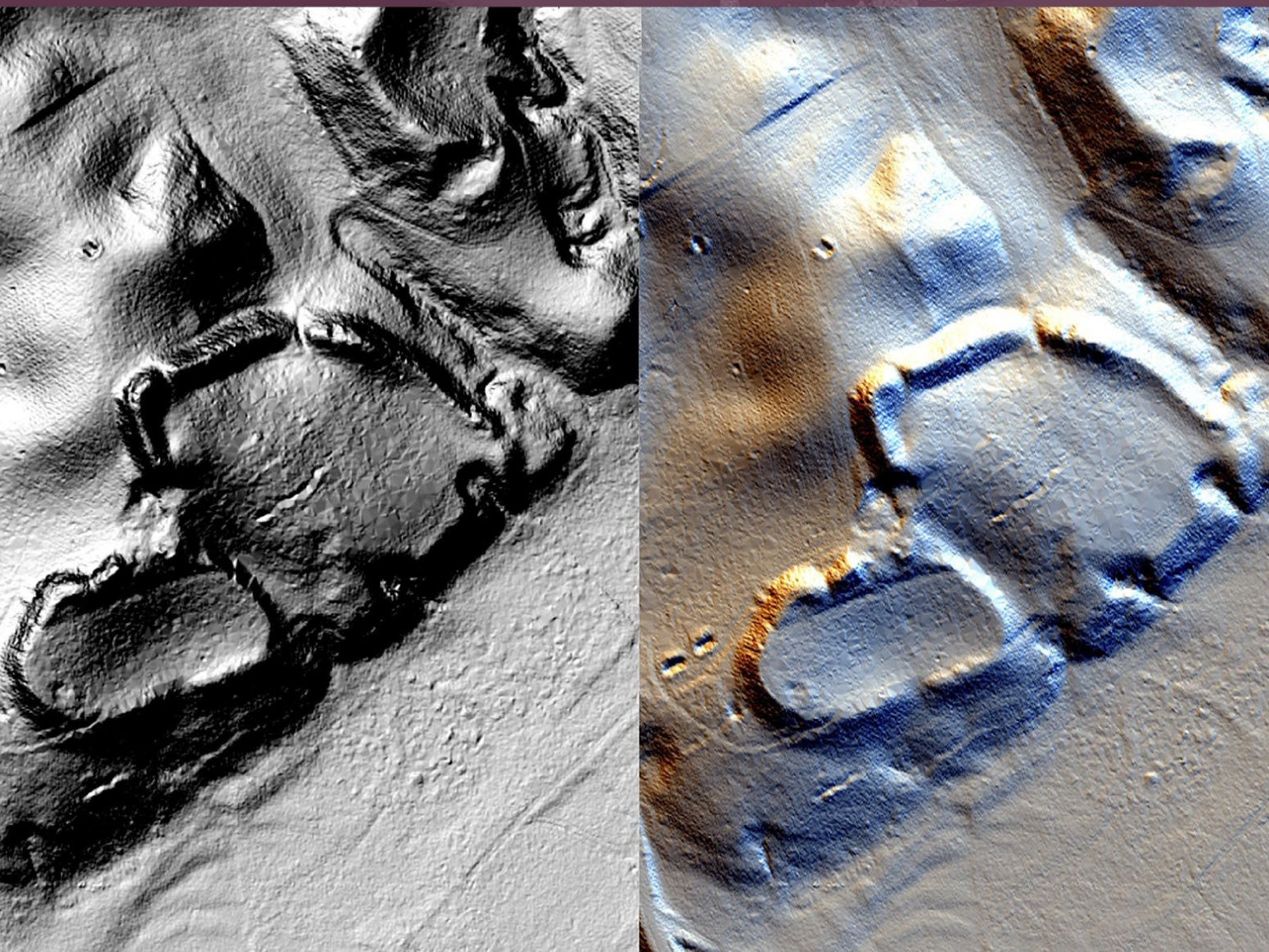


Metody teledetekcyjne dla archeologów

Poradnik
część 1



Narodowy
Instytut
Dziedzictwa

PROGRAM
AZP+



Ministerstwo Kultury i Dziedzictwa Narodowego

Sfinansowano ze środków Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego



Narodowy
Instytut
Dziedzictwa

60
LAT MISJI

PROGRAM
AZP+

Redakcja naukowa

Agnieszka Makowska
Włodzimierz Rączkowski

Zespół pracujący w ramach Programu AZP+

Łukasz Banaszek	Wiesław Małkowski
Miron Bogacki	Robert Olszewski
Tomasz Herbich	Agnieszka Oniszcuk
Michał Jankowski	Katarzyna Osińska-Skotak
Grzegorz Kiarszys	Włodzimierz Rączkowski
Piotr Kittel	Jerzy Sikora
Marek Kowalski	Stefan Staszewski
Krystian Kozioł	Jakub Wrzosek
Agnieszka Krawczewska	Anna Zalewska
Agnieszka Makowska	Lidia Żuk

Korekta

Dariusz Rudziński
Jacek Błach

Opracowanie graficzne

Izolda Bączkowska
Piotr Berezowski

Wydawca

Narodowy Instytut Dziedzictwa
ul. Mikołaja Kopernika 36/40
00-924 Warszawa
nid.pl

ISBN 978-83-67381-21-5

Warszawa 2023

Metody teledetekcyjne dla archeologów

Spis treści

Słowem wstępu	7
1. Metody teledetekcyjne w archeologii – wprowadzenie	11
1.1. Od przeszłości do teraźniejszości... z teledetekcją w tle	11
1.1.1. Przeszłość I	13
1.1.2. Przeszłość II	18
1.1.3. Przeszłość I, przeszłość II a teledetekcja	21
1.2. Klasyfikacje metod	30
1.2.1. Metody aktywne i pasywne	30
1.2.2. Pułapy	30
1.2.3. Sensory	31
Bibliografia	33
2. Metody teledetekcyjne w archeologii – podstawy	35
2.1. Zdjęcia lotnicze w archeologii	36
2.1.1. Wprowadzenie	36
2.1.2. Archeologiczny rekonesans lotniczy (pułap średni)	37
2.1.2.1. Archeologiczny rekonesans lotniczy i jego cele	37
2.1.2.2. Przygotowanie i przeprowadzenie ARL	37
2.1.2.3. Geotagowanie zdjęć	42
2.1.2.4. Selekcja zdjęć do dalszej pracy	44
2.1.2.5. Rektyfikacja i dalsza obróbka zdjęć	44
2.1.3. Archeologiczne rozpoznanie miejsca występowania reliktyw (pułap niski)	46
2.1.3.1. Definicja i cele „zadania stacjonarnego”	46
2.1.3.2. Jak uzyskać dane? Działać samemu czy zlecać naloty?	46
2.1.3.3. Statki powietrzne i sensory	47
2.1.3.4. Przygotowania do lotu	50
2.1.3.5. Przygotowanie nalogu fotogrametrycznego	54
2.1.3.6. Zdjęcia dokumentacyjne i prezentacyjne z dronów	56
2.1.3.7. Wybór i edycja zdjęć lotniczych, przetwarzanie fotogrametryczne	60
2.1.3.7.1. Obróbka fotografii	60
2.1.3.7.2. Tworzenie Numerycznych Modeli Terenu i ortofotomap	61
2.1.4. Zdjęcia lotnicze pionowe (wysoki pułap)	63
2.1.4.1. Zasoby historycznych i współczesnych pionowych fotografii lotniczych	63
2.1.4.2. Potencjał historycznych fotografii pionowych w rozpoznaniu dziedzictwa archeologicznego	65
Bibliografia	66
2.2. Zobrażenia satelitarne	69
2.2.1. Wielospektralne zobrażenia optyczne	71
2.2.1.1. Główne cechy zobrażeń wielospektralnych	71

2.2.1.2.	Zastosowania zobrazowań satelitarnych w archeologii	71
2.2.1.3.	Przegląd i charakterystyka zobrazowań satelitarnych	73
2.2.1.3.1.	Sentinel-2	73
2.2.1.3.2.	Zobrazowania o bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej (VHRS)	75
2.2.1.4.	Charakterystyka poziomów produktów obrazowych udostępnianych przez dystrybutorów	78
2.2.1.5.	Przetwarzanie obrazów wielospektralnych	81
2.2.1.5.1.	Wzmacnianie kontrastu	81
2.2.1.5.2.	Kompozycje barwne	86
2.2.1.5.3.	Integracja danych panchromatycznych i wielospektralnych	89
2.2.1.5.4.	Wskaźniki spektralne	90
2.2.1.5.5.	Analiza składowych głównych	95
2.2.1.5.6.	Transformacja Tasselet Cap	98
2.2.1.6.	Dostępność zobrazowań satelitarnych	101
2.2.1.6.1.	EarthExplorer – earthexplorer.usgs.gov	103
2.2.1.6.2.	GloVis – glovis.usgs.gov	104
2.2.1.6.3.	SCI HUB – scihub.copernicus.eu	105
2.2.1.6.4.	Archive Search & Discovery – discover.maxar.com	106
2.2.1.6.5.	GEOSTORE – www.intelligence-airbusds.com/geostore	108
2.2.1.6.6.	Sentinel Hub EO Browser – https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser	108
	Bibliografia	111
2.3.	Lotnicze skanowanie laserowe w archeologii	116
2.3.1.	Czym jest lotnicze skanowanie laserowe?	116
2.3.2.	Jakie zastosowanie ma lotnicze skanowanie laserowe w archeologii?	116
2.3.3.	Czym różni się dane ogólnodostępne od dedykowanych?	118
2.3.3.1.	Skąd pochodzą i jak pozyskać ogólnodostępne dane ALS?	118
2.3.3.2.	Czy, kiedy i jak pozyskać dane dla celów archeologicznych?	119
2.3.4.	Na czym polega przetwarzanie danych ALS na potrzeby badań archeologicznych?	120
2.3.4.1.	Czym jest chmura punktów?	121
2.3.4.2.	Czym są rastrowe produkty skanowania?	123
2.3.4.3.	Jakie wizualizacje danych ALS stosowane są w analizach archeologicznych?	124
2.3.4.3.1.	Analiza cieniowania	125
2.3.4.3.2.	Cieniowanie z wielu kierunków	126
2.3.4.3.3.	Sky-view Factor	127
2.3.4.3.4.	Analiza otwartości	127
2.3.4.3.5.	Local Relief Model	127
2.3.4.3.6.	Local dominance	128
2.3.4.3.7.	Integracja produktów rastrowych ALS. Zobrazowania scalone	128
2.3.5.	Na czym polega interpretacja i kartowanie obiektów archeologicznych według danych ALS?	129

2.3.6.	Wnioski	130
	Bibliografia	132
2.4.	Metody geofizyczne w archeologii	135
2.4.1.	Czym są badania geofizyczne w archeologii?	135
2.4.2.	Metoda magnetyczna	136
2.4.2.1.	Przyrządy pomiarowe	137
2.4.2.2.	Metodyka badań terenowych	138
2.4.2.3.	Opracowanie i prezentacja wyniku	139
2.4.3.	Metoda geoelektryczna elektrooporowa – profilowania	141
2.4.3.1.	Przyrządy i układy pomiarowe	143
2.4.3.2.	Metodyka badań terenowych	144
2.4.3.3.	Opracowanie i prezentacja wyniku	146
2.4.4.	Metoda elektrooporowa – sondowania i tomografia elektrooporowa	148
2.4.4.1.	Metodyka pomiaru, przyrządy pomiarowe	148
2.4.4.2.	Opracowanie i prezentacja wyników	149
2.4.5.	Metoda elektromagnetyczna z zastosowaniem georadaru (GPR)	151
2.4.5.1.	Metodyka pomiaru, przyrządy	151
2.4.6.	Inne metody	155
2.4.6.1.	Metoda tomografii refrakcyjnej (SRT) – badania sejsmiczne	155
2.4.6.2.	Badania z zastosowaniem urządzeń EM (electromagnetic conductivity)	157
2.4.6.3.	Badania podatności magnetycznej gruntu	157
2.4.6.4.	Metoda grawimetryczna – badania mikrogravimetryczne	157
2.4.7.	Podsumowanie	157
	Bibliografia	162
3.	Perspektywy i wyzwania związane z rozwojem aplikacji metod teledetekcyjnych w archeologii	165
3.1.	Perspektywa technologiczna	165
3.2.	Perspektywa humanistyczna	168
	Bibliografia	170

Słowem wstępu

W 2022 roku minęło 30 lat od podpisania Europejskiej konwencji o ochronie dziedzictwa archeologicznego (zwanej konwencją maltańską). Jedną z ważniejszych rekomendacji w niej zawartych jest ochrona dziedzictwa archeologicznego *in situ*, a także przynajmniej dwa związane z tym postulaty: ograniczenie badań wykopaliskowych jako metody niszczącej do niezbędnego minimum oraz szersze wykorzystywanie i rozwój metod nieinwazyjnych. Metody nieinwazyjne były i są powszechnie stosowane zarówno do poszukiwania nieznanymi dotąd relikwów, jak i do pogłębionej analizy, monitorowania czy dokumentowania obiektów rozpoznanych już wcześniej. Bezprecedensowy obecnie dostęp do danych przestrzennych i teledetekcyjnych, a także nowoczesnych narzędzi, zachęca, a wręcz zobowiązuje badaczy do ich uwzględniania w studiach nad przeszłością, a tym samym do rozwijania kompetencji pozwalających na rozpoznawanie struktur archeologicznych różnymi metodami nieinwazyjnymi i rozumienie procesów, których efektem jest uzyskiwany obraz.

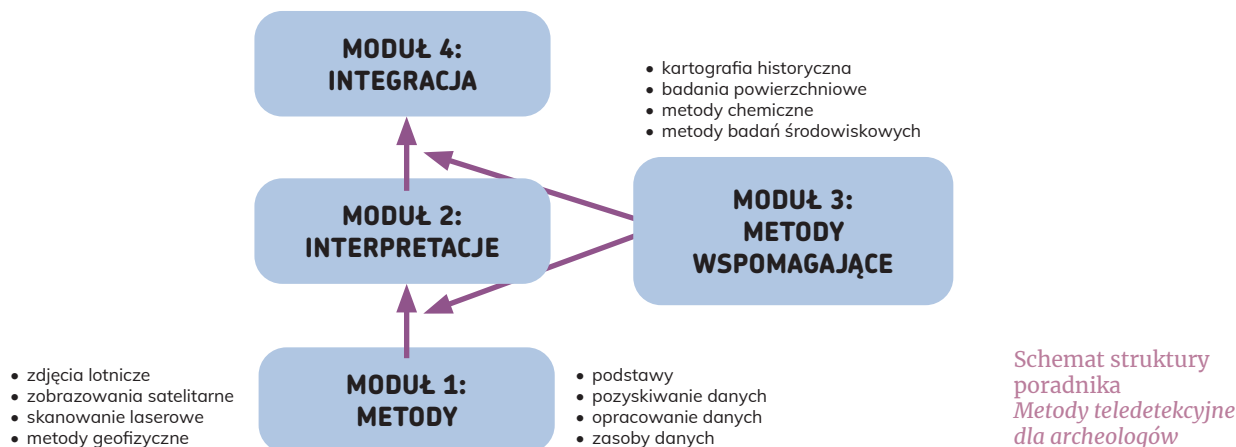
Namysł nad potencjałem metod teledetekcyjnych oraz aktualnym stanem ich wykorzystywania w polskiej archeologii stał się bodźcem do sformułowania koncepcji Programu AZP+. Jego założenia opracowane zostały przez Zespół Ekspertów ds. AZP+. Prace zainicjował Narodowy Instytut Dziedzictwa, którego misją jest tworzenie podstaw dla zrównoważonej ochrony dziedzictwa kulturowego w celu jego zachowania dla przyszłych pokoleń. Należy przy tym podkreślić,

że strategia Instytutu w zakresie archeologii opiera się na postanowieniach konwencji maltańskiej.

Program AZP+ ma cztery główne cele. Pierwszy z nich to przyrost wiedzy na temat dziedzictwa archeologicznego poprzez prowadzenie badań nad przeszłością metodami nieinwazyjnymi. Drugi zakłada nowoczesne zarządzanie danymi o dziedzictwie w oparciu o system informatyczny. Trzecim celem jest stałe podnoszenie kwalifikacji zarówno służb konserwatorskich, jak i badaczy. Czwarty cel to upowszechnianie informacji o dziedzictwie archeologicznym i edukacja archeologiczna. W odniesieniu do wspomnianych celów opracowana została strategia wdrażania metod teledetekcyjnych z akcentem na ich rolę w działaniach służb konserwatorskich.

Istotnym warunkiem sukcesu wprowadzania metod teledetekcyjnych na szeroką skalę w działalności badawczej, konserwatorskiej i popularyzatorskiej jest wiedza na ich temat (cel trzeci i czwarty Programu AZP+). Pierwszym krokiem w szerzeniu niezbędnej wiedzy jest przygotowanie i udostępnienie materiałów edukacyjnych przybliżających złożoną problematykę wykorzystywania metod teledetekcyjnych w archeologii. Zadania te mają spełniać: poradnik *Metody teledetekcyjne dla archeologów*, e-szkolenia oraz kursy.

Punktem wyjścia działań edukacyjnych jest niniejszy Poradnik. To kompleksowa, pierwsza tego typu publikacja w Polsce. Powstała z myślą o archeologach, zarówno pracownikach służb konserwatorskich, jak i badaczach, którzy chcieliby uzyskać bądź ugruntować swoją wiedzę na



temat metod nieinwazyjnych – tych wykorzystywanych w Polsce od dawna, jak archeologia lotnicza czy prospekcja geofizyczna, oraz tych, które dzięki dynamicznemu rozwojowi technologii w ostatnich latach pozwoliły na zaadoptowanie ich do celów badań archeologicznych, jak lotnicze skanowanie laserowe czy optyczne zobrazowania satelitarne.

Głównym celem poradnika jest wspieranie dialogu pomiędzy archeologami zlecającymi badania nieinwazyjne a osobami, które je wykonują. Ma wspomagać umiejętności związane z formułowaniem pytań badawczych oraz określaniem wymagań, a także rozumienie możliwości i ograniczeń poszczególnych metod. Poprzez wskazanie szerokich możliwości wykorzystania metod teledetekcyjnych w pracy archeologa ma również ugruntować przekonanie, że cele takiej prospekcji nie muszą ograniczać się tylko do planowania badań wykopaliskowych czy efektywnej prezentacji reliktyw archeologicznych. Powinny być podstawą wszelkich działań badawczych i konserwatorskich, co w szczególności dotyczy sfery związanej z zarządzaniem dziedzictwem archeologicznym, standardem postępowań konserwatorskich na różnych poziomach i kształtowaniem strategii konserwatorskich. Rozpoznawanie dziedzictwa za pomocą metod nieinwazyjnych pozwala na obejmowanie go ochroną, ale też uświadamia jego złożoność i współzależności, pokazuje dziedzictwo nie jako pojedyncze zjawiska, lecz jako fascynujący krajobraz przeszłych zdarzeń, który warto umieć czytać i rozumieć.

Ważną intencją poradnika jest powiązanie różnych aspektów pracy z metodami teledetekcyjnymi w harmonijną strukturę postępowania badawczo-konserwatorskiego. Zawiera informacje o specyfice danych, sposobach ich pozyskiwania, opracowywania i analizowania, a także wskazówki dotyczące integracji danych i ich interpretacji w celu stworzenia warunków do pogłębionej refleksji nad obserwowanymi reliktywami przeszłej rzeczywistości.

Poradnik składa się z czterech modułów, z których każdy poświęcony jest innemu aspektowi wspomnianej struktury postępowania (patrz: ilustracja powyżej). Moduł 1, który niniejszym udostępniamy, służy wprowadzeniu podstawowych informacji wyjaśniających co, jak i dlaczego możemy identyfikować, wykorzystując różne metody teledetekcyjne oraz w jaki sposób pozyskiwać dane i wstępnie je opracowywać. Jego lektura może służyć pogłębieniu wiedzy warsztatowej i być pierwszym krokiem do samodzielnego prowadzenia badań teledetekcyjnych. Kolejne moduły są aktualnie w opracowaniu. Moduł 2 wprowadza do problematyki interpretacji pozyskanych i zwizualizowanych danych. W procesie tym istotne jest wykorzystywanie również danych dostarczanych przez inne metody (spoza grupy metod teledetekcyjnych). Moduł 3 dotyczy innych metod dostarczających informacji użytecznych w interpretacji. Ostatni moduł (4) jest swego rodzaju podsumowaniem, w którym zaproponowane zostały przykłady integracji danych, czyli procesu krytycznej refleksji pojawiającej się w kontekście pracy z wynikami uzyskanymi dzięki

zastosowaniu rozmaitych metod. Taka struktura poradnika sprawia, że jest on odmienny od tych, które są dostępne w innych krajach.

Dodatkowo na platformie szkoleniowej Narodowego Instytutu Dziedzictwa dostępne są e-szkolenia dotyczące różnych metod. Będą one stopniowo uzupełniane o kolejne kursy.

W pracach Zespołu Ekspertów ds. AZP+ udział brali:

- dr Łukasz Banaszek, Historic Environment Scotland;
- dr Miron Bogacki, Zakład Badań Nieinwazyjnych, Wydział Archeologii, Uniwersytet Warszawski;
- Tomasz Herbach, Instytut Archeologii i Etnologii Polskiej Akademii Nauk;
- dr hab. Michał Jankowski, prof. UMK, Katedra Gleboznawstwa i Kształtowania Krajobrazu, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu;
- dr hab. Grzegorz Kierszys, prof. US, Katedra Archeologii, Instytut Historyczny, Uniwersytet Szczeciński;
- dr hab. Piotr Kittel, prof. UŁ, Katedra Geologii i Geomorfologii, Uniwersytet Łódzki;
- dr hab. inż. Krystian Kozioł, prof. AGH, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie;
- Agnieszka Makowska, Narodowy Instytut Dziedzictwa – koordynator projektu;
- Wiesław Małkowski, Zakład Badań Nieinwazyjnych, Wydział Archeologii, Uniwersytet Warszawski;
- dr hab. inż. Robert Olszewski, prof. PW, Zakład Kartografii, Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska;
- dr Agnieszka Oniszczyk, Narodowy Instytut Dziedzictwa;
- dr hab. inż. Katarzyna Osińska-Skotak, prof. PW, Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej, Politechnika Warszawska;
- prof. dr hab. Włodzimierz Rączkowski, Wydział Archeologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu;

- dr hab. Jerzy Sikora, Katedra Archeologii Historycznej i Bronioznawstwa, Wydział Filozoficzno-Historyczny, Uniwersytet Łódzki;
- dr hab. Anna Zalewska, prof. UŁ, Katedra Archeologii Historycznej i Bronioznawstwa, Wydział Filozoficzno-Historyczny, Uniwersytet Łódzki;
- dr Lidia Żuk, Wydział Archeologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu;

oraz przedstawiciele urzędów konserwatorskich:

- Marek Kowalski, Wojewódzki Urząd Ochrony Zabytków we Wrocławiu, Delegatura w Wałbrzychu;
- Agnieszka Krawczewska, Starostwo Powiatowe w Poznaniu, Powiatowy Konserwator Zabytków;
- Stefan Staszewski, Wojewódzki Urząd Ochrony Zabytków w Gdańsku.

Wielką wartością przy powstawaniu poradnika były dodatkowe konsultacje, w które zaangażowani byli:

- dr hab. Radosław Mieszkowski, prof. UW, Uniwersytet Warszawski;
- dr hab. Krzysztof Misiewicz, prof. UW, Uniwersytet Warszawski;
- Leon Mucha;
- Jakub Wrzosek, Narodowy Instytut Dziedzictwa.

Wszystkim pragniemy serdecznie podziękować za wkład pracy, zaangażowanie i konstruktywne rozmowy o dziedzictwie archeologicznym.

Mamy nadzieję, że poradnik i Program AZP+ przyczynią się do szerszego rozumienia metod teledetekcyjnych i traktowania ich jako priorytetowe w badaniu przeszłości i konserwatorstwie archeologicznym. Jako pierwsza tego rodzaju próba niniejszy poradnik nie może być doskonały i z pewnością nie zaspokoi wszystkich potrzeb. Dyskusja nad nim, zawartymi w nim treściami oraz sposobem podejścia do metod może sprzyjać rozwojowi archeologii w Polsce.

Agnieszka Makowska
Włodzimierz Rączkowski



1.

Metody teledetekcyjne w archeologii – wprowadzenie

Włodzimierz Rączkowski, Anna Zalewska

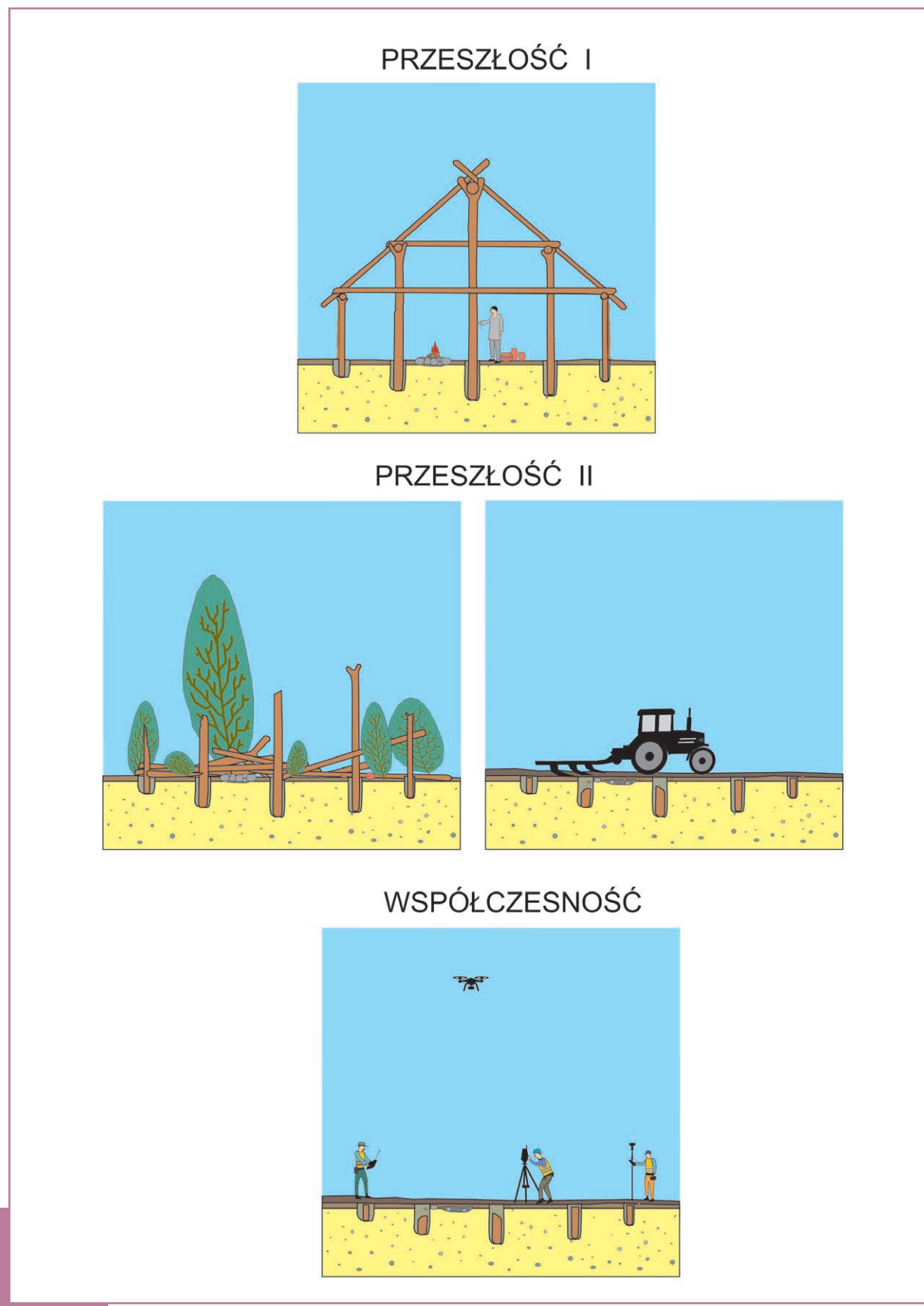
1.1. Od przeszłości do teraźniejszości... z teledetekcją w tle

Truizmem jest mówić, że badanie przeszłości człowieka stanowi cel archeologii. Pewną nowością jest, że od pewnego czasu nie akcentuje się już kwestii chronologii jako istotnej cezury czasowej, wyznaczającej granice zainteresowań archeologów. Oznacza to, że archeologia zajmuje się człowiekiem i jego kulturą od pojawienia się form człokształtnych do dziś. Nie ma już ograniczenia chronologicznego wskazującego, że przedmiotem badań są czasy do końca starożytności, końca średniowiecza czy wyznaczone dostępnością źródeł pisanych. Niezmiennym elementem definiowania archeologii pozostaje kultura materialna, która jest wykorzystywana na rozmaite sposoby w konstruowaniu narracji o przeszłości człowieka (np. Tabaczyński et al. 2012; Bahn, Renfrew 2002).

Materialny wymiar przeszłych działań ludzkich pełni zatem istotną rolę w badaniach nad minionymi społecznościami. Ten wymiar materialny może być przynajmniej dwojaki: wytworzone i/lub użytkowane przedmioty/wytwory mobilne (tradycyjnie w języku archeologów określane jako „ruchome”) oraz obiekty, struktury, konstrukcje – jak to ujął Jan Żak (1977) w swojej definicji osadnictwa – w sposób „względnie trwałe” powiązane ze środowiskiem. Takie struktury/konstrukcje, gdy były tworzone lub użytkowane, prowadziły do in-

gerencji w naturalne układy litologiczne. To dzięki tej cesze archeolodzy określają zwykle tego typu pozostałości materialne jako „nieruchome”.

Z perspektywy potrzeb Programu AZP+ to właśnie ten wymiar kultury materialnej będzie głównym przedmiotem zainteresowania. Metody teledetekcyjne pozwalają nam poszukiwać pozostałości „nieruchomych” (choć nie wyłącznie), lecz oznacza to, że musimy wiedzieć, czego szukamy i czym to „coś” było w kontekście pierwotnym. Zatem punktem wyjścia jest zawsze dotychczasowy stan wiedzy na temat ludzkich działań w przeszłości oraz relacji pomiędzy badaną przeszłością a współczesnym badaczem. Z tego powodu warto dla uporządkowania narracji wyodrębnić dwa etapy: **przeszłość I** i **przeszłość II** (Bahn, Renfrew 2002). **Przeszłość I** będzie odnosiła się do etapu powstawania i użytkowania struktur czy konstrukcji. Często ten etap określany jest jako **kultura żywa**, przeszły **proces społeczno-kulturowy** czy **kontekst pierwotny**. Natomiast **przeszłość II** odnosiłaby się do okresu od momentu zaprzestania użytkowania danej struktury do współczesności, gdy staje się ona przedmiotem badania archeologa (Ryc. 1.1). W dyskursie archeologicznym ten drugi etap określany jest jako **proces archeologiczny** lub **proces(-y) podepozycyjny(-e)**.



Ryc. 1.1. Schemat procesów zachodzących od przeszłej kultury (proces społeczno-kulturowy) poprzez procesy depozycyjne i podepozycyjne po współczesny proces odkrywczy (J. Wrzosek)

1.1.1. Przeszłość I

Kultura jako specyficzna cecha człowieka bywa bardzo różnie definiowana (np. Tabaczyński 2012; Minta-Tworzowska 1994). Na potrzeby rozważań dotyczących struktur czy konstrukcji, które były tworzone i użytkowane w przeszłości przez grupy ludzkie, wystarczy przyjęcie poglądu – w szeroko akceptowanego w dyskusjach archeologicznych – że w ramach kultury wyodrębnić można trzy zasadnicze sfery: gospodarczą, społeczną i światopoglądowo-wierzeniową. Wszystkie są ze sobą wzajemnie powiązane, przenikają się. I choć wyodrębnienie takich trzech sfer (podsystemów) jest pewną redukcją w ujmowaniu złożoności kultury, na potrzeby Programu AZP+ możemy przyjąć ten podział za wystarczająco dobry. Działania powiązane z każdą ze wspomnianych sfer prowadziły do powstawania i użytkowania obiektów, które w sposób „względnie trwałe” były powiązane ze środowiskiem (ingerowały w naturalne i przekształcone antropogeniczne nawarstwienia geologiczne).

W sferze działań gospodarczych wyodrębnić możemy kilka obszarów aktywności, które w mniejszym lub większym stopniu ingerowały w układy litologiczne:

- > działania związane z pozyskiwaniem żywności (np. konstrukcje pułapek na zwierzęta, obozowiska związane z myślistwem i chowem zwierząt, układy pól, stawy rybne);
(Grafika 1)
- > pozyskiwanie surowców skalnych (w tym głównie krzemienia, kamienia, gliny, piasku, kredy jeziornej czy torfu); miejsca obróbki i przetwarzania surowców: pola dymarkowe, warsztaty, mielerze;
(Grafika 2)
- > transport i komunikacja (np. ścieżki, drogi gruntowe, drogi utwardzone, groble, mosty, porty, przystanie);
(Grafika 3)
- > budownictwo (np. domostwa, zamki, grody, kościoły, klasztory, dwory, folwarki, zabudowa miejska).
(Grafika 4)

Działania związane ze sferą społeczną są niewątpliwie powiązane z aktywnością gospodarczą, lecz mają wpływ na powstawanie obiektów o specyficznych cechach wynikających z:

- > relacji władzy i prestiżu (np. gród, zamek, pałac, park);
(Grafika 5)
- > hierarchii społecznej (organizacja przestrzeni domostwa, zagrody, osady, wsi, miasta);
(Grafika 6)
- > konfliktów społeczno-politycznych (np. gród, zamek, fortyfikacje, stanowiska ogniowe, „infrastruktura” wojenna, miejsca kaźni, obozy pracy, obozy jenieckie, granice polityczne);
(Grafika 7)

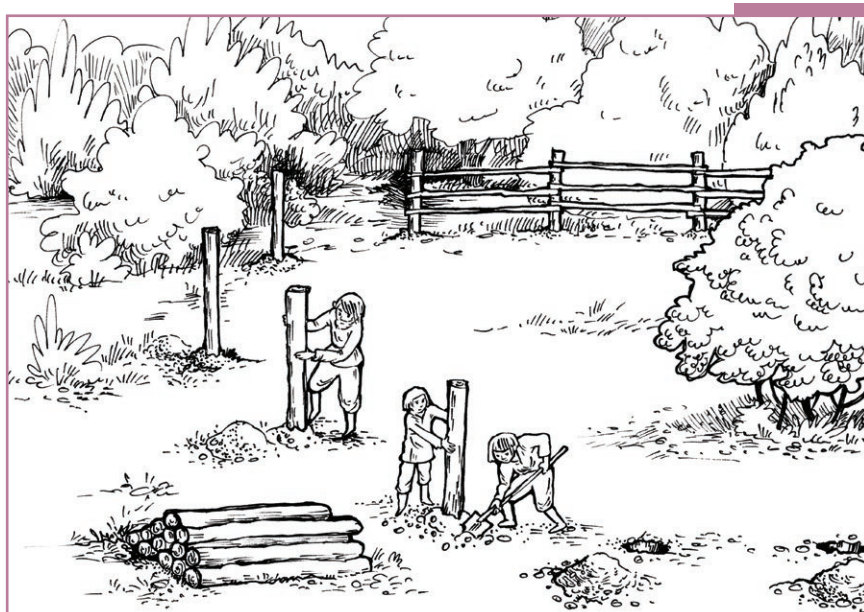
Również sfera działań światopoglądowo-religijnych prowadzi do wytwarzania struktur, które ingerowały w naturalne układy glebowo-geomorfologiczne. Działania te wiązały się z:

- > wyznaczaniem granic (np. strefy bezpieczeństwa);
(Grafika 8)
- > systemem wierzeń odnoszącym się do zmarłych i przodków oraz ich upamiętnianiem (np. kurhany, mogiły, cmentarze i powiązana z nimi infrastruktura, pomniki i inne formy upamiętnień); (Grafika 9)
- > miejscami deponowania wotów, ofiar;
(Grafika 10)
- > miejscami przeznaczonymi na rytuały religijne (np. kręgi kamienne, świątynie, miejsca pielgrzymkowe i ich infrastruktura, kościoły, kaplice, kapliczki). (Grafika 11)

Wspomniane pozostałości „nieruchome” z pewnością nie wyczerpują spektrum przeszłych działań prowadzących do ingerencji w nawarstwienia geologiczne i morfologie terenu oraz profile glebowe. Zaprezentowane powyżej przykłady są wynikiem obecnego stanu wiedzy, dotychczasowych odkryć archeologicznych czy efektów badań etnologicznych. W danych teledetekcyjnych **szukamy tego, co znamy** (Fleck 1986), więc wyjściowa wiedza na temat przeszłości i możliwych do zidentyfikowania relikwów jest jednym z istotnych warunków efektywności stosowania wszelkich metod w archeologii.

Sposoby konstrukcji, wykorzystane materiały, elementy składowe obiektów mają znaczenie przy określeniu potencjału ich zidentyfikowania dzięki metodom teledetekcyjnym. Inne metody muszą być zastosowane przy obiektach skonstruowanych z kamienia, a inne przy próbie

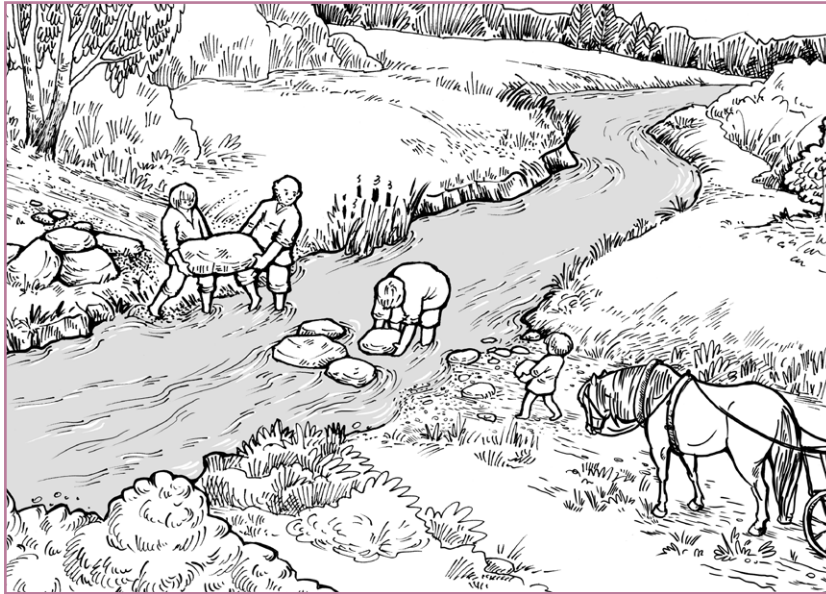
identyfikacji grobu zmarłego pochowanego bez wyposażenia. **Świadomość ograniczeń metod stosowanych w procesie rozpoznawania struktur/konstrukcji o specyficznych cechach jest niezbędna przy podejmowaniu decyzji, co i jak chcemy badać.**



Grafika 1 (A. Milewska)



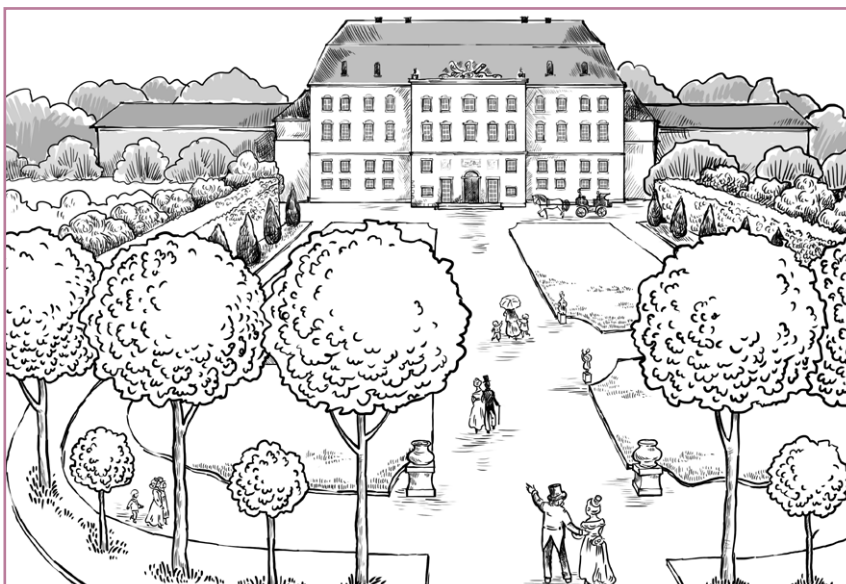
Grafika 2 (A. Milewska)



Grafika 3 (A. Milewska)



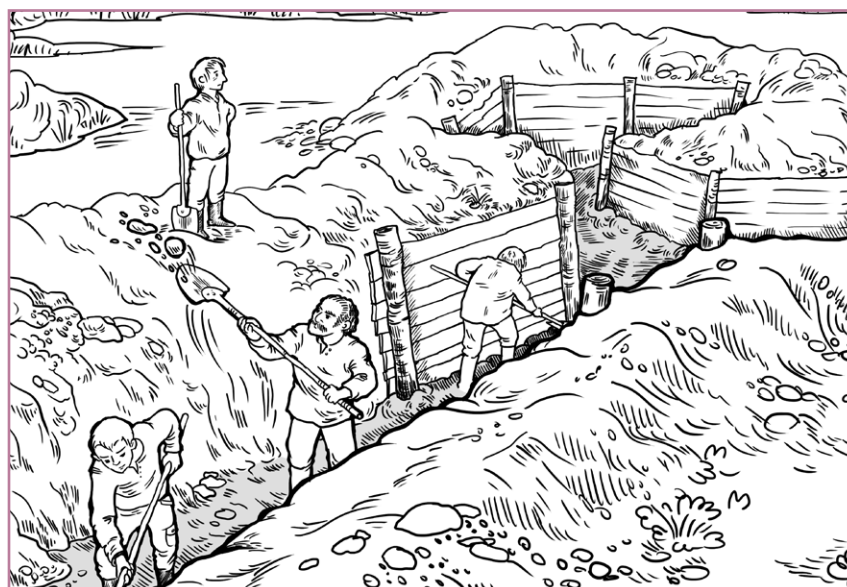
Grafika 4 (A. Milewska)



Grafika 5 (A. Milewska)



Grafika 6 (A. Milewska)



Grafika 7 (A. Milewska)



Grafika 8 (A. Milewska)



Grafika 9 (A. Milewska)



Grafika 10 (A. Milewska)



Grafika 11 (A. Milewska)

1.1.2. Przeszłość II

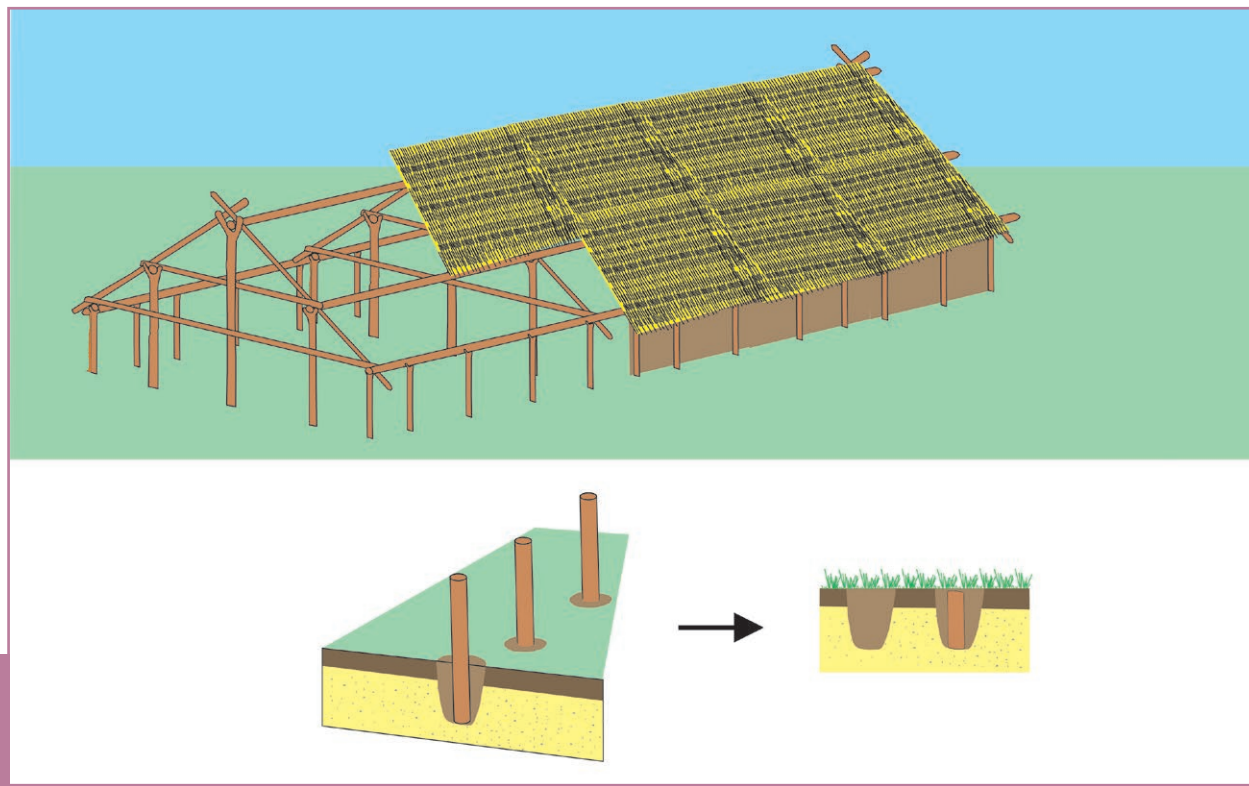
To, co jesteśmy w stanie zarejestrować przy pomocy metod teledetekcyjnych, nie jest tożsame ze strukturą czy konstrukcją stworzoną i użytą w przeszłości. Od momentu opuszczenia/zniszczenia struktury/konstrukcji zachodzi wiele procesów powodujących zmiany, które z jednej strony wpływają na zasób informacyjny, a z drugiej – na możliwości dokonania identyfikacji przy pomocy metod teledetekcyjnych. Abstrahując od tego pierwszego aspektu, gdyż naszym celem w Progranie AZP+ nie jest badanie przeszłości I, warto zastanowić się nad procesami sprawiającymi, że dane relikty mogą być identyfikowane (lub nie) przy pomocy metod teledetekcyjnych.

