vegetation – a review of characteristics and approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 39(8), 2255–2293. DOI: 10.1080/01431161.2017.1420938.
- Tutorial ML RS, 2020: <https://hakimabdi.com/blog/tutorial-machine-learning-classification-of-sentinel-2-satellite-imagery-using-r>
- US Forest Service, 2020. Geospatial Technology and Applications Center: <https://www.fs.fed.us/eng/rsac/baer/barc.html>
- Van Genuchten M.T., 1987. A numerical model for water and solute movement in and below root zone. Research Report No 121. U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS: Riverside, California, USA.
- Velez-Reyes M., Goodman J.A., 2011. Spectral Imaging. W: B.E. Saleh (red.), *Introduction to Subsurface Imaging*, s. 231-275. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511732577.
- Vosselman G., Mass H-G., 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. s. 337. Whittles Publishing, UK. ISBN 978-1-904445-87-6
- Wall L., Larocque D., Léger, P. M., 2008. The early explanatory power of NDVI in crop yield modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 29(8), 2211–2225. DOI: 10.1080/01431160701395252.
- Wang C., Zhu X., Nie S., Xi X., Li D., Zheng W., Chen S., 2019. Ground elevation accuracy verification of ICESat-2 data: a case study in Alaska, USA. *Optics Express*, 27(26), 38168–38179. DOI: 10.1364/OE.27.038168.
- Wang L., Dong Q., Yang L., Gao J., Liu, J., 2019. Crop classification based on a novel feature filtering and enhancement method. *Remote Sensing*, 11(4), 455. DOI: 10.3390/rs11040455.
- Wang L., Qu J., 2007. NMDI: A Normalized Multi-Band Drought Index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 34, L20405. DOI: 10.1029/2007GL031021.
- Wang W., Qu J.J., Hao X., Liu Y., Stanturf J.A., 2010. Post-hurricane forest damage assessment using satellite remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), 122–132. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.09.009.
- Wang Y., Colby J. D., Mulcahy K. A., 2002. An efficient method for mapping flood extent in a coastal floodplain using Landsat TM and DEM data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18), 3681–3696. DOI: 10.1080/01431160110114484.
- Wanjura D.F., Hatfield J.I., 1987. Sensitivity of spectral vegetation indices to crop biomass. *Transactions of the ASAE*, 30(3), 810–816. DOI: 10.13031/2013.30479.
- Wąsowski J., Bovenga F., Nutricato R., Conte D., Refice A., Gregor M., Kowalski Z., 2009. Przestrzenne rozmieszczenie osiadań w rejonie Kopalni Soli Wieliczka w świetle satelitarnych danych interferometrycznych. *Przegląd Geologiczny*, 57(2), 164–172.

- Wąsowski J., Bovenga F., Nutricato R., Conte D., Refice A., Kowalski Z., Graniczny M., 2008. Satellite interferometry reveals spatial patterns of subsidence in the ancient Wieliczka Salt Mine (UNESCO Heritage Site, Poland). W: H. Lacoste, L. Ouwehand (red.), Proceedings of Fringe 2007. ESRIN, Frascati, Italy, 26–30 November 2007. ESA Publications Division, Noordwijk.
- Wekeo, 2020. Home – Wekeo: <https://www.wekeo.eu/web/guest/home>
- Wężyk P., de Kok R., 2005. Automatic mapping of the dynamics of forest succession on abandoned parcels in south Poland. W: J. Strobl, T. Blaschke, G. Griesebner (red.), *Angewandte Geoinformatik*, s. 774-779. Wichmann Verlag, Heidelberg. ISBN 3-87907-244-4.
- Wężyk P., de Kok R., Szombara S., 2007. Zastosowanie obiektowo zorientowanej analizy obrazu (GEOBIA) wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych w klasyfikacji obszaru miasta Krakowa. *Roczniki Geomatyki*, 17b, 791–800.
- Wężyk P., de Kok R., Zajączkowski G., 2004. The role of statistical and structural texture analysis in VHR image analysis for forest applications. A case study on QuickBird data in the Niepolomice Forest. W: W: J. Strobl, T. Blaschke, G. Griesebner (red.), *Angewandte Geoinformatik*, s. 770–775. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg. ISBN 3-87907406-2.
- Wężyk P., Hawryło P., Janus B., Weidenbach M., Szostak M., 2018. Forest cover changes in Gorce NP (Poland) using photointerpretation of analogue photographs and GEOBIA of orthophotos and nDSM based on image-matching based approach. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 501-510. DOI: 10.1080/22797254.2018.1455158.
- Wężyk P., Hawryło P., Zięba-Kulawik K., 2019. Post-hurricane forest mapping in Bory Tucholskie (northern Poland) using random forest based up-scaling approach of ALS and photogrammetry-based CHM to KOMPSAT-3 and PlanetScope imagery. W: G. Chirici, M. Gianinetto (red.), *Trends in earth observation*, Vol. 1: Earth observation advancements in a changing world. s. 45-48. Italian Society of Remote Sensing (AIT). DOI: 10.978.88944687/17.
- Wężyk P., Wańczyk R., 2008. Implementacja dyrektywy INSPIRE na przykładzie internetowego serwisu „Mapa roślinności rzeczywistej Miasta Krakowa”. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 673–683.
- Wężyk P., Wójtowicz-Nowakowska A., Pierzchalski M., Mlost J., Szafrąńska B., 2013. Mapa zmian pokrycia terenu Małopolski 1986-2011 wykonana w oparciu o klasyfikację obiektową obrazów satelitarnych LANDSAT oraz RapidEye. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 25, 273-284.
- Wężyk P., Wójtowicz-Nowakowska A., Pierzchalski M., Mlost J., Szwed P., 2012. Klasyfikacja pokrycia terenu metodą OBIA wraz z wykorzystaniem zobrażeń satelitarnych RapidEye. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 23, 489-500.
- Wężyk P., Hawryło P., Szostak M., Pierzchalski M., de Kok R., 2014. The land use and land cover (LULC) map of the water catchments areas in south Poland, based on the GEOBIA multi-stage approach of BlackBridge RapidEye, Landsat and vector data, as an essential part of the SaLMaR project. *South-Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics*, 3(2S), 293–297.

- Wężyk P., Łabaj A., Drzewiecki W., Jasiewicz J., Kaźmierowski C., Piekarczyk J., Królewicz S., Kuchma T., Cisło-Lesicka U., 2020. Wpływ czynników sezonowych na wielkość plonu potencjalnego, ze szczególnym uwzględnieniem suszy. *Gospodarka Wodna*, 11. 9-15.
- White Sands / APL, 2006: <https://www.airspacemag.com/space/the-first-photo-from-space-13721411/>
- Wójtowicz A., Wójtowicz M., Piekarczyk J., 2005. Zastosowanie teledetekcji do monitorowania i oceny produktywności plantacji rzepaku. *Rośliny Oleiste*, 26(1), 269–276.
- Woodhouse I.H., 2006. Introduction to microwave remote sensing. s. 400. CRC Press. ISBN 0-415-27123-1.
- Xgboost, 2020: <https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/>
- Younis M., 2018. Synthetic Aperture Radar Principles. Microwaves and Radar Institute German Aerospace Center (DLR). http://seom.esa.int/landtraining2015/files/Day_1/D1T1b_LTC2015_Younis.pdf
- Youtube, 2020: <https://www.youtube.com/watch?v=6qAu-NHudp4>
- Zajączkowski G., Jabłoński M., Jabłoński T., Małecka M., Kowalska A., Małachowska J., Piwnicki J., 2019. Raport o stanie lasów 2018. PGL Lasy Państwowe, Warszawa.
- Zajączkowski G., Wężyk P., 2004. Techniki teledetekcyjne w inwentaryzacji urządzeniowej lasu. *Roczniki Geomatyki*, 2(4), 41–50.
- Zapłata R., 2013. Nieinwazyjne metody w badaniu i dokumentacji dziedzictwa kulturowego – aspekty skanowania laserowego w badaniach archeologicznych i architektonicznych. s. 377. Fundacja HEREDITAS, Warszawa. ISBN 978-83-931723-8-2.
- Zapłata R., 2016. Landslides as Threats to Cultural Heritage – A Proposal for Integrated Actions with the Use of ALS Data. W: B. Szmygin (red.), *Heritage in transformation: cultural heritage protection in XXI century: problems, challenges, predictions, Heritage for Future* 1(3), 229-239. ISBN: 978-83-944481-2-7.
- Zawiła-Niedźwiecki T., 2013. Teledetekcja i fotogrametria obszarów leśnych. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin. https://www.geomatyka.lasy.gov.pl/c/document_library/get_file?uuid=92551485-d315-4491-b6ea-7f771c5403c9&groupId=107840.
- Zehentner, 2017. Kinematic orbit positioning applying the raw observation approach to observe time variable gravity. ©Airbus Defence & Space: https://www.researchgate.net/profile/Norbert_Zehentner/publication/316668578/figure/fig9/AS:490282027360263@1493903752638/Artists-view-of-the-two-satellites-TerraSAR-X-and-TanDEM-X-in-close-formation-above.png
- Zeni G., Bonano M., Casu F., Manunta M., Manzo M., Marsella M., Pepe A., Lanari R., 2011. Long-term deformation analysis of historical buildings through the advanced SBAS-DInSAR technique: The case study of the city of Rome, Italy. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8(3), S1. DOI: 10.1088/1742-2132/8/3/S01.
- Zięba-Kulawik K., Skoczylas K., Mustafa A., Wężyk P., Gerber P., Teller J., Omrani H., 2020. Spatiotemporal changes in 3D Building Density with LiDAR and GEOBIA: A city-level analysis. *Remote Sensing*, 2020, 12(21); doi.org/10.3390/rs12213668.

Skorowidz

- 1958 Alpha 1 13
95-ty percytyl 186
ADEOS 173
Advanced Scatterometer, *zob. skaterometr zaawansowany*
aerotriangulacja 247
AGB 183
AGBD 186
AI, *zob. sztuczna inteligencja*
Airbus Defence 17, 77, 394, 395, 398, 401
akwakultura 261
albedo 53, 55, 91, 278, 359
algebra map 125, 211, 215, 218, 222, 224, 240
ALI 39
ALOS 173, 174, 177, 277, 279, 389
ALS LiDAR, *zob. lotnicze skanowanie laserowe*
altimetr 44, 52, 53, 145, 173, 174, 179–183
Amerykańska Służba Geologiczna 16, 40, 107, 150, 155, 157, 165, 170, 190, 314, 365
AMMER, *zob. Monitoring jakości wody dla zbiorników śródlądowych*
AMR-C, *zob. radiometr mikrofalowy*
analityka danych 94, 402
analiza obiektowa 94, 111–115, 210, 221, 227, 246, 250, 251, 253, 278, 279, 335, 336, 342, 350–354
analiza składowych głównych 95, 104, 125, 211, 225, 230, 239, 248
analiza wektora zmian 125–127
AOT 66, 140
Apollo 14, 15, 392
artyfical intelligence, *zob. sztuczna inteligencja*
ASAR 50, 177, 215, 216, 318, 357, 389
ASCAT, *zob. skaterometr zaawansowany*
ASI, *zob. Włoska Agencja Kosmiczna*
ASTER Global DEM 16, 180, 272
ASTER 16, 107, 164, 165, 167, 180, 219, 272, 287, 294, 336, 375, 376
ASTER-GDEM 313, 314
ATCOR 64, 249, 250
ATLAS 16, 52, 53, 54, 181, 182, 183
Atmosfera (Copernicus) 131, 260, 261
A-train 393
AWS Amazon 200, 201
bardzo wysoka rozdzielczość 17, 36, 115, 131, 159, 161, 163, 164, 198, 199, 270, 298, 311, 328, 339, 350, 376, 378, 384, 393, 395, 398, 399, 401
baza interferometryczna 77
BDOT10k 369, 274, 279
BEIDOU 19
Bezpieczeństwo (Copernicus) 131, 260, 273
bezzałogowe statki powietrzne 132, 212, 239, 246, 250, 251, 320, 326, 357
Big Data 94, 95, 392, 393, 402
bilans ciepłno-radiacyjny 359
bilans cieplny 259, 359, 360
BIOMASS 184
BlackSky 395, 395, 397
bliska podczerwień 12, 14, 17, 25, 27, 30, 39, 52, 79, 80, 86, 88, 91, 92, 95, 115, 117, 138–140, 147–149, 152, 153, 155, 157, 158, 164, 170, 174, 179, 180, 258, 282, 283, 291–294, 305, 311, 324, 333, 352, 360, 363, 365, 374, 375, 377, 395, 396, 398, 399
BOA, *zob. współczynnik odbicia od powierzchni Ziemi*
BSP, *zob. bezzałogowe statki powietrzne*
C3S, *zob. Serwis Monitorowania Zmian Klimatu całkowita dokładność klasyfikacji* 116, 119, 284
CAMS, *zob. Serwis Monitorowania Stanu Atmosfery*
Capella Space 400
CARTOSAT 159–163, 393
CAVIS 162, 163, 398
CEMS, *zob. Serwis Zarządzania Kryzysowego*
Centrum Koordynacji Reagowania Kryzysowego 312
charakterystyki spektralne 39, 56, 57, 58, 110, 284
chessboard segmentation, *zob. segmentacja, metoda szachownicy*
CHIME 149, 170, 399
chmura obliczeniowa 10, 196–201, 203, 210, 228, 233, 234, 256, 328, 329, 331, 333, 392, 393
chmura punktów 53, 112, 113, 115, 210, 211, 212, 219, 220–223, 226, 239, 242, 246, 247, 249, 251, 254, 278, 335, 351, 352, 353
CHRIS 39, 170, 172, 173, 294
chwilowe pole widzenia 32
CIMR 149, 399
CIR, *zob. kompozycja w barwach zafałszowanych*
CIS 12
CLC, *zob. CORINE Land Cover*
CLMS, *zob. Serwis Monitorowania Obszarów Łąkowych*
cloud processing 228, 392
CMEMS, *zob. Serwis Monitorowania Środowiska Morskiego*
CNES, *zob. Państwowy Ośrodek Badań Kosmicznych*
CO₂ 328, 330, 344
CO2M 149, 399
continuum removed, *zob. normalizacja krzywej spektralnej*
contrast filter segmentation, *zob. segmentacja, metoda filtru kontrastu*
contrast split segmentation, *zob. segmentacja, metoda podziału kontrastu*
Copernicus 131–135, 138, 141–143, 147–149, 170, 187–190, 196–198, 200, 206, 207, 216, 256, 257, 260–263, 265–269, 271–274, 277, 279, 313, 314, 331, 338, 340, 341, 343, 347–349, 362, 372, 381, 399
CORINE Land Cover 125, 128, 130, 257, 262–266, 272, 274, 275, 313, 314