Przez dziesiątki, setki czy tysiące lat zachodziły rozmaite procesy naturalne bądź kulturowe, które miały i nadal mają wpływ na to, co pozostało po rozmaitych strukturach z przeszłości, a tym samym na to, czy i ewentualnie w jaki sposób możemy je identyfikować (Schiffer 1972, 1987; Urbańczyk 1981, 1986). Nie sposób omówić wszystkich tych procesów, gdyż wiele z nich nie zostało jeszcze zidentyfikowanych. Studia nad takimi procesami (określanymi jako procesy podepozycyjne) nie są szczególnie rozwinięte, choć istnieje i rośnie świadomość ich znaczenia.

Poniżej prezentujemy kilka przykładów pokazujących, jakie zmiany – istotne z perspektywy zastosowania metod teledetekcyjnych – mogą zachodzić w trakcie procesów podepozycyjnych. W pierwszej kolejności zajmiemy się domem słupowym, a właściwie jednym z jego elementów, czyli słupem konstrukcyjnym (Ryc. 1.2). Postawienie takiego słupa wymagało wykopania jamy wystarczająco głębokiej, by słup był stabilny w pozycji pionowej. Średnica jamy była zwykle większa od średnicy samego słupa. Wstawiony do jamy słup stabilizowany był wsypanym i ubitym materiałem. Warto zwrócić uwagę, że był to (mógł być) inny materiał niż warstwy naturalne znajdujące się na zewnątrz jamy. Ta faza konstruowania domu dotyczy przeszłości I. Po opuszczeniu budynku stopniowo następowała jego destrukcja, obejmująca m.in. rozkład drewna. To

drewno, które podlegało częstym zmianom wilgotności i temperatury, rozkładało się szybciej niż drewno znajdujące się w bardziej stabilnych warunkach. Możemy się zatem liczyć z sytuacją, że wcześniej zaniknęły ślady domostwa na powierzchni, niż uległy zniszczeniu elementy zagłębione, osadzone w jamie. Stopniowy rozkład tych elementów drewnianych, które były wkopane w ziemię, nie powodował istotnych zmian w kształcie i wymiarach jamy wykopanej dla posadowienia słupa. Struktura osadu wypełniającego jamę zdominowana była przez materiał, który służył ustabilizowaniu słupa, a także przez rozłożone szczątki samego słupa oraz materiał, który przedostawał się do pierwotnej jamy z zewnątrz w wyniku rozmaitych procesów naturalnych (infiltracja, struktury deformacyjne, procesy związane z zamrażaniem i rozmrażaniem itp.). Z perspektywy wykorzystania metod teledetekcyjnych istotne jest to, że wypełnisko pierwotnej jamy było odmienne od warstw, w które jama została pierwotnie wkopana. Drugim istotnym czynnikiem jest to, że jama nie ulegała zasadniczo zmianie (jeśli chodzi o średnicę), co wskazuje na jej parametry (a nie słupa). Natomiast pierwotna głębokość jamy może być trudna do ustalenia, gdyż w rezultacie rozmaitych procesów (np. erozja naturalna czy antropogeniczna) jej stropowe partie mogły ulec zniszczeniu. Trochę inaczej ten proces wyglądał, gdy chata uległa spaleniowi i zagłębione elementy konstrukcji stopniowo się wypaliły. Wówczas naturalny proces wypełniania może prowadzić do zmian w zarysie jamy. Jeszcze inny model charakteru jamy postłupowej (dołka postłupowego) dotyczy słupów usuwanych (wydobywanych/odzyskiwanych) po zakończeniu użytkowania konstrukcji słupowej. W takim przypadku jama po słupie podlegała znacznym przekształceniom.

Jednym z często identyfikowanych przez archeologów obiektów jest „jama odpadkowa”. W przeszłości I był to wykopany dół, do którego wrzucano niepotrzebne rzeczy, odpadki itp. Oznacza to, że wewnątrz znajdował się materiał zdecydowanie odmienny od warstw, w których dół został wykopany. Tym materiałem może być



Ryc. 1.2. Schemat zmian zachodzących w procesie – od budowy chaty i postawienia słupa konstrukcyjnego po identyfikację obiektu określanego jako jama postłupowa (J. Wrzosek)

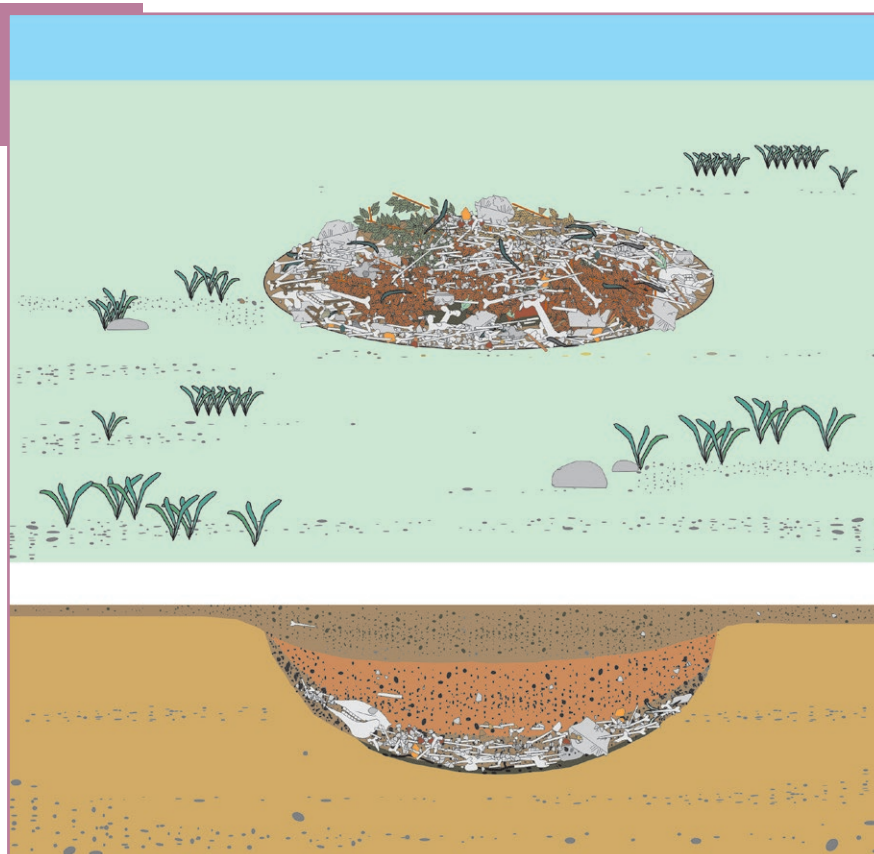
wszystko, np. fragmenty przedmiotów wykonanych z materiałów mineralnych, pozostałości organiczne czy odpadki konsumpcyjne. W przypadku całkowitego wypełnienia, dół przestawał pełnić swoją funkcję i rozpoczynały się procesy podepozycyjne. Prowadziły one do stopniowego rozkładu materii organicznej, osiadania warstw wewnątrz i wypełniania materiałem z zewnątrz osiadającego wnętrza. Wypełnisko dołu stawało się więc bardzo zróżnicowane, zawierało frakcje o różnych właściwościach. W wyniku procesów podepozycyjnych kształt jamy zasadniczo nie ulegał zmianie – obejmował ewentualnie jej stropowe partie, które mogły nawet zostać zniszczone w wyniku późniejszych procesów naturalnych czy kulturowych (Ryc. 1.3).

Inaczej przebiegają procesy podepozycyjne, które rozpoczynają się w momencie, gdy dół na śmieci przestaje być użytkowany, choć nie został do końca wypełniony. Wówczas oprócz procesów dotyczących zdeponowanych tam odpadków zachodzi proces stopniowego wypełniania dołu w wyniku akumulacji warstw z bezpośredniego

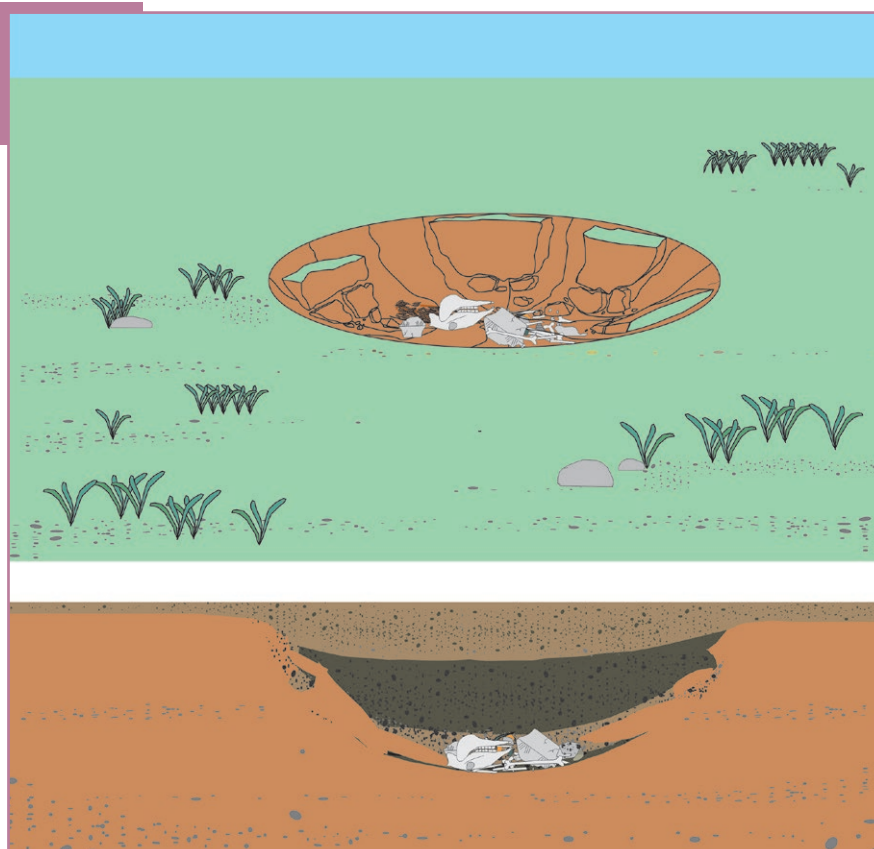
sąsiedztwa – również tych, w których dół został wykopany. Deponowane warstwy tworzą sekwencje osadów mineralnych i organicznych aż do całkowitego wypełnienia dołu. Temu procesowi towarzyszy niszczenie, zapadanie się, obrywanie krawędzi pierwotnie wykopanego dołu, w efekcie czego jego stropowe wymiary i forma ulegają istotnym zmianom (np. poszerzanie, nieregularne brzegi). Oznacza to, że rejestrowany współcześnie obraz takiego dołu jest odmienny niż w fazie użytkowania obiektu (Ryc. 1.4).

Musimy pamiętać, że dany obiekt mógł zostać ukształtowany w wyniku nierozpoznanych jeszcze procesów i że to, co obecnie znajduje się w obserwowanych obiektach jest efektem zarówno zjawisk kulturowych w przeszłości (przeszłość I), jak i procesów podepozycyjnych (przeszłość II). Należy zatem brać pod uwagę możliwość nieograniczonej kreatywności żyjących niegdyś ludzi, a także złożoność i miejscową specyfikę procesów stratyfikacyjnych oraz... własne ograniczenia badacza, które wynikają z percepcji sterowanej naszą dotychczasową wiedzą i oczekiwaniami.

Ryc.1.3. Schemat 1. zmian zachodzących w związku z wypełnianiem i zaprzestaniem użytkowania jamy śmietniskowej (J. Wrzosek)



Ryc. 1.4. Schemat 2. zmian zachodzących w związku z wypełnianiem i zaprzestaniem użytkowania jamy śmietniskowej (J. Wrzosek)



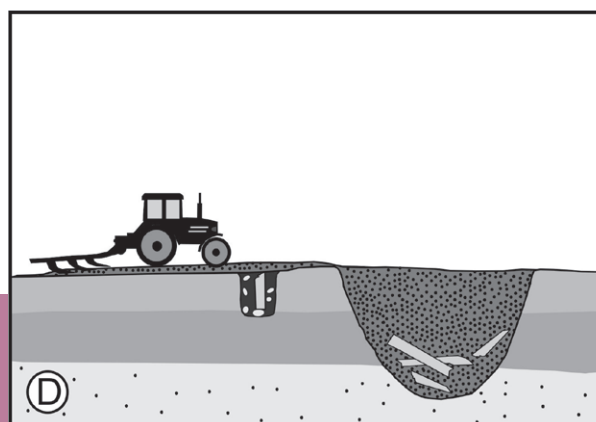
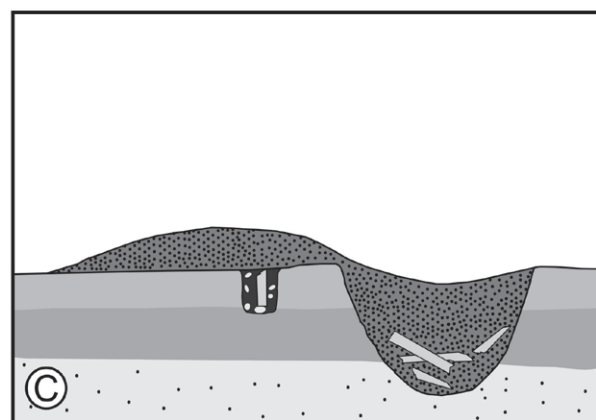
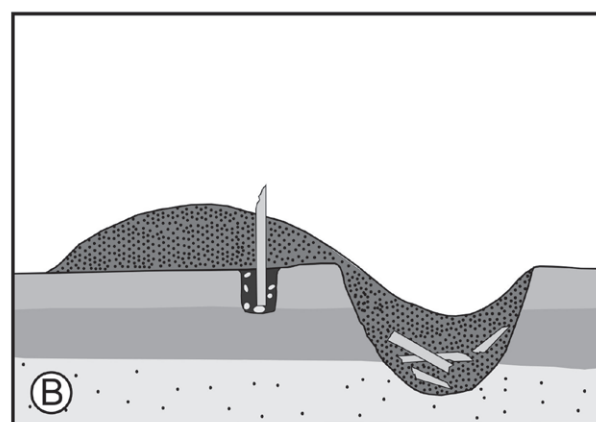
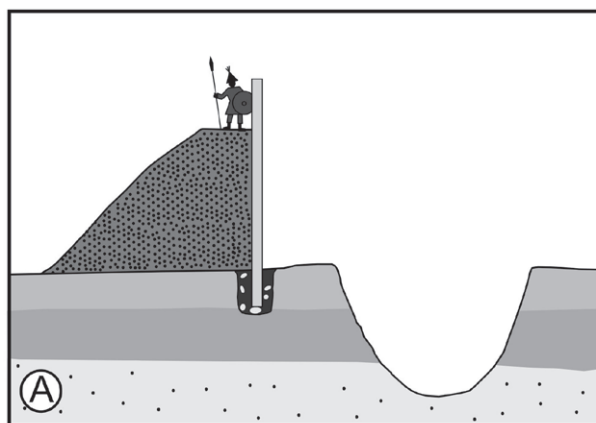
1.1.3. Przeszłość I, przeszłość II a teledetekcja

Pierwotna specyfika struktur czy konstrukcji, a w szczególności ich reliktyw, jako konsekwencji procesów podepozycyjnych, ma przełożenie na możliwość ich identyfikacji oraz interpretacji (najczęściej funkcjonalnej). Mówiąc w największym uproszczeniu, wszelkie obiekty – ze względu na kryterium możliwości ich identyfikacji – dzielą się na dwie grupy: 1) obiekty z zachowaną formą krajobrazową, czytelne w rzeźbie terenu i 2) obiekty całkowicie zniwelowane, których pozostałości znajdują się wyłącznie pod powierzchnią terenu (Ryc. 1.5). W przypadku obu tych grup reliktyw materiał pierwotnie wypełniający użytkowane struktury czy konstrukcje, nawarstwienia, które wtórnie znalazły w wypełniku jako rezultat procesów depozycyjnych i podepozycyjnych, pozwala na detekcję obiektów, szczególnie metodami nieinwazyjnymi.

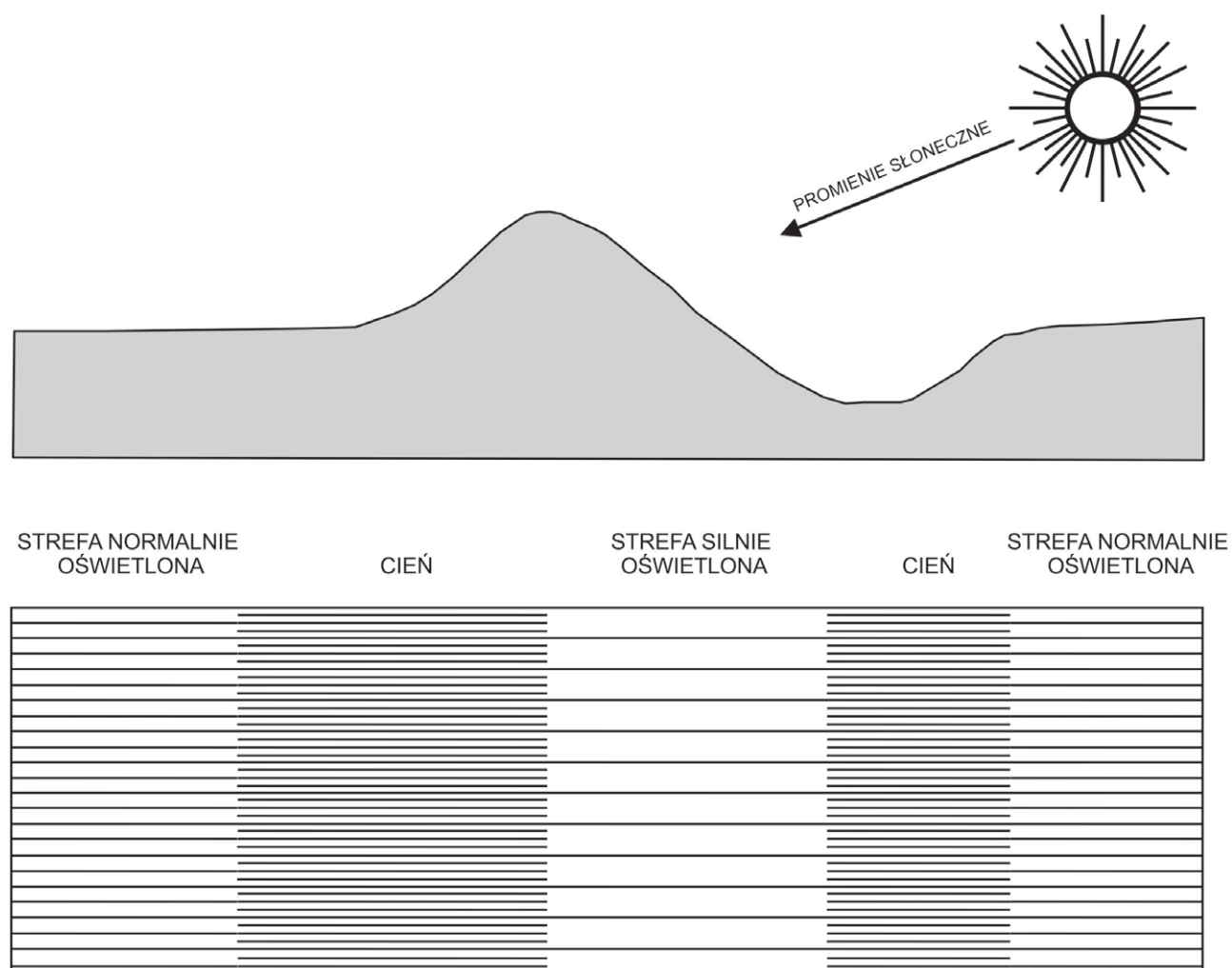
Pierwsze doświadczenia z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych w archeologii wiążą się z zastosowaniem zdjęć lotniczych (co najmniej od 1899 roku – Castrianni 2008). W ramach tej metody wypracowany został podstawowy schemat identyfikacji obiektów manifestujących się na zdjęciach (Crawford 1924; Riley 1987; Wilson 2000; Braasch 1999; Rączkowski 2009). Dla **obiektów o własnej formie terenowej** (grupa 1) kluczowym było obserwowanie **cienia** (ciemne i jasne fototony na zdjęciach czarno-białych) i **kontrastów** pomiędzy strefami oświetlonymi i zacienionymi (Ryc. 1.6, Ryc. 1.7).

Taka metoda interpretowania jest stosowana do dziś, choć już od dłuższego czasu mamy do czynienia z fotografią barwną i kontrasty jawią się na zdjęciach rozmaicie (Ryc. 1.8).

Powyższe doświadczenie zostało również wykorzystane w pierwszych aplikacjach lotniczego skanowania laserowego (Opitz, Cowley 2013), przy czym współcześnie stosowane są różne algorytmy do wizualizowania deniwelacji terenowych (zob. rozdział 5.4.). Obecnie aplikowane



Ryc. 1.5. Schemat wyjaśniający powstawanie obiektów z zachowaną własną formą krajobrazową (B, C) oraz całkowicie zniwelowanych (D) (J. Wrzosek)



Ryc. 1.6. Schemat ukazujący zmienność jasnych i ciemnych fototonów pozwalających na możliwość identyfikacji obiektów o własnej formie krajobrazowej (J. Wrzosek)



Ryc. 1.7. Przykład reliktywów obserwowanych dzięki kontrastowi pomiędzy jasnymi i ciemnymi fototonami (GUGiK)



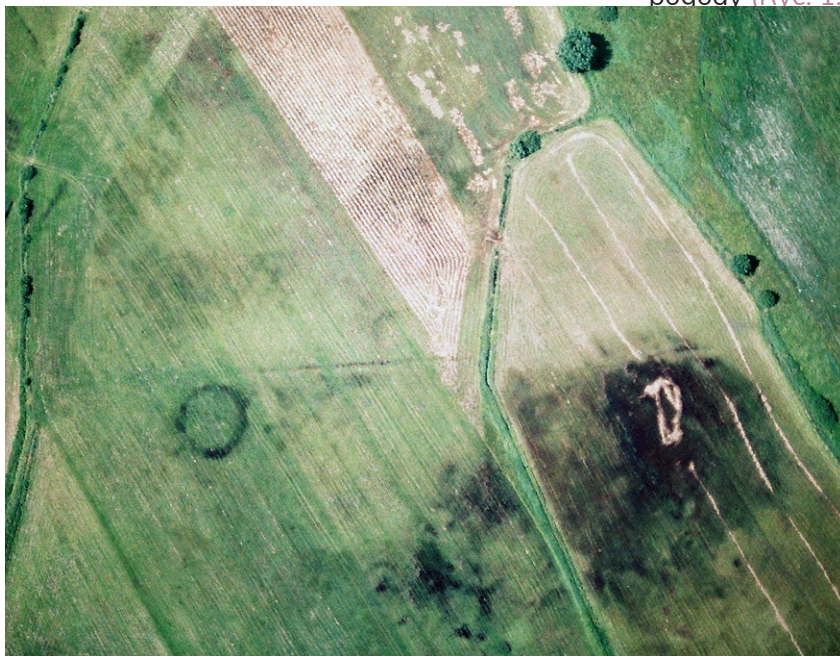
Ryc. 1.8. Przykład identyfikacji cienia wskazującego na obecność obiektów o własnej formie krajobrazowej na fotografii barwnej (M. Bogacki)

algorytmy pozwalają na uwypuklenie form trudno czytelnych. Kontrast widoczny na zdjęciach lotniczych czy optycznych zobrazowaniach satelitarnych pomiędzy cieniem a strefą oświetloną uplastycznia obraz i ułatwia identyfikację oraz interpretację obiektu, ale utrudnia lub nawet uniemożliwia rozpoznanie elementów znajdujących się w cieniu. Innymi czynnikami ujawniającymi formy topograficzne mogą być woda i śnieg. W przypadku wody wiąże się to z faktem, że

intensywne opady deszczu bądź roztopy prowadzą do wypełniania wszelkich zagłębień, które są dzięki temu dobrze czytelne (Ryc. 1.9).

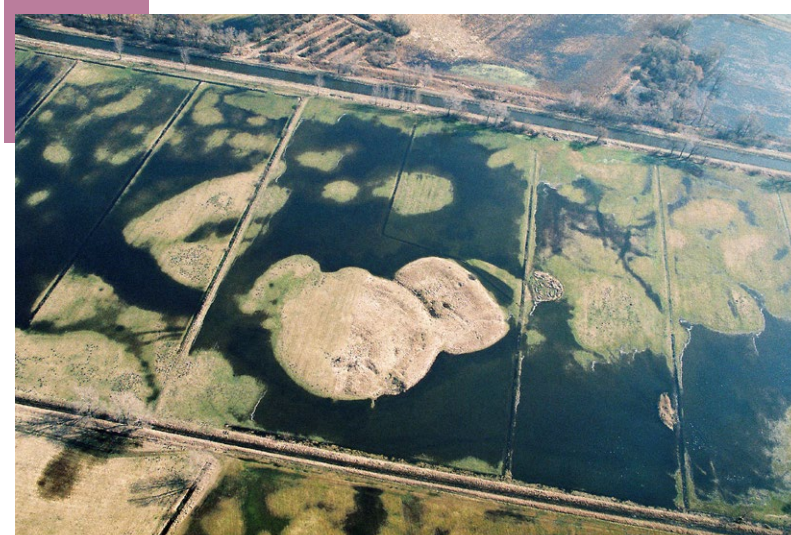
Z inną sytuacją mamy do czynienia, gdy obiekt jest lekko wyniesiony i w konsekwencji otoczony rozlewiskiem (Ryc. 1.10).

Podobnie sytuacja wygląda ze śniegiem, gdyż może on różnie osadzać się i topić na powierzchniach wyeksponowanych w stronę wiatru lub słońca. Są to zwykle warunki krótkotrwałe, dynamiczne, związane ze zmiennością pogody (Ryc. 1.11).



Ryc. 1.9. Woda wypełnia niewielkie koliste obniżenie terenowe i wskazuje obecność przypuszczalnych reliktyw przeszłej działalności człowieka (rów?) (W. Rączkowski)

Ryc. 1.10. Relikty nawet minimalnie wyniesione ponad poziom rozlewiska są doskonale czytelne na zdjęciach lotniczych (W. Rączkowski)



Ryc. 1.11. Nierównomiernie osadzający się i topniejący śnieg może wskazywać na obecność struktur o własnej formie krajobrazowej (W. Rączkowski)



O ile obiekty z własną formą krajobrazową obserwujemy właściwie w taki sposób, w jaki one się dziś przejawiają, to obiekty **całkowicie zniwelowane** (grupa 2) mogą być identyfikowane tylko na podstawie **cech pośrednich**. Zależnie od zagospodarowania obiektu w czasie, gdy pozyskujemy dane, czynnikiem pośrednim jest albo stan wegetacji roślin, albo kolorystyka i wilgotność gleby. Szczegółowe zasady wykorzystywania tych czynników pośrednich zostały wypracowane już na początku XX wieku w archeologii lotniczej i do dziś są one kluczowe przy pracy ze zdjęciami lotniczymi oraz optycznymi zobrazeniami satelitarnymi, a mają swój potencjał również przy lotniczym skanowaniu laserowym. W przypadku optycznych zobrażeń satelitarnych sposoby pozyskiwania danych otwierają

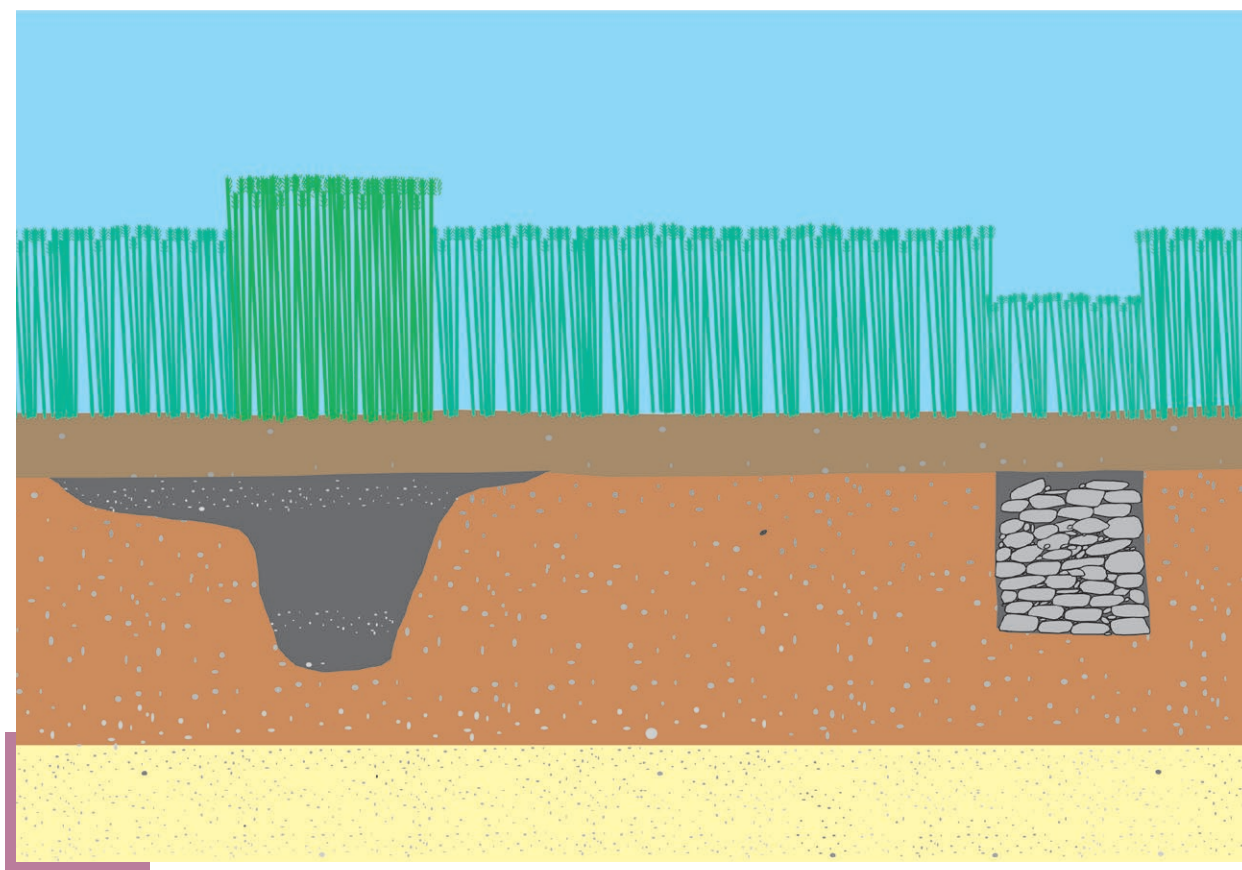
szereg innych możliwości interpretowania cech roślin lub gleb dzięki stosowaniu różnorodnych przetworzeń (zob. rozdział 4.1.). W archeologii lotniczej cechy pośrednie wynikające ze stanu roślinności określane są jako **wyróżniki (wskaźniki) roślinne** (cropmarks), a ze zmiennej kolorystyki (też wilgotności) gleby jako **wyróżniki (wskaźniki) glebowe** (soilmarks).

Wyróżniki roślinne ujawniają zróżnicowanie warunków wegetacji w danym miejscu. To zróżnicowanie może wynikać z naturalnego układu glebowo-geomorfologicznego, przeszłej działalności człowieka i zachodzących procesów podepozycyjnych lub ze współczesnych zabiegów agrotechnicznych (orka, nawożenie, stosowanie środków chemicznych itp.). Nas interesuje właśnie wpływ relików na wegetację,

ale nie możemy zapominać, że w tym samym miejscu mogą ujawniać się i pozostałe czynniki (naturalne oraz współczesne antropogeniczne). Obiekty zalegające pod warstwą orną powodują, że rośliny mają odmienne warunki wegetacji, a w konsekwencji inaczej się rozwijają i dojrzewają w porównaniu do roślin rosnących obok, lecz w miejscach, gdzie nie nastąpiło dawniej antropogeniczne zakłócenie naturalnego układu warstw (Ryc. 1.12). Wypełnisko obiektów archeologicznych może sprzyjać wegetacji lub ją utrudniać. Takie sprzyjające bądź utrudniające warunki wynikają z procesów tworzenia, użytkowania i pierwotnej funkcji obiektu oraz procesów podepozycyjnych. To wypełnisko może się różnić zawartością materii organicznej, zdolnością wchłaniania i utrzymywania wody oraz wewnętrzną spoistością. Każdy z tych czynników osobno i w powiązaniu z pozostałymi wpływa istotnie na proces wegetacji, zwłaszcza w okresie przedłużającej się suszy. Nad obiektami, które zawierają sporo materii organicznej i – przede

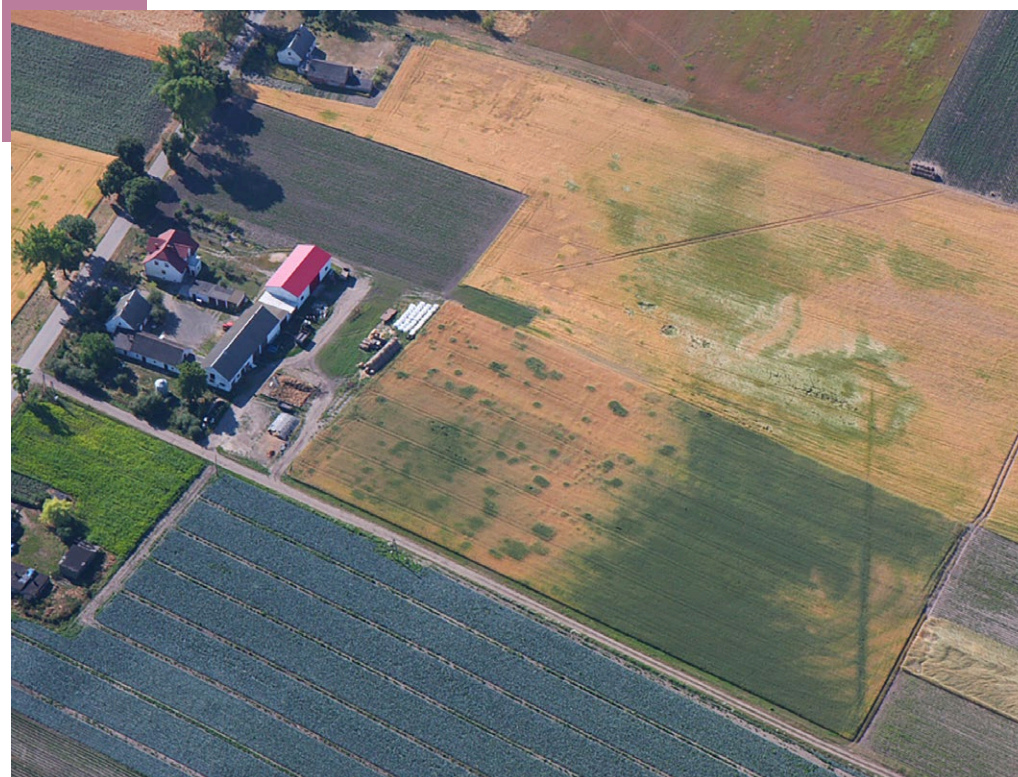
wszystkim – utrzymują więcej wody, rośliny rosną lepiej, są wyższe, mają większą powierzchnię liści, dojrzewają później i są bardziej odporne na choroby oraz szkodniki niż rośliny w bezpośrednim sąsiedztwie. Z kolei nad obiektami o zwartym, spoistym lub bardzo luźnym wypełnisku, zwykle gorzej zatrzymującym wodę, rośliny rosną wolniej, są niższe, rzadsze, dojrzewają (żółkną) szybciej i są bardziej narażone na ataki szkodników oraz chorób. Takie zróżnicowanie pozwala wyodrębnić wyróżniki roślinne pozytywne (co dotyczy roślin lepiej rosnących) i wyróżniki roślinne negatywne (rośliny rosnące słabiej). Wyróżniki roślinne obserwuje się w okresie, gdy rośliny uprawne są na polach (Ryc. 1.13). Po żniwach, a zwłaszcza po podorywkach, możliwość obserwacji wyróżników roślinnych zanika. Czasem bywają one jeszcze widoczne na ścierniskach.

Nie wszystkie rośliny są równie wrażliwe na warunki glebowo-wilgotnościowe. Część z nich dość szybko reaguje na stres wilgotnościowy (susza), np. pszenica, jęczmień, owies czy rzepak.



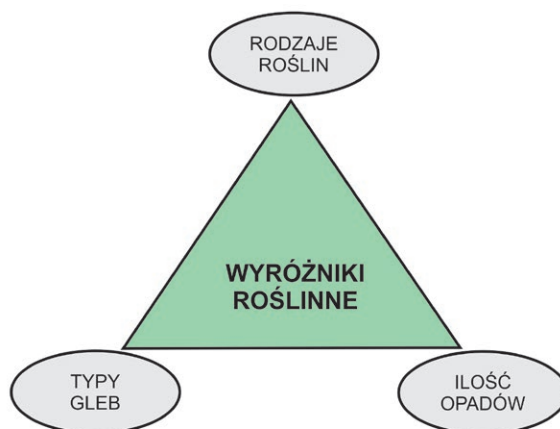
Ryc. 1.12. Schemat powstawania wyróżników glebowych (J. Wrzosek)

Ryc. 1.13. Przykład wyróżników roślinnych pokazujący ich odmienną czytelność w zależności od rodzaju upraw (W. Rączkowski)

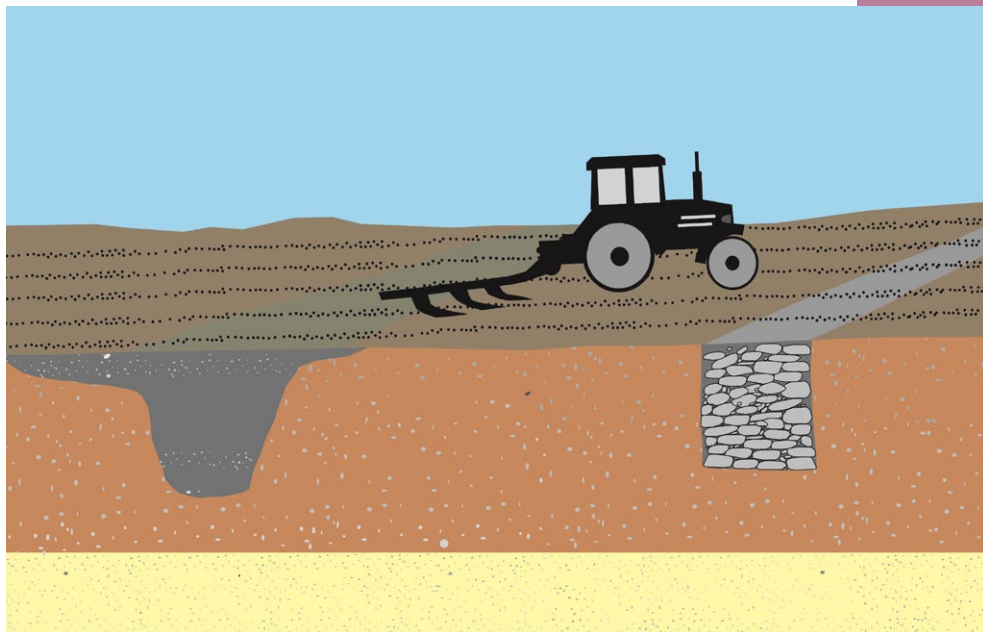


Inne rośliny okazują się bardziej odporne, np. buraki cukrowe czy ziemniaki. Znaczenie ma także rodzaj gleby. Mówiąc w uproszczeniu, gleby lekkie szybciej przesychają i w efekcie dość wcześnie może pojawić się stres wilgotnościowy, podczas gdy gleby ciężkie, bardziej zwarte, dłużej utrzymują wilgoć. Istotną rolę w ocenie prawdopodobieństwa pojawienia się wyróżników odgrywa też ilość i rozkład opadów w ciągu całego roku (Ryc. 1.14).

W okresie, gdy na polach nie ma roślinności (zwykle od późnej jesieni do wczesnej wiosny) możliwe jest obserwowanie **wyróżników glebowych**. Orka prowadzi do mieszania stropowej warstwy gleby. Jeżeli pług w trakcie orki zahaczy warstwę zalegającą niżej, to wyrzuci ją na powierzchnię (Ryc. 1.15). Różnica w barwie warstw (jeżeli jest wyraźna) pozwala zaobserwować obecność niższej warstwy w danym miejscu (choćby przy niewielkim przesunięciu wynikającym z kierunku pracy pługa). Tym samym można obserwować zarówno zmienność litologiczną, jak i obecność relikwów archeologicznych (Ryc. 1.16). Obecność wyróżnika glebowego wskazuje także na systematyczne naruszanie warstw kulturowych.



Ryc. 1.14. Czynniki wpływające na możliwość pojawienia się wyróżników roślinnych (J. Wrzosek)



Ryc. 1.15. Schemat powstawania wyróżników glebowych (J. Wrzosek)



Ryc. 1.16. Warstwa kulturowa o barwie odmiennej od warstwy ornej czytelna jest na powierzchni w wyniku orki (W. Rączkowski)

Dotychczasowe praktyki związane z zastosowaniem metod geofizycznych skupiają się na wyszukiwaniu anomalii o specyficznych cechach oraz ich interpretacji (por. rozdz. 2.5). Przykładowo metoda magnetyczna pozwala na identyfikację obiektów ferromagnetycznych, poddanych obróbce termicznej i wszelkich struktur kontrastu-

jących podatnością magnetyczną z otoczeniem, czyli skupia się na rozpoznaniu zmienności pola magnetycznego (Ryc. 1.17). Skala anomalii określana jest według przyjętego systemu jednostek. W przypadku metody magnetycznej możliwe jest również identyfikowanie pojedynczych wytworów o odmiennych cechach.

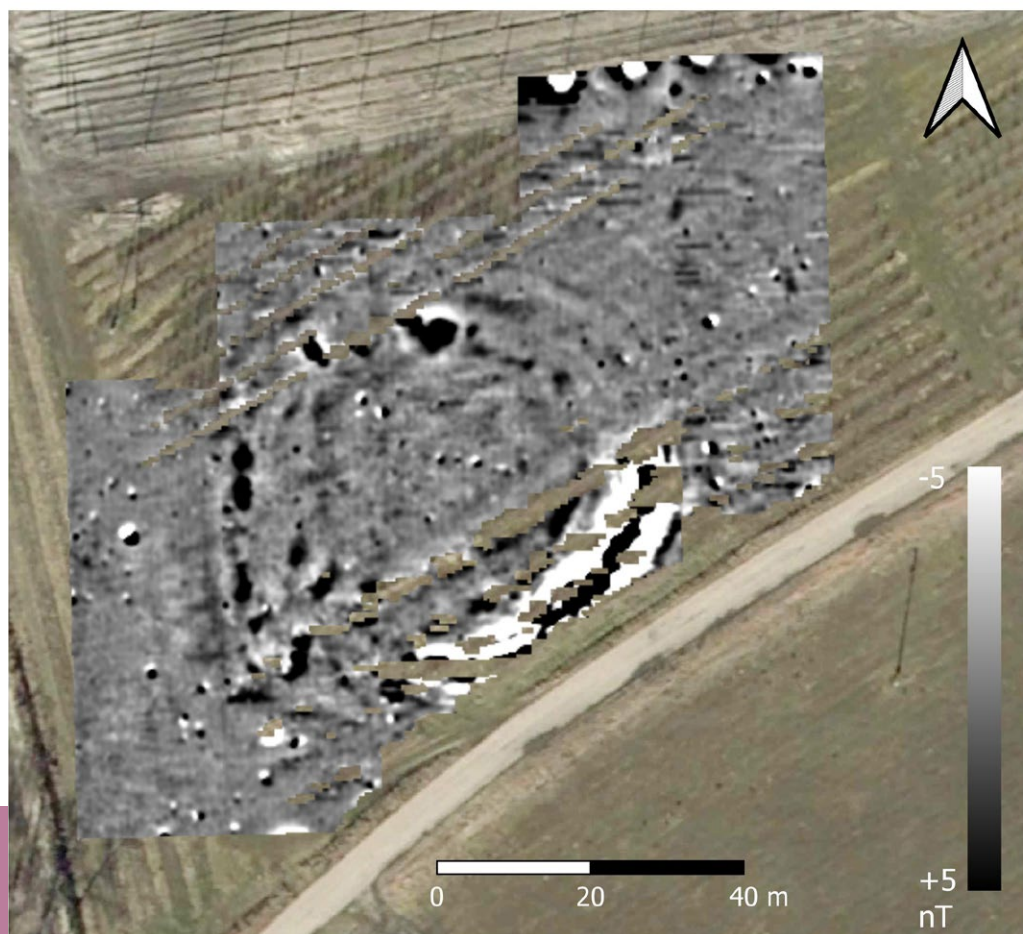
Metoda elektrooporowa wykorzystuje takie cechy struktur czy konstrukcji, które wprowadzają zakłócenia w przepływie prądu elektrycznego w stosunku do otoczenia (Ryc. 1.18).

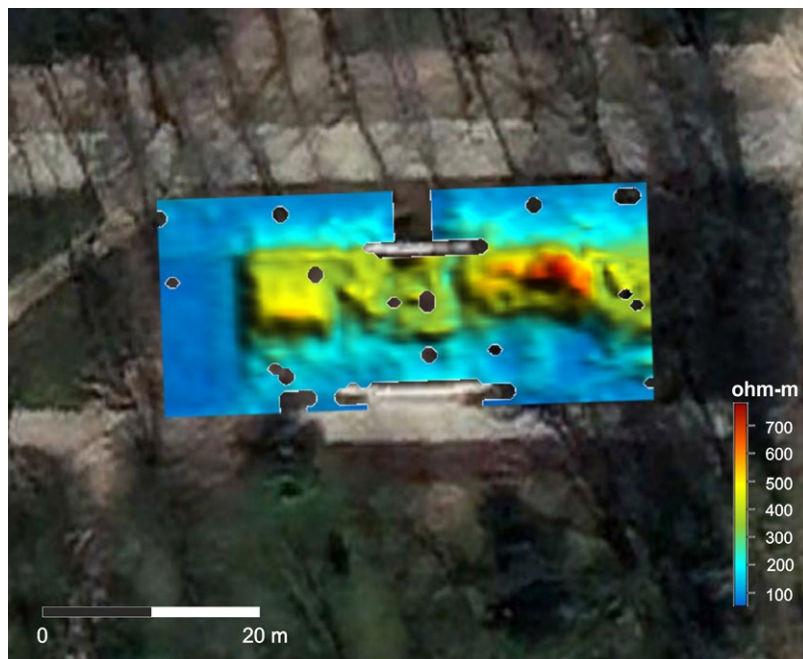
Z kolei metoda georadarowa pozwala na identyfikowanie różnic w rozchodzeniu się fali elektromagnetycznej w warstwach o niejednakowej charakterystyce (Ryc. 1.19).

Te trzy wspomniane metody koncentrujące się na specyficznych cechach obiektów, warstw, struktur, konstrukcji, a nawet pojedynczych wytworów nie wyczerpują całego spektrum badawczego. Złożoność świata materialnego jest

tak ogromna, że badać można wiele cech i odnosić pozyskiwane wyniki do otoczenia. Każda metoda i każdy detektor nastawiony jest więc na identyfikowanie specyficznych charakterystyk materiałów, lecz zawsze wiąże się to ze wskazaniem na odmienność wobec otoczenia. W takim kontekście można też stwierdzić, że **istnieje potencjał wypracowania nowych metod**, które będą pozwalały na identyfikowanie innych cech charakteryzujących struktury czy konstrukcje wytworzone w przeszłości i/lub modyfikowane przez procesy podepozycyjne.

Ryc. 1.17. Mapa rozkładu anomalii magnetycznych (R. Ryndziejewicz)





Ryc. 1.18. Mapa rozkładu oporności gruntu (T. Herbich)



Ryc. 1.19. Zobrazowanie wyników badań georadarowych na głębokości około 40 cm od powierzchni gruntu (T. Herbich)

1.2. Klasyfikacje metod

Złożoność świata powoduje, że dla jego opisu wprowadza się pewne uproszczenia porządkujące, określane jako klasyfikacje. Nie jest to tylko przypadłość archeologii. Klasyfikowanie polega na redukowaniu złożoności jednych cech w celu uwypuklenia innych. Metody teledetekcyjne wykorzystywane w Programie AZP+ charakteryzują się dużą różnorodnością i trudno je uporządkować w taki sposób, by podkreślić ich specyfikę. Wybierając określone kryterium, wskazujemy na daną cechę, a przy zastosowaniu innego wyznacznika podkreślamy specyfikę innej grupy metod. Aby ukazać różne i ważne cechy metod teledetekcyjnych, podejmiemy próbę uporządkowania tych działań przy zastosowaniu kilku kryteriów.

1.2.1. Metody aktywne i pasywne

Takie porządkowanie metod jest dość częste i istotą jest tutaj źródło rejestrowanych danych. **Metody pasywne** wykorzystują promieniowanie docierające do sensora (urządzenia odbiorczego) (Ryc. 1.20A). Może to być promieniowanie wynikające z cech obiektu lub emitowane przez Słońce i odbijające się od obiektów w przestrzeni, a następnie rejestrowane w określonej formie.

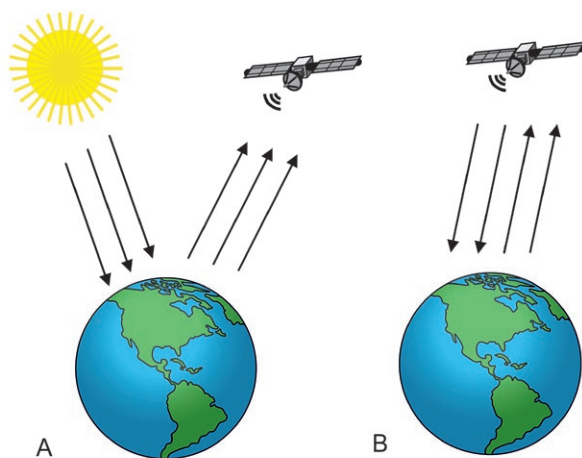
Najbardziej znaną metodą pasywną jest fotografia. Do obiektywu aparatu fotograficznego dociera promieniowanie z zakresu światła widzialnego emitowane przez Słońce i odbite od fotografowanego obiektu. Taką samą zasadę wykorzystują optyczne zobrażenia satelitarne, choć bywa, że zakres rejestrowanego promieniowania wykracza poza zakres światła widzialnego. Z kolei metoda magnetyczna rejestruje zróżnicowane pola magnetyczne. Dany obiekt generuje słabsze lub silniejsze pole magnetyczne i to ono jest rejestrowane w formie **anomalii** w stosunku do średniego natężenia ziemskiego pola magnetycznego. Wśród metod wykorzystywanych w ramach Programu AZP+ do metod pasywnych zaliczyć można: zdjęcia lotnicze, optyczne zobrażenia satelitarne i metodę magnetyczną.

Metody aktywne wiążą się z rejestrowaniem energii, która emitowana jest przez urządzenie i po odbiciu lub zmodyfikowaniu przez badany obiekt powraca do urządzenia (Ryc. 1.20B). W zależności od charakterystyki emitowanego promieniowania i jego odbitego lub zmodyfikowanego sygnału można uzyskać informacje o określonych cechach wybranego obiektu.

Wśród metod teledetekcyjnych wykorzystywanych w ramach Programu AZP+ do metod aktywnych można zaliczyć: skanowanie laserowe, metody geofizyczne (elektrooporowa, georadarowa, sejsmiczna itp.).

1.2.2. Pułapy

Urządzenia rejestrujące mogą być umieszczane na platformach, które znajdują się w pewnej odległości od badanego obiektu. Ze względu na tę odległość wyodrębniane są różne pułapy, z których prowadzi się pomiary. Pułapy reprezentują następujące poziomy: naziemny, niski, średni, wysoki i satelitarny (Ryc. 1.21). **Pułap naziemny** dotyczy platform z urządzeniem pomiarowym używanych na powierzchni ziemi. **Niski pułap** odnosi się do takich platform, jak popularne współcześnie bezzałogowe statki powietrzne (potocznie określane jako drony), a także już wcześniej stosowane latawce czy balony – używane na poziomie



Ryc. 1.20A, B. Urządzenia wykorzystywane w metodach pasywnych rejestrują docierające do sensorów wybrane długości promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez badany obiekt lub odbitego promieniowania słonecznego (J. Wrzosek)

50–250/300 m nad ziemią). **Średni pułap** to domena małych samolotów sportowych, samolotów ultralekkich, ale też śmigłowców, które operują zwykle na wysokości od 250/300 do 2000 m.

Wysoki pułap wyznaczają specjalistyczne samoloty działające na wysokości 2000–10000 m. Natomiast **pułap satelitarny** sięga poziomu nawet 36 000 km. Oczywiście podziały i granice pułapów są w dużej mierze umowne.

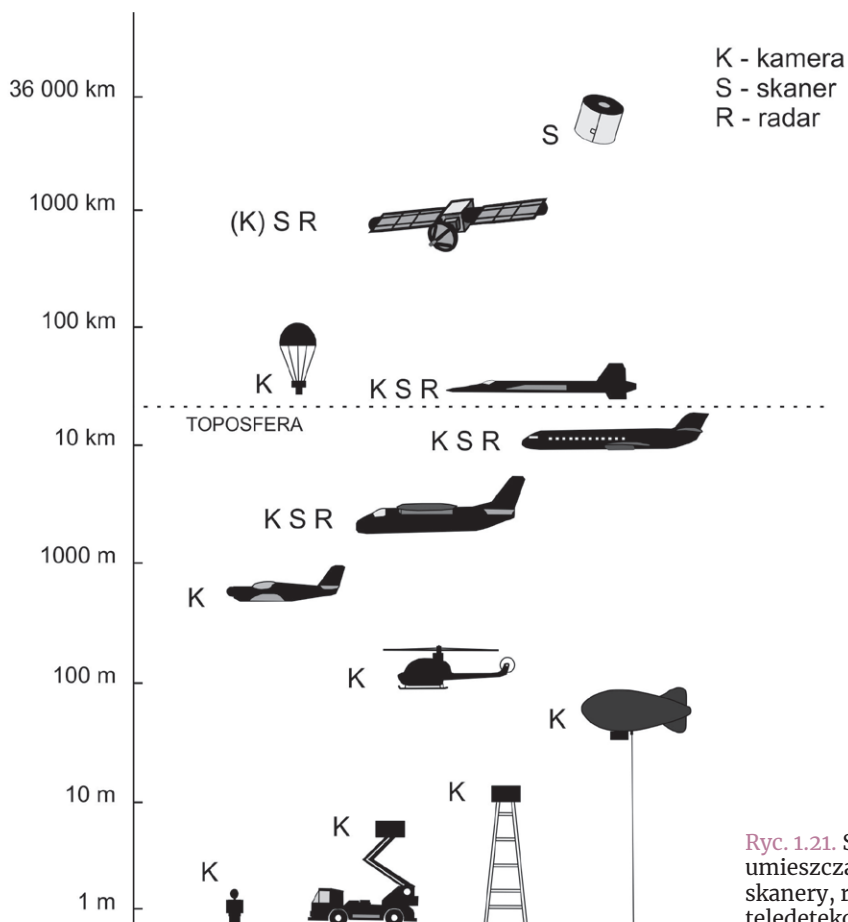
Prowadzenie pomiarów z różnych pułapów generuje rozmaite potrzeby związane ze wstępną obróbką danych (np. korekcję radiometryczną i atmosferyczną czy korygowanie zniekształceń geometrycznych – zob. rozdz. 2.1–2.4). Wykorzystanie różnych pułapów dla umieszczenia urządzeń pomiarowych wpływa także na skalę przestrzenną prowadzonych pomiarów. O ile pomiary naziemne pozwalają pozyskiwać dane na obszarze licznym w hektarach, to zobrazowania satelitarne mogą oferować pojedyncze sceny obejmujące kilkaset km².

Niektóre metody charakteryzują jeden pułap, a w przypadku innych aparatura pomiarowa umieszczona jest na wielu pułapach (Tabela 1).

1.2.3. Sensory

Urządzenia pomiarowe/pozyskujące dane (sensory) są specyficzne dla każdej metody. Co więcej, każdy producent wprowadza swoiste rozwiązania techniczne, a to prowadzi do różnic w parametrach poszczególnych urządzeń. Przykładem mogą być sensory instalowane na satelitach, pozwalające na rejestrowanie różnych długości fal z zakresu światła widzialnego i podczerwieni (Tabela 2).

To zestawienie pokazuje, że nawet przy stosowaniu tej samej metody wyniki nie muszą być identyczne i pokazywać to samo w taki sam sposób. Niezbędna jest zatem świadomość parametrów poszczególnych sensorów, a także potrzeby wstępnej obróbki danych, która wpływa na ich wizualizowanie i możliwości interpretacji.



Ryc. 1.21. Schemat pułapów, na których umieszczane są różne sensory (kamery, skanery, radary) wykorzystywane w metodach teledetekcyjnych (J. Wrzosek)

Tabela 1. Metody detekcji stosowane na różnych pułapach

<div>Metoda \ Pułap</div>	Naziemny	Niski	Średni	Wysoki	Satelitarny
metody geofizyczne	✓	?*			
skanowanie laserowe	✓	✓	✓	✓	
zdjęcia lotnicze		✓	✓	✓	
optyczne i radarowe zobrazowania satelitarne					✓
metody hiper- i wielospektralne	✓	✓	✓	✓	✓

* Prowadzone są doświadczenia z wykonywaniem pomiarów magnetycznych z dronów.

Tabela 2. Zakresy promieniowania rejestrowane przez wybrane systemy satelitarne

	Blue (μm)	Green (μm)	Red (μm)	NIR (μm)
IKONOS	0,45–0,52	0,52–0,60	0,63–0,69	0,69–0,90
GeoEye-1	0,45–0,51	0,51–0,58	0,655–0,69	0,78–0,92
OrbView-3	0,45–0,52	0,52–0,60	0,625–0,695	0,76–0,90
QuickBird-2	0,45–0,52	0,52–0,60	0,63–0,69	0,76–0,90
WorldView-2, 3	0,45–0,51	0,51–0,58	0,63–0,69	0,77–0,895
Pleiades-1A, 1B	0,43–0,55	0,49–0,61	0,60–0,72	0,75–0,95
SPOT 7	0,455–0,525	0,53–0,59	0,625–0,695	0,76–0,89

Bibliografia

- Braasch O. 1999. Z innego punktu widzenia – prospekcja lotnicza w archeologii. W: Z. Kobyliński (red.), *Metodyka ratowniczych badań archeologicznych*. Warszawa: Państwowe Muzeum Archeologiczne, 41–100.
- Campana S., Piro S. (red.) 2009. *Seeing the Unseen. Geophysics and landscape archaeology*. Leiden: CRC Press/Balkema.
- Castrianni L. 2008. Giacomo Boni: a pioneer of the archaeological aerial photography. W: R. Lasaponara, N. Massini (red.), *Advances on Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management*. Rome: EARSeL, 55–58.
- Fleck L. 1986. *Powstanie i rozwój faktu naukowego*. Lublin: Wydawnictwo Lubelskie.
- Minta-Tworzowska D. 1994. *Klasyfikacja w archeologii jako sposób wyrażania wyników badań, hipotez oraz teorii archeologicznych*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.
- Misiewicz K. 2006. *Geofizyka archeologiczna*. Warszawa: Instytut Archeologii i Etnologii PAN.
- Opitz R., Cowley D. (red.) 2013. *Interpreting Archaeological Topography. 3D Data, Visualisation and Observation*. Oxford, UK: Oxbow Books.
- Oswin J. 2009. *A Field Guide to Geophysics in Archaeology*. Chichester: Praxis Publishing.
- Rączkowski W. 2009. Zobaczyć ukryte. Zdjęcia lotnicze w archeologii. W: T. Sawicki (red.), *Studia nad dawną Polską*, t. 2. Gniezno: Muzeum Początków Państwa Polskiego w Gnieźnie, 133–154.
- Renfrew C., Bahn P. 2002. *Archeologia. Teorie, metody, praktyka*. Warszawa: Prószyński i S-ka.
- Riley D.N. 1987. *Air Photography and Archaeology*. London: Duckworth.
- Schiffer M.B. 1972. Archaeological context and systemic context. *American Antiquity* 37, 156–165.
- Schiffer M.B. 1987. *Formation processes of archaeological record*. Albuquerque: University of New Mexico Press.
- Schmidt A. et al. 2015. *EAC guidelines for use of geophysics in archaeology. Questions to ask and points to consider*. Namur, Belgium: Europae Archaeologia Concilium.
- Tabaczyński S. 2012. Kultura i kultury. W: S. Tabaczyński, A. Marciniak, D. Cyngot, A. Zalewska (red.), *Przeszłość społeczna. Próba konceptualizacji*. Poznań: Wydawnictwo Poznańskie, 571–604.
- Tabaczyński S., Marciniak A., Cyngot D., Zalewska A. (red.) 2012. *Przeszłość społeczna. Próba konceptualizacji*. Poznań: Wydawnictwo Poznańskie.
- Urbańczyk P. 1981. O możliwościach poznawczych archeologii. *Przegląd Archeologiczny* 29, 5–52.
- Urbańczyk P. 1986. Formowanie się układów stratyfikacyjnych jako proces źródotwórczy. W: W. Hensel, G. Donato, S. Tabaczyński (red.), *Teoria i praktyka badań archeologicznych*. Wrocław: Ossolineum, 184–245.
- Wilson D. 2000. *Air Photo Interpretation for Archaeologists*. Stroud: Tempus Publishing Ltd.
- Żak J. 1977. O studiach osadniczych. *Archeologia Polski* 22, 421–424.



2.

Metody teledetekcyjne w archeologii – podstawy

Teledetekcja to sposób identyfikacji, obserwacji i pomiarów określonego obiektu z pewnej odległości, bez bezpośredniego z nim kontaktu. Technologia pozwalająca na realizację takich zadań pojawiła się już w starożytności (*camera obscura*), ale forma bardziej zaawansowana powstała w połowie XIX wieku i był nią aparat fotograficzny. Termin teledetekcja (*remote sensing*) został wprowadzony do dyskursu naukowego przez Evelyn Pruitt z U.S. Office of Naval Research i dziś jest powszechnie stosowany. Odnosi się do wielu metod, włącznie z metodami wykorzystywanymi przez archeologów. Obecnie w archeologii najpowszechniej stosuje się kilka metod teledetekcyjnych. Są to: zdjęcia lotnicze wykonywane z różnych pułapów, zobrazowania satelitarne, skanowanie laserowe, metody geofizyczne czy obrazowania hiper- i wielospektralne.

Metody te mają zróżnicowane zastosowanie w archeologii, a także niejednolite umocowanie w praktyce badawczej. W konsekwencji struktura niniejszego rozdziału nie jest jednorodna, lecz z rozmaicie rozłożonymi akcentami i zróżnicowanym poziomem szczegółowości. Ponadto staramy się wykazać, że wraz z zastosowaniem poszczególnych metod zmieniają się możliwości pozyskiwania danych, co także wpływa na strukturę zaprezentowanych tu podrozdziałów. Niniejszy

rozdział ukształtowany jest też w odpowiedzi na dostępność danych komercyjnych lub publicznych, która jest różna w zależności od omawianej metody.

Intencją autorów jest stworzenie pewnego zasobu wiedzy pozwalającej na zrozumienie potencjału i ograniczeń poszczególnych metod. Mamy nadzieję, że ułatwi to podejmowanie decyzji odnośnie do zarządzania dziedzictwem archeologicznym przez pracowników służb konserwatorskich, a środowisku akademickiemu wskaże obecny zasięg stosowalności dyskutowanych metod w ramach rozwiązywania problemów badawczych. Kładziemy nacisk przede wszystkim na potrzebę precyzyjnego formułowania pytania badawczego czy też konserwatorskiego i przyjrzenia się potencjałowi metod właśnie z takiej perspektywy. Jednocześnie biorąc pod uwagę, że pytania mogą być bardzo zróżnicowane, nie możemy zagwarantować, że zawarte poniżej wskazówki spełnią wszystkie oczekiwania.

Historia obecności zdjęć lotniczych w archeologii jest najdłuższa na tle stosowanych w archeologii metod teledetekcyjnych i obejmuje szerokie spektrum aplikacji. Dlatego ta metoda (zwłaszcza rekonesans lotniczy wykonywany na średnim pułapie) otwiera Poradnik. Następnie zostały omówione zobrazowania satelitarne, lotnicze skanowanie laserowe i metody geofizyczne.

Włodzimierz Rączkowski, Miron Bogacki, Grzegorz Kiarszys

2.1. Zdjęcia lotnicze w archeologii

2.1.1. Wprowadzenie

Ponad stuletnia historia fotografii lotniczej w archeologii pokazuje, że zastosowania zdjęć się zmieniały, fotografie miały realizować różne cele, a sposoby wykorzystania zdjęć warunkowane były formułowanymi w rozmaitych kontekstach oczekiwaniami badawczymi (Wilson 2000; Rączkowski 2002). Bywały okresy, gdy głównym celem fotografii lotniczej stawało się zidentyfikowanie miejsca z obserwowanymi śladami minionej działalności człowieka (np. Insall 1927; Agache, Bréart 1975). Z czasem te cele ulegały modyfikacjom i pojawiały się zadania dotyczące budowania wyobrażeń i zbierania danych o przeszłych krajobrazach czy procesach podepozycyjnych (np. Brown 1983; Bewley 1991). Podkreślano też rolę ilustracyjno-perswazyjną fotografii w narracjach o przeszłości (np. Musson 1994). Ta zmienność zadań stawianych przed zdjęciami lotniczymi wynikała z pojawiania się nowych nurtów teoretycznych w archeologii, a tym samym różnorodnego rozumienia archeologii, jej miejsca w społeczeństwie, jak i celów badawczych. Każdorazowo świadomie sformułowany cel wpływa na dobór szczegółowych rozwiązań, które należy uwzględnić przy planowaniu, przeprowadzaniu działań związanych z wykonywaniem zdjęć czy ich opracowywaniu i interpretacji.

Ogromna różnorodność dotychczasowych praktyk oraz nieprzewidywalność przyszłych możliwych celów generuje problem związany ze spójnością narracji dotyczącej stosowalności zdjęć lotniczych w archeologii. Tradycyjnie najważniejszym zadaniem jest możliwie pełne rozpoznanie zasobów dziedzictwa archeologicznego. To rozpoznanie może dotyczyć pojedynczego miejsca (lub zgrupowania miejsc),

czyli obiektu (obiektów) już wcześniej znanego (znanych) oraz zakresu regionalnego lub nawet ponadregionalnego, czyli sytuacji, gdy mamy tylko fragmentaryczną wiedzę o zasobach (np. AZP) i chcemy ją rozbudować lub doprecyzować. Zadania sformułowane w tak uproszczony sposób pozwalają uporządkować narrację według pułapów, z których prowadzi się rozpoznanie (por. rozdz. 1.2.2), choć nie jest to podział jednoznaczny ani rozłączny.

Najbardziej tradycyjnym i rozpowszechnionym aspektem wykorzystywania zdjęć lotniczych w archeologii był rekonesans lotniczy w obrębie pułapu średniego (Wilson 2000; Musson, Palmer, Campana 2013). I taka praktyka od początków XX wieku ukształtowała zasadnicze wyobrażenie o roli zdjęć lotniczych w archeologii. Dziś coraz częściej wykorzystuje się bezzałogowe statki powietrzne do fotografowania z niskiego pułapu rozpoznanych już miejsc ze śladami minionej działalności człowieka. Dokumentowanie takiego pojedynczego, znanego już miejsca było pierwszym zadaniem, w którym wykorzystano zdjęcia lotnicze (Forum Romanum w 1899 roku – Castrianni 2008) i tego rodzaju zadania są wykonywane do czasów obecnych. Istnieją też zasoby zdjęć nierobionych na potrzeby archeologów (pułap wysoki), lecz i one mogą zawierać wiele istotnych informacji, dlatego powinny być uwzględniane przez środowisko archeologiczne. Taki zasób jest jednym z fundamentów realizowanego w Wielkiej Brytanii od lat 90. XX wieku programu National Mapping Programme (Bewley 1995; Fenner 1995). Trzeba jednak pamiętać, że pionowe zdjęcia lotnicze wykonywane dla celów wojskowych i kartograficznych wykorzystywano w archeologii już w latach 20. XX wieku (Crawford 1923), a nawet wcześniej (Czarnecki 2019).

2.1.2. Archeologiczny rekonesans lotniczy (pułap średni)

2.1.2.1. Archeologiczny rekonesans lotniczy i jego cele

Bez wątpienia to rekonesans lotniczy przyczynił się do ugruntowania roli zdjęć lotniczych w archeologii jako metody identyfikacji śladów minionej działalności człowieka (pułap średni). Już od początku XX wieku organizowano takie loty. Prowadziły one do rozpoznania reliktyw zachowanych w różnych formach. Tego rodzaju inicjatywy podejmowano na rozległym obszarze – od Wysp Brytyjskich po Bliski Wschód i Afrykę Północną, a z czasem również na półkuli zachodniej (np. Ducloux 1984). W Polsce początki takiego rozpoznania datuje się na lata 30. XX wieku, lecz było ono wówczas nastawione na fotografowanie miejsc znanych już z innych badań (najczęściej chodziło o grodziska wczesnośredniowieczne – Kowalenko 1938). Podobne nastawienie towarzyszyło znanej „akcji helikopterowej” zorganizowanej w latach 1959 i 1960 przez Zdzisława Rajewskiego we współpracy z Wojskiem Polskim (Kobyliński 2005; Rajewski 1960).

Czym zatem jest archeologiczny rekonesans lotniczy (ARL) w tradycyjnym rozumieniu? ARL można określić jako praktykę poszukiwania, odkrywania i dokumentowania miejsc ze śladami minionej działalności człowieka oraz aspektów dawnych krajobrazów z wykorzystaniem lekkich samolotów, które pozwalają badać obszar do kilkuset kilometrów kwadratowych. W praktyce ARL oznacza obecność na pokładzie samolotu archeologa (jako obserwatora i fotografa, a czasem też jako pilota) lub osoby zainteresowanej przeszłością, która w trakcie lotu (mniej lub bardziej zaplanowanego) prowadzi obserwację terenu i wykonuje zdjęcia obiektów uznanych za istotne z perspektywy zainteresowań archeologicznych lub uzgodnionych zadań do wykonania (Musson 1995; Gojda 1995). Współcześnie do zadań ARL można jeszcze dodać monitorowanie stanu zachowania znanych miejsc oraz identyfikowanie pojawiających się zagrożeń. W trakcie obserwacji

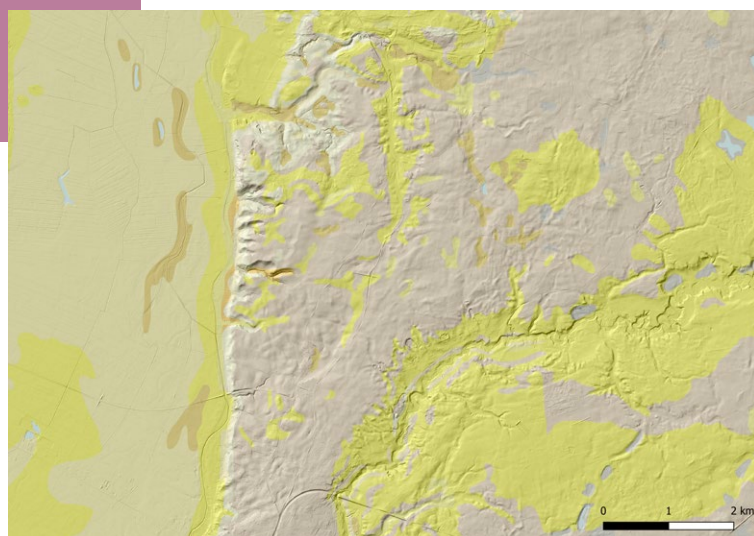
archeolog wykorzystuje okoliczność, że relikty mogą być widoczne jako zachowane formy terenowe, za pośrednictwem zabarwienia gleby lub zróżnicowanej wegetacji roślin (zob. 1.1.3) i już ta obserwacja, połączona z decyzją o wykonaniu zdjęcia, jest wynikiem procesu interpretacji (zob. Moduł 2).

2.1.2.2. Przygotowanie i przeprowadzenie ARL

Ponad stuletnie doświadczenia z prowadzeniem ARL pozwoliły na zbudowanie wiedzy o specyfice ujawniania się reliktyw oraz na wypracowanie praktyk, które mogą wzmacniać efektywność ARL i w konsekwencji przydatność wykonanych zdjęć dla archeologów i konserwatorów zabytków (por. rozdz. 1.1.3). Czasy i możliwości się zmieniają, dlatego wiele współczesnych praktyk odbiega zdecydowanie od tych z XX wieku. Odpowiednie przygotowanie i przeprowadzenie ARL sprzyja efektywności działań rozpoznawczych. Przygotowanie obejmuje kilka etapów: 1) analizę warunków środowiskowych w rejonie planowanego ARL, 2) zebranie informacji o rozpoznanym już zasobie archeologicznym, 3) analizę warunków pogodowych przed ARL i na czas jego przeprowadzenia, 4) przygotowanie wyposażenia niezbędnego w trakcie ARL, 5) organizacja kwestii logistycznych i planowanie lotu.

Ad 1) Warunki środowiskowe mają istotny wpływ na ujawnianie się wyróżników roślinnych czy glebowych, a tym samym na możliwość ich obserwacji. Warto zatem w ramach planowania ARL zrobić wstępne rozpoznanie rzeźby terenu i gleb. Materiały pozwalające na zebranie takich informacji są dostępne w domenie publicznej – są to mapy geologiczne w skali 1:50 000 (szczegółowa mapa geologiczna, mapy geośrodowiskowe, mapa litogenetyczna, mapa hydrogeologiczna – <https://gis.pgi.gov.pl/>, <https://geologia.pgi.gov.pl/arcgis/apps/MapSeries/index.html?appid=8d14826a895641e2be10385ef3005b3c>) oraz mapy glebowe nawet w skali 1:5000. Nie oznacza to, że mapy przedstawiają bardzo szczegółowe zróżnicowanie glebowo-litologiczne (por. Moduł 3 – przykład Kaczkowo). Mapy takie

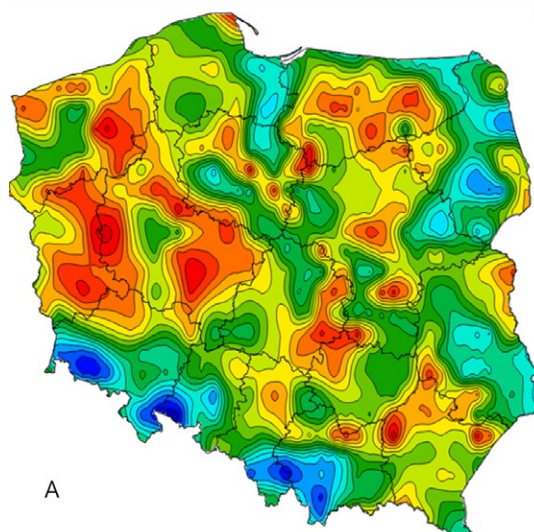
Ryc. 2.1. Przykładowa mapa litogenetyczna (skala 1:50 000) na podkładzie NMT (okolice Kwidzyna) (W. Rączkowski)



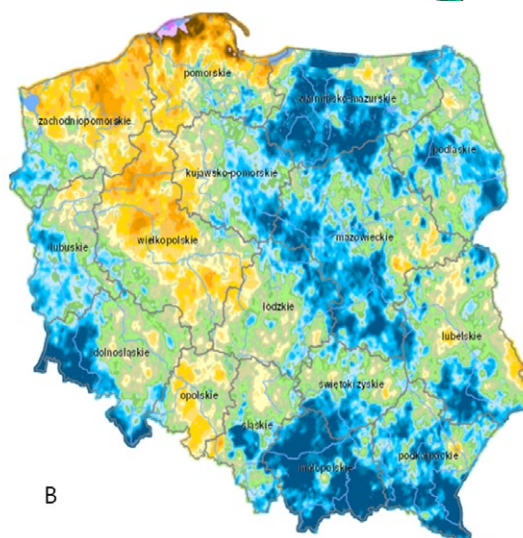
pozwalają na ogólne zorientowanie się z jakimi warunkami i z jakim zróżnicowaniem litologiczno-glebowym mamy do czynienia (Ryc. 2.1). Przyjąć można, że im większa różnorodność warunków, tym trudniej wskazać strefy optymalne dla ujawniania się wyróżników obecności reliktyw i tym trudniejsza będzie obserwacja. Zróżnicowane warunki mają wpływ na wegetację roślin i na naturalne procesy podepozycyjne (takie jak erozja, agradacja, denudacja). Nie należy jednak z góry wykluczać możliwości identyfikacji wyróżników glebowych czy roślinnych w źle rokujących warunkach.

Ad 2) Kwerenda informacji o zasobach danych archeologicznych jest ważna przy każdym zadaniu. Program AZP (<https://mapy.zabytek.gov.pl/nid/>) pozwala na orientację w potencjale zasobu, choć nie rozstrzyga o tym, co i w jaki sposób można zidentyfikować (Rączkowski 1996; 2005). W środowisku osób zajmujących się ARL zdania na temat tego, czy zasób należy rozpoznać przed rekonesansem, czy dopiero na etapie opracowywania wyników są podzielone. Trzeba uwzględnić opinię, że wiedza o zasobach może mieć wpływ na percepcję w trakcie lotu – wyostrezenie uwagi w rejonach, gdzie obecność reliktyw jest już znana i zmniejszenie koncentracji w rejonach bez rozpoznanych dotąd zasobów (por. Cowley 2002).

Ad 3) Warunki pogodowe w okresie przed planowanym ARL są istotne dla oceny możliwości pojawienia się wyróżników roślinnych. Im dłuższy



A



B

Ryc. 2.2. Przykładowe mapy pokazujące wskaźniki wilgotności gleby (A) i klimatyczny bilans wodny (B) dla Polski (w różnych terminach), wskazujące na deficyt opadów w różnych regionach kraju, czyli ilustrujące potencjalnie dobre warunki dla ujawniania się wyróżników roślinnych (źródło: A – Agrometeo, rozkład opadów i parowania (imgw.pl), B – <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw>) (W. Rączkowski)

jest okres bez opadów przed planowanym terminem ARL, tym większe prawdopodobieństwo zróżnicowania wegetacji roślin, w szczególności tych wrażliwych lub rosnących na glebach lekkich (por. rozdz. 1.1.3 oraz ad 1). Ogólne informacje o aktualnej sytuacji dotyczącej zagrożenia suszą można znaleźć m.in. na stronach Instytutu Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach: <https://susza.iung.pulawy.pl/kbw/2021,14/> lub Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej: Agrometeo, monitoring suszy (imgw.pl); https://klimat.imgw.pl/pl/climate-maps/#Mean_Temperature/Monthly/ (Ryc. 2.2).