CORINE 125, 128, 257, 262–267, 271, 272, 274, 275, 279, 313, 314, 341

COSMO-LEPS 313, 315

COSMO-SkyMed 18, 175, 178, 200

CREODIAS 257, 196–199

CRISTAL 149, 399

CSA, *zob.* Kanadyjska Agencja Kosmiczna

CSS, *zob.* Serwis Bezpieczeństwa

CubeSat 396, 399

CVA, *zob.* analiza wektora zmian

czerwień krawędziowa 58, 92, 138, 139, 140, 160, 162, 163, 170, 293, 310, 352, 394

DAAC 183

dane zintegrowane 351

data fusion, *zob.* dane zintegrowane

data mining, *zob.* eksploracja danych

data science, *zob.* analityka danych

deep learning, *zob.* głębokie uczenie

Deimos-02 268

DEM, *zob.* numeryczny model terenu

DIAS 196–198, 200, 213, 257

DigitalGlobe 17, 161, 163, 201, 277, 336

DInSAR, *zob.* interferometria różnicowa

DL, *zob.* głębokie uczenie

DLR, *zob.* Niemiecka Agencja Kosmiczna

DN, *zob.* jaskrawość piksela

dokładność konsumenta 119

dokładność producenta 119

DOS, *zob.* radiancja obiektów ciemnych

DSCOVER 166, 393, 396

DTED-1, *zob.* SRTM

Earth Observation, *zob.* obserwacja Ziemi

echo 45, 53, 145, 225

ECMWF, *zob.* Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych

EDRS, *zob.* Europejski System Łączności Satelitarnej

EEA, *zob.* Europejska Agencja Środowiska

EFAS, *zob.* Europejski System Informowania o Powodziach

efekt cętkowania 75, 318

efekt stereoskopowy 81, 82

EFFIS, *zob.* Europejski System Informacji o Pożarach Lasów

EGiB, *zob.* Ewidencja Gruntów i Budynków

EIONET 264, 267

eksploracja danych 94, 402

ekwidystanta 218, 240

Electron 398

EMS, *zob.* europejska mapa osadnicza

Endeavour 16, 44, 314

Envisat 135, 142, 146, 147, 177, 192, 197–200, 216, 287, 324, 365

Envisat/ASAR 50, 318, 357, 389

EO Browser 120, 187, 192, 193, 199

EO, *zob.* obserwacja Ziemi

EOS-Aura 343

EOSDIS 64, 65

EOS-Terra 343, 344

EPIC, *zob.* European Precipitation Index based on simulated Climatology

ERCC, *zob.* Centrum Koordynacji Reagowania Kryzysowego

ERIC, *zob.* European Runoff Index based on Climatology

ERICHA, *zob.* European Rainfall-InduCed Hazard Assessment

EROS 159–162, 190, 202, 314

erozja 328, 354, 355, 361

ERS 16, 17, 135, 173, 174, 177, 215, 376

ERTS-1 15, 151

ES, *zob.* usługi ekosystemowe

ESA, *zob.* Europejska Agencja Kosmiczna

ESSP 184

ETRS-1 16

EU-Hydro 272

EUMETSAT 133, 134, 149, 167–169, 206, 207, 260, 348, 394

European Precipitation Index based on simulated Climatology 315

European Rainfall-InduCed Hazard Assessment 315

European Runoff Index based on Climatology 315

European Soil Information System 314

Europejska Agencja Kosmiczna 16, 17, 18, 20, 33, 42, 43, 50, 65, 66, 73, 124, 132–135, 137–139, 141, 143–146, 149, 167–170, 172, 177, 178, 197, 198, 206, 212, 213, 216, 230, 260, 264, 285, 294–296, 336, 348, 354, 356, 359, 365, 388–390, 394, 398, 399

Europejska Agencja Środowiska 134, 262–264, 266–272, 275–277, 314, 341, 351

europejska mapa osadnicza 200, 268, 274, 276, 338

Europejski System Informacji o Pożarach Lasów 274, 336–340, 342

Europejski System Informowania o Powodziach 274, 311–316, 326, 377

Europejski System Łączności Satelitarnej 132

Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych 134, 260, 273, 312, 313, 315, 338