Wnikliwa analiza warunków pogodowo-wilgotnościowych pozwala uniknąć niepotrzebnych kosztów związanych z ARL na terenach słabo rokusujących. Trzeba jednak pamiętać, że są to mapy ogólne i lokalne warunki (w skali kilku pól czy wsi) mogą być odmienne. Innymi słowy, bywa, że wyróżniki roślinne dają się zidentyfikować nawet w mało sprzyjających warunkach. Obecnie coraz częściej podejmowane są inicjatywy wykorzystania aktualnych zobrazowań satelitarnych (Sentinel 2) dla oceny zaawansowania wegetacji roślin nawet na poszczególnych polach (por. 2.3 – zobrazowania satelitarne).

Sytuację pogodową należy brać również pod uwagę w momencie planowania lotu. Oczywiście wskazane jest wykonywanie lotów wówczas, gdy nie ma zagrożenia gwałtownymi zjawiskami pogodowymi. Sprzyjającą okolicznością bywa prowadzenie ARL po przejściu chłodnego frontu, gdyż poprawia się wtedy przejrzystość powietrza. Najbardziej korzystne jest jednorodne oświetlenie z bezchmurnego nieba lub przy pełnym zachmurzeniu. Bardzo dobre efekty można uzyskać przy zachodzącym słońcu.

Ad 4) Planowanie ARL wymaga przygotowania niezbędnego wyposażenia (por. Crawshaw 1995). Potrzebny jest oczywiście aparat fotograficzny, mapa (w formie papierowej lub cyfrowej) i urządzenie pozwalające na rejestrowanie trasy lotu. Podstawową decyzją jest wybór aparatu fotograficznego. Gdy spojrzeć się perspektywy historii zdjęć lotniczych w archeologii, właściwie każdy współczesny aparat nadaje się do wykonywania

tu fotografii, gdyż z reguły dzisiejsze aparaty cechują się lepszymi parametrami niż nawet bardzo dobre urządzenia z pierwszej połowy XX wieku. Zatem dyskusja o parametrach aparatów fotograficznych może wydawać się bezprzedmiotowa. Nie do końca tak jednak jest, choć minimalny warunek stanowi możliwość wykonania „niezłego” zdjęcia, pozbawionego zniekształceń powodowanych przez niedoskonałości optyki. Ostatecznie najważniejsze jest to, co zostało sfotografowane, a nie samo zdjęcie. Takie ujęcie zagadnienia bywa akceptowane w środowisku, ale też dyskutowane. Współczesne możliwości i potrzeby związane z przetwarzaniem zdjęć powodują, że wskazane jest wykonywanie zdjęć aparatami gwarantującymi wysokie parametry.

Przy wyborze obiektywu trzeba wyważyć jakość optyczną i możliwość szybkiej zmiany pola widzenia. Obiektywy typu zoom cechują się zazwyczaj gorszą jakością optyczną od stałoogniskowych, pozwalają jednak na szybkie przybliżenie lub rozszerzenie kadru, co ma niebagatelne znaczenie. Obiektywy zmienneogniskowe, oprócz większej liczby wad optycznych, są też gorzej obsługiwane przez oprogramowanie fotograficzne. Dlatego jeśli planowane jest przetwarzanie zdjęć w numeryczne modele pokrycia terenu i ortoobrazy, lepiej używać obiektywu stałoogniskowego. Zdjęcia z powietrza wykonuje się wygodnie obiektywami zmienneogniskowymi w zakresach 24–70 czy 24–105 mm, a wśród stałoogniskowych najbardziej przydatne będą 24 mm, 35 mm, 50 mm, 100 mm. Jasność obiektywów wyrażona parametrem przysłony (f/) nie jest w przypadku archeologii lotniczej aż tak istotna, gdyż większość zdjęć wykonuje się z przymkniętymi przysłonami o większej wartości.

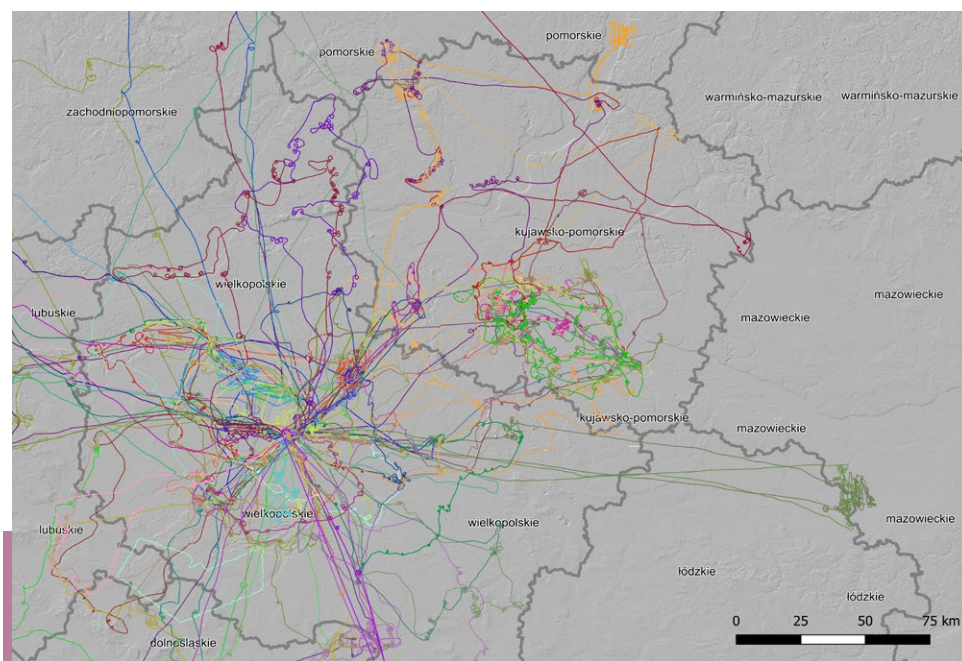
W trakcie ARL nie ma zbyt wiele czasu na ustawianie parametrów zdjęcia, dlatego warto wykorzystać funkcję preselekcji czasu naświetlania (w aparatach nazywaną Tv lub S) i wybór krótkiego czasu (np. 1/800, 1/1000 sekundy, choć ten parametr zależy też od wybranej ogniskowej, warunków oświetlenia, szybkości lotu i wysokości). Warto zwracać uwagę na to, aby przysłona oscylowała w granicach od f/6,3 do f/13, gdyż

daje to odpowiednią głębię ostrości. Kolejnym istotnym parametrem jest czułość (ISO). Decyduje ona m.in. o ziarnistości zdjęć i wystąpieniu tzw. szumów. Zdjęcia mają lepszą jakość i mniej szumów przy niskich wartościach ISO (np. 100), a gorszą przy wysokich. Ważnym czynnikiem jest wybór formatu zapisu zdjęć. Producenci oferują zwykle kilka formatów, w tym najpopularniejsze JPG czy TIFF. Najlepszą jakość i możliwość edycji zdjęć uzyskuje się przy wyborze plików RAW. Wadą tego formatu jest potrzeba używania

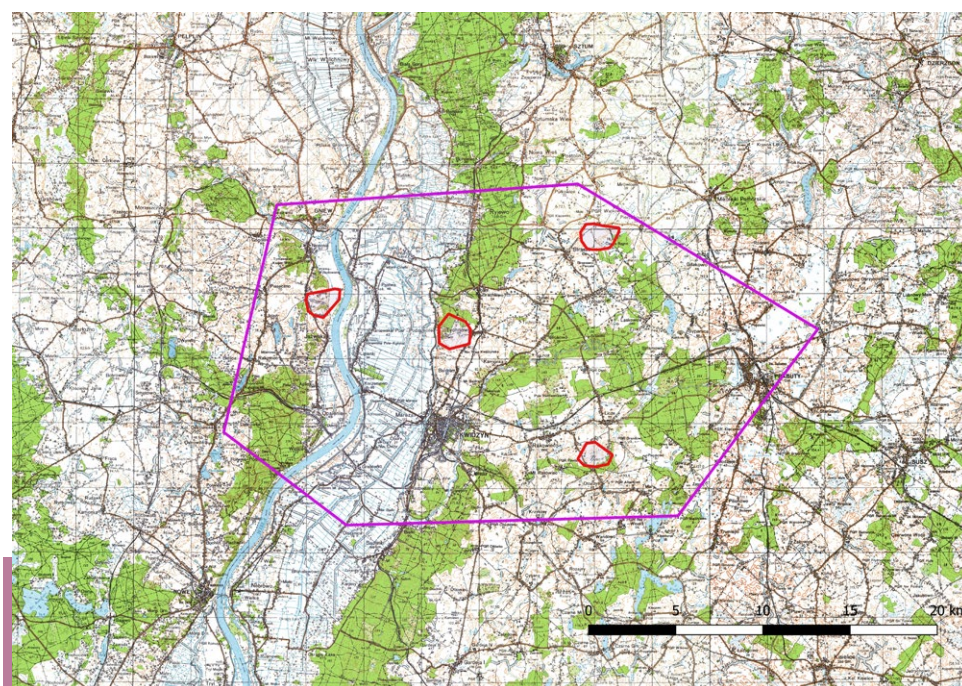
specjalnych programów graficznych, które obsługują konkretny typ pliku RAW (z danego modelu aparatu fotograficznego). W nowszych aparatach istnieje możliwość jednoczesnego zapisu plików RAW i JPG, co wydaje się przydatne, ale stwarza problemy z przechowywaniem dużych plików (por. rozdz. 2.3.4).

Drugi ważny składnik wyposażenia stanowi urządzenie rejestrujące trasę lotu. Może to być ręczny GPS, logger w samolocie czy telefon komórkowy z odpowiednią aplikacją. Rejestrowanie

Ryc. 2.3. Rejestracja tras ARL pozwala na ocenę intensywności rozpoznania poszczególnych regionów i planowanie kolejnych lotów (W. Rączkowski)



Ryc. 2.4. Przykładowa mapa robocza z zaznaczonym obszarem przeznaczonym do wykonania ARL oraz rejonami występowania stanowisk archeologicznych (W. Rączkowski)



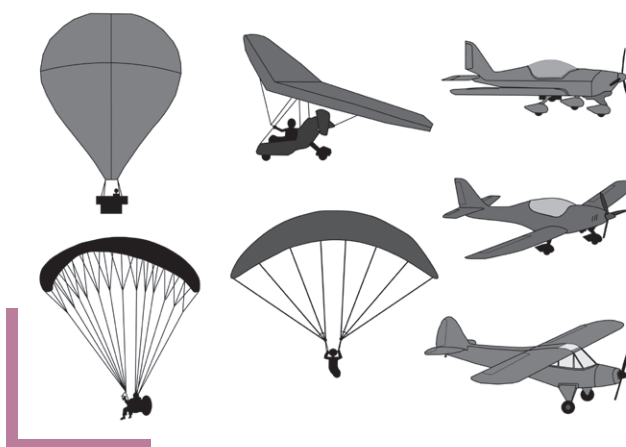
trasy lotu (Ryc. 2.3) jest ważne ze względu na ocenę stanu lotniczego rozpoznania danego regionu, planowanie kolejnych ARL i opracowywanie wykonanych zdjęć (zob. 2.1.2.3).

Trzecim przydatnym elementem jest mapa (Ryc. 2.4) z zaznaczonym planowanym rejonem ARL i/lub naniesionymi zasobami archeologicznymi, które są już znane (por. uwagi Ad. 2). Może to być mapa w formie papierowej (raczej w skali 1:100 000 niż 1:10 000 ze względu na poręczność) lub w postaci cyfrowej (w odbiorniku GPS lub dodatkowym urządzeniu).

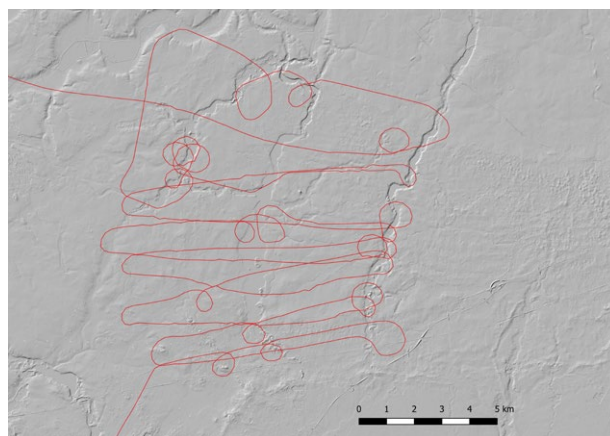
Ad 5) Kwestie logistyczne wiążą się głównie z organizacją lotu. Zasadniczą sprawą jest wybór „maszyny latającej”. Obecne możliwości są bardzo duże, poczynwszy od balonów poprzez lotnie, motolotnie, parolotnie, motoparalotnie, szybowce, aż po samoloty sportowe i helikoptery. Nie każda opcja pozwala na wykonanie określonych zadań, lecz dotychczasowe doświadczenia pokazują, że ARL można skutecznie prowadzić przy wykorzystaniu różnych rozwiązań. Niewątpliwie najbardziej rozpowszechnioną i optymalną wersją jest korzystanie z samolotów sportowych czy też ultralekkich. Zaleca się, aby był to górnopłat, gdyż wówczas konstrukcja samolotu w najmniejszym stopniu przeszkadza przy wykonywaniu zdjęć. Wśród samolotów sportowych warunek ten spełniają Wilga (chyba już od dość dawna niewykorzystywana) i Cessna, a także liczne samoloty ultralekkie (Ryc. 2.5).

Wiele statków powietrznych pozwala wykonywać fotografie w różnych kierunkach, natomiast samoloty stwarzają zwykle możliwość obserwacji tylko z jednej strony. Z perspektywy wykonywania zdjęć wybór odpowiedniego samolotu powinien uwzględniać opcję otwierania okna albo lotu bez drzwi.

Obecne przepisy lotnicze wymagają dostarczenia planu lotu odpowiednim organom kontrolnym ruchu powietrznego (np. <https://www.samoloty.pl/niezbednik-pilota-strefa-lotnicza-1449/zaplanuj-lot-strefa-lotnicza-1793?id=6822>). Plan lotu jest przygotowywany przez pilota i dlatego odpowiednio wcześniej należy z nim uzgodnić trasę lotu. Pilot przekazuje plan lotu organom



Ryc. 2.5. Przykładowe statki latające do wykorzystania w ARL (J. Wrzosek)



Ryc. 2.6. Obraz regularnie prowadzonego ARL pozwalającego na równomierne rozpoznanie (W. Rączkowski)

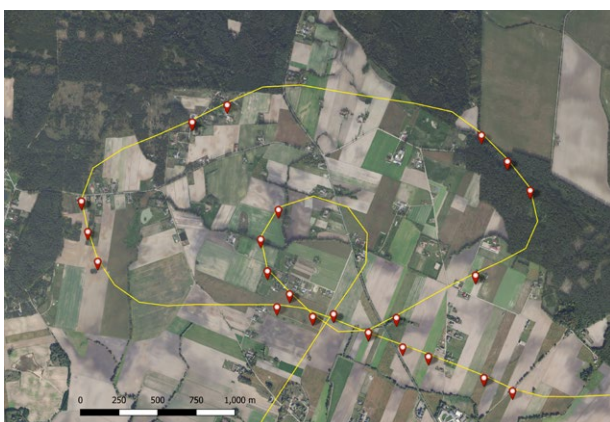


Ryc. 2.7. Obraz losowego rozpoznania wynikającego z obserwacji prowadzonej w trakcie lotu (W. Rączkowski)

kontrolnym i uzyskuje informację o możliwości wykonania lotu na danej wysokości w określonym rejonie. W trakcie samego lotu można przedstawić korektę planu lotu. Podczas lotu wszystkie najważniejsze decyzje podejmuje pilot. Ze względu na zaplanowane zadania ARL może być organizowany w formie regularnego pokrycia całego wybranego obszaru (Ryc. 2.6) lub jako lot nastawiony na losowe rozpoznanie (Ryc. 2.7). Oba te rozwiązania mają zarówno swoje zalety, jak i ograniczenia.

2.1.2.3. Geotagowanie zdjęć

Współczesne wymogi związane z opracowywaniem wyników ARL powodują, że wszystkie zdjęcia powinny być geotagowane, czyli w metadanych fotografii należy uwzględnić informację przestrzenną (np. Verhoeven et al. 2012). Temu służy obecność GPS na pokładzie samolotu, gdyż wówczas można szybko wprowadzić taką informację do pliku. W aparatach, które mają wbudowany GPS, tego rodzaju informacja generowana jest automatycznie. Jeśli brak tego udogodnienia, należy samemu wprowadzić odpowiednie dane (w tzw. EXIF). Warto zatem pamiętać o synchronizacji czasu w aparacie fotograficznym z GPS przed lotem. Niezależnie od sposobu rejestrowania trasy lotu i/lub lokalizacji zdjęć uzyskany wynik pokazuje pozycję samolotu i aparatu fotograficznego w danym momencie (Ryc. 2.8).



Ryc. 2.8. Lokalizacja zdjęć zsynchronizowanych z trasą lotu. Każde zdjęcie pokazuje lokalizację samolotu/aparatu fotograficznego w danym momencie, a nie fotografowanego przedmiotu (w domyśle śladów działalności człowieka) (W. Rączkowski)

Można by zadać pytanie, czy jest to jedyna opcja i czy zawsze spełnia ona oczekiwania zleceniodawcy. Poprzez taką procedurę nie uzyskujemy bowiem lokalizacji zidentyfikowanego i sfotografowanego miejsca (w metadanych nie ma powiązania zdjęcia z fotografowanym miejscem). Dla wielu użytkowników zdjęć lotniczych taka informacja jest najważniejsza.

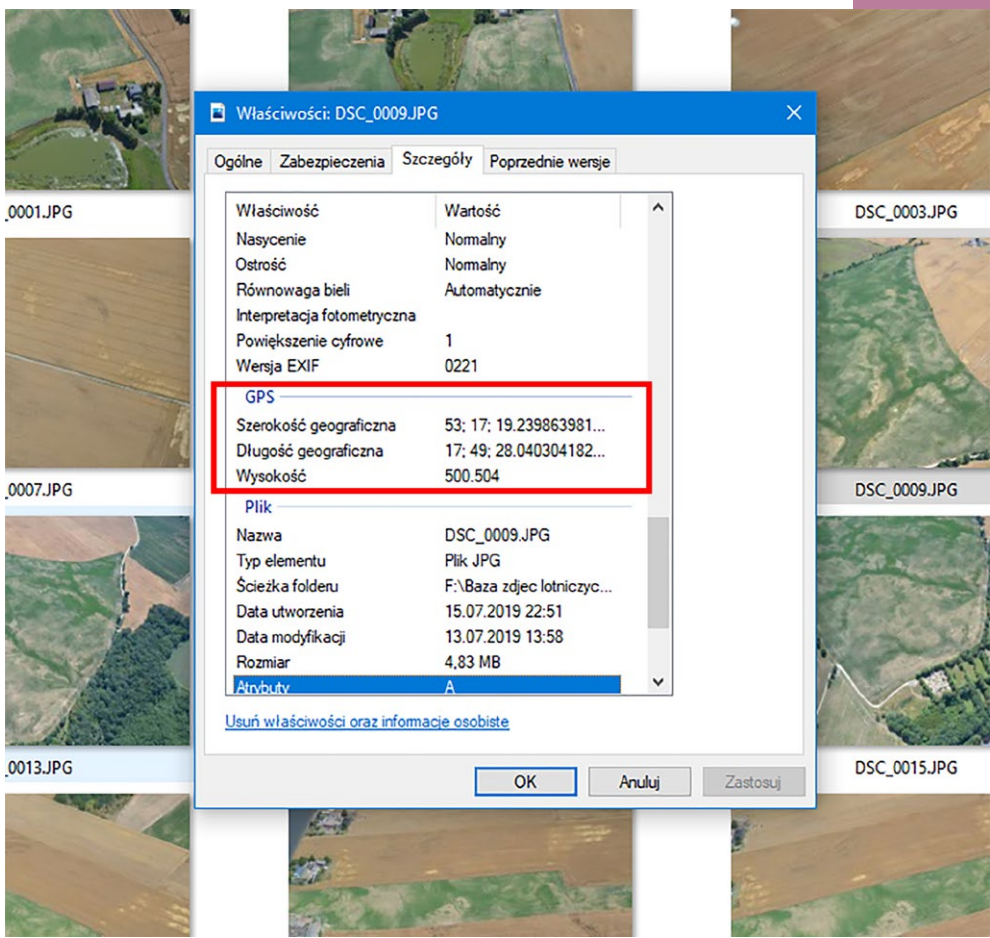
Jednym ze sposobów wprowadzania lokalizacji sfotografowanego obiektu może być zmiana metadanych geolokalizacyjnych przy wykorzystaniu programu GeoSetter (<https://geosetter.de/en/main-en/>) i przesunięciu miejsca wykonania zdjęcia (pozycji samolotu i aparatu fotograficznego) w miejsce występowania śladów przeszłości (Ryc. 2.9).

W konsekwencji takiego zabiegu w metadanych zdjęcia zawarta jest informacja, gdzie znajduje się obiekt. Te dane można wykorzystać w programach GIS i przeglądarkach plików graficznych (Fast Stone Image Viewer, Irfan View itp.) czy w Google Earth (Ryc. 2.10), co pozwala na bezpośrednie zestawianie wyników rekonesansu z innymi informacjami ważnymi dla zleceniodawcy, np. rozmieszczeniem zasobu archeologicznego zidentyfikowanego w ramach programu AZP (Ryc. 2.11).

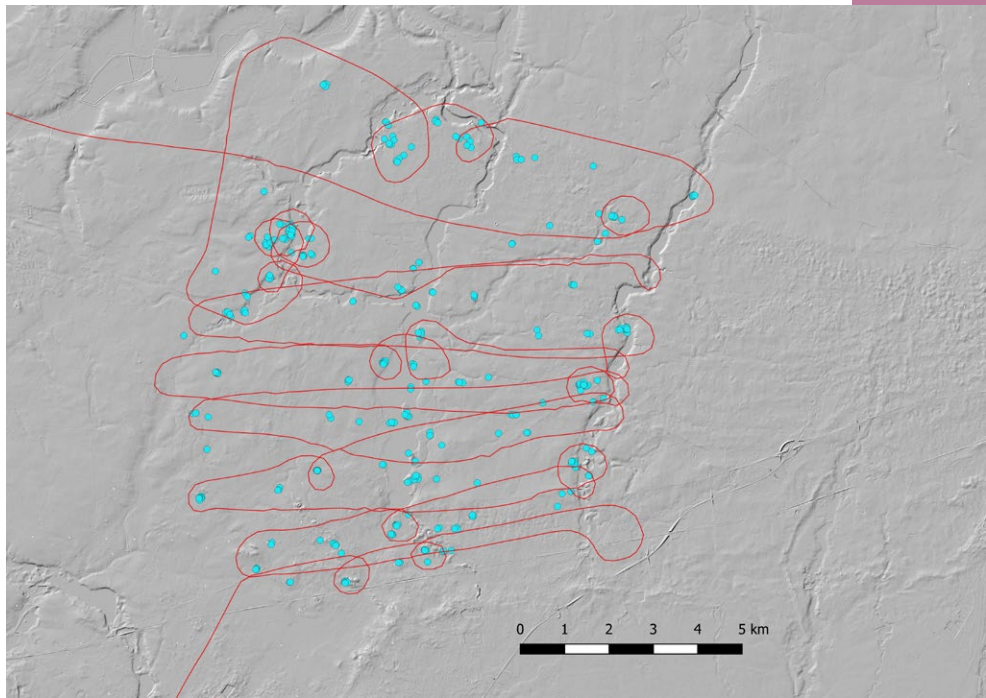
Oba rozwiązania mają zalety i wady. Z perspektywy dalszej procedury związanej z obróbką zdjęć oryginalne współrzędne mogą być ważne przy tworzeniu ortoobrazów czy modeli 3D



Ryc. 2.9. Korekta lokalizacji sfotografowanych śladów działalności człowieka (W. Rączkowski)



Ryc. 2.10. Lokalizacja sfotografowanego obiektu w metadanych zdjęcia (W. Rączkowski)



Ryc. 2.11. Rozmieszczenie sfotografowanych obiektów (W. Rączkowski)

i znacznie dokładniejszej ich lokalizacji. Jednak takie informacje nie dają szybkiego i łatwego wglądu w rozkład zaobserwowanych reliktyw i ich powiązania z innymi danymi przestrzennymi.

Wskazany jest więc głęboki namysł nad tym, czego oczekujemy od rekonesansu i w jakiej formie mają być przekazane jego wyniki. Ostateczna decyzja należy do zleceńodawcy i musi być ona przemyślana.

2.1.2.4. Selekcja zdjęć do dalszej pracy

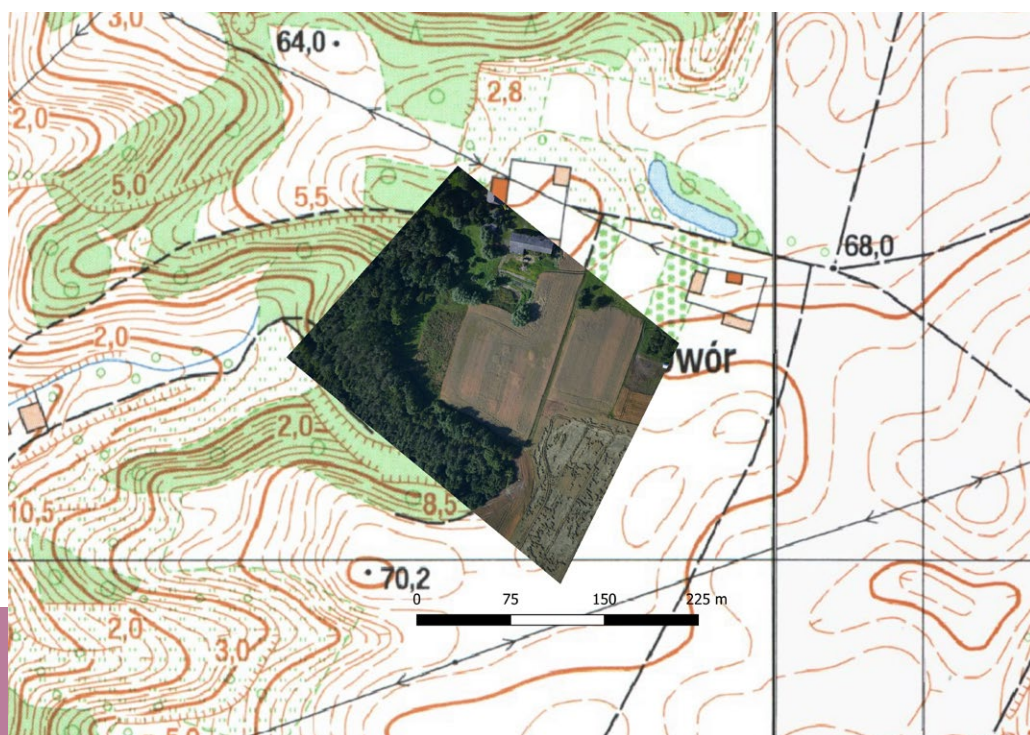
W trakcie ARL archeolog-fotograf już w czasie lotu dokonuje interpretacji przy podejmowaniu decyzji o wykonaniu zdjęcia. Decyzja musi nastąpić szybko, zatem rekomendowane jest wykonywanie zdjęć przez doświadczonego interpretatora i/lub osobę dobrze zorientowaną w formach przeszłej działalności człowieka na danym obszarze i sposobach ich przejawiania się w ramach poszczególnych upraw lub na polach bez pokrywy roślinnej. Na warunki obserwacji prowadzonej przez archeologa-fotografa wpływ ma wysokość i szybkość lotu oraz oświetlenie/

zachmurzenie. Niezbędne może okazać się więc krążenie wokół jednego obiektu, które pozwala na podjęcie decyzji albo wykonanie serii zdjęć z różnych kierunków.

Do dalszej pracy wybierane są zdjęcia uznawane za źródła informacji wynikających z celów zadania – najczęściej chodzi oczywiście o obecność śladów dawnej działalności człowieka. Pierwszym i najważniejszym kryterium wyboru zdjęć jest zatem obecność i czytelność tych śladów. Drugie istotne kryterium stanowi obecność na zdjęciach tzw. punktów kontrolnych, które pozwalają na dalszą obróbkę fotografii, czyli na ich rektyfikację (np. Palmer 1995).

2.1.2.5. Rektyfikacja i dalsza obróbka zdjęć

Interpretacja zdjęć i w konsekwencji ostateczny wybór fotografii do dalszej pracy są niezbędne dla przeprowadzenia końcowych działań, czyli wektoryzacji i wypełnienia bazy danych. Niezbędnym etapem poprzedzającym te kroki jest rektyfikacja zdjęć ukośnych, czyli ich „prostowanie” i nadawanie im georeferencji (Ryc. 2.12).

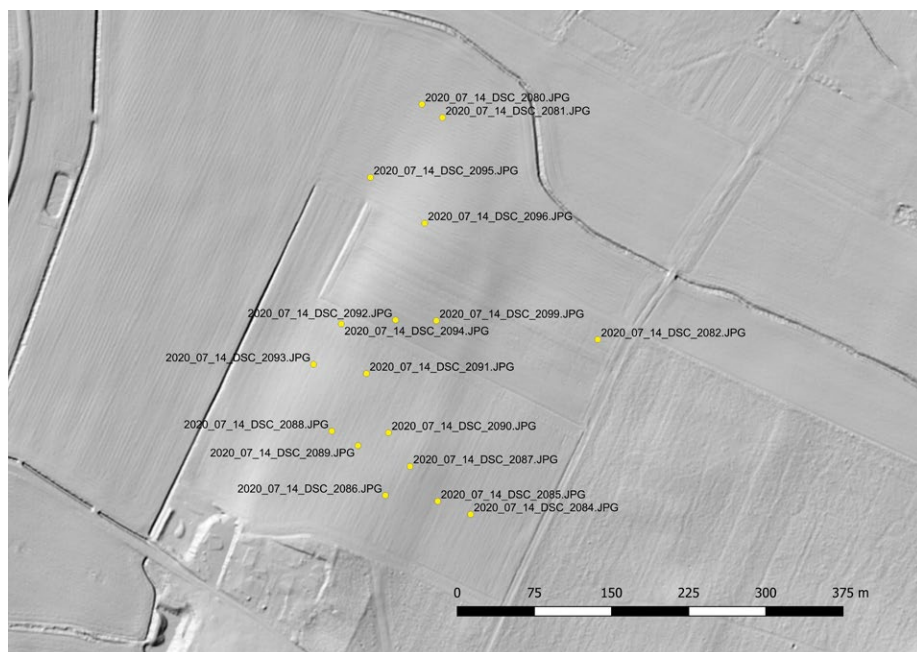


Ryc. 2.12. Przykładowe ukośne zdjęcie lotnicze zrektyfikowane i zgeoreferowane (W. Rączkowski)

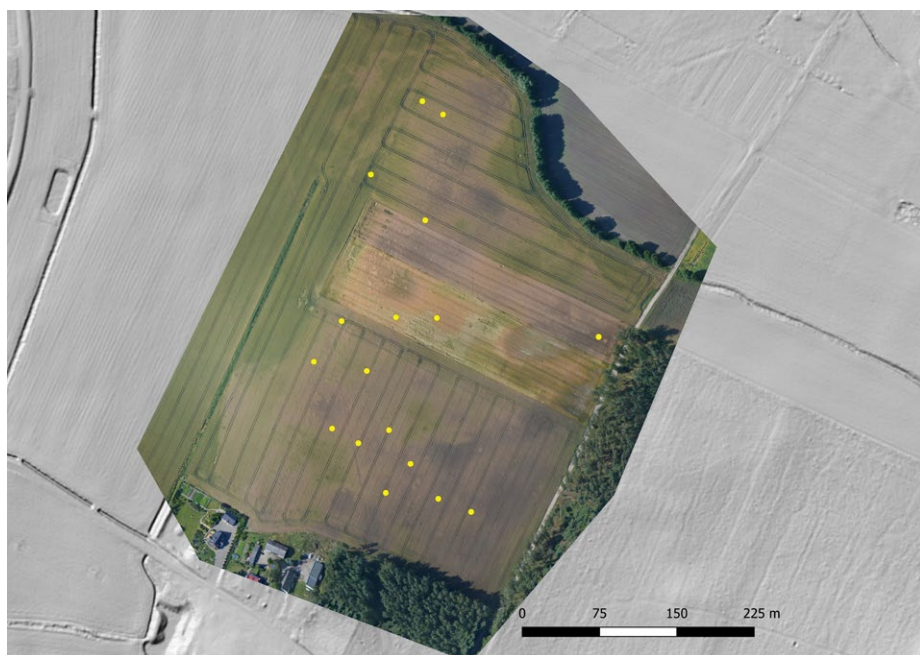
Innymi słowy, w trakcie wykonywania zdjęć podczas lotu rekonesansowego należy także zwracać uwagę na obecność tzw. punktów kontrolnych. Są to miejsca na zdjęciu, które można dokładnie zidentyfikować na mapie lub ortofotomapie. Na fotografii powinno się znaleźć ich kilka, gdyż tylko one pozwalają na oba działania: rektyfikację i georeferencję. Pamiętać też należy, że poprawne przekształcenie obrazu następuje tylko w obrębie poligonu wyznaczonego przez punkty

kontrolne. Rektyfikację i georeferencję można wykonać obecnie w ramach każdego oprogramowania GIS (np. Georeferencer w QGIS), choć przed laty służyło temu specjalistyczne oprogramowanie (np. AERIAL, AirPhoto – Haigh 1995; Scollar 2002).

Niektóre strefy występowania śladów działalności człowieka są tak rozległe lub nie ma w ich pobliżu punktów kontrolnych, że trudno jest przeprowadzić proces rektyfikacji (i georeferencji).



Ryc. 2.13. Seria zdjęć (żółte punkty) wykonana dla jednego, rozległego obszaru z wyróżnikami roślinnymi w sytuacji braku wystarczającej liczby punktów kontrolnych (W. Rączkowski)



Ryc. 2.14. Zgeoreferowany ortoobraz rozmieszczenia wyróżników roślinnych wykonany z wykorzystaniem 17 zdjęć ukośnych zrobionych aparatem z obiektywem zmiennoogniskowym (słabsze parametry w obróbce zdjęć dla celów fotogrametrycznych) (M. Bogacki)

Takie sytuacje należy brać pod uwagę już na etapie ARL i wykonywać wiele zdjęć pod różnymi kątami o dużym stopniu pokrywania się, w różnych kierunkach i z różnej wysokości (Ryc. 2.13). Komputerowe możliwości obróbki obrazu (por. 2.1.3.7) pozwalają na wygenerowanie z serii zdjęć ortobrazu danej przestrzeni. Ortoobraz może zostać zgeoreferowany choćby na podstawie wizualnego dopasowania widocznych na nim punktów z jakimkolwiek podkładem – mapowym, ortofotomapy czy zobrazowania satelitarnego (Ryc. 2.14).

2.1.3. Archeologiczne rozpoznanie miejsca występowania reliktyw (pułap niski)

2.1.3.1. Definicja i cele „zadania stacjonarnego”

Bezzałogowe Statki Powietrzne (BSP), nazywane też Bezzałogowymi Statkami Latającymi (BSL) lub potocznie dronami, są wytworem bardzo dynamicznie rozwijającej się gałęzi gospodarki. Ich coraz szersze wykorzystanie widoczne jest również w archeologii (Campana 2017; Agudo et al. 2018; Cowley et al. 2018; Bogacki 2016b). Zadanie użycia ich w ochronie dziedzictwa archeologicznego i historycznego związane jest zazwyczaj z chęcią pogłębienia wiedzy na temat miejsc znanych już wcześniej (jako efektu innego rozpoznania). Wskazuje się tu zatem obszar, który powinien zostać zobrazowany z powietrza. Zwykle nie zajmuje on więcej niż 1 km², a wysokość lotu statków powietrznych wykorzystanych do sporządzenia dokumentacji nie przekracza z reguły 300 m. W zakres takich prac mogą wchodzić zarówno rozległe zespoły reliktyw: budowle i konstrukcje obronne, pozostałości zasiedlenia, rolnictwa oraz konstrukcji służących komunikacji, jak i znacznie mniejsze obiekty obejmujące np. jamy zasobowe i konstrukcje mieszkalne czy związane z obrzędami i wierzeniami (por. rozdz.1.1).

Oprócz nieinwazyjnego badania miejsc i obiektów architektonicznych można obrazować także

kolejne poziomy i postęp prac w trakcie wykopalisk. Pojawiły się także możliwości techniczne wykonywania lokalnego ARL z wykorzystaniem BSP¹ (rozdział 2.1.2).

Celem uzyskanej dokumentacji jest jak najlepsze zobrazowanie śladów działalności człowieka, ocena stanu ich zachowania i możliwych dla nich zagrożeń.

2.1.3.2. Jak uzyskać dane? Działać samemu czy zlecać naloty?

Aby uzyskać dokumentację z niskiego pułapu, można: 1) zlecić odpowiednie prace specjalistom, 2) samodzielnie sterować BSP lub 3) samemu wznieść się w powietrze (np. balon, motolotnia, paralotnia).

Ad 1) Wykorzystanie specjalistów (osób lub firm) do tego zadania ma swoje zalety. Nie tracimy czasu na naukę metody, pracę w terenie i wstępne opracowanie materiałów. Koszt takiej usługi jest zazwyczaj niższy niż zakup lub wynajem potrzebnego sprzętu i oprogramowania. Możemy więc skupić się na przetwarzaniu, integrowaniu i analizie finalnych danych. Istnieją jednak niebezpieczeństwa związane z oddaniem większości prac w ręce fachowców. Głównym problemem okazuje się wybór odpowiednich specjalistów. Jak ocenić ich umiejętności i stan wiedzy? Czy wykonawcy dokumentacji będą potrafili dostosować się do potrzeb naszego projektu? Czy wystarczy, że mają doświadczenie w branży? Aby dobrze wybrać specjalistów, samemu trzeba mieć przynajmniej podstawową wiedzę na temat tworzenia dokumentacji z powietrza. Powyższe pytania można zadawać także w przypadku innych metod teledetekcyjnych, ale fotografowanie z drona wydaje się najprostszą do opanowania metodą teledetekcyjną. Z pozoru wystarczy zakupić drona i właściwie po 15 minutach nauki można nim latać i fotografować obiekty. Dlatego powyższe pytania pojawiły się właśnie w tym miejscu.

¹ BSP oferują coraz dłuższy czas lotu, co pozwala na dokumentację od kilku do nawet kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych. Ponadto jakość przesyłanego w trakcie lotu obrazu stale się poprawia, co umożliwia lepszy ogląd terenu. Dodatkową wartością takich lotów staje się nagrywanie filmu o wysokiej rozdzielczości (np. 4k lub 8k). Tego rodzaju materiał może służyć jako dokumentacja, a pojedyncze klatki filmu wykorzystywane są jako ilustracje.

Ad 2) Decydując się na samodzielne sterowanie BSP i fotografowanie z powietrza, musimy przede wszystkim dostosować się do obowiązujących przepisów prawa. Obecnie nie można latać BSP w celu wykonywania zdjęć archeologicznych bez przejścia odpowiedniego kursu (lub samokształcenia), zdania egzaminu i zarejestrowania się w odpowiednich urzędach. Latając BSP, włączamy się w przestrzeń powietrzną, którą należy kontrolować, ponieważ jest ona wykorzystywana przez wiele załogowych i bezzałogowych statków powietrznych. W razie awarii lub błędu BSP stanowią zagrożenie dla osób i mienia na ziemi i w powietrzu. Nie bez znaczenia są uwarunkowania prawne dotyczące prywatności obywateli. Na szczęście wiedza, którą trzeba opanować, jest w większości dostępna online w formie zasobu otwartego.

Aktualne informacje o wymaganiach dotyczących operatorów bezzałogowych statków powietrznych znajdują się m.in. na stronach Urzędu Lotnictwa Cywilnego (<https://ulc.gov.pl/pl/drony/>) i Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej (https://www.pansa.pl/pansautm_news/). Latanie dronami wymaga również wiedzy technicznej, serwisowej i umiejętności manualnych. Nowe modele są coraz prostsze w obsłudze i właściwie każdy jest w stanie opanować latanie nimi, ale nie zwalnia to operatorów ze zdobycia głębszej wiedzy, która jest niezbędna ze względów bezpieczeństwa.

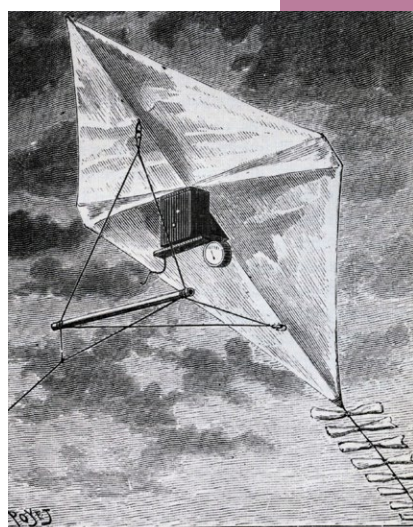
Decydując się na samodzielne latanie i fotografowanie, uzyskujemy kontrolę nad całym

procesem od momentu przygotowań do analizy uzyskanych materiałów. Mamy też możliwość kontrolowania jakości dokumentacji na każdym etapie. Możemy dobrać termin lotu istotny dla wyników fotografowania, rozdzielczości opracowań, a w razie potrzeby można poszerzyć zakres terytorialny lotu lub z niego zrezygnować, jeśli na miejscu okaże się, że zadania nie da się skutecznie wykonać. Ponadto etap fotogrametrycznego przetwarzania danych jest dziś znacznie prostszy do opanowania niż to było jeszcze kilka lat temu, dlatego większość osób korzystających z programów komputerowych powinna sobie z nim poradzić (patrz: 2.1.3.7.2. Tworzenie Numerycznych Modeli Terenu i ortoobrazów).