EUSIS, *zob.* European Soil Information System

EUSPA 133

EVI-2 184

EW 137, 138

ewapotranspiracja 149, 258, 259, 357, 359, 360

Ewidencja Gruntów i Budynków 112, 350

Explorer 12, 13, 160, 165, 170, 171, 187, 190–192, 194–196, 237, 285

Falcon 9 184, 398

FAO 330

faza interferometryczna 75, 76, 79

FCC, *zob.* kompozycja w barwach zafalszowanych

FIRMS 336, 337, 339, 342

FORMOSAT 227

Frontex 369–373, 378

FUA, *zob.* funkcjonalny obszar miejski

funkcjonalny obszar miejski 268, 269

FWF, *zob.* pełna fala

GALILEO 19, 132

Gaofen-1 160
 Gaussian Mixture Model 219
 gazy cieplarniane 148, 190, 261, 275, 330, 343, 348, 360
 GCOS, *zob.* Globalny System Obserwacji Klimatu
 GCP, *zob.* punkty dostosowania
 GDAL 200, 217, 219, 222, 231, 233, 236
 GEDI 20, 179, 184–186, 331, 332
 GEE, *zob.* Google Earth Engine
 Gemini 14
 GEO, *zob.* orbita geostacjonarna
 GEOBIA, *zob.* analiza obiektowa
 GeoEye-1 162, 163, 268, 294
 GeoEye-2, *zob.* WorldView-4
 GEOLAND-2 276, 277
 GEOSS, *zob.* Globalny System Systemów Obserwacji Ziemi
 GERB 168, 169
 GFC 328, 330, 332, 333
 GFCH 332
 GHSL 268
 GIOŚ 263–265
 GIS 65, 112, 115, 136, 210, 212, 216, 217, 219, 224, 226, 227, 233, 237, 241, 242, 244, 246, 247, 250, 254, 263, 277, 278, 288, 305, 306, 311, 313, 314, 317, 327, 333, 338, 342, 350–354
 GLAS 52, 53, 179–181, 183, 331, 332
 głębokie uczenie 103, 104, 106, 230, 246, 255
 Global Flood Awareness System 274, 312
 Global Forest Watch 341
 Globalny Monitoring Środowiska i Bezpieczeństwa 131, 132, 277
 Globalny System Informacji o Pożarach 274, 340–342
 Globalny System Obserwacji Klimatu 273
 Globalny System Systemów Obserwacji Ziemi 17
 GlobCarbon 314
 GloFAS, *zob.* Global Flood Awareness System
 GLONASS 19
 GMES, *zob.* Globalny Monitoring Środowiska i Bezpieczeństwa
 GML 210, 219
 GNDVI 336
 GNSS 18, 53, 79, 144, 335, 393, 396
 GOES 16, 166, 167, 169, 396
 GOF-C-GOLD 340
 Google Earth Engine 202, 203, 210, 212, 228, 234–237, 331–335
 Google Earth 202, 203, 210, 233, 234, 264, 331, 333
 GPS-NAVSTAR 13, 19
 GRASS 217, 219
 GSA, *zob.* EUSPA
 GSD 16, 17, 19, 33, 34, 66, 81, 92–95, 113, 139–143, 147, 148, 150, 153, 156–161, 163–165, 167, 169, 171, 172, 198–201, 252, 262, 265–268, 270, 271, 276, 277, 314, 327, 328, 333–335, 337, 339, 350, 352–354, 357, 362, 385–388, 393–400
 GTOS 340
 GWIS, *zob.* Globalny System Informacji o Pożarach
 HAPS, *zob.* pseudosatelita
 Helios 401
 HEO, *zob.* orbita silnie eliptyczna
 Heweliusz 399
 hiperspektralny obraz /sensor/dane 35, 39, 40, 64, 87, 95, 106–108, 111, 123, 131, 149, 169–173, 212, 224–226, 228, 246, 247, 294, 320, 321, 323, 326, 357, 399
 HJ-1A 171, 173
 HLS, *zob.* ręczne skanowanie laserowe
 HR, *zob.* wysoka rozdzielczość
 HRL, *zob.* wysokorozdzielcze warstwy tematyczne
 HS, *zob.* hiperspektralny obraz
 HSI (EnMAP) 172, 173
 Hyperion 35, 39, 170, 171, 173, 294, 399
 HySIS 171
 IACS, *zob.* Zintegrowany System Zarządzania i Kontroli
 ICESat 16, 53, 54, 60, 179–183, 331, 332
 ICEYE 176, 179, 400
 IFOV, *zob.* chwilowe pole widzenia
 IHS 224, 248
 IKONOS-2 17, 161, 162, 227, 277, 250, 395
 ILS 53
 IMGW-PIB 205–207
 IMU, *zob.* jednostka inercyjna
 indeks dróg 305, 311
 indeks morfometryczny 354
 indeks zabudowy 88, 89, 91
 InSAR, *zob.* satelitarna interferometria radarowa 74
 INSPIRE 131
 integracja danych 112, 210, 240, 243, 282
 inteligentne miasto, *zob.* smart city
 intensywność sygnału 55
 interferometria palarymetryczna 79
 interferometria radarowa 74, 75, 215, 248, 249, 258, 259, 299, 303, 311, 378, 380
 interferometria różnicowa 78, 79, 173, 303, 380
 IPC, *zob.* chmura punktów
 IR, *zob.* obrazowa analiza regresji
 ISOK 115, 274, 279, 351
 ISS, *zob.* Międzynarodowa Stacja Kosmiczna
 ITOS 14
 IW 136–138
 jaskrawość piksela 31, 36, 55, 60–62, 64, 65, 67, 70, 79, 81, 88, 94–97, 99, 100, 103, 111, 215, 221
 Jason 166, 198
 JAXA 20, 374
 jednostka inercyjna 53, 54
 JERS-1 173
 JPL, *zob.* Laboratorium Napędu Odrzutowego NASA
 JRC MARS, *zob.* Monitoring Agricultural Resources
 JRC, *zob.* Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej
 Kanadyjska Agencja Kosmiczna 20, 174
 kąta spektralny 221
 kierunek obrazowania 78, 382

klasyfikacja nadzorowana 95, 99–101, 116, 127, 221, 225, 230, 235, 239, 246, 248, 256, 284, 308, 336
 klasyfikacja nienadzorowana 95, 97, 99, 104, 221, 225, 230, 235, 239, 246, 248, 365
 klasyfikacja 66, 79, 93–95, 97, 99, 100, 107, 109, 113, 115, 125, 128, 141, 184, 211, 212, 219, 246, 249, 250, 258, 259, 290, 296, 369, 376, 384, 393
 klucz fotointerpretacyjny 86
 kNN, *zob.* metoda k-najbliższych sąsiadów
 kompozycja w barwach naturalnych 39, 41, 69, 82–84, 98, 140, 155, 298, 299
 kompozycja w barwach zafałszowanych 12, 66, 67, 69, 79, 80, 82, 85, 86, 90, 101, 102, 252, 279, 298, 299, 308, 327, 350, 352, 386–388
 KOMPSAT 161, 162, 199, 200, 270, 294, 335
 korekcja atmosferyczna 64, 65, 66, 141, 153, 155, 193, 211, 246, 247, 249, 250, 320, 321
 korekcja geometryczna 60, 61, 63–65, 141, 145, 148, 153, 155, 156, 199, 210, 214, 225, 227, 229, 235, 239, 244, 246, 250, 321, 331
 korekcja radiometryczna 55, 60–67, 69, 88, 93, 141, 147, 148, 153, 155, 156, 210, 211, 214, 246, 248, 250, 331
 KPK, *zob.* Krajowy Program Kosmiczny
 Krajowy Program Kosmiczny 133
 KRAKSat 399
 krzywa spektralna 29, 30, 39, 55, 58, 87, 106–110, 187, 214, 225, 300, 301, 303, 309, 310, 363, 364, 367, 368, 377
 Laboratorium Napędu Odrzutowego NASA 107
 LAI, *zob.* wskaźnik powierzchni liści
 Landsat 12, 16, 23, 28, 33, 35–39, 41, 60, 62, 63, 65–70, 80, 83–86, 90, 107, 127, 128, 130, 131, 141, 150–158, 164, 169, 184, 187, 191, 192, 194–204, 219, 221, 227, 230, 263–265, 274, 279, 281, 283, 286, 287, 291, 294, 296, 299, 309, 311, 314, 342, 325, 328, 329, 331–334, 336, 339–341, 352, 357, 360, 362, 365, 366, 368, 369, 373, 374, 377, 378, 394, 395
 LAS (APRS) 210, 249, 254
 laser beam, *zob.* plamka lasera
 laser footprint, *zob.* plamka lasera
 lasy losowe 100, 103, 104, 106
 Legion 163, 395, 397, 400
 Lem 399
 LEO, *zob.* niska orbita okołoziemska
 LiDAR 16, 52–54, 81, 112, 113, 115, 179, 184, 186, 210–212, 219–222, 242, 246, 247, 249, 251, 254, 258, 277, 279, 299, 335, 342, 351–353, 379
 linia Kármána 12
 LISFLOOD 287–289, 313, 315
 LoS, *zob.* kierunek obrazowania
 lotnicze skanownie laserowe 52, 53, 115, 279, 361
 LSTM 149, 399
 LUCAS 272, 273
 LULC, *zob.* mapa użytkowania/pokrycia terenu
 Machine Learning, *zob.* uczenie maszynowe
 macierz błędów 60, 117–119, 281, 284
 macierz krzyżowa 118
 MAES 271, 272
 mapa użytkowania/pokrycia terenu 88, 106, 115, 125, 128, 130, 164, 233, 258, 262–264, 269, 271, 272, 275, 307, 311, 350–352, 354, 384, 385
 MARSHALL 356
 MATLAB 181, 226, 233
 Maxar 163, 328, 351, 393–395, 397, 400, 401
 Maximum Likelihood, *zob.* metoda największego prawdopodobieństwa
 MDC, *zob.* metoda najmniejszej odległości
 MEO, *zob.* średnia orbita okołoziemska
 Mercury (misja) 13
 metoda czasowych rozpraszaczy 303
 metoda dopasowania krzywych spektralnych 109
 metoda k-najbliższych sąsiadów 253
 metoda k-średnich 97, 99, 103, 105, 106
 metoda Mahalanobisa 221
 metoda Matched Filtering 110
 metoda Mixture Tuned Matched Filtering 110, 111
 metoda najmniejszej odległości 101, 102, 105, 107
 metoda największego prawdopodobieństwa 101, 102, 105, 107, 116, 128, 221, 239, 246
 metoda równoległościątów 100
 metoda Spectral Angle Mapping 108, 221
 MetOp 167–169, 344, 394, 395
 METOP-B 344
 METOP-C 168, 344
 MF, *zob.* metoda Matched Filtering
 MFG 168
 MH, *zob.* metoda Mahalanobisa
 Microsoft Azure 203, 204
 Międzynarodowa Stacja Kosmiczna 16, 18, 20, 184–186, 393, 396
 Minimalna Jednostka Kartowania 269, 276
 MIRAS 42, 73, 74
 MKD, *zob.* Model Koron Drzew
 ML, *zob.* metoda największego prawdopodobieństwa
 ML, *zob.* uczenie maszynowe
 MLC, *zob.* metoda największego prawdopodobieństwa
 MLS, *zob.* mobilne skanowanie laserowe
 MMU, *zob.* Minimalna Jednostka Kartowania
 mobilne skanowanie laserowe 53, 343
 Model Koron Drzew 335, 351
 MODIS 166, 167, 169, 184, 192, 201, 202, 204, 219, 281, 284, 286–289, 294, 324, 328, 332, 336, 337, 339, 340, 344, 357, 360, 365, 368, 375, 395
 MOLAND 276, 277
 Molnyia 19
 Monitoring Agricultural Resources 285, 312, 313, 314
 Monitoring jakości wody dla zbiorników śródlądowych 124
 monitoring przemieszczeń i deformacji terenu 137, 173, 380
 MR, *zob.* średnia rozdzielczość
 MRV 331
 MS, *zob.* wielospektralny obraz