Ad 3) Niekiedy na niskim pułapie wykonuje się zdjęcia z załogowych statków powietrznych. Do najpopularniejszych nośników należą tu różnego rodzaju lotnie, parolotnie, balony itp., które pozwalają na tani przelot, a w niektórych przypadkach stwarzają możliwość wyniesienia w powietrze dwóch osób: pilota i fotografa, co znacznie ułatwia wykonanie dokumentacji.

2.1.3.3. Statki powietrzne i sensory

Pułap lotu do 300 metrów nad poziomem gruntu i dokumentacja na stosunkowo niewielkim obszarze oznacza bardzo dużą liczbę możliwych sposobów wyniesienia w powietrze aparatu fotograficznego. Przykłady już z początków archeologii



Ryc. 2.15. Pierwszy latawiec wykonany przez Artura Batuta, z którego zdalnie i skutecznie wykonano fotografię z powietrza (Newhall 1969, 41)



Ryc. 2.16. Seryjnie produkowany zdalnie sterowany wielowirnikowiec firmy DJI

lotniczej pokazują, że do takiej dokumentacji z powodzeniem można wykorzystywać załogowe i bezzałogowe statki powietrzne o zróżnicowanej budowie (Ryc. 2.15). Dziś najczęściej stosowane są do tego zadania zdalnie sterowane wielowirnikowce (Ryc. 2.16).

Główną zaletą wielowirnikowców jest możliwość swobodnego lotu i zatrzymania się w wybranych punkcie przestrzeni. Nie bez znaczenia jest też ich szeroka dostępność, łatwa obsługa i niska cena. Wielowirnikowce dzielone są w zależności od liczby silników na quadrokoptery, hexakoptery, oktokoptery i inne. Większa liczba silników pozwala spodziewać się lepszego bezpieczeństwa lotu i większego udźwigu. Podstawowym kryterium specyfikacji wielowirnikowców, na który warto zwrócić uwagę, jest czas lotu i możliwości sensora optycznego. Zwłaszcza aparat fotograficzny może być piętą achillesową wielu tańszych i seryjnie produkowanych dronów. Nawet jeśli aparat ma wysokorozdzielczą matrycę, często jakość optyczna obiektywu nie jest wystarczająco dobra. W starszych BSP stosowane są nawet szerokokątne obiektywy typu „rybie oko”, które znacznie zniekształcają obraz i nie nadają się do tworzenia dokumentacji. Dlatego nadal jest popularne składanie dronów przez modelarzy, dzięki czemu taniej można stworzyć maszyny latające zdolne do uniesienia i obsługi profesjonalnych aparatów fotograficznych z lepszą optyką (Ryc. 2.17).

Nowe fabryczne wielowirnikowce często wyposażone są w dużą liczbę czujników ostrzegających przed przeszkodami i różnorodne sensory pomagające określić pozycję urządzenia. Nie należy im jednak ufać do końca. Przykładowo, nie jest wskazane szybkie latanie pomiędzy gałęziami, liniami wysokiego napięcia i innymi małymi przeszkodami, ponieważ nie zawsze są one wykrywane. Natomiast optyczne sensory pozycji mogą nie dokonywać poprawnych pomiarów w trakcie lotów nad wodą (zob. też 2.3.4, pkt 2). Funkcja autopilota obejmuje coraz więcej automatycznych trybów lotu i wykonywania określonych zadań, które znacznie ułatwiają kontrolę nad BSL-em. Warto jednak zwrócić uwagę na to,

by dron miał opcje lotu manualnego, wykorzystującego tylko niezbędne czujniki. Taki tryb sterowania jest bardzo przydatny w sytuacjach awaryjnych, gdy jeden z czujników podaje złe dane. W sytuacjach nietypowych przydatna okazuje się opcja wyłączenia niektórych czujników lub zaniechania ich testowania podczas startu. Takie udogodnienia mogą być pomocne, m.in. podczas startu z łodzi na wodzie.

Niezależnie czy używany jest fabryczny, czy składany dron, możliwość zamontowania pod nim dodatkowego, osobnego sensora fotograficznego jest dużą zaletą. Można wtedy wybrać najlepszy dla naszych potrzeb aparat i obiektyw – w stosunku do udźwigu drona i potrzebnego czasu lotu. Jakość optyczną i rozdzielczość obiektywów można poznać dzięki testom dostępnym w Internecie (<https://www.the-digital-picture.com>, <https://optyczne.pl>, <http://www.photozone.de/>). Do lotów wybierane są zazwyczaj najlżejsze w swojej kategorii cenowej aparaty ze stałooogniskowymi obiektywami. Zaletą takich optycznych konstrukcji jest lepsza rozdzielczość i niższa waga w porównaniu do obiektywów zmienneoogniskowych. Stosowane są też z reguły obiektywy szerokokątne 24, 28, 35 mm. Podczas większości lotów (bez specjalnych pozwoleń) operatora drona obowiązuje ograniczenie maksymalnej wysokości lotu – 120 metrów n.p.t. i aby objąć na jednym zdjęciu większe obiekty, potrzebny jest szerszy kąt widzenia. Należy także uwzględniać wibracje silników dronów, które są bardziej widoczne przy długich ogniskowych obiektywów. Warto ponadto zwrócić uwagę na wielkość matrycy w aparacie. Liczba megapikseli nie jest aż tak ważna jak jej fizyczne rozmiary. Najlepszą jakość zdjęć uzyskuje się z matryc tzw. średnioformatowych (rozmiary większe niż 36 × 24 mm), jednak ze względu na wyższą wagę takich aparatów stosuje się zwykle matryce tzw. pełnoklatkowe (36 × 24 mm) i mniejsze.

Podczas dopasowywania aparatu fotograficznego do BSL sprawdzić należy nie tylko zgodność wymiarową i wagową aparatu, ale także to, czy oprogramowanie drona obsługuje dany model

kamery cyfrowej i jakie ustawienia będzie można zmieniać zdalnie w aparacie.

Do obsługi aparatów i kamer służy zazwyczaj specjalne mocowanie (gimbal). Najpopularniejsze obecnie są ramiona aparatów z silnikami bezszczotkowymi, które dzięki specjalistycznemu układowi elektronicznemu (Basecam, STorM32) stabilizują sensor w trzech osiach. Istnieją też firmy wykonujące gotowe gimbale, przystosowane do pracy z różnymi autopilotami (Gremsy, HD Air Studio). W samodzielnie robionych dronach wyzwaniem technicznym może być przesyłanie obrazu na ziemię do operatora. Jeszcze niedawno wykorzystywane były systemy analogowe pracujące w paśmie 2,4 lub 5,8 GHz. Dziś w aparatach brakuje już nawet analogowego wyjścia Composite Video, więc obraz przesyłany jest w tym samym paśmie, ale cyfrowo z wyjścia HDMI. Nowoczesne radiowe przekaźniki i kontrolery mogą mieć zasięg nawet kilkudziesięciu kilometrów.

Na BSP można zamontować nie tylko aparat fotograficzny pracujący w zakresie światła widzialnego. Możliwe jest wykorzystanie sensorów wielospektralnych, termalnych (zob. 3.1) czy skanerów laserowych (zob. 2.3). Kluczowa jest tu mała waga tych urządzeń i ich kompatybilność z wybranym modelem BSP.



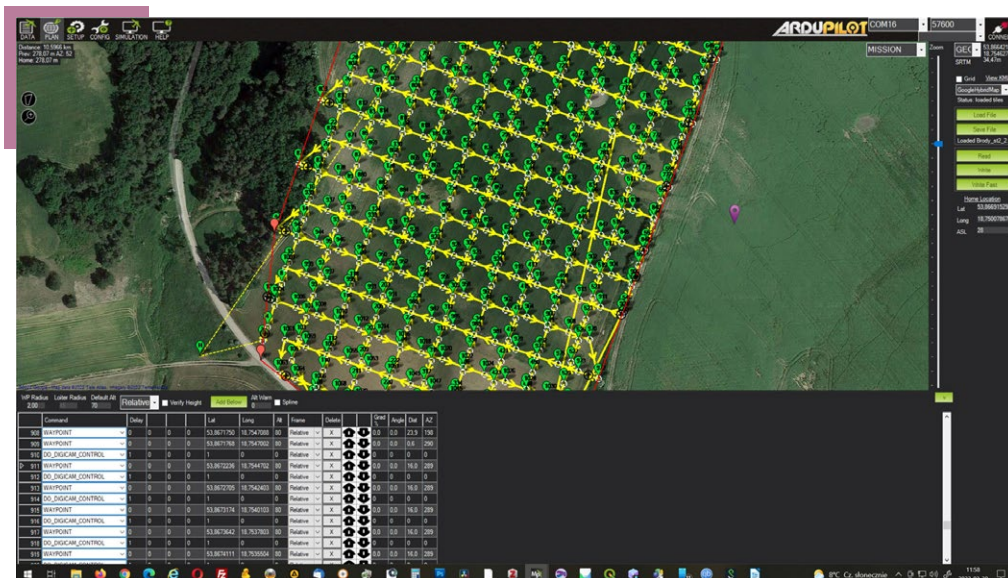
Ryc. 2.17. Oktokopter zmontowany z części dostępnych w Internecie (M. Bogacki)

Oprócz zdalnie sterowanych wielowirnikowców do fotografowania z powietrza wykorzystywane są inne statki latające. Popularne wśród osób, które tworzą ortoobrazy, są zdalnie kontrolowane płatownice (samoloty). Dzięki większej powierzchni nośnej zużywają one mniej energii, mogą latać dłużej i obejmować obrazowaniem większy obszar. Nie są jednak tak uniwersalne jak wielowirnikowce i zazwyczaj nie pozwalają na jednoczesne wykonywanie zdjęć ukośnych i pionowych, a także na zatrzymanie się w wybranym punkcie przestrzeni.

Istotnym elementem wyposażenia współczesnych dronów jest oprogramowanie pozwalające na loty autonomiczne. Warto sprawdzić, z jakimi aplikacjami może współpracować BSP i jakie funkcje cechują to oprogramowanie. Czy można dzięki nim stworzyć plany lotów nadające się do fotogrametrii, skanowania ALS, tworzenia modeli 3D itp.? Czy są nałożone jakieś ograniczenia na liczbę punktów trasy takich lotów lub wielkość badanych obszarów? Czy producent drona nie ogranicza lotów w pewnych miejscach, tworząc swoje strefy bezpieczeństwa? W najbardziej zaawansowanych programach można m.in. tworzyć krzyżowe plany lotu (Ryc. 2.18), z miejscami awaryjnych lądowań, czy też zmieniać prędkość i wysokość lotu.

W niektórych warunkach efektywnym sposobem dokumentowania z powietrza są innego rodzaju BSP, a mianowicie balony i latawce (Bogacki 2016a). Balony na uwięzi z podwieszonym aparatem (Ryc. 2.19) nie wymagają tak dużo lżejszego od powietrza gazu, jak ich załogowe wersje. Poza tym oferują wyjątkową stabilność lotu przy bezwietrznej pogodzie. Latawce są natomiast najtańszym statkiem powietrznym (Ryc. 2.20), który przy odrobinie samozaparcia można wykonać samemu. Do ich poprawnego działania potrzebny jest jedynie wiatr i odpowiednie warunki terenowe.

Ryc. 2.18. Krzyżowy plan lotu drona przygotowany w oprogramowaniu Mission Planner (M. Bogacki)



Ryc. 2.19. Bezzałogowy balon helowy użyty do dokumentacji fotograficznej na stanowisku w Starej Łomży (A. Makowska)



Ryc. 2.20. Wypuszczanie latawca, pod którym na linie zostanie zamontowane mocowanie z bezprzewodowo sterowanym aparatem fotograficznym (M. Bogacki)

2.1.3.4. Przygotowania do lotu

Przygotowania do lotu można podzielić na: 1) długoterminowe i 2) te bezpośrednio przed lotem.

Ad 1) W ramach przygotowań długoterminowych musimy uzyskać certyfikaty i uprawnienia od organów państwowych w sprawie użytkowania dronów (https://ulc.gov.pl/_download/Drony/FAQ_v2_LBSP.pdf; <https://ulc.gov.pl/pl/aktualnosci/5329-miej-drony-pod-kontrola-od-31-grudnia-nowe-zasady-lotow-dronami-w-calej-europie>).

Regularnie należy także sprawdzać stan techniczny maszyny latającej i poddawać ją przeglądowi. W dronach nie ogranicza się to do inspekcji stanu ramy, śmigieł czy silników. Polega również na dokonywaniu aktualizacji i dostosowywaniu ustawień w funkcjach oprogramowania. Drony są wciąż na wczesnym etapie swojego rozwoju i oprogramowanie komputera pokładowego oraz innych komponentów musi być poprawione ze względu na pojawiające się błędy. „Firmware” decyduje m.in. o kulturze pracy BSP, obsłudze różnych czujników i możliwościach konfiguracji oraz

sterowania. Poprzez oprogramowanie dodawane są i zmieniane funkcje dronów. Nawet w niektórych akumulatorach dronów jest dziś program, który trzeba aktualizować. Oczywiście niezbędne jest też zapoznanie się z instrukcją obsługi drona. Coraz częściej nie jest nią wydrukowana książeczka, lecz strona internetowa odświeżana zgodnie z aktualizacjami oprogramowania. Pomocne mogą się okazać ponadto blogi i materiały wideo innych użytkowników dronów, a także fora internetowe dotyczące modelarstwa itp. Obsługiwać BSP łatwiej będzie osobom, które już zdobyły wiedzę i uprawnienia z zakresu pilotażu załogowych statków powietrznych, a także osobom z doświadczeniem komputerowym.

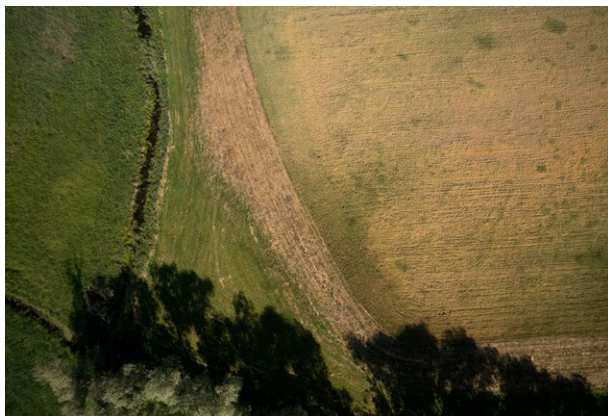
Ważnym czynnikiem w planowaniu lotu powinno być uwzględnienie uwarunkowań atmosferycznych/pogodowych. Zaleca się wykonywanie lotów przy przejrzystości powietrza sięgającej kilku kilometrów, braku opadów i sile wiatru, która nie utrudni lotu (zwykle będzie to prędkość poniżej 8 m/s). Należy przy tym pamiętać, że czas lotu zależy też od temperatury otoczenia. Większość baterii ma mniejszą efektywność w niskich temperaturach i powinniśmy uwzględnić krótszy czas działania sprzętu, gdy mamy do czynienia z takimi warunkami. Ponadto przydatne są internetowe serwisy z numeryczną prognozą pogody, które z dużą precyzją, zazwyczaj godzinową, pokazują przewidywania. Dla Polski najwięcej cennych danych pogodowych można znaleźć na stronach <https://www.meteo.pl/> i <https://meteo.imgw.pl/>. Prognozy te najlepiej sprawdzają się na 1–3 dni przed lotem. Dłuższe terminy należy traktować orientacyjnie.

Przygotowując się do lotów, warto obejrzeć oblatywany rejon zarówno na stronach internetowych (Google Maps, Bing Maps, geoportal.gov.pl), jak i na żywo. Problemem w wykonaniu misji mogą okazać się przeszkody terenowe, takie jak linie wysokiego napięcia, drzewa, wiatraki czy budynki. Warto zaplanować sobie miejsce startu, biorąc pod uwagę ukształtowanie terenu, pozycję Słońca i tor lotu.

Punkt wylotu powinien pozwalać na lądowanie autonomiczne. Większość dronów ma

bowiem system awaryjnego powrotu na miejsce startu (*failsafe mode*), który w razie np. utraty radiowego sygnału kontrolera sam się uruchomi. Jest on jednak dość ograniczony. Kieruje się odbiornikiem GPS, który działa zazwyczaj z dokładnością do 5–10 m i dron zamiast wylądować przykładowo na pomoście (z którego startowaliśmy), może spróbować wodować na jeziorze. Poza tym powracający BSL dolatuje zwykle na dużej wysokości do miejsca startu i zaczyna się pionowo zniżać do lądowania. Jeżeli miejsce startu wyznaczone zostało pod drzewem lub drutami wysokiego napięcia, może to spowodować wypadek.

Należy też zwrócić uwagę, czy promienie słoneczne nie będą nam utrudniały obserwacji drona i czy odpowiednio oświetlił dokumentowany teren. Zalecane jest jednorodne oświetlenie przy bezchmurnym niebie lub przy pełnym zachmurzeniu. Pojedyncze chmury zasłaniające lub odsłaniające słońce podczas sesji fotogrametrycznej mogą spowodować, że mozaika zdjęć będzie się składała z różnie oświetlonych fragmentów, które trudno będzie scalić w jeden ortoo obraz i interpretować. Wyboru twardego (bezpośrednie słońce) lub miękkiego światła (zachmurzenie) należy dokonać w zależności od potrzeb. Silne kontrasty lepiej podkreślą relief terenu i ewentualne struktury archeologiczne, jednak w cieniach może ukryć się część dokumentowanego obszaru (Ryc. 2.21). Przy świetle miękkim cały teren będzie dobrze widoczny, ale ukształtowanie terenu i jego archeologiczne formy nie będą tak wyraziste (Ryc. 2.22). Światło z pochmurnego nieba może być też korzystne w miejscach, gdzie występuje dużo cieni z różnorodnych struktur, np. w lesie, na łąkach z krzakami czy w mieście. Liczne cienie przy ostrym świetle mogą spowodować powstanie tak różnobarwnej grafiki, że nie da się dokładnie prześledzić wyglądu żadnego wyróżnika. Istotnym czynnikiem jest ponadto wysokość słońca nad horyzontem. Oczywiście im bardziej skośne, niskie światło, tym lepiej podkreśli różnice w wysokości terenu, choć wtedy powstaje coraz dłuższy cień, który może ukryć część struktur (Ryc. 2.23). Ważnym elementem przygotowań jest



Ryc. 2.21. Cienie drzew zasłaniają część dokumentowanego obszaru (M. Bogacki)



Ryc. 2.22. Oświetlone miękkim, rozproszonym światłem fundamenty, manifestują się w postaci wysuszonej trawy (negatywny wyróżnik roślinny) (M. Bogacki)



Ryc. 2.23. Długi cień podkreślający relief terenu, ale też za-ciemniający fragmenty grodziska (M. Bogacki)

wybór ustawień aparatu fotograficznego. W BSP z wbudowanym aparatem większość parametrów można ustawiać zdalnie, jednak gdy aparat nie stanowi części maszyny latającej, podczas lotu zazwyczaj ograniczona jest jego funkcjonalność. W przypadku niektórych wielowirnikowców po starcie można wyzwalać tylko migawkę lub rozpocząć nagranie filmu, dlatego pozostałe parametry należy wybrać na ziemi.

Ustawienia warto zacząć od parametrów ekspozycji, które decydują o jasności zdjęć. Prawdopodobnie dla większości operatorów najwygodniejszą opcją będzie tryb manualny oznaczony w aparatach jako „M”. Przysłona i czas naświetlania muszą wtedy zostać ustawione ręcznie. Światłomierz podpowiada zazwyczaj wizualnie, czy jest to dobre ustawienie, ale ostateczną decyzję podejmuje fotograf. Zaletą takiego rozwiązania jest to, że aparat nie decyduje automatycznie o ekspozycji i nie zmienia jej błędnie, zmylony

choćby przez silne odbicia światła. Jeżeli potrzebne – lub wygodniejsze – są ustawienia półautomatyczne, można skorzystać z preselekcji przysłony oznaczonej w aparatach jako Av lub A albo preselekcji czasu naświetlania (S lub Tv). W tych trybach samemu ustawiamy przysłonę (Av) bądź czas naświetlania (Tv), a drugi z parametrów dobierany jest automatycznie przez światłomierz. Nie są polecane w pełni automatyczne ustawienia, ponieważ doprowadzają zazwyczaj do powstania wadliwych ujęć. Lepiej jest rozumieć i samemu ustawić poprawne parametry. Dla dobrej jakości zdjęć, ich ostrości i rozdzielczości warto zadbać o to, aby przysłona oscylowała w środkowej części skali. Dla obiektywów małoobrazkowych (pełnoklatkowych) są to wartości od $f/6,3$ do $f/13$. Oczywiście istotny jest również czas naświetlania, który powinien być dopasowany do prędkości drona, wysokości lotu, ogniskowej obiektywu i jakości stabilizacji sensora. Można przyjąć, że podczas zawisu w większości dronów $1/100$ sekundy będzie najdłuższym czasem, z jakiego można skorzystać. Zwykle jednak będą to krótsze migawki (Tabela 1). Zdjęcia wykonane ze zbyt długim czasem naświetlania będą rozmazane. Trzecim parametrem decydującym o jasności zdjęć jest czułość ISO. Jako zasadę można przyjąć, że powinna ona być jak najniższa, ponieważ przy wyższych wartościach pojawia się tzw. szum i zdjęcia są gorszej jakości.

Ostatnim kluczowym ustawieniem aparatu, na które należy zwrócić uwagę, jest rodzaj formatu, w jakim zapisywane będą zdjęcia. Najlepszą

Czas migawki aparatu	Ogniskowa obiektywu	Wielkość matrycy aparatu	Wysokość lotu n.p.t.	Prędkość lotu
1/273 sek.	28 mm	36 mm × 24 mm	80 m	9 km/h
1/416 sek.	24 mm	36 mm × 24 mm	100 m	20 km/h
1/474 sek.	20 mm	23,5 mm × 15,6 mm	60 m	10 km/h
1/228 sek.	5,2 mm	7,6 mm × 5,7 mm	100 m	15 km/h

Tabela 1. Najdłuższe czasy naświetlania dla przykładowych parametrów aparatu fotograficznego i lotu

jakość i możliwości edycji zdjęć uzyskuje się w plikach RAW. Wśród różnych producentów aparatów pliki te mają rozszerzenie DNG, CR2, CR3, NEF, AR2 itd. W porównaniu do najpopularniejszego i zajmującego mniej miejsca na karcie pamięci pliku JPG, w format RAW pozwala na zmianę balansu bieli (temperatury barwowej zdjęcia) bez pogorszenia jakości i na znacznie szerszą korekcję ekspozycji (jasności zdjęcia). Wadą tego formatu jest konieczność używania do edycji specjalnych programów graficznych, które obsługują konkretny typ pliku RAW z danego modelu aparatu fotograficznego (np. program RawTherapee, Adobe Camera RAW, Adobe Lightroom). Nowsze aparaty pozwalają zapisywać zarówno pliki RAW, jak i JPG, co jest przydatne, jeśli potrzebujemy „na szybko” mniejszego pliku, który będzie kompatybilny z większością urządzeń.

Ad. 2) Bezpośrednio przed lotem sprawdzamy jeszcze raz sprzęt i koncentrujemy się na miejscu wykonywanego lotu. Obecnie wymogiem jest zarejestrowanie lotu w aplikacji na telefon DroneRadar Premium. To program, który pozwala skomunikować się online ze służbami kontroli przestrzeni powietrznej Polski (Polską Agencją

Żeglugi Powietrznej). Musimy podać swoje podstawowe dane, które zidentyfikują nas jako operatora i nasz statek powietrzny. Ponadto jeśli nie zrobiliśmy tego wcześniej sprawdzamy, do jakiej wysokości możemy latać w danym miejscu. Aplikacja pobierze naszą lokalizację i oznaczy obszar, na którym będziemy działać. W zależności od miejsca, w którym pracujemy, konieczne może być oczekiwanie na zgodę na start ze strony FIS (Służby Informacji Powietrznej) albo z okolicznej wieży lotniska. Istnieją też strefy lotnicze, gdzie trzeba kilka dni wcześniej zgłosić plan lotu i/lub uzyskać dodatkowe zgody na latanie od innych podmiotów zarządzających przestrzenią. Większość informacji o takich ograniczeniach znajdziemy w aplikacji DroneRadar i odpowiednich aktach prawnych. W europejskim prawie rozróżnia się dwie kategorie lotów: loty w zasięgu wzroku VLOS (Visual Line of Sight) i poza zasięgiem wzroku BVLOS (Beyond Visual Line of Sight). Ta druga grupa wymaga dodatkowych uprawnień i pozwoleń.

Istotny jest fakt, że operator BSP powinien ustąpić pierwszeństwa wszystkim innym statkom powietrznym. Musi więc obserwować i kontrolować przestrzeń wokół drona (VLOS).

Dobłą praktyką tuż przed startem jest sprawdzenie szeregu parametrów. SĄ to następujące kwestie:

- > poziom naładowania baterii;
- > siła sygnału aparatury sterującej;
- > liczba podłączonych do autopilota satelitów GPS i jakość ich sygnału;
- > jakość działania kompasu;
- > czy pojawiają się inne komunikaty ostrzegawcze autopilota;
- > czy działa aparat fotograficzny;
- > jakie parametry ekspozycji są ustawione w aparacie;
- > stan techniczny i wygląd ramy, silników oraz śmigieł drona.

Warto rozumieć ograniczenia, jakim podlegają drony ze względu na towarzyszące im technologie. Podstawowym sensorem, z którego korzysta większość BSP, jest odbiornik GPS. Na jego podstawie BSP określają swoją pozycję i kierunek lotu. Gdy GPS przestaje działać prawidłowo, np. z powodu burz magnetycznych na Słońcu, dron może przestać reagować na polecenia lub nawet zacząć odlatywać w nieodpowiednim kierunku. W Internecie dostępne są informacje o aktywności magnetycznej słońca (<https://www.spaceweatherlive.com/en/auroralactivity/kp-index.html>), dzięki czemu możemy uniknąć takich problemów.

Istotnym instrumentem do określania kierunków stron świata jest także żyrokompas. Jeżeli dron znajduje się w pobliżu silnych emitentów pola magnetycznego, takich jak np. samochód czy płyta betonowa ze stalowym zbrojeniem, może przestać działać prawidłowo, dlatego lepiej unikać startu z dachu samochodu itp.

Warto też zadbać, by obok miejsca startu drona nie było osób postronnych. W tym kontekście przyda się pomoc współpracowników. Operowanie dronem jest zadaniem wymagającym i pilot powinien skupić się tylko na tym działaniu, a nie odpowiadać na pytania typu: co tu robi, ile kosztuje taki dron, jak wysoko może polecieć?

2.1.3.5. Przygotowanie nalotu fotogrametrycznego

W przypadku zaawansowanych dronów oprócz ręcznej kontroli nad trasą lotu można stworzyć, w naziemnej stacji kontroli (np. w komputerze) plan lotu, który wgrywa się do komputera pokładowego i potem BSP wykonuje lot samodzielnie. Zaletą zaplanowanej trasy jest możliwość przeprowadzenia dokładniejszego lotu z zadanymi, ściśle określonymi elementami: pokryciem zdjęć, rozdzielczością, zmianami wysokości i momentami wyzwiania migawki. Pilot nie musi sterować lotem drona – może skupić się na oglądaniu zdjęć i obserwacji przestrzeni powietrznej.

W przypadku udanych przetworzeń fotogrametrycznych boczne pokrycie zdjęć powinno wynosić przynajmniej 70%, a pionowe 80%. Dodatkowym kryterium, które należy stosować w odniesieniu do takich zdjęć, jest ich minimalna rozdzielczość. Wydaje się, że według dzisiejszych standardów (stan na rok 2022) i możliwości sprzętu rozdzielczość zdjęć pionowych i wykonanych z nich opracowań powinna być lepsza niż 8 cm/piksel. Taki wymóg techniczny w większym stopniu gwarantuje, że uzyskane wyniki będą obrazowały również mniejsze struktury i ich fragmenty, niewidoczne zazwyczaj na materiałach ze średniego i wysokiego pułapu. Wraz ze zwiększającą się rozdzielczością materiałów obrazujących uczymy się wykorzystywać takie nowe dane. Jednocześnie należy zaznaczyć, że uzyskanie zobrażeń z rozdzielczością 1–4 cm/piksela² nie jest dziś ograniczone wysoką ceną czy dostępnością i tego typu zdjęcia wykonywane są coraz częściej. Większość naziemnych stacji kontroli pozwala tak zaplanować lot, że powyższe warunki są spełnione przy uwzględnieniu rodzaju aparatu i obiektywu, szybkości lotu i jego wysokości.

Należy też zwrócić uwagę na czas lotu, jaki jest niezbędny do ukończenia misji. Jeśli przekracza on możliwości drona, lot trzeba podzielić na

² Omawiana jest tutaj rozdzielczość teoretyczna wynikająca z liczby pikseli na matrycy światłoczułej. Oczywiście lepszym wskaźnikiem byłaby rozdzielczość rzeczywista, która zależy od znacznie większej liczby wskaźników, takich jak optyczna jakość obiektywu czy przejrzystość powietrza. Byłoby to jednak zdecydowanie trudniejsze do wyegzekwowania i wymagałoby zaawansowanych testów rozdzielczości przy każdym badaniu.

kilka etapów. Większość producentów dronów i autopilotów poleca programy do tworzenia tras przelotów, np. dla otwartego (open source) projektu ArduPilot (<https://ardupilot.org/>) są to QGC (<http://qgroundcontrol.com/>) i Mission Planner (<https://ardupilot.org/planner/>). Dostępne są również programy dla wielu platform, np. UgCS (<https://www.ugcs.com/>) czy Pix4D Capture (<https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>).

W celu uzyskania centymetrowej precyzji wpasowania map w geograficzne układy współrzędnych dobrą praktyką jest rozłożenie na badanym obszarze naziemnych punktów kontrolnych w postaci fotopunktów (Ryc. 2.24). Są to przeważnie krzyże odróżniające się od otoczenia kolorem, które będą dobrze widoczne na zdjęciach. Aby można było zweryfikować dokładność mapy, potrzebne są przynajmniej trzy, ale zazwyczaj przygotowuje się ich znacznie więcej. Dobrze jest rozłożyć je równomiernie na całym badanym obszarze, żeby zweryfikować dokładność przetworzeń fotogrametrycznych w różnych miejscach. Tak pozostawione fotopunkty powinny być domierzone odbiornikiem GPS (GNSS) z centymetrową precyzją (GPS RTK, NTRIP). Warstwa dodatkowych pomiarów pozwala następnie w oprogramowaniu fotogrametrycznym wpasować mapy i modele w geograficzny lub kartograficzny układ współrzędnych i sprawdzić dokładność tego wpasowania.

Niektóre drony z wbudowanymi aparatami oznaczają (geotagują) każde zdjęcie lokalizacją geograficzną jego wykonania (pomiar środka rzutu). Dzięki temu programy fotogrametryczne mogą od razu umieścić wykonane przetworzenia w układach geograficznych/kartograficznych. Dokładność takiego wpasowania jest jednak zależna od rodzaju i dokładności odbiornika GPS w dronie. Większość urządzeń może cechować się nawet kilkumetrowym błędem dopasowania. Najlepsze rezultaty uzyskiwane są dzięki konstrukcjom opartym na GPS RTK lub z oprogramowaniem PPK łączącym się z dodatkowymi stacjami referencyjnymi GPS. Liczba naziemnych punktów kontrolnych może być wtedy znacznie mniejsza lub całkowicie się z nich rezygnuje. Nie



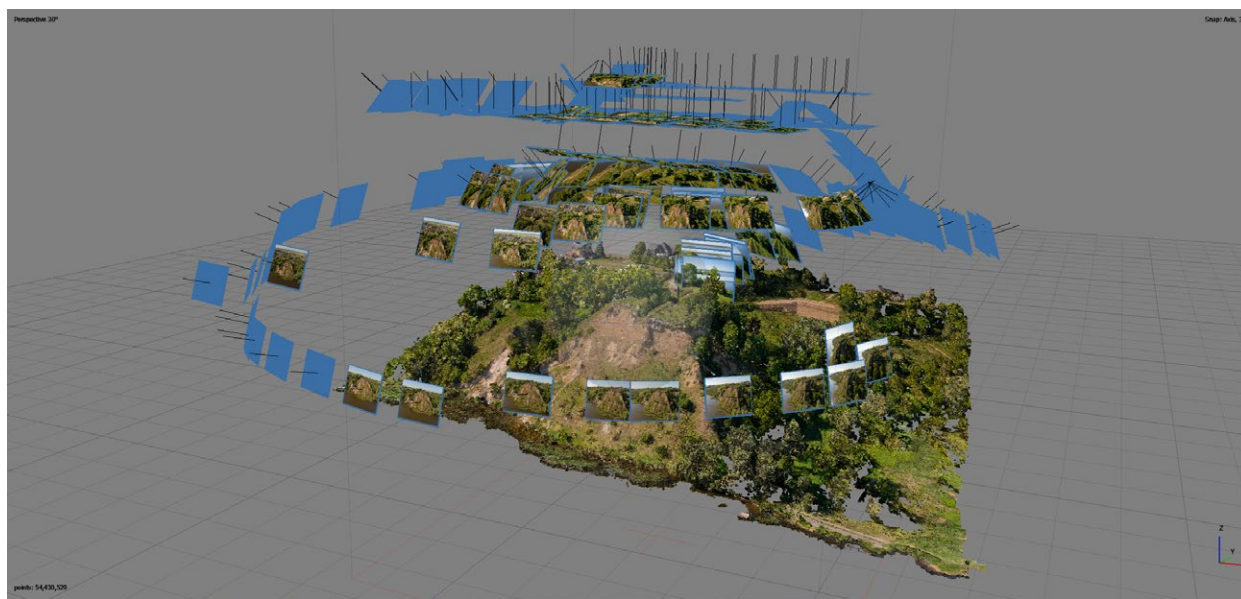
Ryc. 2.24. Geodezyjne domierzanie fotopunktu w terenie

ulega jednak wątpliwości, że fotopunkty zapewniają większą precyzję, kontrolę i bezpieczeństwo dokładnego wpasowania materiałów.

Zdjęcia nadające się do przetworzeń fotogrametrycznych można uzyskać również z lotu kontrolowanego osobiście. Takie rozwiązanie jest niezbędne w miejscach, gdzie potrzebne są szybkie reakcje pilota i dopasowywanie się do zmiennych warunków lotu. Szczególnie jeśli lot wykonywany jest na wysokościach powyżej 100 m, łatwiej zachować odpowiednie zakładki dla kolejnych linii przelotu do mozaiki zdjęć. W przypadku większości mapowań wystarczające są zdjęcia pionowe, lecz jeśli wymagania co do jakości numerycznego modelu terenu i ortofotomapy okazują się wysokie, a poza tym trzeba zadokumentować np. fasady budynków, można wykonać także serię zdjęć skośnych. Dostępne są nawet specjalistyczne kamery z wieloma obiektywami i matrycami, które wykonują jednocześnie zdjęcia pionowe i skośne (Ryc. 2.25).



Ryc. 2.25. Aparat fotograficzny przystosowany do wykonywania jednocześnie pionowych i pochylonych zdjęć



Innego podejścia wymagają obiekty przestrzenne, architektoniczne i archeologiczne obrazowane jako modele 3D. Zdjęcia pionowe już wtedy nie wystarczają i należy również wykonać fotografie z boku, na różnych wysokościach i przy zróżnicowanych kątach widzenia. Obiekt musi zostać sfotografowany z każdej strony i to w taki sposób, żeby na zdjęciach każda jego część była widoczna z różnych, ale pokrywających się ujęć (Ryc. 2.26). Przy takich nalotach obowiązuje też zasada, że kolejne zdjęcia muszą obejmować obszar, który będzie podobny w zakresie przynajmniej 70%. Niektóre programy fotogrametryczne, na podstawie wstępnego modelu 3D obiektu, pozwalają dokładnie zaplanować miejsca wykonywania zdjęć do takiego projektu (<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000157953-mission-planning-for-complex-structures>).

2.1.3.6. Zdjęcia dokumentacyjne i prezentacyjne z dronów

Z dronów wykonywane są również zwykłe zdjęcia dokumentacyjne i ilustracyjne. Perspektywa z lotu ptaka stała się standardem w dokumentacji różnorodnych obiektów, zazwyczaj bardziej rozległych, których nie można odpowiednio zaprezentować, tzn. nie da się pokazać ich skali i miejsca w przestrzeni z poziomu ziemi.

Ryc. 2.26. Wizualizacja pozycji aparatu podczas wykonywania zdjęć do dookólnej dokumentacji fotogrametrycznej obiektu (M. Bogacki)

Ryc. 2.27: a, b, c, d. Grodzisko Rogale, gm. Stare Juchy, sfotografowane z różnych wysokości i punktów widzenia (M. Bogacki)



Ryc. 2.27a.



Ryc. 2.27b.



Ryc. 2.27c.



Ryc. 2.27d.

Przed sesją fotograficzną należy zadać sobie pytanie, jaki jest cel tego działania; na co chcemy zwrócić uwagę odbiorcy; dlaczego fotografie są potrzebne. Inaczej będą wykonywane zdjęcia ilustracyjne, efektownie prezentujące najbardziej okazałe części stanowiska archeologicznego, a inaczej zdjęcia mające pokazać np. zdewastowanie zabytku czy jego architektoniczne detale. Przed sesją fotograficzną należy się zastanowić:

- > które części dokumentowanego obiektu są najważniejsze;
- > gdzie dokładnie można spodziewać się interesujących nas obiektów lub ich śladów;
- > czy są jakieś relacje pomiędzy obiektami a przestrzenią dookoła, które chcemy pokazać;
- > czy są jakieś wyniki wcześniejszych badań archeologicznych, które chcemy zweryfikować;
- > jak dużej szczegółowości obrazu potrzebujemy;
- > kiedy możemy zrobić zdjęcia;
- > ile czasu możemy przeznaczyć na to działanie;
- > jaka będzie najlepsza pora roku dla naszego działania;

- > jaka będzie najlepsza pora dnia na zrobienie zdjęć;
- > jakie oświetlenie odpowiadałoby nam najbardziej podczas fotografowania;
- > kiedy trzeba oddać gotową dokumentację fotograficzną zleceniodawcy.

Nie ma gotowego przepisu na sesję fotograficzną z lotu ptaka do celów archeologicznych. Jest jednak kilka warunków, które wydają się niezbędne, szczególnie podczas wykonywania dokumentacji. Nie ulega wątpliwości, że zdjęcia muszą być dobre technicznie, czyli poprawnie naświetlone, ostre; powinny mieć naturalne barwy i przedstawiać odpowiednie kadry. Istotne jest też wykorzystanie jak najbardziej zaawansowanego, nowoczesnego sprzętu, a jego wybór nie powinien być przypadkowy. Trudno tu wskazać rozpiętość cenową; miarą powinno być raczej wykorzystanie danych narzędzi przez zawodowców w zleceniach komercyjnych.

Ogólnie można przyjąć, że zdjęcia dokumentacyjne należy robić z różnych stron świata/punktów widzenia, przy zmiennych wysokościach itd. (Ryc. 2.27a, b, c, d). Jednocześnie trzeba przewidywać, jakie ujęcia będą przydatne do wybranych celów. Pomocne są niekiedy fotografie robione z odległości 5–10 m, pokazujące dobrze wysokość i skalę obiektu (Ryc. 2.28). Dobrze jest ująć obiekt/obiekty w węższym i szerszym kontekście. Przydatne będą zarówno zdjęcia pionowe mapujące teren, jak i ukośne (Ryc. 2.27a, c). W zależności od możliwości logistycznych i czasowych pomocne okazują się zdjęcia z różnych pór dnia



Ryc. 2.28. Grodzisko Rogale, gm. Stare Juchy sfotografowane z drona z niskiej wysokości (M. Bogacki)

czy roku (Ryc. 2.29a, b), gdyż poszczególne części stanowiska mogą się inaczej prezentować w odmiennych warunkach. Warto uwzględnić w harmonogramie zdjęć planowane inne badania archeologiczne. Fotografowanie należy wykonywać w pierwszej kolejności, ponieważ np. badania geofizyczne mogą spowodować zmiany lub zniszczenia we florze, co utrudnia interpretację wyróżników roślinnych (Ryc. 2.30).

Do problemów, które są charakterystyczne dla fotografii dronowej, zalicza się tzw. hot spot. Gdy słońce znajduje się dokładnie za aparatem, na zdjęciach powstaje jaśniejszy punkt będący odbiciem światła. Czasami jest on mylnie interpretowany jako np. wyróżnik roślinny (Ryc. 2.31). Problemem mogą też być wibracje silników drona, które powodują nieostrość zdjęć, a nawet utrudniają podgląd obrazu z wysokości. W słoneczną pogodę niełatwo zobaczyć obraz na ekranie podglądowym, dlatego warto znaleźć sobie miejsce zacienione lub przynajmniej przygotować zastłonę do ekranu, żeby kontrolować kadr. Z kolei podczas zimy przydatne są odpowiednie rękawiczki, które nie utrudniają kontrolowania i wyczucia aparatury sterującej, żeby można było manipulować dżojstikami. Warto w szczególności na początku przygody z dronami kontrolować ściśle czas lotu, a nawet ustawić dodatkowy alarm dźwiękowy. Skupiając się na locie i dokumentując kolejne obszary, łatwo się zapomnieć i nie zostawić odpowiedniej ilości czasu na powrót drona oraz lądowanie.