MSG 168
 MSS 12, 150, 169, 265
 MTCI 336
 MTMF, *zob.* metoda Mixture Tuned Matched Filtering
 multiresolution segmentation, *zob.* segmentacja w wielu rozdzielczościach
 MultiSpec 210, 212, 224–226
 multi-threshold segmentation, *zob.* segmentacja wieloprogramowa
 MW, *zob.* promieniowanie mikrofalowe
 MWR, *zob.* radiometr mikrofalowy
 N2K, *zob.* Natura 2000
 Narodowa Baza Danych o Śniegu i Lodzie 181, 183
 NASA 11, 12, 14–16, 20, 24, 53, 65, 149–152, 154, 155, 157, 158, 165–167, 169, 170, 179–181, 183, 184, 186, 201, 230, 163, 264, 281, 328, 331, 332, 336, 339–341, 348, 352, 365, 374, 393–396, 401
 NASADEM 16
 Natura 2000 271, 272, 275, 276, 295–297, 342, 355, 356, 362
 naziemne skanowanie laserowe 53
 NBLI, *zob.* znormalizowany różnicowy indeks powierzchni odkrytych
 NBR, *zob.* znormalizowany wskaźnik pożarów
 NDBI, *zob.* znormalizowany różnicowy indeks zabudowy
 NDDI, *zob.* znormalizowany różnicowy wskaźnik suszy
 nDSM, *zob.* znormalizowany numeryczny model pokrycia terenu
 NDVI, *zob.* znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności
 NDWI, *zob.* znormalizowany różnicowy wskaźnik wody
 NFMS, *zob.* Państwowy system do monitorowania lasów
 Niemiecka Agencja Kosmiczna 17, 75, 174, 176, 331, 332, 399
 Nimbus 14, 15, 16
 NIR, *zob.* bliska podczerwień
 NISAR 184
 niska orbita okołozemska 18–20, 161, 163, 348, 393–395, 398, 400
 NMPT, *zob.* numeryczny model pokrycia terenu
 NMT, *zob.* numeryczny model terenu
 NOAA AVHRR 284, 291, 357, 368, 395
 NOAA GOES-E 396
 NOAA 14, 147, 149, 166–169, 201, 204, 284, 285, 291, 324, 328, 332, 336, 337, 339, 340, 344, 357, 365, 368, 374, 394–396
 normalizacja krzywej spektralnej 107–109
 NovaSAR-1 175, 179
 NRC 25, 32, 33, 267
 NSIDC, *zob.* Narodowa Baza Danych o Śniegu i Lodzie
 numeryczny model pokrycia terenu 210, 211, 222, 246, 249, 252, 271, 274, 279, 351
 numeryczny model terenu 16, 54, 55, 75, 76, 94, 180, 184, 186, 210, 211, 216, 222, 230, 238–240, 242, 249, 251, 271, 279, 306, 309, 311, 314, 316, 317, 354, 376
 NWI, *zob.* znormalizowany wskaźnik wody
 OBIA, *zob.* analiza obiektowa
 obrazowa analiza regresji 125
 obrazowanie radarowe 43, 45, 74, 316
 obserwacja Ziemi 15, 38, 160, 163, 201, 282, 285, 340, 379, 389, 392, 403
 Obszary lądowe (Copernicus) 131, 260, 262, 268, 277, 279
 Ocena Oddziaływania na Środowisko 276, 352
 ocena zagrożenia 311, 326, 338, 339, 355, 377
 off-nadir 17, 82, 394
 okno atmosferyczne 23, 24, 41
 OLCI 143–145, 324
 OLI 150, 152, 154–158, 281
 ONDA 196, 197, 199, 200
 OneWeb 398
 OOS, *zob.* Ocena Oddziaływania na Środowisko 276, 352
 open software, *zob.* wolne oprogramowanie
 OptiSAR 400
 orbita geostacjonarna 16, 19, 132, 148, 168, 393, 394, 396
 orbita heliosynchroniczna 19, 135, 138, 139, 142, 143, 147, 152, 154, 155
 orbita silnie eliptyczna 19
 OSAM-1 154
 PALSAR-2 173, 174, 177
 PAN, *zob.* panchromatyczny obraz
 panchromatyczny obraz /kanał 17, 28, 33–35, 40, 66, 67, 80, 82, 83, 86, 150, 152–157, 159–165, 172, 198–200, 251, 268, 335, 393, 398, 399
 pan-sharpening, *zob.* wzmacnianie obrazu
 Państwowy system do monitorowania lasów 331
 pasmo C 16, 44, 177, 178
 pasmo L 44, 48, 74, 177, 179
 pasmo X 48, 178, 179, 183
 PAZ 175, 178
 PCA, *zob.* analiza składowych głównych
 pełna fala 53, 55, 179, 186
 PEM, *zob.* promieniowanie elektromagnetyczne
 plamka lasera 53, 180, 185
 Planet Labs 18, 34, 159, 160, 164, 264, 270, 286, 294, 331, 339, 352, 385, 396, 398, 400
 PlanetScope Dove 328, 334, 335, 386, 395, 396, 398, 400
 PlanetScope SuperDove 398
 Pléiades 161–164, 199, 227, 268, 270, 272, 294, 331, 394, 398
 Ploughing Indicato, *zob.* wskaźnik orki
 podczerwień termalna 27, 41, 63, 166, 300, 311, 336
 pola testowe (kontrolne) 116, 117
 pola treningowe 95, 100, 101, 116, 284
 polarymetria radarowa 48, 79
 polaryzacja 44, 46, 48, 50, 74, 79, 283, 358
 PolinSAR, *zob.* interferometria polarymetryczna
 PolSAR, *zob.* polarymetria radarowa