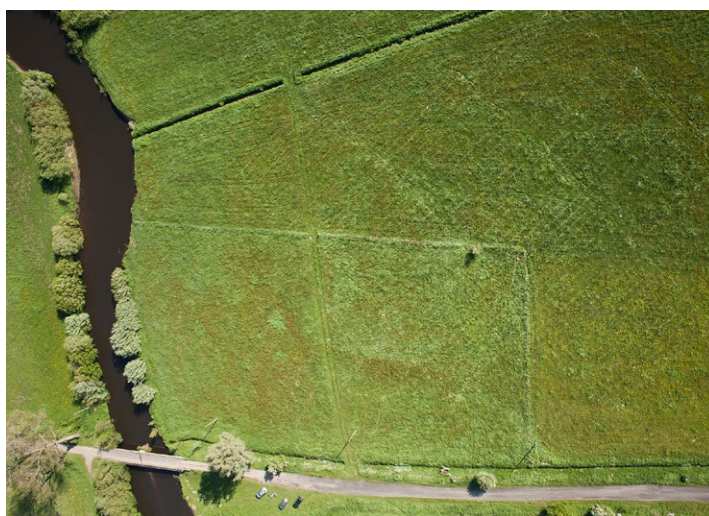
Przykładem typowego obiektu dla fotografii lotniczej w Polsce są grodziska. Były one dokumentowane od początków archeologii lotniczej w naszym kraju. Zdjęcia z ziemi rzadko ukazują złożoność i skalę tych obiektów, a fotografiami z powietrza można zilustrować ich stan zachowania, osadzenie w środowisku naturalnym, dodatkowe elementy umocnień – choćby tylko w postaci wyróżników wegetacyjnych – oraz ślady dawnych badań archeologicznych itp. Często dokumentowane są też relacje pomiędzy grodem, a osadą przygodową (Ryc. 2.32). Podobnie spektakularne i przydatne mogą być zdjęcia pozostałości zamków i pałaców czy budowli religijnych



Ryc. 2.29a. Grodzisko w Wicinie, gm. Jasień sfotografowane we wrześniu 2012 roku (M. Bogacki)



Ryc. 2.29b. Grodzisko w Wicinie, gm. Jasień, sfotografowane w listopadzie 2010 roku, rozlewiska podkreślają wypiętrzanie terenu (M. Bogacki)



Ryc. 2.30. Relikty grodziska w Sławsku, gm. Sławno, z widocznymi śladami wyniezionej przez geofizyków roślinności (M. Bogacki)



Ryc. 2.31. W centralnej części zdjęcia znajduje się tzw. hot spot (jaśniejszy punkt z ciemną kropką po środku) – powstający, gdy słońce znajduje się w osi za aparatem (M. Bogacki)



Ryc. 2.32. Przy grodzisku w Wicinie, gm. Jasień widoczny jest lekko obniżony obszar reliktyw osady przygródowej (M. Bogacki)



Ryc. 2.33. Pozostałości zamku w Czersku (M. Bogacki)



Ryc. 2.34. Katedra w Gnieźnie (M. Bogacki)



Ryc. 2.35. Grodzisko Rudaw, gm. Ciechocin sfotografowane przy lekkim zamgleniu o poranku (M. Bogacki)

(Ryc. 2.33, Ryc. 2.34). Właściwie wszystkie miejsca z reliktywami zajmujące powierzchnię nie większą niż 1 km² są dobrym i wartościowym naukowo tematem zdjęć dronowych.

Fotografie ilustracyjne, spektakularne, wykonywane w celach marketingowych rządzą się innymi zasadami niż zdjęcia dokumentacyjne. Mają

przyciągać uwagę, pokazywać obiekt w oryginalny sposób. Wykonując takie fotografie, można się skupić na części zabytku, która jest najładniejsza, używać drona podczas zamglenia (Ryc. 2.35) lub pod słońce, żeby utworzyć flarę w obiektywie; wykorzystywać wschód lub zachód słońca. Podstawowym kryterium jest tutaj estetyka.

2.1.3.7. Wybór i edycja zdjęć lotniczych, przetwarzanie fotogrametryczne

2.1.3.7.1. Obróbka fotografii

Po wykonaniu zdjęć można przejść do prac studyjnych. Warto jednak jeszcze w terenie sprawdzić, czy zdjęcia się udały. Na małym monitorze podglądowym czasem nie zauważymy, że niektóre zdjęcia są nieostre i wymagają poprawy itp. Wstępna ocena techniczna fotografii zaraz po sesji może nas uchronić przed kolejną wizytą w terenie, dodatkowymi kosztami, stratą czasu itd. Dobrze jest zatem też wykonać kopię zapasową (backup) zebranych danych zaraz po sesji fotograficznej.

Obecnie przy pojemnych i tanich kartach pamięci standardem jest wykonanie dużej liczby zdjęć, niekiedy kilkuset w jednej sesji. Problemem staje się nie tyle wykonywanie fotografii, a ich przejrzanie i wyselekcjonowanie najlepszych. Przydatne do tego celu są szybkie przeglądarki plików graficznych, np. Fast Stone Image Viewer, Irfan View czy XnView. Potrafią one sprawnie wyświetlić szerokie spektrum plików RAW z różnych aparatów. Za pomocą skrótów klawiaturowych można w nich wybierać, przenosić, kopiować i kasować obrazy. Cenne jest też sprawdzanie geolokalizacji plików i parametrów ekspozycji (EXIF). W zależności od potrzeb na tym etapie można przydzielać zdjęcia do odpowiednich folderów,

które posłużą do opracowań fotogrametrycznych, obrazowania obiektów itp.

Kolejnym etapem po wyborze zdjęć jest ich obróbka. Pliki RAW można przetworzyć na bardziej popularne formaty JPG, TIFF, choćby darmowym programem RAWTherapee lub komercyjnym Adobe Lightroom. Kontrastem i nasyceniem koloru uwypukla się niektóre elementy obrazu, jednak nie należy przesadzać z efektami. Niekiedy potrzebna jest korekcja balansu bieli, tak aby zdjęcia nie wpadały w zbyt niebieski lub żółty odcień. Warto używać filtra wyostrażającego (unsharp mask), który potrafi poprawić widoczność szczegółów fotografii. Przydatna jest również opcja łączenia zdjęć w panoramy, dzięki czemu bez dużych zniekształceń perspektywy uzyskuje się szerszy punkt widzenia o wyższej rozdzielczości niż w przypadku pojedynczego zdjęcia (Ryc. 2.36). Te wszystkie przetworzenia zapisuje się ostatecznie w plikach JPG lub TIFF, które są najbardziej kompatybilne z większością urządzeń i programów. W zasobach archiwalnych powinny też jednak zostać oryginalne pliki RAW. Stanowią one zachowującą oryginalną jakość dokumentację źródłową, którą zawsze można ponownie wykorzystać do nowych przetworzeń.

Ryc. 2.36. Panorama pokazująca przestrzeń z relikami przeszłych działań ludzkich w Starym Rypinie, gm. Rypin (M. Bogacki)



2.1.3.7.2. Tworzenie Numerycznych Modeli Terenu i ortofotoobrazów

Przetwarzanie zdjęć w modele 3D, modele terenu i ortofotomapy oferują m.in. komercyjne programy 3DF Zephyr (<https://www.3dflow.net/>), Agisoft Metashape (<https://www.agisoft.com/>), Reality Capture (<https://www.capturingreality.com/>) czy Pix4d (<https://www.pix4d.com/>). Korzystają one z techniki SfM (Structure from Motion – Verhoeven et al. 2013). Do dyspozycji mamy także procedury darmowe, oparte na otwartoźródłowych (open source) rozwiązaniach jak VisualSFM (<http://ccwu.me/vsfm/index.html>) czy OpenDroneMap (<https://www.opendronemap.org/>). Są one jednak bardziej pracochłonne i trudniejsze w obsłudze. Większość tych programów proponuje w pierwszym etapie stworzenie uproszczonej chmury punktów i obliczenie przez algorytm miejsc, z których zostały wykonane zdjęcia. Następnie przygotowywana jest gęsta chmura punktów pozwalająca na wykonanie dalszych zobrazowań. Na tym etapie przydaje się plik tekstowy z odbiornika GPS z pomiarami fotopunktów. Dzięki tym danym można nadać wizualizacjom współrzędne geograficzne i sprawdzić dokładność opracowania. W kolejnych etapach tworzy się i eksportuje modele 3D, Numeryczne Modele Pokrycia Powierzchni Terenu, Numeryczne Modele Terenu (Ryc. 2.37), ortofobrazy (Ryc. 2.38), raporty z przetworzeń fotogrametrycznych itp. Dane fotogrametryczne można traktować podobnie jak dane z zobrazowań ALS (por. rozdz. 2.2). Chmura punktów podlega opracowaniu, klasyfikacji i w dalszym opracowaniu wykorzystuje się potrzebne klasy punktów, wyznaczające np. grunt, drzewa, budynki (Ryc. 2.39). Chmurę punktów można zamienić w dwuwymiarowe dane rastrowe, które wizualizuje się w postaci popularnych plików graficznych. Dokładniejsze informacje dotyczące obsługi programów fotogrametrycznych znajdują się w instrukcjach obsługi poszczególnych pakietów i licznych filmach instruktażowych: (<https://docs.zephyrproject.org/latest/>, <https://www.agisoft.com/support/tutorials/beginner-level/>, <https://guides.lib.unc.edu/c.php?g=716413&p=5098040>,

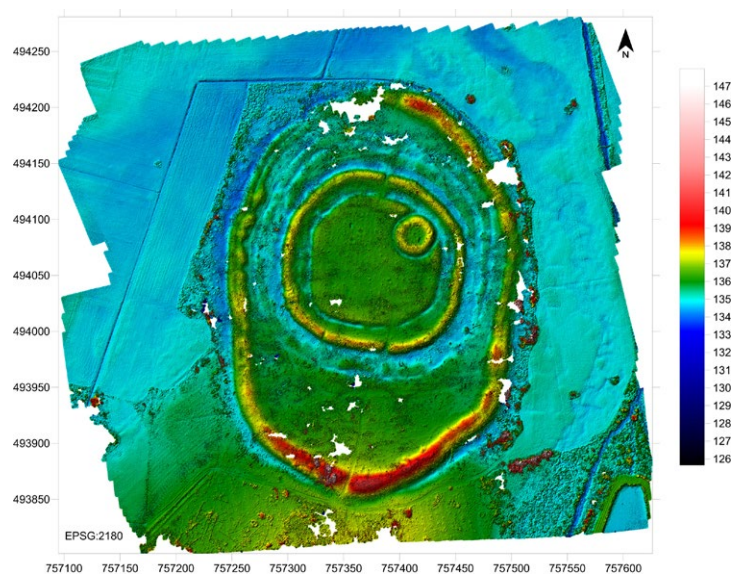
<https://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/115001485172-Help-SW-documentation-manual>, <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf>, <https://www.youtube.com/watch?v=e2qp3o8caPs>).

Wyeksportowane dane mogą być otwierane w programach typu GIS (Geographic Information Systems).

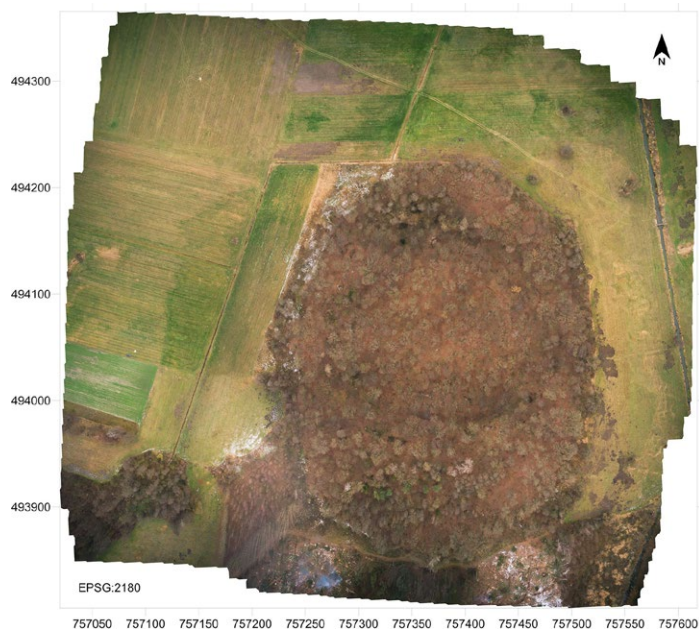
Przetwarzanie zdjęć w programach fotogrametrycznych stwarza niekiedy problemy. Przyczynami powstania gorszych wyników przetworzeń są zazwyczaj:

- > zbyt mała liczba zdjęć użytych do przetwarzania lub ich małe pokrycie;
- > słaba jakość zdjęć z technicznego punktu widzenia (np. rozmyte ujęcia z powodu zbyt długiego czasu naświetlania);
- > zróżnicowana przysłona fotografii;
- > brak metadanych EXIF w zdjęciach;
- > kadrowanie zdjęć;
- > zmiana ogniskowej obiektywu lub użycie zdjęć z różnych aparatów i obiektywów;
- > różne warunki oświetleniowe zdjęć;
- > różna wysokość lotu w nalotach mapowych;
- > zbyt jednorodna lub zmieniająca się pomiędzy ujęciami struktura i barwa fotografowanych obszarów (tj. woda, śnieg, asfalt, rośliny, drzewa).

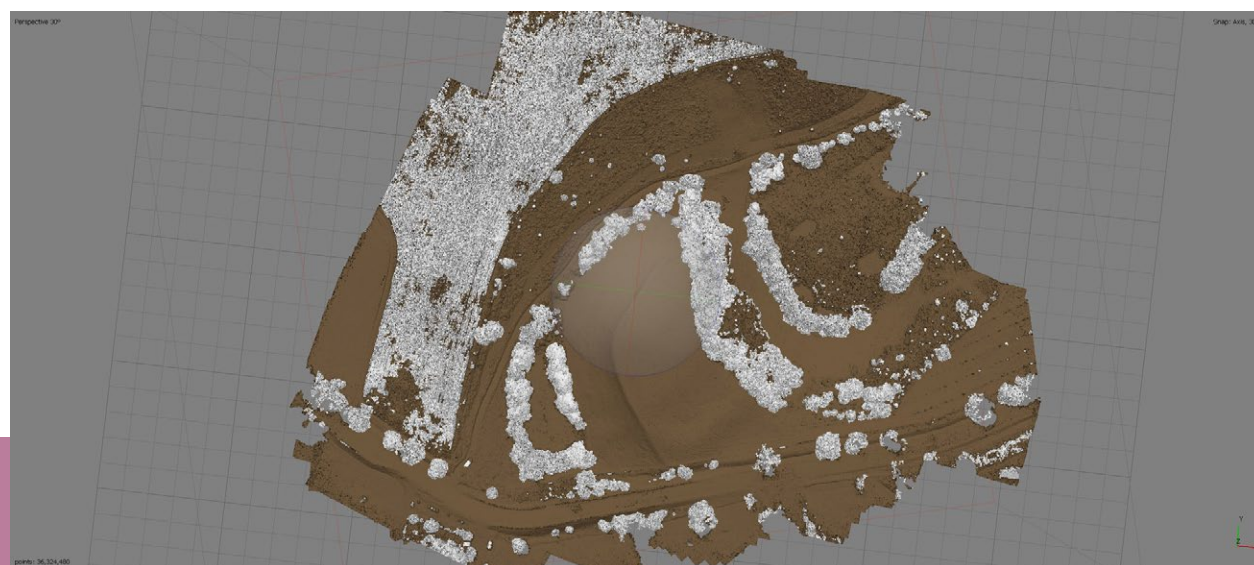
Ponadto w materiałach wynikowych z programów fotogrametrycznych problem stanowią czasem ostre krawędzie obiektów, które bywają postrzępione lub zbyt wygładzone. Ortoobrazy i tekstury modeli 3D wykonane szerokokątnymi obiektywami mają niekiedy widoczne błędy i nierówności przy połączeniach z poszczególnych zdjęć. Czasami trudności może sprawić duża „zasobożerność” programów fotogrametrycznych. Aby sprawnie działały i przetwarzały kilkadziesiąt zdjęć w projekcie, wymagają bardzo dobrych parametrów sprzętu. Potrzebny jest zatem szybki procesor, pamięć operacyjna (RAM) powyżej 16 GB i nowoczesna karta grafiki. Nawet przy drogich komputerach przetworzenia mogą trwać godzinami.



Ryc. 2.37. Numeryczny Model Pokrycia Powierzchni Terenu (NMPPT) grodziska Dzięcioły, gm. Łosice (M. Bogacki)



Ryc. 2.38. Ortoobraz grodziska Dzięcioły, gm. Łosice (M. Bogacki)



Ryc. 2.39. Wizualizacja sklasyfikowanej chmury punktów z grodziska Borzymin, gm. Rypin (M. Bogacki)

2.1.4. Zdjęcia lotnicze pionowe (wysoki pułap)

Pionowe zdjęcia lotnicze to fotografie, przy wykonywaniu których oś obiektywu kamery tworzy z powierzchnią ziemi kąt od 0° (zdjęcia pionowe) do 3° (tzw. zdjęcia prawie pionowe). Taka tolerancja wynika z faktu, że podczas lotu bardzo trudno jest uzyskać idealnie pionowe ustawienie osi optycznej kamery (Ciołkosz, Miszański, Olędzki 1999). Fotografie pionowe mogą być wykonywane w trakcie klasycznego rekonesansu archeologicznego, jeśli pozwala na to konstrukcja samolotu; z drona podczas nalogu fotogrametrycznego oraz z samolotów przeznaczonych do sporządzania dokumentacji fotogrametrycznej z wysokiego pułapu. Ponieważ dwa pierwsze przypadki zostały już omówione we wcześniejszej części poradnika, w tym paragrafie skupimy się na potencjale poznawczym pionowych fotografii lotniczych wykonywanych z wysokiego pułapu (por. Dziewanowski, Żuk 2005).

2.1.4.1. Zasoby historycznych i współczesnych pionowych fotografii lotniczych

Obecnie obszar Polski jest systematycznie fotografowany z powietrza dzięki różnym inicjatywom prywatnym i rządowym. Fotografie pionowe z wysokiego pułapu wykonuje się m.in. do celów gospodarczych, planowania przestrzennego, kartograficznych i wojskowych. Tereny uprzemysłowione, zurbanizowane są znacznie częściej dokumentowane w ten sposób niż obszary słabo zaludnione, użytkowane rolniczo czy też zalesione. W przypadku dużych miast wykonuje się więc systematyczne nalogi – niemal każdego roku – a dla terenów wiejskich, położonych z dala od większych ośrodków, interwały mogą wynosić nawet kilka lat. To powoduje, że dostępny zasób zdjęć pionowych (i ich przetworzeń) dla poszczególnych regionów jest zróżnicowany. W archeologii korzysta się zarówno z gotowych ortofotomap, jak i nieprzetworzonych cyfrowych zdjęć pionowych oraz skanów starszych zdjęć analogowych, które wymagają obróbki w oprogramowaniu GIS, zanim będą mogły zostać poddane analizom.

Największym krajowym archiwum, w którym gromadzone są pionowe zdjęcia lotnicze z obszaru Polski, jest Państwowy Zasób Geodezyjny i Kartograficzny (PZGiK) zarządzany przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK). Współczesne ortofotomapy GUGiK udostępnia w Internecie – poprzez stronę geoportal.gov.pl i usługę WMS. Są to ortofotomapy wykonywane od początku XXI wieku do dziś. Istnieje też wtyczka „Archiwalna ortofotomapa” dla popularnej aplikacji QGIS, która ułatwia korzystanie z tych źródeł. Fragmenty ortofotomap można również pobierać za pomocą wtyczki „Pobieracz danych GUGiK”. W zasobie PZGiK są zarówno ortofotomapy czarno-białe, barwne (RGB), jak i z kanałem bliskiej podczerwieni (CIR).

PZGiK dysponuje także dużymi zbiorami lotniczych zdjęć pionowych wykonywanych przez polskie służby kartograficzne od końca II wojny światowej do początków XXI wieku na terenie całego kraju. Jest ich znacznie mniej niż fotografii współczesnych, ponieważ w omawianym okresie nie przeprowadzano tyle nalogów fotogrametrycznych, co obecnie. Są to zeskanowane czarno-białe fotografie analogowe i fotografie barwne wykonywane od połowy lat 90. XX wieku. Można je wyszukiwać poprzez geoportal, gdzie znajdują się również niskorozdzielcze miniatury, zamieszczone do celów orientacyjnych. Zamówienie ich w wysokiej rozdzielczości jest odpłatne (z wyjątkami – zob. <http://www.gugik.gov.pl/pzgik/zakup-danych-online>). Zazwyczaj do tych zdjęć dołączone są metadane, które informują o dacie ich wykonania, przybliżonej skali zdjęcia analogowego, pułapie lotu, rodzaju aparatu i obiektywu. Praca z takimi fotografiami wymaga ich przetworzenia i nadania im georeferencji w oprogramowaniu GIS. Dla potrzeb archeologicznych robi się to najczęściej z wykorzystaniem fotopunktów. Podobnie jak w przypadku zdjęć ukośnych fotografie pionowe są georeferowane i poddawane przekształceniom poprzez identyfikację (wskaźnik) punktów na zdjęciu korespondujących z obiektami na mapie, numerycznym modelem terenu ALS lub innym zgeoreferowanym źródłem danych przestrzennych. Bardziej precyzyjne

rezultaty uzyskuje się dzięki używaniu profesjonalnego oprogramowania fotogrametrycznego, które pozwala na uwzględnienie innych czynników, takich jak stopień pochylenia fotografii czy dystorsja obrazu powodowana przez obiektyw.

Zasoby historycznych zdjęć pionowych znajdują się również w innych archiwach na terenie kraju, np. w Centralnym Archiwum Wojskowym, lokalnych urzędach, Urzędzie Morskim, na uczelniach i w instytucjach badawczych (zasoby pozyskane w związku z realizacją projektów badawczych) oraz w firmach prywatnych. Dostęp do tych źródeł nie zawsze jest tak łatwy jak w przypadku PZGiK. Warto też wspomnieć

o historycznych ortofotomapach udostępnianych przez firmę Alphabet za pośrednictwem aplikacji Google Earth i serwisu Google Maps. Dla wielu obszarów Polski najbardziej szczegółowy poziom ortofotomap tworzony jest z pionowych zdjęć lotniczych. Google Earth umożliwia łatwy dostęp do licznych zobrazowań historycznych, dzięki czemu jest jednym z najpowszechniejszych – obok geoportalu – narzędzi wykorzystywanych przez archeologów.

Warto również pamiętać, że istnieją zasoby pionowych zdjęć lotniczych wykonywanych w okresie międzywojennym i podczas II wojny światowej. Do najbardziej wartościowych należą



Ryc. 2.40. Przykład niemieckiej fotomapy w skali 1:25 000 (źródło: [http://maps.mapywig.org/m/German_maps/series/025K_Bildplan/400dpi/4170_\(2345\)_Koschmin_Bildplan25_400dpi.jpg](http://maps.mapywig.org/m/German_maps/series/025K_Bildplan/400dpi/4170_(2345)_Koschmin_Bildplan25_400dpi.jpg))

zdjęcia zrobione przez Luftwaffe. Kolekcje tych fotografii znajdują się w wielu archiwach na terenie Europy i USA (zob. Różycki, Osińska-Skotak, Świątek 2020). Jednym z najciekawszych produktów jako efektu regularnego pokrycia terenu zdjęciami pionowymi są fotomapy w skali 1:25 000 wykonywane w Niemczech od 1933 roku (Ryc. 2.40). Dla terenów współczesnej Polski istnieje wiele arkuszy sporządzonych w latach 1933–1944 (Rączkowski 2004). W okresie II wojny światowej i później lotnictwo alianckie prowadziło loty szpiegowskie i te zasoby zdjęć są dostępne w archiwach brytyjskich (np. <https://www.historicenvironment.scot/archives-and-research/archives-and-collections/national-collection-of-aerial-photography/>).

Duży zasób pionowych zdjęć lotniczych z czasów II wojny światowej znajduje się ponadto w U.S. National Archives and Records Administration (NARA) w Waszyngtonie. Obok wspomnianych wcześniej niemieckich zdjęć zwiadowczych i fotomap są tam fotografie z misji wykonywanych przez RAF, 8. Armię Powietrzną i inne jednostki sił zbrojnych USA (<https://www.archives.gov/>). Nie można zapomnieć też o zdjęciach lotniczych zrobionych w trakcie I wojny światowej. Nie są to liczne kolekcje, ale obejmują one zarówno zdjęcia pionowe, jak i ukośne (np. Czarnecki 2019; Zalewska, Czarnecki, Kiarszys 2019).

2.1.4.2. Potencjał historycznych fotografii pionowych w rozpoznaniu dziedzictwa archeologicznego

Pionowe fotografie lotnicze są w większości przypadków wykonywane w celach niezwiązanych z archeologią, co ma istotne konsekwencje. Pora

roku, kiedy je robiono, często nie była optymalna dla występowania wyróżników roślinnych czy glebowych wskazujących na obecność reliktyw archeologicznych. Dzięki dużym zasobom zdjęć historycznych zawsze istnieje jednak szansa, że na jakiejś fotografii ujawniły się interesujące ślady dawnych działań człowieka. Nie można też wykluczać wystąpienia pewnych anomalii pogodowych i ujawniania się reliktyw podczas nietypowych pór roku. W przypadku obiektów o własnej formie terenowej istotne są natomiast warunki oświetleniowe, które różnią się między poszczególnymi fotografiami. Dzięki analizom powszechnie dostępnych ortofotomap udało się odkryć w ostatnich latach kilka istotnych miejsc świadczących o dawnej działalności człowieka, w tym np. opuszczone miasto w Dzwonowie (Krzepkowski, Moeglich, Wroniecki 2017).

Ważną cechą historycznych pionowych fotografii lotniczych jest to, że przedstawiają one wygląd krajobrazu kulturowego w przeszłości, zarówno tej dalszej, jak i zupełnie bliskiej. Źródła te dokumentują niejednokrotnie etapy poprzedzające intensywne przemiany przestrzenne lub powstawały w trakcie tych transformacji, a zatem ich znaczenie dla badań i ochrony dziedzictwa archeologicznego jest nie do przecenienia. Dzięki historycznym fotografiom można zidentyfikować relikty archeologiczne, które dziś już nie istnieją, ponieważ zostały zniszczone w wyniku działalności człowieka lub oddziaływania naturalnych procesów. Historyczne fotografie lotnicze pozwalają ponadto na kompleksowe prześledzenie i zrozumienie procesów krajobrazowych, a często są ostatnim dostępnym źródłem informacji o nieistniejących już zabytkach archeologicznych (Cowley, Standring, Abicht 2010; Hanson, Oltean 2013; Kijowska, Kijowski, Rączkowski 2010).

Bibliografia

- Agache R., Bréart B. 1975. *Atlas d'Archéologie Aérienne de Picardie*. Amiens: Société des Antiquaires de Picardie.
- Agudo P.U. et al. 2018. The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Crop-marks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery. *Drones* 2(3): 29. <https://doi.org/10.3390/drones2030029>.
- Bogacki M. 2016a. *Z lotu ptaka. Zdjęcia z balonu i latawca jako metoda dokumentacji archeologicznej*. Warszawa: Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego.
- Bogacki M. 2016b. Zdjęcia lotnicze i fotogrametryczne opracowanie stanowisk średniowiecznego kompleksu osadniczego w Starym Rypinie. W: J. Lewandowska (red.), *Późnośredniowieczny Kompleks Osadniczy w Starym Rypinie*. Toruń: Adam Marszałek, 421–430.
- Brown M. 1983. New Evidence for Anglian Settlement in East Lothian. *Scottish Archaeological Review* 2(2), 156–163.
- Bewley R.H. 1991. A Late August Experience 1983: Grass Marks in Cumbria. *Aerial Archaeology* 12, 14–18.
- Bewley R.H. 1995. A National Mapping Programme for England. W: J. Kunow (red.), *Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa*. Potsdam: Brandenburgisches Landesmuseum für Ur- und Frühgeschichte, 83–92.
- Campana S. 2017. Drones in Archaeology. State-of-the-Art and Future Perspectives. *Archaeological Prospection* 24(4), 275.
- Castrianni L. 2008. Giacomo Boni: a pioneer of the archaeological aerial photography. W: R. Lasaponara, N. Massini (red.), *Advances on Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management*, Rome: EARSeL, 55–58.
- Ciołkosz A., Miszalski J., Olędzki J. R. 1999. *Interpretacja zdjęć lotniczych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Cowley D. C. 2002. A Case Study in the Analysis of Patterns of Aerial Reconnaissance in a Lowland Area of Southwest Scotland. *Archaeological Prospection* 9, 255–265.
- Cowley D.C., Standring R.A., Abicht M.J. 2010. Landscapes through the lens: An introduction. W: D.C. Cowley, R.A. Standring, M.J. Abicht (red.), *Landscapes through the lens: Aerial photographs and the historic environment*. Oxford: Oxbow Books, 1–6.
- Cowley D.C. et al. 2018. UAVs in Context: Archaeological Airborne Recording in a National Body of Survey and Record. *Drones* 2(1), 2. <https://doi.org/10.3390/drones2010002>.
- Crawford O.G.S. 1923. Air Survey and Archaeology. *The Geographical Journal* 61(5), 342–360.

Crawshaw A. 1995. Oblique Aerial Photography – Aircraft, Cameras and Films. W: J. Kunow (red.), *Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa*. Potsdam: Brandenburgisches Landesmuseum für Ur- und Frühgeschichte, 67–76.

Czarnecki J. 2019. Archiwalne zdjęcia zwiadowcze – rozpoznanie lotnicze oraz rola samolotów w czasie bitwy nad Rawką i Bzurą 1914–1915. W: A. Zalewska (red.), *Archeologiczne przywracanie pamięci o Wielkiej Wojnie w rejonie Rawki Bzury (1914–1915)*, Warszawa: Instytut Archeologii i Etnologii PAN, 181–196.

Dziewanowski M., Żuk L. 2005. Zaległości „nie do odrobienia”? Przyczynek do przydatności zdjęć lotniczych w badaniach terenowych na przykładzie stanowiska 5 w Mierzynie, woj. zachodniopomorskie. W: J. Nowakowski, A. Prinke, W. Rączkowski (red.), *Biskupin... i co dalej? Zdjęcia lotnicze w polskiej archeologii*, Poznań: IP UAM, OODA, MAB, PPT, 327–335. https://archo.amu.edu.pl/__data/assets/pdf_file/0026/110996/6_07_Dziewanowski_Zuk.pdf.

Fenner V.E.P. 1995. The Thames Valley Project. A pilot project for England's National Mapping Programme. W: J. Kunow (red.), *Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa*. Potsdam: Brandenburgisches Landesmuseum für Ur- und Frühgeschichte, 93–101.

Gojda M. 1995. Zum Projekt der Luftbildarchäologie in Böhmen, Konzeption und Methoden. W: J. Kunow (red.), *Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa*. Potsdam: Brandenburgisches Landesmuseum für Ur- und Frühgeschichte, 199–208.

Hanson W.S., Oltean I. A. 2013. A Spy in the Sky: The Potential of Historical Aerial and Satellite Photography for Archaeological Research. W: W. S. Hanson, I. A. Oltean (red.), *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*. Dordrecht: Springer, 3–10.

Haigh J.G.B. 1995. The current development of the AERIAL program. W: J. Kunow (red.), *Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa*. Potsdam: Brandenburgisches Landesmuseum für Ur- und Frühgeschichte, 149–154.

Insall G.M. 1927. Woodhenge. *Antiquity* 1(1), 99–100.

Kijowska J., Kijowski A., Rączkowski W. 2010. Politics and landscape change in Poland c. 1940–2000. W: D.C. Cowley, R.A. Standring, M.J. Abicht (red.), *Landscapes through the lens: Aerial photographs and the historic environment*. Oxford: Oxbow Books, 155–166.

Kobyliński Z. 2005. *Archeologia lotnicza w Polsce. Osiem dekad wzlotów i upadków*. Warszawa: Państwowe Muzeum Archeologiczne.

Krzepkowski M., Moeglich M., Wroniecki P. (red.) 2017. *Dzwonowo. Średniowieczne zaginione miasto. Środowisko naturalne, zarys dziejów, badania nieinwazyjne*, t. I: *Środowisko naturalne, zarys dziejów, badania nieinwazyjne*. Wągrowiec: Muzeum Regionalne w Wągrowcu.

Musson C. 1994. *Wales from the Air: Patterns of Past and Present*. Aberystwyth: RCAHMS.

Musson C. 1995. Establishing a flying programme. W: J. Kunow (red.), *Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa*. Potsdam: Brandenburgisches Landesmuseum für Ur- und Frühgeschichte, 61–64.

Musson C., Palmer R., Campana S. (red.) 2013. *Flights into the Past. Aerial photography, photo interpretation and mapping for archaeology*. https://www.academia.edu/5467087/FLIGHTS_INTO_THE_PAST_Aerial_photography_photo_interpretation_and_mapping_for_archaeology.

Palmer R. 1995. Photo interpretation, mapping and AERIAL. W: J. Kunow (red.), *Luftbildarchäologie in Ost- und Mitteleuropa*. Potsdam: Brandenburgisches Landesmuseum für Ur- und Frühgeschichte, 33–41.

Rajewski, Z. 1960. Helikoptery w badaniach archeologicznych. *Wiadomości Archeologiczne* 26(3–4), 281–287.

Rączkowski W. 1996. Aerial reconnaissance and fieldwalking survey: British and Polish reality, *AARGnews* 12, 16–17.

Rączkowski W. 2002. *Archeologia lotnicza – metoda wobec teorii*. Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.

Rączkowski W. 2004. Dusty treasure: thoughts on a visit to The Aerial Reconnaissance Archives at Keele University (UK), *AARGnews* 29, 9–11.

Rączkowski W. 2005. To Overcome Infirmary. Current Approaches to Aerial Archaeology in Poland. W: J. Bourgeois, M. Meganck (red.), *Aerial Photography and Archaeology 2003. A Century of Information*. Ghent: Academia Press, 121–135.

Różycki S., Osińska-Skotak K., Świątek A. 2020. *Zdjęcia lotnicze Polski z okresu II wojny światowej*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Scollar I. 2002. Making Things Look Vertical. W: R.H. Bewley, W. Rączkowski (red.), *Aerial Archaeology. Developing Future Practice*. Amsterdam: IOS Press, 166–172.

Verhoeven G. et al. 2012. Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs, *Journal of Archaeological Science* 39, 2060–2070.

Verhoeven G. et al. 2013. Undistorting the Past: New Techniques for Orthorectification of Archaeological Aerial Frame Imagery. W: C. Corsi, B. Slapšak, F. Vermeulen (red.), *Good Practice in Archaeological Diagnostics*. Dordrecht: Springer, 31–67. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-01784-6_3.

Wilson D. 2000. *Air Photo Interpretation for Archaeologists*. Stroud: Tempus Publishing Ltd.

Zalewska A. I., Czarnecki J., Kiarszys G. 2019. *Krajobraz Wielkiej Wojny. Front nad Rawką i Bzurą (1914–1915) w świetle teledetekcji archeologicznej i źródeł historycznych*. Warszawa: Instytut Archeologii i Etnologii PAN.

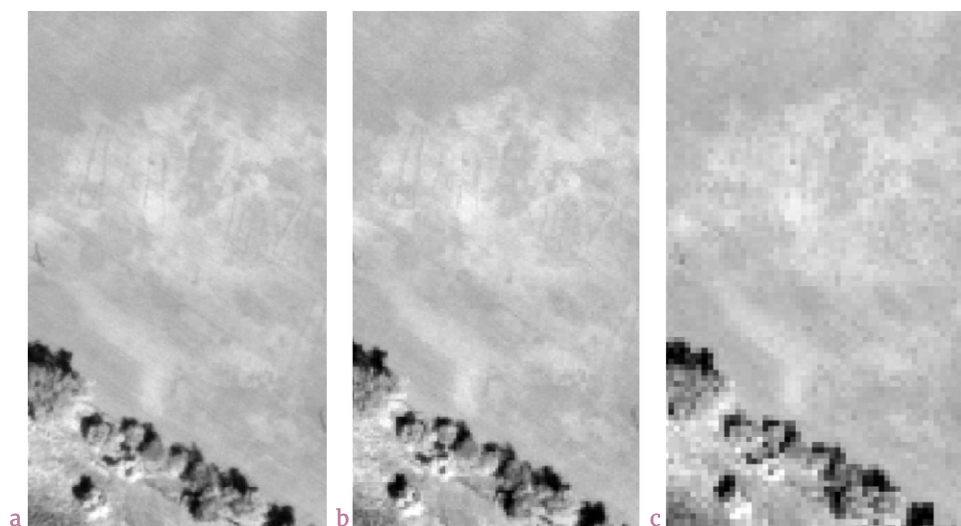
Katarzyna Osińska-Skotak, Włodzimierz Rączkowski

2.2. Zobrazowania satelitarne

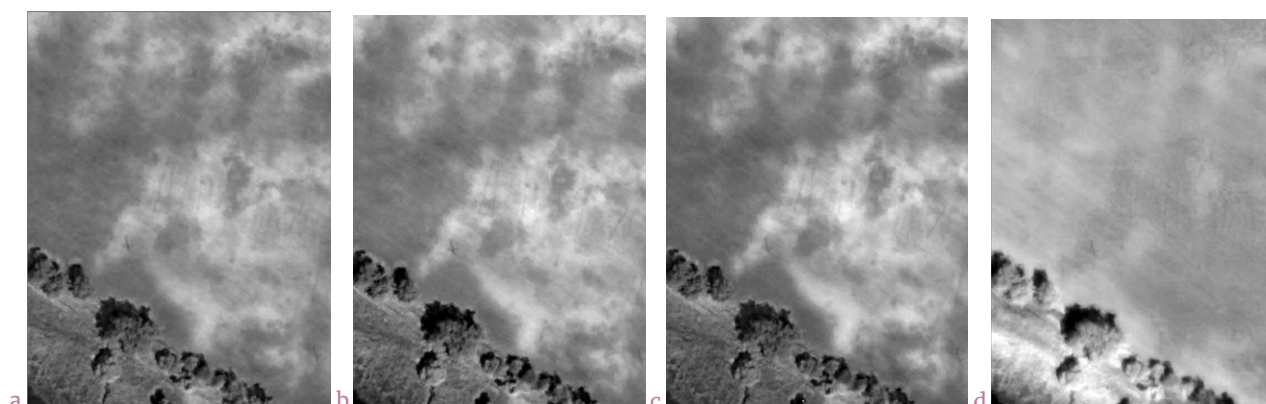
Od momentu wprowadzenia na orbitę okołoziemską pierwszego sztucznego satelity Ziemi upłynęło blisko 65 lat. Zobrazowania satelitarne pozyskiwane są więc od ponad sześciu dekad i dostarczają wiedzy o procesach zachodzących na powierzchni Ziemi, tuż pod nią, a także w przestrzeni powietrznej (badania atmosfery). Dzięki danym satelitarnym wiele dziedzin gospodarki i dyscyplin naukowych zyskało nową wiedzę i bogatą, stale uaktualnianą bazę danych o naszej planecie. Jedną z dyscyplin naukowych, która również je wykorzystuje, jest archeologia. W badaniach archeologicznych przydatne są zarówno dane historyczne, np. zdjęcia z amerykańskich misji wywiadowczych CORONA czy HEXAGON, jak i te najnowsze, pozyskiwane z wysokorozdzielczych optycznych systemów satelitarnych, np. WorldView czy Pleiades. Poza powszechnie stosowanymi zobrazowaniami optycznymi z pułapu satelitarnego rejestrowane są także inne – radarowe i termalne.