POSEIDON 149
 potencjał solarny 351
 powódź błyskawiczna 312, 315, 316, 375, 377
 powodzie 55, 125, 138, 172, 256, 258, 259, 267,
 274–276, 311–317, 325, 326, 354, 363, 373–378,
 384, 385, 392
 pożary 60, 125, 145, 155, 156, 172, 256, 259, 262,
 267, 274, 328, 330, 334, 336–342, 356, 363–366,
 377, 378, 392, 394
 poziom powyżej atmosfery 63, 66, 141, 145, 148,
 152, 156
 prawo Plancka 22
 prawo Stefana-Boltzmana 22, 68
 prawo Wiena 22
 PRISMA 172, 173
 PROBA-1 170, 172, 173
 prom kosmiczny 16, 18, 20
 promieniowanie elektromagnetyczne 9, 20–28,
 31, 35, 39, 41, 43, 60, 70, 80, 87, 89, 139, 148, 179,
 180, 289, 291, 294, 303, 367
 promieniowanie mikrofalowe 23, 39, 42, 45, 47,
 48, 63, 70, 72, 81
 promieniowanie odbite 25, 26, 31, 39, 41, 45, 52,
 56, 57, 60, 67, 73, 81, 293, 294
 promieniowanie widzialne oraz bliska
 podczerwień 23, 27, 39, 40, 58, 63, 66, 69, 81,
 158, 165, 170, 174, 300, 357
 przepróbkowanie 62, 92, 136, 216, 222, 248
 przesuszenie 360
 przetwarzanie wsadowe 190, 216, 238
 pseudosatelita 19, 393, 401, 402
 PSInSAR, *zob.* interferometria różnicowa
 punkty dostosowania 61, 215, 216, 239, 247
 PW-Sat1 398
 PW-Sat2 399, 400
 Python 199, 203, 210–212, 217, 219, 226, 228,
 230–234, 240, 247, 248, 251
 QA, *zob.* analiza dokładności klasyfikacji
 quadtree based segmentation, *zob.* segmentacja,
 metoda drzewa czwórkowego
 QuickBird-2 17, 161, 277, 279, 350
 radar z syntetyzowaną aperturą 45, 135, 173–175, 296
 radar 16, 17, 31, 40, 43–48, 50, 52, 61, 74–76,
 79, 81, 131, 135, 136, 138, 142, 143, 149, 163,
 173–179, 200–202, 212, 214–216, 226–228, 245,
 246, 248–251, 258, 259, 281, 283, 296, 297, 299,
 301, 303, 311, 313–318, 320, 324–326, 342, 357,
 360, 365, 372, 374–376, 378, 380, 384, 387, 390,
 399, 400
 RADARSAT 17, 79, 174, 177, 227, 283, 317, 376
 radiancja obiektów ciemnych 64
 radiancja 62, 63, 64, 67, 141, 148, 152, 214
 radiolokator SAR 16
 radiometr mikrofalowy 70, 143, 144, 149, 166
 RAMSAR 357
 Random Forests, *zob.* lasy losowe
 RapidEye 33, 34, 160, 249, 264, 265, 277, 279, 281,
 296, 352–354, 362, 394, 395
 RCM 174, 178
 RE, *zob.* czerwień krawędziowa
 ręczne skanowanie laserowe 53
 REDD+ 330, 332, 341
 RedEdge, *zob.* czerwień krawędziowa
 Region Grow 253
 REI, *zob.* indeks dróg
 resampling, *zob.* przepróbkowanie
 Revised Universal Soil Loss Equation 354
 RF, *zob.* lasy losowe
 RGB 16, 39, 44, 50, 66, 67, 69, 75, 80, 81, 83–86, 95,
 161, 163, 164, 246, 248, 319, 327, 352, 354, 357,
 358, 363, 364, 385, 386, 396, 398, 399
 Riga airTEXT 345, 347
 RMSE 16, 153, 183, 272, 335
 Rocket Labs 398
 rolnictwo precyzyjne 10, 149, 392, 398
 ROSE-L 149, 399
 ROSKOSMOS 20
 rozciągnięcie histogramu 81, 89
 rozdzielczość czasowa 30, 38, 138, 139, 143, 147,
 150, 152, 155, 158, 279, 297, 337, 342, 366, 367,
 375, 377, 393, 394, 395
 rozdzielczość przestrzenna 16–18, 28, 30–34, 40,
 41, 57, 62, 66, 71, 74, 81, 88, 92, 123, 125, 131,
 136–140, 143, 147, 152, 154, 155, 158–173, 175,
 177, 203, 214, 224, 248, 251, 262, 266–268, 271,
 276, 277, 281–283, 289, 310–312, 314, 320, 326,
 328, 329, 331, 333, 335, 337, 339–342, 350, 352,
 359, 365, 368, 375–378, 390, 391, 393–396, 399
 rozdzielczość radiometryczna 30, 36, 37, 158
 rozdzielczość spektralna 30, 31, 40, 107, 139, 141,
 143, 147, 152, 155, 163, 169, 170, 173, 393, 398
 rozpraszanie Mie 25
 rozpraszanie nieselektywne 25
 rozpraszanie Rayleigha 25
 rozpraszanie selektywne 25
 RUSLE, *zob.* Revised Universal Soil Loss Equation
 S2GLC 257
 saldo promieniowania 359
 SAM, *zob.* metoda Spectral Angle Mapping
 SAR, *zob.* radar z syntetyzowaną aperturą
 satelitarna interferometria radarowa 74
 satelitarne skanowanie laserowe 52, 53, 179, 181,
 183, 184, 186, 341, 342
 SCL 140, 141
 SCOR 17
 Scout 395, 397, 400
 SCP, *zob.* Semi-Automatic Classification Plugin
 Se2WaQ 120, 122
 segmentacja obrazu 111–115, 210, 212, 216, 221,
 224, 227, 246, 251–254
 segmentacja przez zmianę kształtu 253
 segmentacja różnic spektralnych 114, 253
 segmentacja w wielu rozdzielczościach 114, 253
 segmentacja wieloprogowa 114, 253
 segmentacja wododziałowa 114
 segmentacja, metoda drzewa czwórkowego 114, 253
 segmentacja, metoda filtru kontrastu 253
 segmentacja, metoda podziału kontrastu 253

segmentacja, metoda szachownicy 114, 253
segmentation by reshaping algorithm, *zob.*
segmentacja przez zmianę kształtu

Semi-Automatic Classification Plugin 64, 100, 127,
210, 212, 294, 309

Sentinel 9, 23, 33, 35, 38, 39, 65, 66, 81, 92–98,
115, 120, 122, 124, 131–149, 158, 160, 164, 165,
168, 184, 187, 188, 190–192, 197–200, 202,
204, 206–209, 213, 214, 216, 219, 227, 230,
234, 249, 260, 264, 265, 273, 281, 283, 286,
287, 291, 292, 294–296, 299, 303, 305–311,
314, 317, 319, 320, 324–326, 328, 331, 335, 336,
339–341, 344, 348, 354, 356, 357, 359–361,
364–367, 369, 372, 375, 377, 378, 381–383,
385–388, 390, 394, 398, 399

SEOSAR, *zob.* PAZ

Serwis Bezpieczeństwa 141, 273

Serwis Monitorowania Obszarów Lądowych 141,
142, 198, 199, 200, 262, 263, 267, 272, 274

Serwis Monitorowania Środowiska
Morskiego 142, 198–200, 261

Serwis Monitorowania Stanu Atmosfery 147, 148,
190, 198, 199, 200, 261, 343–347, 362

Serwis Monitorowania Zmian Klimatu 141, 142,
147, 200, 273, 348, 349, 362

Serwis Zarządzania Kryzysowego 141, 198, 199, 273

SEVIRI 168, 169

SFF, *zob.* metoda dopasowania krzywych
spektralnych

sigma zero, *zob.* współczynnik wstecznego
rozpraszania radarowego

skaterometr zaawansowany 168, 169, 313, 395

SkyBox 399

SkySat 160, 161, 162, 164

SLC (dane) 135, 136, 176

SLC (korektor lini skanowania) 153

SLMS 331

SLR 44

SLS, *zob.* satelitarne skanowanie laserowe

SLSTR 143, 144, 145, 214

SM, *zob.* Stripmap

smart city 256

SMFR, *zob.* Social Media for Flood Risk

śmieci kosmiczne 18, 399

SMOS, *zob.* Soil Moisture Ocean Salinity

SMS 16

Social Media for Flood Risk 216

Soil Moisture Ocean Salinity 42, 73, 74, 197, 198, 313

SOM 227

Space 1.0 392

Space 2.0 392

Space Shuttle, *zob.* prom kosmiczny

SpaceX 18, 184, 397, 398, 401, 403

speckle effect, *zob.* efekt cętkowania

spectral difference segmentation, *zob.* segmentacja
różnic spektralnych 114, 253

spektralne pomiary polowe 57

spektrometr 16, 58, 147–149, 166, 169, 170

SPOT 107, 141, 144, 145, 159, 160, 164, 165, 227,
279, 281, 294, 314, 318, 365, 369, 374, 376

Sputnik-1 12, 13, 392

SRAL 143

średnia orbita okołoziemiska 19

średnia podczerwień 23, 39, 40, 63, 66, 80, 81, 88,
89, 92, 138, 139, 140, 143, 147–149, 152, 153, 155,
157, 158, 160, 162, 163, 165, 170, 258, 292, 294,
299, 333, 363–365, 377, 395, 398

średnia rozdzielczość 115, 136, 164, 165, 172, 176,
214, 294, 311, 339, 352, 375, 378, 393

Środowisko morskie (Copernicus) 131, 258–261

SRTM 16, 180, 186, 191, 198, 210, 215, 272, 313,
314, 376

SSO, *zob.* orbita heliosynchroniczna

stacja kowariancji wirów 361

stała c 52

stała dielektryczna 72, 73

Starlink 18, 397, 403

Stratobus 402

Stripmap 136, 138, 176, 177–179

Suomi-NPP 147, 166, 169, 395

susza 276, 279, 285–287, 289, 327, 360, 367

SVAT 94

SVM, *zob.* wektory nośne

światło widzialne 17, 22, 23, 25, 27–31, 35, 39, 41,
43, 44, 56, 63, 79, 80, 95, 138–140, 143, 147–149,
152, 153, 155, 159–165, 167, 170, 174, 179, 283,
291, 316, 360, 374, 395

Światowid 399

Światowy Program Badań Klimatu 273

SWIR, *zob.* średnia podczerwień

sygnatury spektralne 29, 214, 239, 248, 251

systemy aktywne 43, 320, 321

Systemy Informatyki Geograficznej, *zob.* GIS

systemy pasywne 39, 41, 60, 81, 303, 321, 336

Sytuacje kryzysowe (Copernicus) 131, 259, 260, 273

szorstkość powierzchni 46, 48, 50, 55, 73, 258,
278, 283, 291, 316–318, 326, 359

sztuczna inteligencja 94, 161, 204, 316, 392, 393,
395, 398, 402, 403

Tandem-L 176, 179

TanDEM-X 17, 77, 174–176, 178, 184, 331, 332, 357

Tasseled Cap 125, 248

TCl, *zob.* wskaźniki temperaturowe

temperatura kinetyczna 22, 68, 72

temperatura radiacyjna 14, 68, 70, 72, 73, 262,
284, 291, 336, 342, 360, 362

TerraBella 399

TerraSAR-X 17, 60, 75, 77, 174, 175, 178, 184, 249,
296, 297, 317, 331, 357, 381, 383

Thematic Mapper 12, 60, 150, 152, 153, 263, 265,
328, 333, 368

TIROS-1 14

TIRS 41, 150, 154–158, 336

TLS LiDAR, *zob.* naziemne skanowanie laserowe

TM, *zob.* Thematic Mapper

ToF 53, 54, 180

TOPEX/Posejdon 17

transformacja Fouriera 224

TROPOMI 146, 147, 344

TS, *zob.* metoda czasowych rozpraszaczy
 turbulencyjny strumień ciepła jawnego 359
 turbulencyjny strumień ciepła utajonego 359
 TVI 91, 92
 UA, *zob.* Urban Atlas
 UAV, *zob.* bezzałogowe statki powietrzne
 uczenie maszynowe 94, 100, 103–106, 116, 120,
 200, 201, 204, 210, 219, 221, 230, 231, 235, 255,
 257, 268, 335, 336, 341, 345, 392, 393, 396, 398,
 402, 403
 UI, *zob.* indeks zabudowy
 Urban Atlas 128, 263, 268–271, 275–277, 279, 306, 307
 URBANSAT 276, 277
 UrtheCast 400
 USASC 14
 USGS, *zob.* Amerykańska Służba Geologiczna
 usługi ekosystemowe 271, 275
 UV 23, 28, 147–149, 190, 261, 395
 UVN 148, 168
 UWQV 120, 122, 123
 V-1 12
 V-2 12, 13
 Vanguard 2 14
 VCI, *zob.* Vegetation Condition Index
 Vegetation Condition Index 284, 357
 VHR, *zob.* bardzo wysoka rozdzielczość
 VI, *zob.* wskaźnik roślinności
 VIS, *zob.* światło widzialne
 Vistula Study 352, 353
 VML 227
 VNIR, *zob.* promieniowanie widzialne oraz bliska
 podczerwień
 watershed segmentation, *zob.* segmentacja
 wododziałowa
 WCRP, *zob.* Światowy Program Badań Klimatu
 wektory nośne 100, 103, 106, 18, 219, 235, 236,
 246, 258, 362
 wiarygodność, *zob.* dokładność konsumenta
 wieloczasowa spektralna analiza zmieszania 125
 wielospektralny obraz /sensor 12, 16, 17, 35, 39,
 40, 62, 64, 66, 79, 80, 82, 87, 88, 94, 100, 106, 107,
 112, 113, 115, 138, 139, 147, 150, 152, 158, 160,
 161, 163, 164, 169, 186, 225, 239, 246, 247, 249,
 251, 268, 270, 299, 300, 328, 331, 336, 341, 374,
 379, 391, 394, 400
 Włoska Agencja Kosmiczna 172, 175
 wolne oprogramowanie 210, 211, 213, 219, 228
 WorldDEM 17, 175
 WorldView-1 162, 163, 397
 WorldView-2 33, 34, 113, 115, 162, 163, 169, 227,
 268, 277–279, 299, 305, 341, 351, 395, 401
 WorldView-3 162, 163, 268, 328, 393–395, 398
 WorldView-4 (GeoEye-2) 162, 163, 395
 wskaźnik orki 267
 wskaźnik powierzchni liści 87, 88, 186, 262, 285,
 287, 288, 291, 294, 314, 359, 361
 wskaźnik roślinności 88, 91, 112, 115, 120, 201, 218,
 246, 282, 291–295, 297, 334, 335, 336, 241, 357,
 360, 368, 377
 wskaźniki temperaturowe 284, 357
 współczynnik emisyjności 27–29, 41, 58, 60, 68,
 69, 72, 73, 87, 299–301, 303, 311
 współczynnik kappa 119, 284
 współczynnik odbicia od powierzchni Ziemi 66, 141
 współczynnik odbicia 27, 29, 30, 33, 39, 48, 56, 57,
 60, 63–65, 73, 87, 88, 92, 93, 96, 99, 123, 141, 145,
 148, 152, 156, 187, 214, 292–294, 299, 300, 303,
 309–311, 323, 329, 374
 współczynnik wstecznego rozpraszania
 radarowego 46, 74, 317
 Wspólne Centrum Badawcze Komisji
 Europejskiej 126, 268, 274, 276, 281, 285–287,
 296
 wysoka rozdzielczość 17, 18, 31, 60, 66, 123,
 136, 145, 159, 160, 168, 170, 175, 176, 201, 203,
 281, 368, 384, 385, 399
 wysokorozdzielcze warstwy 262, 263, 266–268, 274
 wzmacnianie obrazu 33, 34, 66, 67, 224, 226
 wzorzec bieli 57
 zagrożenie powodziowe 258, 311, 312, 315,
 326, 377
 zarządzanie kryzysowe 137–139, 141, 148, 205–
 207, 256, 259, 311, 326, 363, 377, 378
 zdolność emisyjna podłoża 359
 Zephyr S 401
 zielony laser 52
 Zintegrowany System Zarządzania i Kontroli 125
 Zmiany klimatu (Copernicus) 260
 znormalizowany numeryczny model pokrycia
 terenu 271, 351
 znormalizowany różnicowy indeks powierzchni
 odkrytych 89
 znormalizowany różnicowy indeks zabudowy 88,
 89, 305, 311
 znormalizowany różnicowy wskaźnik
 roślinności 88–93, 115, 125–127, 145, 192–194,
 196, 215, 235, 236, 253, 262, 284, 287, 292, 293,
 295, 329, 341, 357, 359, 361, 368, 375, 377, 378
 znormalizowany różnicowy wskaźnik suszy 93
 znormalizowany różnicowy wskaźnik wody 89,
 90, 92, 93, 215, 292–295, 375
 znormalizowany wskaźnik pożarów 365
 znormalizowany wskaźnik wody 77, 92, 94, 198,
 293, 314, 317