Zobrazowania satelitarne opisywane są za pomocą parametrów, które pozwalają na ocenę ich przydatności dla realizacji poszczególnych zadań. Są to następujące czynniki:

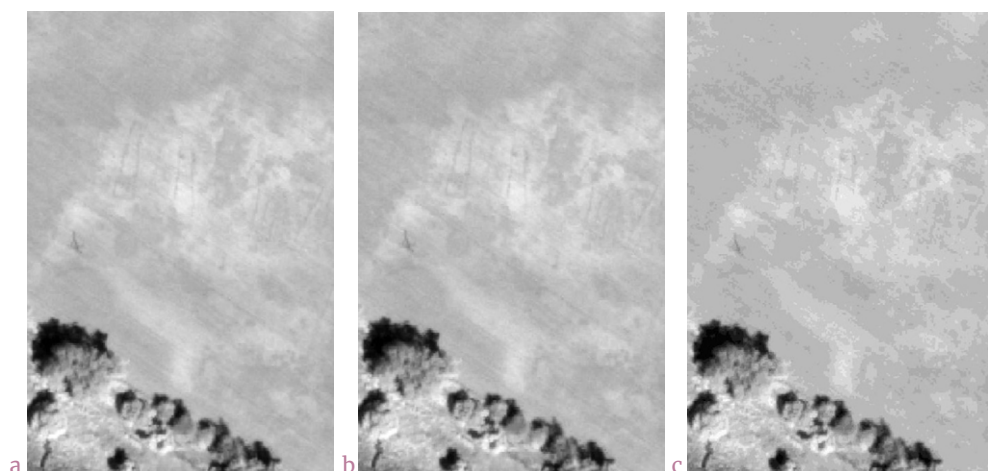
- > **rozdzielczość przestrzenna**, która często jest rozumiana równoznacznie z terenową wielkością piksela (picture element) zobrazowania, czyli najmniejszą, niepodzielną częścią obrazu cyfrowego. Obecnie stosowane jest określenie „terenowa odległość próbkowania” – GSD (Ground Sampling Distance). Wymiar terenowy piksela i GSD są w praktyce używane zamiennie, ale z formalnego punktu widzenia stanowią różne wielkości, co dotyczy wszystkich pułapów. GSD jest miarą dokładności rozróżniania szczegółów obrazu – im mniejszy jest terenowy rozmiar piksela, tym bardziej szczegółowa (pod względem geometrycznym) jest analiza zobrazowania (por. Ryc. 3.1).
- > **Rozdzielczość spektralna** najczęściej jest definiowana jako liczba i przedziały promieniowania rejestrowanego w poszczególnych kanałach spektralnych danego urządzenia obrazującego. Różne obiekty mają odmienne właściwości spektralne w poszczególnych zakresach promieniowania (zob. 1.1.3), dzięki czemu można je od siebie odróżnić i analizować ich cechy. Od tego, jakie zakresy promieniowania są pozyskiwane, zależy kwestia, czy będzie możliwe wykonanie określonej analizy (np. do oceny stanu roślinności niezbędne są zakresy podczerwone). Zakresy promieniowania widzialnego (podobnie jak w przypadku tradycyjnych zdjęć lotniczych) są niejednokrotnie wystarczające do identyfikacji struktur o własnej formie krajobrazowej, wyróżników glebowych bądź roślinnych (Ryc. 3.2). Inne zakresy spektralne (w tym podczerwień bliska, krótka czy termalna) z zastosowaniem rozmaitych algorytmów są wykorzystywane do identyfikacji innych cech wpływających na możliwość pośredniego wnioskowania o obecności reliktyw (chodzi tu np. o wilgotność gleby, obecność związków chemicznych). Duża liczba i różnicowanie zakresów promieniowania elektromagnetycznego pozwalają na analizę większej liczby typów i właściwości obiektów.
- > **rozdzielczość radiometryczna**, zwana także zakresem dynamicznym, to liczba poziomów szarości/wartości możliwych do uzyskania w konkretnym systemie zapisu obrazów cyfrowych. Zobrazowania te mogą być zapisywane w systemie 8- (256 odcieni szarości), 11- (2048 odcieni szarości), 12- (4096 odcieni szarości), 14- (16 384 odcieni szarości), a nawet 16-bitowym (65 536 odcieni szarości). Każdy z tych systemów umożliwia dokonanie zapisu obrazu z wykorzystaniem innej liczby odcieni szarości. Im więcej odcieni możemy zapisać, tym bardziej szczegółowe jest różnicowanie tonalne (wartości odbicia promieniowania) obiektów i ich właściwości (Ryc. 3.3).



Ryc. 3.1. Porównanie obrazów o różnych rozdzielczościach przestrzennych – a. 0,6 m × 0,6 m, b. 1 m × 1 m, c. 2 m × 2 m)



Ryc. 3.2. Porównanie obrazów zarejestrowanych w poszczególnych kanałach spektralnych – a. kanał niebieski, b. kanał zielony, c. kanał czerwony, d. kanał bliskiej podczerwieni



Ryc. 3.3. Porównanie obrazów o różnych rozdzielczościach radiometrycznych – a. 11 bitów (2048 odcieni), b. 8 bitów (256 odcieni), c. 4 bity (64 odcienie) (K. Osińska-Skotak)*

* W celu zilustrowania różnych aspektów pracy z optycznymi zobrazowaniami satelitarnymi wykorzystano dane pozyskane w ramach projektu ArchEO – *archaeological application of Earth Observation techniques* realizowanego przez Wasat Sp. z o.o. wraz z Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w latach 2014–2016, a finansowanego przez Europejską Agencję Kosmiczną.

- > **rozdzielczość czasowa**, nazywana także częstością repetycji, określa czas, jaki upływa między kolejnymi rejestracjami zobrazowania satelitarne dla tego samego obszaru. Obecnie zobrazowania satelitarne można pozyskiwać nawet codziennie (w przypadku konstelacji satelitów).

Wymienione tu parametry charakteryzujące zobrazowania rejestrowane przez poszczególne systemy satelitarne determinują ich przydatność do konkretnego zastosowania. W zależności od potrzeb (ukierunkowanie na analizę wyróżników roślinnych lub glebowych) należy dokonać właściwego wyboru danych. W przypadku badań dotyczących wyróżników roślinnych zobrazowania powinny obejmować przynajmniej kanały spektralne bliskiej podczerwieni, promieniowania czerwonego i zielonego. Dla wyróżników glebowych może być przydatne zarówno spektrum promieniowania widzialnego (RGB), jak i podczerwień bliska, krótka czy termalna. Na podstawie zakresu widzialnego uzyskuje się informację powierzchniową (np. o jasności i barwie gleby). Stosując szersze spektrum, można uzyskać także informację strukturalną (np. o wilgotności, temperaturze, składzie chemicznym). W sekcji 2.2.1.4. scharakteryzowano zobrazowania satelitarne z wybranych systemów.

2.2.1. Wielospektralne zobrazowania optyczne

2.2.1.1. Główne cechy zobrazowań wielospektralnych

Zobrazowania wielospektralne, zwane często multispektralnymi (*multispectral images*), składają się z kilku obrazów zarejestrowanych w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego, ale w tym samym momencie. Każdy taki pojedynczy obraz pozyskany w określonym przedziale promieniowania nazywany jest kanałem spektralnym. W przypadku techniki wielospektralnej zakres promieniowania rejestrowanego w pojedynczym kanale jest stosunkowo szeroki (50–200 nm). Zobrazowania tego rodzaju rejestrowane są przez większość optycznych systemów satelitarnych, m.in. system Landsat 7 ETM+

(7 kanałów spektralnych), Landsat 8 i 9 OLI (9 kanałów spektralnych), WorldView-2 (8 kanałów spektralnych), GeoEye-1 (4 kanały spektralne), Pleiades (4 kanały spektralne). Takie zobrazowania pozyskuje się również z pułapu lotniczego (tzw. fotogrametria lotnicza) i niskiego pułapu (UAV), przy czym obrazowanie z pułapów niższych pozwala na rejestrowanie obrazów o wielkości terenu piksela nawet rzędu pojedynczych centymetrów, co nie jest obecnie możliwe do uzyskania z pułapu satelitarnego. Rejestrując więcej węższych kanałów spektralnych, uzyskujemy zobrazowania superspektralne (kilkanaście kanałów spektralnych), a nawet hiperspektralne (kilkaset kanałów spektralnych).

Obrazowanie wielospektralne kojarzone jest na ogół z teledetekcją optyczną, jednak to określenie nie jest zarezerwowane dla obrazów optycznych (rejestrowane jest na nich promieniowanie słoneczne odbite od powierzchni Ziemi). Są także skanery wielospektralne (nawet hiperspektralne), które pozyskują zobrazowania w zakresie termalnym, np. skanery ASTER TIR, Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS), HypsIRI 8 TIR czy Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System (SEBASS).

2.2.1.2. Zastosowania zobrazowań satelitarnych w archeologii

Zalety spojrzenia na powierzchnię Ziemi z pewnej wysokości znane były od dawna i znalazły odzwierciedlenie w rozwoju archeologii lotniczej (por. rozdz. 2.1). Wyniesienie aparatu/sensora powyżej górnej warstwy atmosfery otworzyło nowe możliwości dla archeologów.

Pierwsze projekty satelitarne, w których istotnym elementem było wykonywanie zdjęć powierzchni Ziemi, to programy: CORONA (z misjami KH-1, KH-2, KH-3, KH-4, KH-4A i KH-4B w latach 1960–1972, NRO 1988), ARGON (z misją KH-5 w latach 1961–1964), LANYARD (z misją KH-6 w roku 1963), GAMBIT (z misją KH-7 w latach 1963–1967, NRO 1991) i HEXAGON (z misją KH-9 w latach 1973–1980, NRO 1992). Były to programy szpiegowskie, ale dostarczały

też wiele danych będących przedmiotem zainteresowania różnych dyscyplin naukowych oraz instytucji zarządzających przestrzenią (Ruffner 1995). Wiedza o tych programach i potencjale zdjęć satelitarnych wpływała na formułowanie nowych pomysłów i pytań badawczych. W praktyce archeologicznej te zobrazowania przez długi czas nie były wykorzystywane ze względu na ich niedostępność. Dopiero od 1995 roku, gdy zdjęcia pozyskane w ramach programów CORONA, ARGON i LANDYARD zostały odtajnione i w pełni udostępnione cywilnym użytkownikom, w tym archeologom, pojawiły się pierwsze opracowania z wykorzystaniem tego materiału (Fowler 1995; 1999; 2004; Kennedy 1998; Fowler i Fowler 2005; Philip et al. 2002). Nie oznacza to jednak, że archeolodzy dopiero wówczas zainteresowali się potencjałem zdjęć satelitarnych.

W 1972 roku rozpoczęła się misja LANDSAT realizująca zadania cywilne (Lauer, Morain, Salomonson 1997), co oznaczało także dostęp archeologów do tych danych. Rozdzielczość przestrzenna wynosiła wówczas około 80 m, a spektralna obejmowała cztery kanały. Zwłaszcza ten pierwszy parametr powodował, że uzyskiwana szczegółowość nie pozwalała na identyfikowanie miejsc z relikami. W latach 70. i 80. XX wieku zobrazowania LANDSAT wykorzystywano w tworzeniu map tematycznych (geologicznych, glebowych, pokrywy roślinnej i innych – np. Custer et al. 1986; Dorsett et al. 1984; Ebert 1989; Johnson 1996), używanych do planowania prognostycznego (*predictive modeling*), silnie obecnego w archeologii procesualnej i formułowaniu strategii ochrony dziedzictwa archeologicznego (np. Ebert, Lyons 1980; Ebert, Gutierrez 1981).

Kolejne cywilne programy kosmiczne prowadziły do poprawy rozdzielczości przestrzennej (SPOT – 20 m w trybie wielospektralnym, 10 m w trybie panchromatycznym; LANDSAT 7 – 30 m w trybie wielospektralnym, 15 m w trybie panchromatycznym), lecz w dalszym ciągu nie wzbudzały większego zainteresowania archeologów. Szerzej wykorzystywane były tylko na obszarach trudno dostępnych (np. Bliski Wschód) dla

identyfikacji kontekstów przestrzennych znanych miejsc i kompleksów.

Dopiero przełom XX i XXI wieku przyniósł istotną zmianę. Z jednej strony udostępnione zostały zdjęcia z programu CORONA (i stopniowo kolejne), a z drugiej – organizowano kolejne misje cywilne z sensorami o coraz to większej rozdzielczości przestrzennej (IKONOS – 1 m; QuickBird – 0,6 m, SPOT 5 – 2,5–5 m) i spektralną (np. Lasaponara, Masini 2007). Szczególnie istotna była rozdzielczość przestrzenna zdjęć z programu CORONA, która osiągała od 1,2 do 10 m, czyli porównywalne wartości jak w przypadku zobrazowań komercyjnych z początku XXI wieku (Beck et al. 2007; Casana, Cothorn 2008; Ur 2003; Gheyle et al. 2004).

Archeolodzy szybko rozpoznali potencjał zdjęć/zobrazowań satelitarnych o takiej rozdzielczości przestrzennej. Obecnie mamy do czynienia przynajmniej z dwoma kierunkami wykorzystywania zobrazowań satelitarnych. Jeden wiąże się z wysokorozdzielczymi zobrazowaniami komercyjnymi (np. WorldView, GeoEye, QuickBird), w których rozdzielczość dochodzi nawet do 0,25 m. Drugi wiąże się z ogólnodostępnymi zobrazowaniami (np. Sentinel-2A i 2B), których rozdzielczość przestrzenna wynosi 10 m (w czterech kanałach spektralnych). Pierwszy z wymienionych kierunków prowadzi do skupiania uwagi na tradycyjnych pytaniach archeologów typu co i gdzie. Umożliwia to tylko poszukiwanie miejsc występowania relików, określanie ich zasięgu, funkcji i ewentualnie chronologii. To klasyczne powielenie pytań archeologii kulturowo-historycznej, często obecnych także w archeologii lotniczej. Inne pytania oraz aplikacje dotyczą: 1) identyfikacji procesów podepozycyjnych i oceny ich wpływu na stan relików, 2) mapowania identyfikowanych relików, 3) monitorowania procesów naturalnych i kulturowych w rejonie występowania relików, 4) analiz przestrzennych udokumentowanych śladów, 5) tworzenia modeli 3D z wykorzystaniem par stereoskopowych zobrazowań, m.in. zastosowania zdjęć z programu CORONA lub wysokorozdzielczych systemów satelitarnych, 6) analiz zniszczeń wynikających z rabunków prowadzonych

w strefach już rozpoznanych jako dziedzictwo archeologiczne (tzw. looting – zob. Fowler 2010; Lasaponara, Masini 2012; Agapiou, Alexakis, Sarris, Hadjimitsis 2014; Tapete 2018; 2019; Tapete, Cigna 2019a; 2019b; Agapiou, Lysandrou, Hadjimitsis 2017). Zobrażenia wiążące się z drugim kierunkiem często nie dotyczą wprost obserwowanych reliktyw. Są wykorzystywane na etapie decyzji podejmowanych przez archeologów. Chodzi tu np. o: 1) wstępne rozpoznanie warunków prowadzenia badań powierzchniowych (charakter roślinności i użytkowania terenu), 2) ocenę stanu zaawansowania wegetacji i w konsekwencji perspektyw pojawienia się wyróżników roślinnych, 3) sprawdzenie możliwości identyfikacji wyróżników glebowych (brak obecności roślin na polach). W polityce konserwatorskiej coraz częściej podejmowane są inicjatywy wykorzystania zobrażeń z Sentinel-a czy LANDSAT-a w: 1) monitorowaniu form i kierunków oddziaływań kulturowych – procesy urbanizacyjne, zalesienia, intensywne rolnictwo, działania wojenne, rozwój infrastruktury, działania właścicieli zabytków itp., a także 2) monitorowaniu i ocenie zagrożeń oraz zniszczeń wynikających z procesów naturalnych – erozja, intensywne opady, powodzie, pożary, trzęsienia ziemi, osuwiska itp. (np. Tapete, Cigna 2018). W tej drugiej grupie zadań szczególną rolę odgrywa duża rozdzielczość czasowa zobrażeń, czyli dostępność nowych danych w sekwencjach kilkudniowych. Umożliwia to wręcz monitorowanie wybranych obszarów w czasie rzeczywistym i prognozowanie. Pamiętać należy, że nie każde zobrazenie będzie przydatne do analizy, ponieważ w naszych szerokościach geograficznych największym problemem w pozyskiwaniu zobrażeń optycznych jest zachmurzenie, co wpływa na możliwość pozyskania danych w określonym odstępie czasowym.

Istotną cechą wykorzystywania zobrażeń satelitarnych w archeologii jest skupienie uwagi na kanale panchromatycznym i zobrażowaniu

(kompozycji barwnej) w barwach naturalnych (RGB). Analiza zobrażeń satelitarnych nawiązywała do długiej tradycji wypracowanej w archeologii lotniczej i pracy ze zdjęciami lotniczymi. Zobrażenia satelitarne dają możliwość analizowania danych pozyskanych w różnych kanałach spektralnych, co otwiera nowe pole do analiz dotyczących np. charakteru wyróżników roślinnych, a także charakterystyk specyficznych stref o odmiennych cechach spektralnych.

Nowe możliwości otwierają się przed satelitarnymi zobrażowaniami radarowymi, których wielką zaletą jest zbieranie danych niezależnie od oświetlenia (czyli np. w nocy) oraz przy zachmurzeniu (np. Stewart 2017; Tapete, Cigna, Donoghue 2016; Tapete, Cigna 2019a; Lasaponara, Masini 2013). Przetwarzanie takich informacji to bardziej złożone zadanie, a interpretacja okazuje się trudniejsza, lecz są już prowadzone intensywne doświadczenia w kierunku identyfikacji reliktyw i/lub monitorowania zmian, w tym w sferze badawczej.

2.2.1.3. Przegląd i charakterystyka zobrażeń satelitarnych

2.2.1.3.1. Sentinel-2

Od roku 2014 satelity serii Sentinel, stanowiące jeden z elementów programu Copernicus prowadzonego przez Europejską Agencję Kosmiczną, są i będą sukcesywnie umieszczane na orbitach okołoziemskich. Pozyskują one dane dla różnorodnych potrzeb ukierunkowanych na badania powierzchni lądów, roślinności, wód śródlądowych, morskich i przybrzeżnych, a także badania atmosfery ziemskiej i monitorowania zmian klimatu. Ponieważ dane z programu Copernicus są udostępniane nieodpłatnie, stanowią jedno z podstawowych źródeł danych teledetekcyjnych i przyspieszają rozwój aplikacji geoinformatycznych, w tym aplikacji do automatycznego monitorowania zmian powierzchni Ziemi.

³ Wprowadzenie na orbitę kolejnych satelitów serii Sentinel-2 jest planowane na 2024 r. (Sentinel-2C) i 2025 r. (Sentinel-2D), https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sentinel-2.htm.

Obecnie na orbicie okołoziemskiej pracują dwa bliźniacze satelity – Sentinel-2A i Sentinel-2B. Pierwszy został wprowadzony na orbitę 23 czerwca 2015 roku, a drugi 7 marca 2017 roku³. Dzięki temu, że oba systemy pozyskują zobrazenia wielospektralne o identycznych parametrach, zwiększyła się częstość obrazowania – w przypadku średnich szerokości geograficznych zobrazenia tego samego obszaru są dostępne co 3 dni. Rejestrowane są one w 13 zakresach spektralnych, obejmujących promieniowanie widzialne, bliską i średnią podczerwień (Tabela 1). Wielkość terenowa piksela obrazów w poszczególnych zakresach spektralnych jest zróżnicowana – obrazy w kanale niebieskim, zielonym, czerwonym i bliskiej podczerwieni rejestrowane są z rozdzielczością

przestrzenną 10 m × 10 m, w przypadku średniej podczerwieni rozdzielczość przestrzenna osiąga niższe wartości: 20 m × 20 m (6 kanałów spektralnych) oraz 60 m × 60 m (3 zakresy spektralne). Szerokość pasa skanowania wynosi 290 km, a zobrazenia są udostępniane jako tzw. granule. Biorąc pod uwagę terenową wielkość piksela tych zobrażeń, najbardziej przydatne dla badań archeologicznych w Polsce będą kanały spektralne: B2 (kanał niebieski), B3 (kanał zielony), B4 (kanał czerwony) oraz B8 (kanał bliskiej podczerwieni).

Zobrazowania z satelitów Sentinel-2 są udostępniane w postaci dwóch typów produktów (L1C i L2A) na platformie SCI HUB⁵. Aby przeglądać dane i je pobierać, należy być zarejestrowanym użytkownikiem.

Tabela 1. Charakterystyka zobrażeń satelitarnych rejestrowanych przez skaner MSI umieszczony na satelitach Sentinel-2⁴

Oznaczenie kanału spektralnego	Zakresy spektralne [µm]	Wielkość piksela [m]	Rozdzielczość radiometryczna [bit]	Szerokość pasa skanowania
MultiSpectral Instrument (MSI)				
B1 – Coastal aerosol	0,433–0,453	60 × 60	12	290
B2 – Blue	0,457–0,522	10 × 10		
B3 – Green	0,542–0,577	10 × 10		
B4 – Red	0,650–0,680	10 × 10		
B5 – Vegetation Red Edge	0,698–0,713	20 × 20		
B6 – Vegetation Red Edge	0,733–0,748	20 × 20		
B7 – Vegetation Red Edge	0,773–0,793	20 × 20		
B8 – NIR	0,785–0,900	10 × 10		
B8A – Vegetation Red Edge	0,855–0,875	20 × 20		
B9 – Water vapour	0,935–0,955	60 × 60		
B10 – SWIR – Cirrus	1,365–1,395	60 × 60		
B11 – SWIR	1,565–1,655	20 × 20		
B12 – SWIR	2,100–2,280	20 × 20		

⁴ Opracowano na podstawie <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/>.
⁵ <https://scihub.copernicus.eu/>.

2.2.1.3.2. Zobrażenia o bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej (VHRS)

Era obrazowania powierzchni Ziemi w tzw. bardzo dużej rozdzielczości (Very High Resolution) rozpoczęła się od wprowadzenia na orbitę okołoziemską satelity IKONOS, co nastąpiło 24 września 1999 roku. Ten komercyjny satelita jako pierwszy pozyskiwał tzw. zobrażenia wysokorozdzielcze, czyli takie, których terenowy wymiar piksela był mniejszy niż 1 m × 1 m. Od tego czasu nastąpił znaczący rozwój i obecnie najwyższą rozdzielczością przestrzenną (25 cm × 25 cm) cechują się zobrażenia panchromatyczne pozyskiwane przez satelitę CartoSat-3 (Tabela 2). Większość systemów wysokorozdzielczych

pozyskuje zobrażenia w dwóch trybach – panchromatycznym (rejestrowanie jednego szerokopasmowego zakresu promieniowania widzialnego, ewentualnie rozszerzonego o fragment podczerwieni bliskiej) oraz wielospektralnym (rejestrowanie kilku szerokopasmowych zakresów promieniowania). W trybie wielospektralnym większość systemów pozyskuje zobrażenia w czterech zakresach spektralnych: niebieskim, zielonym, czerwonym i bliskiej podczerwieni. Jedynie WorldView-2 i WorldView-3 obrazują powierzchnię Ziemi w większej liczbie kanałów spektralnych. Podstawowe parametry techniczne zobrażeń satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej z wybranych systemów przedstawia Tabela 2.

Tabela 2. Charakterystyka zobrażeń wybranych systemów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej⁷

Nazwa satelity	Okres działania	Zakresy spektralne [µm]	Nominalna wielkość piksela [m]	Rozdzielczość radiometryczna [bit]
Ikonos ⁸	24.09.1999 – 31.03.2015	PAN: 0,450–0,900 MS: 0,450–0,530 0,520–0,610 0,640–0,720 0,760–0,860	PAN: 0,82 × 0,82 MS: 3,28 × 3,28	11
QuickBird ⁹	18.10.2001 – 27.01.2015	PAN: 0,450–0,900 MS: 0,450–0,520 0,520–0,600 0,630–0,690 0,760–0,900	PAN: 0,61 × 0,61 MS: 2,44 × 2,44	11
OrbView-3 ¹⁰	26.06.2003 – 13.03.2011	PAN: 0,450–0,900 MS: 0,450–0,520 0,520–0,600 0,625–0,695 0,760–0,900	PAN: 1 × 1 MS: 4 × 4	11

⁷ Opracowano na podstawie informacji zawartych na stronach internetowych Europejskiej Agencji Kosmicznej, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/> oraz Satellite Imaging Corporation, <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/>.
⁸ <https://resources.maxar.com/data-sheets/ikonos>.
⁹ <https://resources.maxar.com/data-sheets/quickbird>.
¹⁰ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/orbview-3>.

Nazwa satelity	Okres działania	Zakresy spektralne [μm]	Nominalna wielkość piksela [m]	Rozdzielczość radiometryczna [bit]
FORMOSAT-2 ¹¹	19.05.2004 – 08.2016	PAN: 0,450–0,900 MS: 0,450–0,520 0,520–0,600 0,630–0,690 0,760–0,900	PAN: 2 × 2 MS: 8 × 8	11
KOMPSAT-2 ¹²	28.07.2006 – 21.03.2014	PAN: 0,500–0,900 MS: 0,450–0,520 0,520–0,600 0,630–0,690 0,760–0,900	PAN: 1×1 MS: 4×4	10
CartoSat-2 ¹³	10.01.2007 – obecnie	PAN: 0,450–0,850	PAN: 0,8 × 0,8	11
WorldView-1 ¹⁴	18.09.2007 – obecnie	PAN: 0,400–0,800	PAN: 0,50 × 0,50	11
GeoEye-1 ¹⁵	6.09.2008 – obecnie	PAN: 0,450–0,900 MS: 0,450–0,510 0,520–0,580 0,655–0,690 0,780–0,920	PAN: 0,41 × 0,41 MS: 1,64 × 1,64	11
WorldView-2 ¹⁶	08.10.2009 – obecnie	PAN: 0,450–0,800 MS: 0,400–0,450 0,450–0,510 0,510–0,580 0,585–0,625 0,630–0,690 0,705–0,745 0,770–0,895 0,860–1,040	PAN: 0,46 × 0,46 MS: 1,84 × 1,84	11
CartoSat-2A ¹⁷ CartoSat-2B ¹⁸	28.04.2008 – obecnie 12.07.2010 – obecnie	PAN: 0,450–0,850	PAN: 0,8 × 0,8	10
PLEIADES-1A PLEIADES-1B ¹⁹	17.12.2011 – obecnie 02.12.2012 – obecnie	PAN: 0,480–0,830 MS: 0,430–0,550 0,490–0,610 0,600–0,720 0,750–0,950	PAN: 0,7 × 0,7 MS: 2,0 × 2,0	12
KOMPSAT-3 ²⁰	17.05.2012 – obecnie	PAN: 0,450–0,900 MS: 0,450–0,520 0,520–0,600 0,630–0,690 0,760–0,900	PAN: 0,7 × 0,7 MS: 2,8 × 2,8	14

¹¹ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/formosat-2>.

¹² <https://earth.esa.int/eogateway/catalog/kompsat-2-esa-archive>.

¹³ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cartosat-2>.

¹⁴ <https://resources.maxar.com/data-sheets/worldview-1>.

¹⁵ <https://resources.maxar.com/data-sheets/geoeye-1>.

¹⁶ <https://resources.maxar.com/data-sheets/worldview-2>.

¹⁷ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cartosat-2a>.

¹⁸ <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cartosat-2b>.

¹⁹ <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Pleiades-Imagery-User-Guide.pdf/a7082657-3d73-02d2-9c9a-d7b84e44dd61>.

²⁰ <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/kompsat-3>.

Nazwa satelity	Okres działania	Zakresy spektralne [µm]	Nominalna wielkość piksela [m]	Rozdzielczość radiometryczna [bit]
SPOT 6 SPOT 7 ²¹	09.09.2012 – obecnie 30.06.2014 – obecnie	PAN: 0,450–0,745 MS: 0,455–0,525 0,530–0,590 0,625–0,695 0,760–0,890	PAN: 1,5 × 1,5 MS: 6 × 6	12
WorldView-3 ²²	13.08.2014 – obecnie	PAN: 0,450–0,800 SWIR:1,195-1,225 MS: 0,400–0,450 1,550-1,590 0,450–0,510 1,640-1,680 0,510–0,580 1,710-1,750 0,585–0,625 2,145-2,185 0,630–0,690 2,185-2,225 0,705–0,745 2,235-2,285 0,770–0,895 2,295-2,365 0,860–1,040	PAN: 0,31 × 0,31 MS: 1,24 × 1,24 SWIR: 3,7 × 3,7	PAN: 11 MS: 11 SWIR: 14
KOMPSAT-3A	25.03.2015 – obecnie	PAN: 0,450–0,900 MS: 0,450–0,520 0,520–0,600 0,630–0,690 0,760–0,900	PAN: 0,5 × 0,5 MS: 2,0 × 2,0	14
WorldView-4 ²³	11.11.2016 – 30.11.2021	PAN: 0,450–0,800 MS: 0,450–0,510 0,510–0,580 0,655–0,690 0,780–0,920	PAN: 0,31 × 0,31 MS: 1,24 × 1,24	11
CartoSat-3	27.11.2019 – obecnie	PAN: 0,50–0,75 MS: 0,45–0,52 0,52–0,59 0,62–0,68 0,77–0,86	PAN: 0,25 × 0,25 MS: 1,2 × 1,2	11
SkySat ²⁴ (21 satelitów)	21.11.2013 – obecnie	PAN: 0,450–0,900 MS: 0,450–0,515 0,515–0,595 0,625–0,695 0,740–0,900	PAN: 0,86 × 0,57 MS: 1,0 × 0,75	11
JL-1GXA	7.10.2015 – obecnie	PAN: 0,500–0,800 MS: 0,450–0,520 0,520–0,600 0,630–0,690 0,700–0,800	PAN: 0,72 MS: 2,88	10
JL-1KF01/ JL-1KF01B	15.01.2020 – obecnie 3.07.2021 – obecnie	PAN: 0,450–0,800 MS: 0,450–0,510 0,510–0,580 0,630–0,690 0,770–0,895	PAN: 0,50 MS: 2,00	12
JL-GF03A / JL-1GF03B01, 02,03,04,05,06/ JL1 GF03D1,2,3 ²⁵	od 5.06.2019	PAN: 0,470–0,800 MS: 0,450–0,510 0,510–0,580 0,630–0,690 0,770–0,895	PAN: 0,98–1,06 MS: 3,92–4,24	12

²¹ <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SPOT-6-7-imagery-user-guide.pdf>.

²² <https://resources.maxar.com/data-sheets/worldview-3>.

²³ <https://resources.maxar.com/data-sheets/worldview-4>.

²⁴ <https://earth.esa.int/eogateway/missions/skysat>.

²⁵ Rejestracja obrazowań dwa razy dziennie w konstelacji.

2.2.1.4. Charakterystyka poziomów produktów obrazowych udostępnianych przez dystrybutorów

Zobrazowania satelitarne udostępniane są na różnych poziomach przetworzenia. Niektóre z nich to dane przeznaczone dla użytkowników zaawansowanych, którzy mają wiedzę i doświadczenie z zakresu fotogrametrii oraz teledetekcji i mogą samodzielnie przetworzyć zobrazowanie tak, aby było ono jak najlepiej przygotowane do ich potrzeb. Druga grupa zobrazowań to dane przeznaczone dla użytkowników, którzy mają podstawową wiedzę na temat przetwarzania zobrazowań satelitarnych, są specjalistami z innych dziedzin i wykorzystują je w aplikacjach tematycznych. Dla nich najbardziej przydatne okazują się produkty będące ortoobrazami bądź ortofotomapami, które stanowią materiał w pełni kartometryczny w określonym odwzorowaniu kartograficznym i układzie współrzędnych. Są to produkty pozbawione

niekształceń geometrycznych i radiometrycznych (które mają zobrazowania źródłowe, surowe), gotowe do dalszych prac analitycznych.

Większość operatorów systemów satelitarnych udostępnia produkty na podobnych poziomach przetworzenia, ale często z odmiennymi oznaczeniami (Tabela 3). Dla użytkowników z zaawansowaną wiedzą na temat wstępnego przetwarzania zobrazowań satelitarnych przeznaczone są produkty poziomu pierwszego (oznaczane jako Level 1 lub L1), ale również – w zależności od operatora systemu – mogą to być niektóre produkty poziomu drugiego (oznaczane jako Level 2 lub L2). Takie produkty, z oznaczeniami 2A lub OR2A, oferuje np. firma MAXAR Technologies, a użytkownik musi je samodzielnie zortorektyfikować. Przed dokonaniem wyboru i ewentualnego zakupu zobrazowań satelitarnych warto więc zaznajomić się ze specyfiką dystrybuowanych produktów obrazowych, aby uniknąć późniejszych problemów z ich przygotowaniem do dalszych analiz. Użytkownicy z podstawowymi

Tabela 3. Poziomy produktów satelitarnych vs. poziom zaawansowania użytkownika

Właściciel	System satelitarny	Poziomy produktów satelitarnych udostępniane przez operatorów poszczególnych systemów	
		Użytkownik zaawansowany – specjalista z zakresu fotogrametrii i teledetekcji	Użytkownik z podstawową znajomością zagadnień fotogrametrii i teledetekcji
ESA	Sentinel-2	L1C	L2A
MAXAR Technologies	WorldView	> System-Ready imagery (1B) > View-Ready imagery (2A) <ul style="list-style-type: none"> • Standard (2A) • Ortho Ready Standard (OR2A) 	Map-ready imagery (Ortho) – 3D
	GeoEye		
	QuickBird		
	IKONOS		
AIRBUS Defences& Space	Plejades	> Primary (Radiometria: Basic lub Reflectance) > Projected (Radiometria: Basic lub Reflectance)	> Ortho <ul style="list-style-type: none"> • Standard Ortho (Radiometria: Basic lub Reflectance) • Tailored Ortho (Radiometria: Basic lub Reflectance) • Premium Ortho (Radiometria: Basic lub Reflectance)
	SPOT		

umiejętnościami i zasadniczą wiedzą powinni korzystać z produktów poziomu 3 (zwykle oznaczanych jako Ortho albo Level 3 lub L3) w przypadku zobrazowań wysokorozdzielczych i poziomu 2A w przypadku zobrazowań Sentinel-2 (Tabela 3).

Syntetyczny opis poszczególnych produktów obrazowych udostępnianych przez Europejską Agencję Kosmiczną i dystrybuowanych przez wiodących operatorów komercyjnych systemów satelitarnych – MAXAR Technologies i AIRBUS Defence&Space – przedstawiono w tabelach 4–6.

Tabela 4. Poziomy udostępnianych produktów obrazowych Sentinel-2

Poziom przetwarzania	Opis produktu
Level 1C (L1C) ²⁶	Produkt po korekcji radiometrycznej i geometrycznej (w tym ortorektyfikacji) udostępniany w postaci obrazu odbicia spektralnego rejestrowanego na górnej granicy atmosfery (Top-Of-Atmosphere – TOA) w układzie współrzędnych UTM na elipsoidzie odniesienia WGS84. Produkty tego poziomu zawierają dodatkowo maskę chmur i dane ECMWF charakteryzujące stan atmosfery: całkowita kolumna ozonu, całkowita kolumna pary wodnej i średnie ciśnienie na poziomie morza.
Level 2A (L2A) ²⁷	Produkt po korekcji radiometrycznej, geometrycznej i atmosferycznej udostępniany w postaci ortoobrazu odbicia spektralnego na poziomie gruntu (Bottom-Of-Atmosphere – BOA), w układzie współrzędnych UTM na elipsoidzie odniesienia WGS84. Dodatkowo dołączane są: mapa grubości optycznej aerozolu (AOT), mapa pary wodnej (WV) i mapa klasyfikacji sceny (SCM) wraz ze wskaźnikami jakości (QI) dla prawdopodobieństwa występowania zachmurzenia i śniegu w rozdzielczości 60 m.

Tabela 5. Charakterystyka produktów dystrybuowanych przez firmę MAXAR Technologies

Nazwa produktu	Poziom przetworzenia	Opis produktu
System-Ready Imagery (Basic) ²⁸	1B	System-Ready Imagery to najmniej przetworzony obraz z wykonanymi korekcjami zniekształceń radiometrycznych. Dokonywana jest korekcja geometrii wewnętrznej, zniekształceń optycznych i funkcji przenoszenia sygnału sensora (tzw. kalibracja sensora). Produkt jest dostarczany ze wszystkimi plikami danych pomocniczych obrazu, potrzebnymi do przetwarzania fotogrametrycznego, w tym efemerydami położenia satelity, danymi do kalibracji geometrycznej, modelem kamery, metadanymi obrazu, danymi radiometrycznymi i współczynnikami RPC.
View-Ready Imagery – Standard ²⁹	2A	Produkt zawiera korekcje analogiczne jak poziom 1B, a dodatkowo jest znormalizowany ze względu na rzeźbę terenu (stosuje się NMT średniej rozdzielczości).
View-Ready Imagery – Ortho ³⁰	OR2A	Produkt zawiera korekcje analogiczne jak poziom 1B i jest przygotowany do ortorektyfikacji z wykorzystaniem dowolnego NMT.
Map-Ready Imagery (Ortho) ³¹	3D	Produkt po ortorektyfikacji, w pełni kartometryczny (w odwzorowaniu kartograficznym UTM na elipsoidzie odniesienia WGS84), zawierający wszystkie wymagane korekcje geometryczne i radiometryczne (na zamówienie może zostać także wykonana korekcja atmosferyczna).

²⁶ <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-1>.
²⁷ <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>.
²⁸ <https://resources.maxar.com/optical-imagery/system-ready-imagery-data-sheet>.
²⁹ <https://resources.maxar.com/optical-imagery/view-ready-imagery-data-sheet>.
³⁰ Tamże
³¹ <https://resources.maxar.com/optical-imagery/map-ready-imagery-data-sheet>.

Tabela 6. Charakterystyka produktów dystrybuowanych przez firmę AIRBUS Defences & Space³²

		Poziom przetworzenia pod względem radiometrii obrazu			Opis produktu
Poziom przetworzenia pod względem geometrii obrazu	Primary	Basic	Reflectance	Display	Produkt po korekcji radiometrycznej oraz geometrycznej, które przywracają poprawną geometrię rejestracji obrazu (wprowadzane są poprawki efemeryd wynikające z perturbacji lotu satelity) oraz usuwają dyktorsje radiometryczne. Dzięki temu obrazy panchromatyczny i wielospektralny są spójne geometrycznie. Zobrazowanie dostarczane jest w układzie współrzędnych geograficznych WGS84.
	Projected				Produkt po korekcjach analogicznych jak w przypadku produktu poziomu Primary. Ma nadaną georeferencję w układzie kartograficznym przy założeniu stałej wysokości odniesienia, ale nie jest poddane ortorektyfikacji. Zobrazowanie standardowo dostarczane jest w układzie współrzędnych kartograficznych UTM na elipsoidzie odniesienia WGS84.
	Ortho				Standard Ortho to produkt po korekcji radiometrycznej i geometrycznej, analogicznej jak produkt Primary, a dodatkowo poddany ortorektyfikacji z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu Reference3D lub SRTM. Produkt w pełni kartometryczny udostępniany standardowo w układzie współrzędnych kartograficznych UTM na elipsoidzie odniesienia WGS84.
	– Standard Ortho – Tailored Ortho – Premium Ortho				W przypadku produktu Tailored Ortho ortorektyfikacja jest wykonywana z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu wysokiej jakości, dostarczanego przez klienta.
Opis produktu		Produkt po korekcji radiometrycznej, obejmującej kalibrację sensora. Wartości pikseli w zapisie 12-bitowym lub na zamówienie w 8-bitowym.	Zobrazowanie po korekcji radiometrycznej (kalibracji sensora) i uwzględnieniu wpływu rozpraszania promieniowania w atmosferze (molekularna lub Rayleigha). Inne efekty atmosferyczne nie są usuwane. Wartości pikseli są podawane w znormalizowanych wartościach odbicia spektralnego na poziomie gruntu.	Produkt poddany wzmocnieniu kontrastu w celu uzyskania jak najlepszego efektu wizualnego. Wartości pikseli nie są oryginalnymi wartościami. Obraz dostarczany jest w zapisie 8-bitowym.	

W przypadku produktów pochodzących z satelitów wysokorozdzielczych (np. WorldView, GeoEye, Pleiades) zobrazowania można zamówić w różnej postaci:

- > obrazu panchromatycznego;
- > obrazu wielospektralnego, z wszystkimi kanałami spektralnymi;
- > obrazu 4- (R, G, B, NIR) lub 3-kanałowego, kompozycja w barwach naturalnych (R, G, B) lub w barwach fałszywych (G, R, NIR);
- > obrazu typu Pansharpen, czyli po integracji zobrazowania panchromatycznego i wielospektralnego, 4- (R, G, B, NIR) lub 3-kanałowego, kompozycja w barwach naturalnych (R, G, B) lub w barwach fałszywych (G, R, NIR).

³² Opracowano na podstawie SPOT Imagery User Guide (AIRBUS, 06.2019, dostęp: 31.03.2022) oraz Pléiades Imagery User Guide (AIRBUS, 15.04.2021, dostęp: 31.03.2022).