Autorzy rozdziałów

dr **Katarzyna Bajorek-Zydrón**; ProGea 4D; katarzyna.bajorek-zdyron@progea4d.pl;

dr hab. **Jarosław Chormański**, prof. SGGW; Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; jaroslaw_chormanski@sggw.edu.pl;

dr inż. **Urszula Cisło-Lesicka**; ProGea 4D; urszula.cislo-lesicka@progea4d.pl; PWSTE w Jarosławiu;

dr inż. **Ewa Głowienka**; Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; eglo@agh.edu.pl;

prof. dr hab. inż. **Beata Hejmanowska**; Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; galia@agh.edu.pl;

dr hab. **Jarosław Jasiewicz**; Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych; jarek@amu.edu.pl;

dr inż. **Joanna Jaskuła**; Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej; jaskula@up.poznan.pl;

dr **Elżbieta Jędrzejczak**; ProGea 4D; elzbieta.jedrzejczak@progea4d.pl;

dr hab. inż. **Cezary Kazmierowski**, prof. UAM; Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych; cezary.kazmierowski@amu.edu.pl;

mgr inż. **Piotr Kramarczyk**; Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; gorgany100@o2.pl;

dr **Sławomir Królewicz**; Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu; Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych; skrol@amu.edu.pl;

dr inż. **Magdalena Mleczko**; Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geoinżynierii; magdalena.mleczko@uwm.edu.pl;

dr hab. inż. **Marek Mróz**, prof. UWM; Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geoinżynierii; marek.mroz@uwm.edu.pl;

mgr inż. **Natalia Ostrowska**; Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geoinżynierii; natalia.ostrowska@uwm.edu.pl;

dr hab. inż. **Jan Piekarczyk**, prof. UAM; Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych; piekjan@amu.edu.pl;

mgr inż. **Małgorzata Słapińska**; Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; malgorzata_slapinska@sggw.edu.pl;

prof. dr hab. inż. **Mariusz Sojka**; Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej; mariusz.sojka@up.poznan.pl;

dr inż. **Sylwia Szporak-Wasilewska**; Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Centrum Wodne; sylwia_szporak@sggw.edu.pl;

dr hab. inż. **Piotr Wężyk**, prof. UR; Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Leśny; p.wezyk@ur.krakow.pl; ProGea 4D – CEO, piotr.wezyk@progea4d.pl;

dr inż. **Rafał Wróżyński**; Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej; rafal.wrozynski@up.poznan.pl;

dr hab. **Rafał Zapłata**, prof. UKSW; Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie; Wydział Nauk Przyrodniczych. Szkoła Nauk Ścisłych; r.zaplata@uksw.edu.pl;

mgr inż. arch. kraj. **Karolina Zięba-Kulawik**; Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Leśny; karolina.zieba@urk.edu.pl;

mgr inż. **Anna Żądło**; Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie; Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska; zadlo@agh.edu.pl.

(...) Nowy podręcznik (...) to pozycja cenna nie tylko dla administracji publicznej, co sugerować może tytuł, ale też dla szerokiego grona studentów kierunków takich jak: geodezja, kartografia, geografia, gospodarka przestrzenna, nauki o Ziemi czy leśnictwo, którzy w ramach studiów stykają się z teledetekcją i szeroko rozumianą problematyką geoinformatyczną. Podręcznik w sposób skondensowany zarysowuje historię i stan współczesnych technik satelitarnego monitoringu Ziemi, podstawy teoretyczne teledetekcji i najważniejsze metody przetwarzania danych satelitarnych, prezentując jednocześnie bardzo bogaty i szczegółowy przegląd współczesnych danych teledetekcyjnych i produktów pochodnych, a także ich możliwych zastosowań w różnych dziedzinach. Podręcznik daje wiedzę rozległą i przede wszystkim aktualną, co ma niebagatelne znaczenie, biorąc pod uwagę choćby szybko rosnące zasoby danych w ramach europejskiego programu Copernicus (...).

prof. dr hab. Jacek Kozak

(...) Lektura Podręcznika daje Czytelnikowi mocne podstawy teoretyczne w zakresie satelitarnych systemów obserwacji Ziemi, będąc swoistym kompendium wiedzy nt. dostępności danych teledetekcyjnych oraz sposobów ich wykorzystania w różnych obszarach gospodarki. Podręcznik pozwoli polskiej administracji włączyć się w ogólnoeuropejskie inicjatywy, zgodnie z zasadą „myśl globalnie, działaj lokalnie”. Choć Podręcznik dedykowany jest administracji publicznej, to nie ulega wątpliwości, że spotka się on z zainteresowaniem szeroko rozumianej społeczności geoinformacyjnej, w tym środowiska akademickiego, wypełniając w tym zakresie wyraźnie odczuwalną lukę (...).

prof. dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński

Organizator szkoleń:
Polska Agencja Kosmiczna
www.polsa.gov.pl

Projekt realizuje Konsorcjum w składzie:

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy –
Lider konsorcjum

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk

Akademickie Centrum Komputerowe CYFRONET
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Polska Agencja Kosmiczna

PROJEKT WSPÓŁFINANSOWANY ZE ŚRODKÓW PROGRAMU OPERACYJNEGO
POLSKA CYFROWA NA LATA 2014-2020