2.2.1.5. Przetwarzanie obrazów wielospektralnych

Surowe zobrazowania satelitarne obarczone są różnego rodzaju zniekształceniami geometrycznymi i radiometrycznymi (por. rozdz. 2.2.1.4). Wynikają one m.in. ze specyfiki obrazowania, wpływu zakrzywienia powierzchni Ziemi, ruchu obrotowego planety, deniwelacji rzeźby terenu, niedoskonałości detektorów (różnego przebiegu funkcji przenoszenia sygnału), dystorsji optycznych czy szumów instrumentalnych. Większość wymienionych zniekształceń jest eliminowana na etapie wstępnego przetwarzania obrazu przez operatora systemu – dotyczy to szczególnie najwyższych poziomów udostępnianych produktów. Użytkownik otrzymuje wówczas produkt, który sam może dalej przetwarzać według potrzeb uzależnionych od celu pracy czy prowadzonych badań. Przetwarzanie cyfrowe zobrazowań zdalnych obejmuje szereg metod, które uwypuklają bądź wygaszają widoczność różnych cech obiektów czy zjawisk, a ta widoczność jest kluczowa w analizach wizualnych reliktyw. Są to między innymi następujące metody:

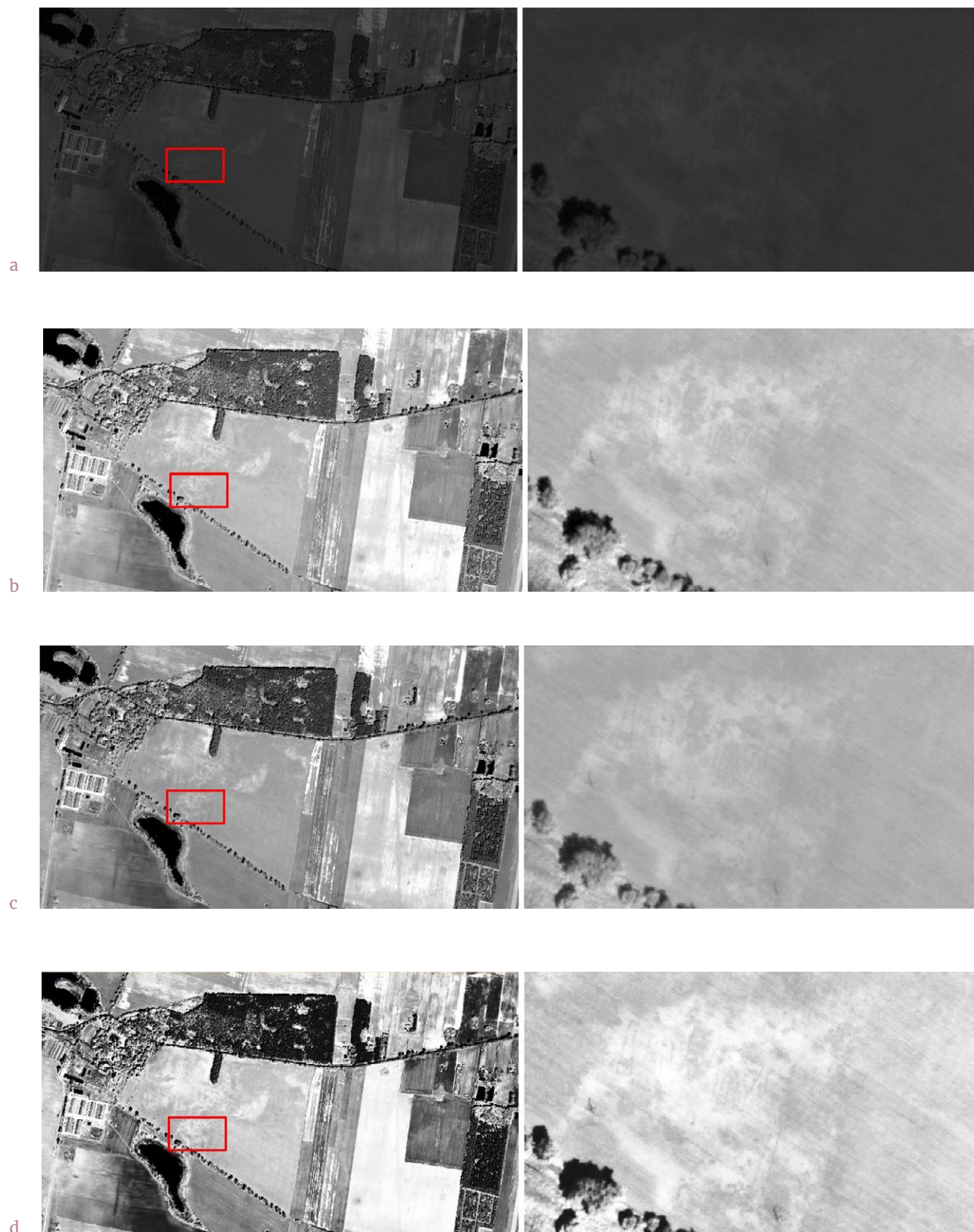
- > wzmacnianie kontrastu;
- > kompozycje barwne;
- > integracja obrazów: panchromatycznego i wielospektralnego;
- > teledetekcyjne wskaźniki spektralne;
- > transformacje ortogonalne, takie jak analiza składowych głównych (PCA) czy transformacja Tasselet Cap (TCT).

Wymienione operacje można skutecznie wykonywać zarówno w ramach oprogramowania komercyjnego (np. ERDAS Imagine, ENVI, PCI Geomatica, ArcGIS), jak i otwartego (QGIS, GRASS, SAGA GIS, GDAL, SNAP, Orfeo Toolbox – OTB). W przypadku tego drugiego może się okazać, że trzeba doinstalować dodatkowe wtyczki. Obecnie w QGIS oferowany jest dostęp do większości narzędzi programów wolnego oprogramowania, funkcjonujących także jako niezależne pakiety: GRASS, SAGA GIS, GDAL, Orfeo Toolbox (są one wyświetlane w panelu algorytmów, o ile zostały zainstalowane w pełnej wersji oprogramowania QGIS).

W dotychczasowej praktyce archeologicznej wykorzystywane są najczęściej trzy pierwsze metody, natomiast za kilka lat teledetekcyjne wskaźniki spektralne będą zapewne odgrywać coraz większą rolę. Złożoność czynników pozwalających na identyfikację reliktyw archeologicznych powoduje, że rekomendować można stosowanie wszystkich metod, gdyż trudno przewidzieć, która z nich dostarczy nam optymalnego obrazu w danych warunkach. Podstawowym materiałem do wyjściowej interpretacji powinien być obraz będący wynikiem integracji danych panchromatycznych i wielospektralnych, przetworzony do postaci kompozycji barwnej z uwzględnieniem doboru zakresów promieniowania i metody wzmocnienia kontrastu.

2.2.1.5.1. Wzmacnianie kontrastu

Zwykle pierwszą czynnością – poza korektami radiometrycznymi i geometrycznymi – jaką wykonuje się w odniesieniu do zobrazowania optycznego, jest wzmocnienie jego kontrastu, które ma na celu zwiększenie czytelności różnych obiektów czy zjawisk. Obraz źródłowy jest zazwyczaj mało-kontrastowy, dość ciemny (patrz [Ryc. 3.4a](#)). Wynika to z faktu, że wartości pikseli w źródłowych obrazach satelitarnych prawie nigdy nie obejmują całego przedziału wielkości możliwych do zarejestrowania, czyli nie są w nich rejestrowane wszystkie wartości od 0% do 100% wartości odbicia promieniowania (w systemach 8-bitowych to wartości z przedziału 0–255, a w systemach 11-bitowych 0–2047). Jest to dość naturalne zjawisko, ponieważ w rzeczywistości nie ma na powierzchni ziemi obiektów, które w ogóle nie odbijają promieniowania lub odbijają je w 100%. Jeśli zatem chcemy uczynić zobrazowanie, należy je odpowiednio przetworzyć, wykorzystując do tego celu funkcje wzmacniania kontrastu. Wśród tego rodzaju opcji można wymienić m.in. funkcję liniową (*linear stretch* lub *minimum-maximum stretch*), liniową z nasyceniem (*linear with saturation stretch* lub *percent clip*), odchylenia standardowego (*standard deviations stretch*) czy też wyrównania histogramu (*histogram equalize*). Każda z tych opcji pozwala na uzyskanie nieco

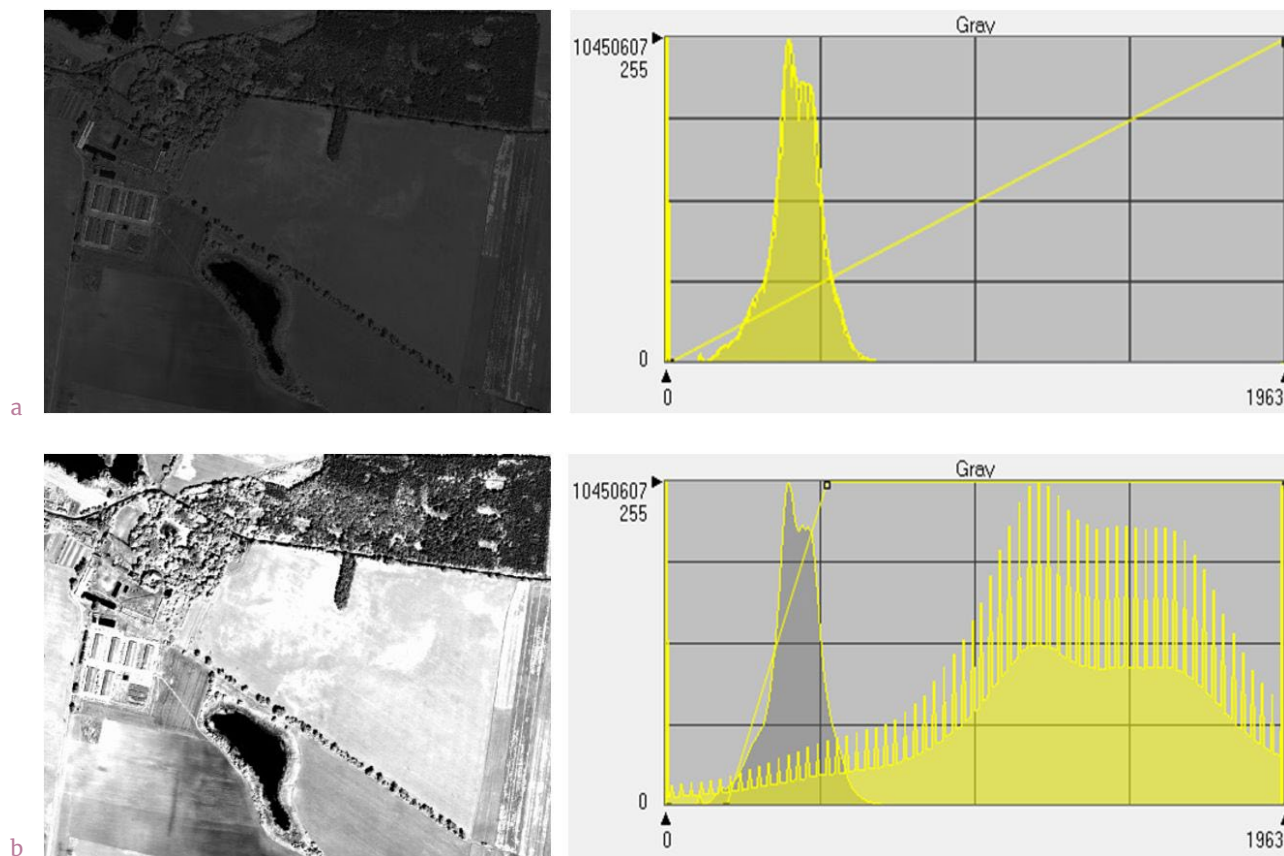


Ryc. 3.4. Wzmacnianie kontrastu obrazu panchromatycznego za pomocą funkcji: **a.** liniowej z określeniem wartości minimalnej i maksymalnej w obrazie, **b.** liniowej z nasyceniem 0,5% dla niskich wartości i 2% dla wysokich wartości, **c.** liniowej dla wartości z przedziału ± 2 odchylenia standardowe, **d.** wyrównania histogramu. Po prawej: przybliżenie fragmentu zobrazowania ze śladami obiektów z przeszłości (K. Osińska-Skotak)

innego efektu wizualnego – delikatniej bądź mocniej kontrastując różne obiekty (Ryc. 3.4).

Należy pamiętać, że w przypadku poszukiwania na zobrazeniach optycznych elementów, które mogą pośrednio wskazywać na obecność obiektów archeologicznych, zastosowanie nieodpowiedniej funkcji wzmacniania kontrastu powoduje czasami utratę ich widoczności. Dzieje się tak najczęściej przy zbyt silnym wzmacnianiu kontrastu (np. przy zastosowaniu metody wyrównania histogramu lub odchylenia standardowego o małej wartości). Wynika to z utraty widoczności zróżnicowania tonalnego części wartości pikseli, które są wizualizowane – po wzmocnieniu kontrastu – w dwóch skrajnych odcieniach skali szarości (czarnym i białym) bądź odcieniach barw (w przypadku wizualizacji zobrażeń barwnych). Zróżnicowanie pikseli nie jest zatem ukazane na obrazie wynikowym. Ten problem ilustruje przykład ukazany na Ryc. 3.5a. Oryginalny obraz jest mało kontrastowy i ciemny. Widoczny

obok niego histogram przedstawiający liczbę pikseli w obrazie o danej wartości wskazuje, że ten obraz obejmuje wartości z wąskiego przedziału (od około 140 do 630). Jeśli zastosujemy funkcję wzmacniania kontrastu odchylenia standardowego na poziomie $\pm 1\sigma$, obraz zyskuje na kontraście, ale zróżnicowanie tonalne na niektórych polach uprawnych zanika. To efekt zastosowania zbyt silnej funkcji wzmacniania kontrastu, która powoduje ujednolicenie wartości najniższych i najwyższych – na histogramie obrazu ze wzmocnionym kontrastem (w kolorze żółtym na Ryc. 3.5b) widoczne są wysokie słupki przy wartości minimalnej (0) i maksymalnej (1963), które wskazują, jak duża grupa pikseli została ujednolicona tonalnie. Są to piksele o wartościach z przedziału oznaczonego na Ryc. 3.6 kolorem czerwonym. Wartość 0 uzyskały piksele, których wartości oryginalne znajdowały się w przedziale od 0 do $\mu - 1\sigma$ (gdzie μ to wartość średnia), natomiast wartość 1963 – piksele, których wartości oryginalne zawierały się



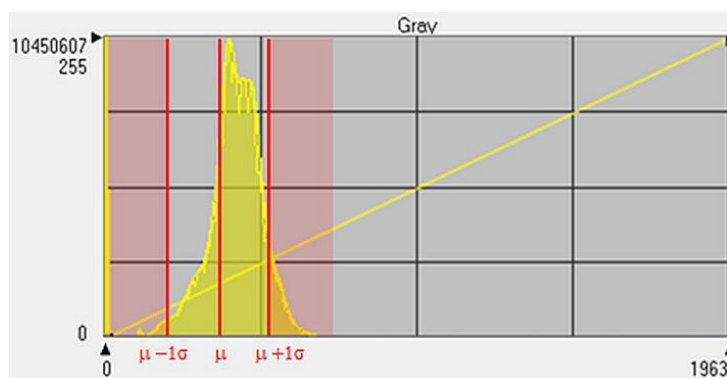
Ryc. 3.5. Obraz źródłowy (a) i jego histogram oraz obraz ze wzmocnionym kontrastem z wykorzystaniem funkcji odchylenia standardowego $\pm 1\sigma$ (b) (K. Osińska-Skotak)

w przedziale od $\mu+1\sigma$ do wartości maksymalnej. Chcąc uzyskać lepszy kontrast zobrazowania, ale bez zbytejnej utraty czytelności detali, należy zastosować wyższą wartość odchylenia standardowego, np. $1,5\sigma$ lub 2σ (Ryc. 3.7), czyli podczas wzmacniania kontrastu trzeba uwzględniać większą liczbę wartości pikseli obrazu oryginalnego.

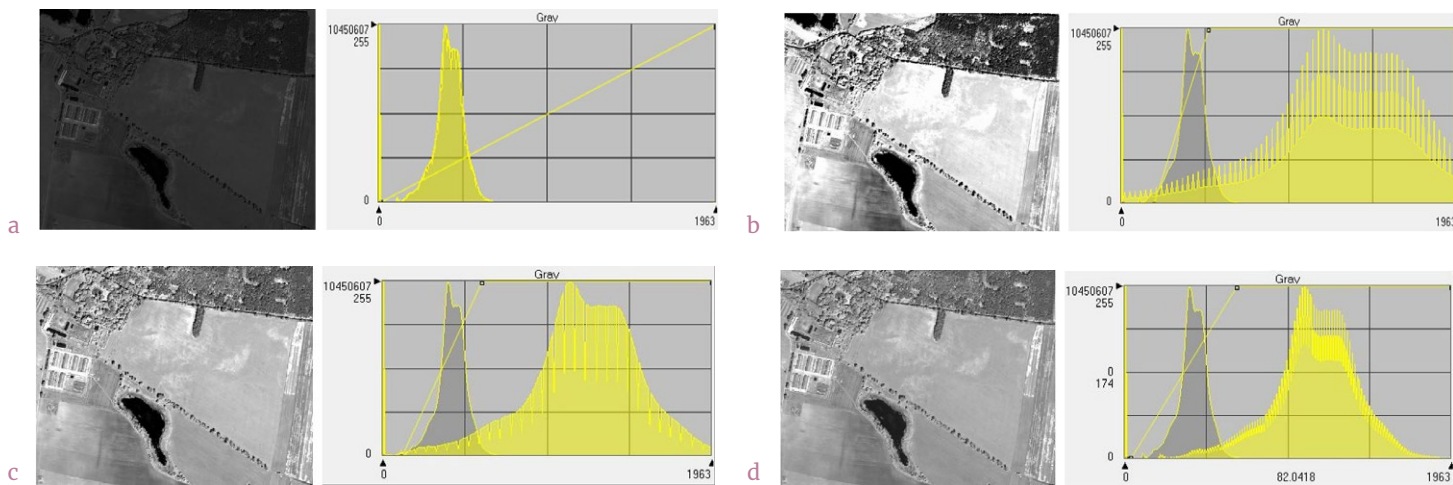
Jeśli wiemy, że na danym obszarze (np. polu uprawnym) powinny znajdować się wskaźniki obecności obiektów archeologicznych, warto wyodrębnić z zobrazowania ten konkretny obszar i przetwarzać go oddzielnie. Wówczas nieco łatwiej będzie operować różnymi funkcjami wzmacniania kontrastu. Należy podkreślić, że uzyskane efekty wizualne będą zgoła odmienne,

niż jest to w przypadku analizy całego zobrazowania. Mogą się one różnić na powierzchniach o innych charakterystykach (np. odmienna uprawa) (por. Ryc. 3.4 i Ryc. 3.8).

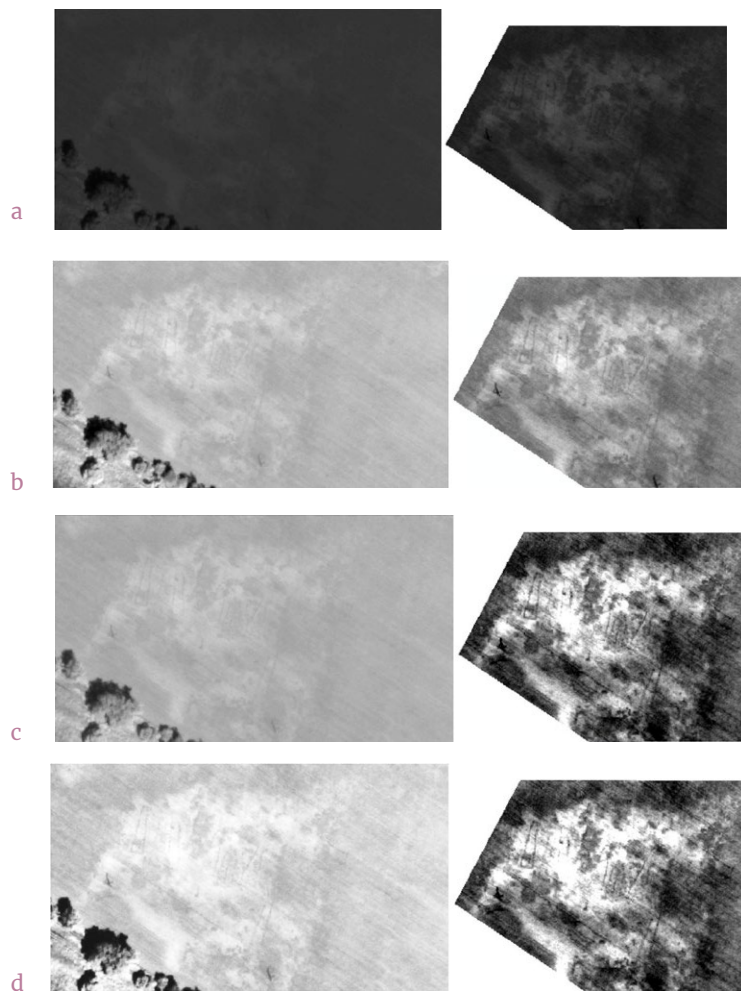
W przypadku analizy wydzielonych obszarów (np. pojedynczych pól uprawnych) lepsze efekty uwypuklenia wyróżników świadczących o występowaniu trwałych reliktyw przynosi zwykle zastosowanie funkcji wzmacnienia kontrastu o parametrach nieco słabiej kontrastujących, np. przy funkcji odchylenia standardowego lepiej zastosować wyższą wartość odchylenia (por. Ryc. 3.9b), a przy funkcji liniowej z nasyceniem mniejszą wartość nasycenia (mniejszy % odcięcia wartości skrajnych, por. Ryc. 3.9a).



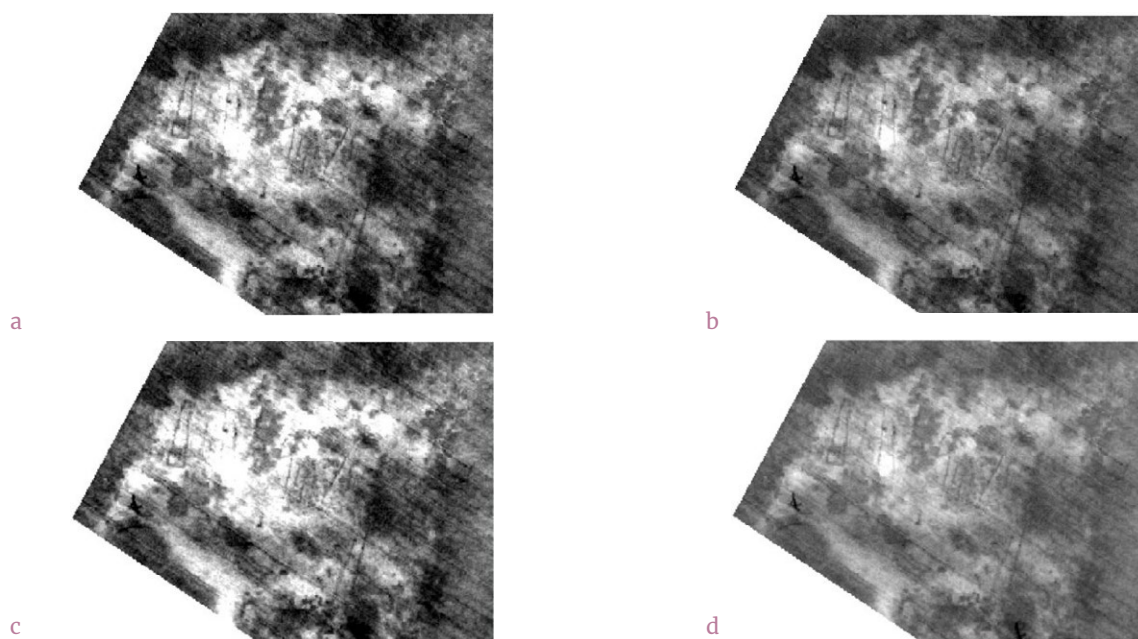
Ryc. 3.6. Idea działania funkcji wzmacniania kontrastu, która wykorzystuje odchylenie standardowe (kontrast wzmacniany jest tylko dla wartości z przedziału od $\mu-1\sigma$ do $\mu+1\sigma$, gdzie μ to wartość średnia, natomiast σ to odchylenie standardowe, obliczone na podstawie wszystkich pikseli obrazu) (K. Osińska-Skotak)



Ryc. 3.7. Obraz źródłowy (a) i jego histogram oraz obraz ze wzmacnionym kontrastem z wykorzystaniem funkcji odchylenia standardowego (σ): $\pm 1\sigma$ (b), $\pm 1,5\sigma$ (c), $\pm 2\sigma$ (d) (K. Osińska-Skotak)



Ryc. 3.8. Porównanie wyników wzmacniania kontrastu obrazu panchromatycznego dla wybranego obszaru – (a) oryginalnie zarejestrowany obraz – za pomocą funkcji: (b) liniowej z określeniem wartości minimalnej i maksymalnej w obrazie, (c) liniowej z nasyceniem 0,5% dla niskich wartości i 2% dla wysokich wartości, (d) liniowej dla wartości z przedziału ± 2 odchylenia standardowe (K. Osińska-Skotak)



Ryc. 3.9. Porównanie wyników wzmacniania kontrastu obrazu panchromatycznego dla wybranego obszaru z pomocą funkcji: (a) liniowej z nasyceniem 0,5% dla niskich wartości i 2% dla wysokich wartości, (b) liniowej z nasyceniem 0,1% dla niskich i wysokich wartości, (c) liniowej dla wartości z przedziału ± 2 odchylenia standardowe, (d) liniowej dla wartości z przedziału ± 4 odchylenia standardowe (K. Osińska-Skotak)

2.2.1.5.2. Kompozycje barwne

Kompozycja barwna to kolejna z najbardziej podstawowych metod przetwarzania satelitar-nych zobrazowań optycznych. Ponieważ takie zobrazowania są rejestrowane na ogół w kilku zakresach promieniowania (każdy obraz stanowi tzw. kanał spektralny), można na ich podstawie przygotować kilka różnych kompozycji barwnych. W tym celu stosowany jest tzw. addytywny system barw, w którym barwami podstawowymi są: czerwony (R), zielony (G) i niebieski (B) – [Ryc. 3.10](#). Addytywna teoria barw dotyczy mieszania światła o różnej długości fali. Mieszając światło czerwone, zielone i niebieskie w jednakowych proporcjach, uzyskiwany jest odcień szarości (zależnie od natężenia barw podstawowych w zakresie od czerni do bieli).

Kompozycja barwna stanowi złożenie trzech monochromatycznych kanałów spektralnych (wybranych spośród tych, które oferują poszczególne sensory, czyli od czterech do kilkuset). Każdemu z nich nadawana jest jedna z barw podstawowych R, G lub B ([Ryc. 3.11](#)). Łącząc je w ten sposób, uzyskuje się obraz barwny, który ukazuje właściwości obiektów zarejestrowane w trzech wybranych kanałach spektralnych.

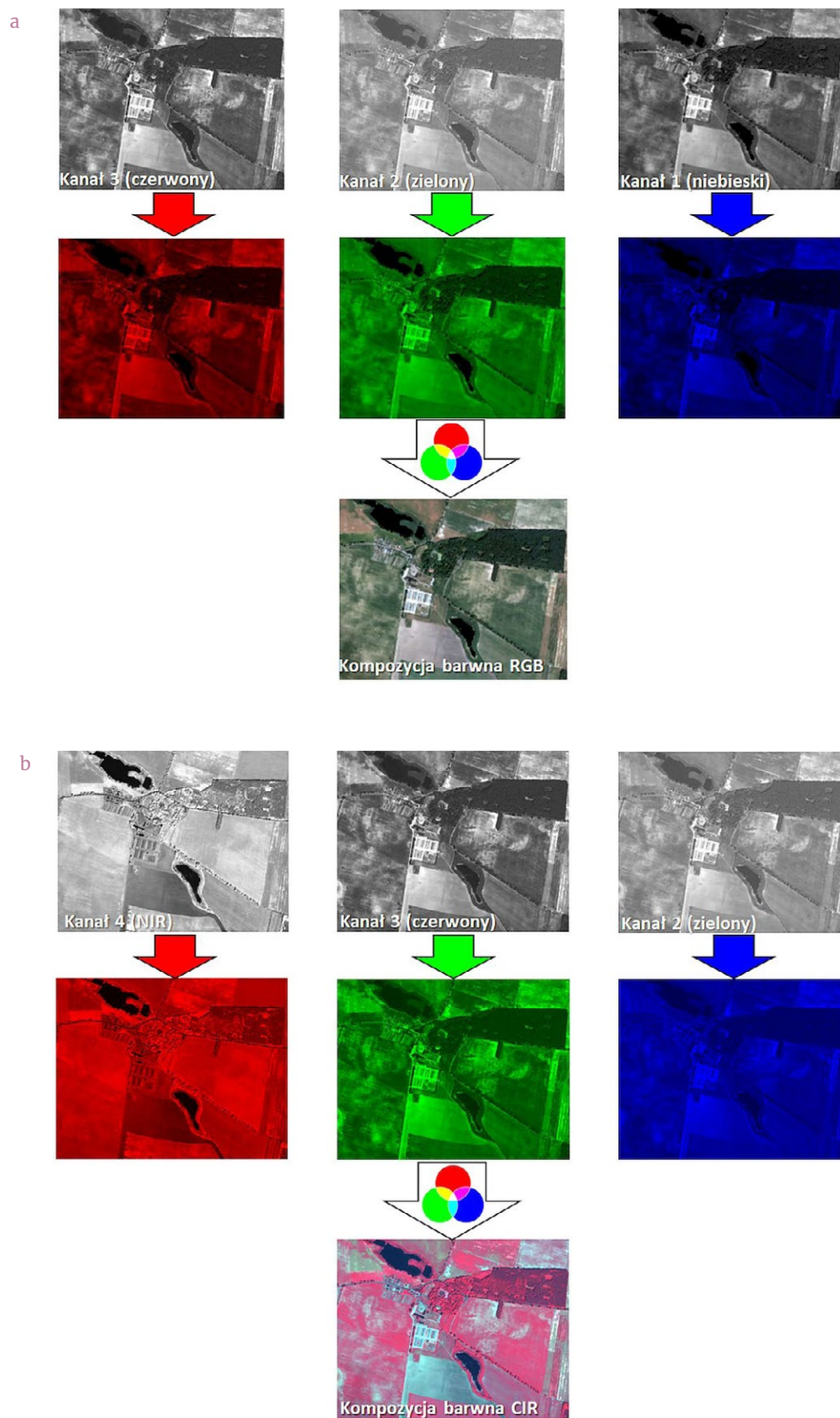
W efekcie różnego udziału barw każdy piksel uzyskuje inne zabarwienie na obrazie wynikowym. Takie zabarwienie wynika z tego, jakie kanały spektralne zostaną użyte do opracowania kompozycji barwnej, a także z właściwości spektralnych obiektu, jaki dany piksel reprezentuje. Dla przykładu: kompozycja barwna ukazana na [Ryc. 3.11b](#) ukazuje roślinność zieloną w odcieniach



[Ryc. 3.10](#). Addytywny system barwny

czerwonych, co wynika z faktu, że roślinność zdrowa, bujna odbija bardzo silnie bliską podczerwień (której nadano odcienie czerwieni), a niewiele promieniowania czerwonego (któremu nadano odcienie zieleni) i zielonego (któremu nadano odcienie niebieskiego). Zatem w przypadku tej konkretnej kompozycji barwnej największy wpływ na zabarwienie pikseli z roślinnością zieloną ma właśnie zakres bliskiej podczerwieni (NIR) i czynnik, z którego wynika odbicie tego zakresu przez roślinność (czyli stan roślinności). Z kolei analizując przykład ukazany na [Ryc. 3.11a](#), czyli kompozycję w barwach naturalnych, zielony kolor roślinności wynika z największego stopnia odbicia przez nią promieniowania zielonego – w kanale zielonym obszary z roślinnością zieloną są znacznie jaśniejsze niż w kanale niebieskim i czerwonym. Jeśli jakiś obiekt odbija podobną ilość promieniowania w każdym z wymienionych zakresów (ma podobną jasność), wówczas na kompozycji widzimy go w odcieniu szarości (np. budynku na [Ryc. 3.11a](#)).

Najczęściej stosowanymi kompozycjami barwnymi w przypadku wysokorozdzielczych zobrazowań optycznych są: kompozycja w barwach naturalnych ([Ryc. 3.12a](#)) oraz tzw. kompozycja standardowa ([Ryc. 3.12b](#)), czasami nazywana także CIR, co wynika z angielskiego skrótu odnoszącego się do zdjęć barwnych w podczerwieni. Większość satelitów VHR rejestruje bowiem cztery podstawowe zakresy spektralne: promieniowanie niebieskie, zielone, czerwone i bliską podczerwień. Jedynie satelity WorldView-2 i WorldView-3 pozyskują zobrazowania w większej liczbie kanałów spektralnych – jest ich osiem – co daje zdecydowanie szersze możliwości w tworzeniu kompozycji barwnych. Podobnie jest w przypadku obrazów Sentinel-2, przy czym najwyższą rozdzielczość przestrzenną mają zobrazowania zarejestrowane w czterech podstawowych kanałach spektralnych, a pozostałe mają dwu- bądź trzykrotnie mniejszą rozdzielczość przestrzenną. W przypadku badań archeologicznych polegających na identyfikacji reliktyw również tutaj będzie występowało ograniczenie do dwóch wymienionych już kompozycji barwnych.



Ryc. 3.11. Idea tworzenia kompozycji barwnych: (a) kompozycja w barwach naturalnych – tzw. RGB, (b) kompozycja standardowa – tzw. CIR (K. Osńska-Skotak)

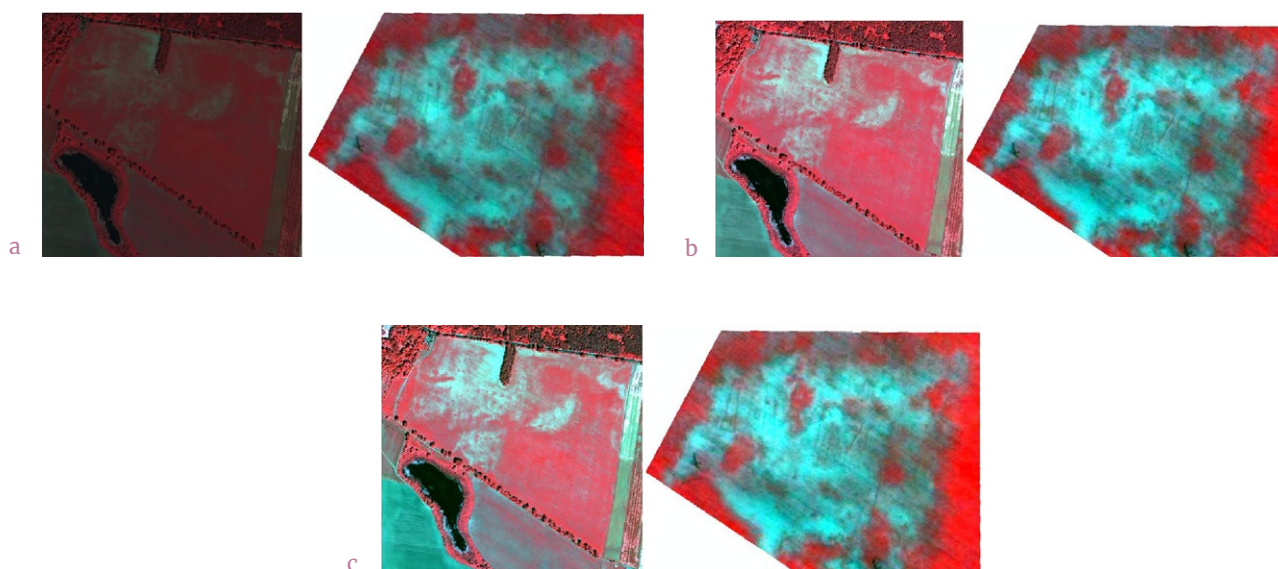
Kompozycja w barwach naturalnych jest prosta w interpretacji nawet dla mało wprawnego użytkownika. Oddaje ona bowiem obraz terenu w barwach, w których obiekty widzimy na co dzień. Jednak nie pozwala ona na dostrzeżenie cech obiektów niewidocznych dla oka ludzkiego, np. różnic w kondycji roślin widocznych w zakresie podczerwonym. Aby uwypuklić wyróżniki roślinne, warto zatem wykorzystać kompozycje barwne utworzone z użyciem zakresów podczerwieni bliskiej (NIR) i krótkiej (SWIR). Wówczas wyraźniej zostaną ukazane różnice w stanie roślinności,

które mogą być wynikiem występowania pod powierzchnią ziemi obiektów archeologicznych.

Niezależnie od tego, jaka zostanie utworzona kompozycja barwna, ważnym zagadnieniem pozostaje wzmocnienie jej kontrastu. Zasady są analogiczne jak w przypadku pojedynczego zobrazowania. Jeśli zastosowane zostanie zbyt silne wzmocnienie kontrastu, może dojść do utraty czytelności pewnych detali. Z kolei ograniczając obszar analizy, warto pamiętać, że te same parametry funkcji wzmacniania kontrastu dają zupełnie odmienne efekty wizualne (Ryc. 3.13).



Ryc. 3.12. Kompozycje barwne wykonane na podstawie obrazu satelitarne QuickBird z 4 lipca 2005 roku – (a) kompozycja w barwach naturalnych RGB 321, (b) kompozycja standardowa RGB 432 (K. Osińska-Skotak)



Ryc. 3.13. Kompozycje barwne wykonane na podstawie obrazu satelitarne QuickBird z 4 lipca 2005 roku – porównanie wyników wzmocnienia kontrastu w przypadku globalnego przetwarzania całej sceny satelitarnej (strona lewa) oraz wybranego fragmentu (strona prawa) dla kompozycji barwnej RGB 432. Wzmacnianie kontrastu z zastosowaniem funkcji: (a) liniowej min-max, (b) liniowej z nasyceniem 0,5% po stronie lewej (niższe wartości DN) i 2% po stronie prawej (wyższe wartości DN), (c) liniowej z dwukrotnym odchyleniem standardowym (K. Osińska-Skotak)

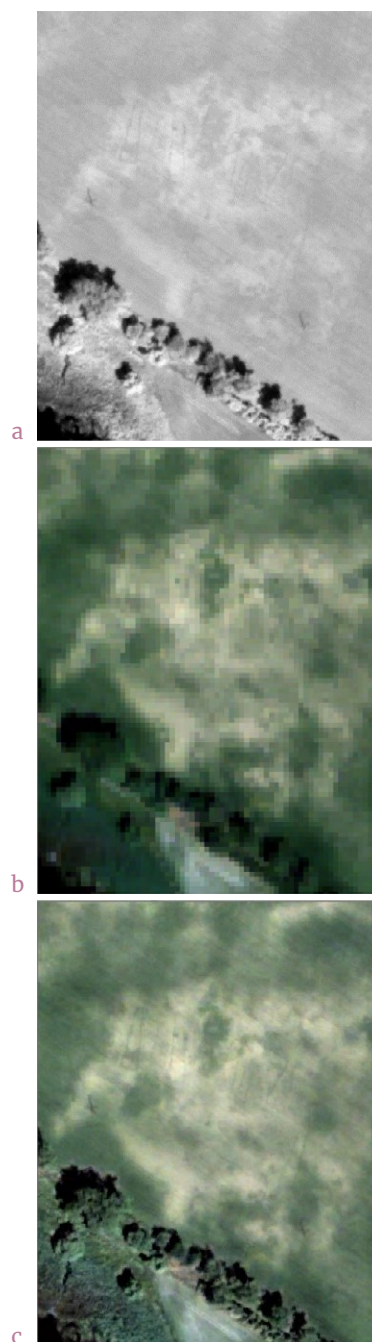
2.2.1.5.3. Integracja danych panchromatycznych i wielospektralnych

Zobrazowania panchromatyczne charakteryzują się wyższą rozdzielczością przestrzenną niż zobrazowania pozyskane w trybie wielospektralnym. Zwykle stosunek rozmiarów liniowych pikseli obrazu panchromatycznego i wielospektralnego to 1:4, czyli obraz panchromatyczny ma cztery razy mniejszy terenowy wymiar piksela w porównaniu do obrazu wielospektralnego. Integracja zobrazowań panchromatycznych i wielospektralnych (*pansharpening* lub *image fusion*) ma na celu uzyskanie obrazu wielospektralnego o takiej rozdzielczości przestrzennej, jaką ma zobrazowanie panchromatyczne (czyli mniejszym wymiarze terenowym piksela niż jest to dla obrazu wielospektralnego). Ważne jest przy tym zachowanie zarówno szczegółowości przestrzennej obrazu panchromatycznego, jak i właściwości spektralnych zarejestrowanych na obrazie wielospektralnym (Ryc. 3.14).

Technik integracji zobrazowań panchromatycznych i wielospektralnych jest bardzo dużo. Dają one różne wyniki – część z nich doskonale zachowuje właściwości spektralne, inne dają silne wzmocnienie przestrzenne. Metody, które przynoszą najlepsze rezultaty, są dostępne głównie w oprogramowaniu komercyjnym. Można tu wymienić m.in. metodę Zhanga (zaimplementowaną w programie PCI Geomatica), Gramma-Schmidta (zaimplementowaną w programie ENVI), metody Hyperspherical Color Space, Modified IHS i Ehlersa (zaimplementowane w programie ERDAS Imagine). Zobrazowania uzyskane za pomocą tych narzędzi można z powodzeniem stosować w dalszych analizach, w tym do obliczania wskaźników spektralnych.

Z algorytmów dostępnych w oprogramowaniu typu open source (np. GRASS – narzędzie i. pansharpen, GDAL, Orfeo Toolbox) do dalszego przetwarzania (np. obliczania wskaźników roślinności) nadaje się jak najbardziej metoda wykorzystująca analizę składowych głównych PCA, a do fotointerpretacji – metoda wykorzystująca transformację przestrzeni barw RGB-IHS-RGB. Popularne

metody, takie jak transformacja Broveya czy metoda mnożnikowa, znacząco zmieniają właściwości spektralne i ich zastosowanie do obliczania wskaźników ilościowych, np. wskaźników roślinności, nie jest właściwe.



Ryc. 3.14. Porównanie (a) zobrazowania panchromatycznego PAN, (b) zobrazowania wielospektralnego MS w postaci kompozycji w barwach naturalnych (RGB 321) oraz (c) zobrazowania powstałego w wyniku integracji zobrazowania panchromatycznego i wielospektralnego metodą Gramma-Schmidta w postaci kompozycji barwnej w kolorach naturalnych (RGB 321). Fragment obrazu satelitarnego QuickBird z 4 lipca 2005 roku (K. Osinska-Skotak)

2.2.1.5.4. Wskaźniki spektralne

Przetwarzanie całego zobrazowania satelitarne, które cechuje różnorodność form pokrycia i zagospodarowania terenu, nie zawsze pozwala dostrzec zmiany, jakie mają miejsce np. na pojedynczych polach uprawnych. Wynika to m.in. z faktu, że na obraz powierzchni ziemi zarejestrowany w zobrazowaniu optycznym wpływa szereg czynników, w tym zmienne oświetlenie (np. wynikające z ukształtowania powierzchni), warunki atmosferyczne, zmienna wilgotność gruntu czy różny stopień pokrycia powierzchni roślinnością. W celu uwypuklenia właściwości czy zmienności określonych typów pokrycia stosowane są obrazy wskaźnikowe, które stanowią proste operacje algebraiczne, np. dzielenie jednego kanału spektralnego przez inny kanał czy też ich sumowanie bądź odejmowanie. Dzięki obrazom wskaźnikowym normalizowany jest wpływ wymienionych wyżej czynników, podkreślane jest zróżnicowanie określonego typu obiektów, a odmienności innych są wygaszane – wówczas ich zmienność na zobrazowaniu wynikowym będzie niewielka. Wskaźniki spektralne oblicza się na podstawie wartości odbicia spektralnego na poziomie gruntu (BOA).

Wśród teledetekcyjnych wskaźników spektralnych można wymienić kilka grup: wskaźniki roślinności, gleb i minerałów, wilgotności, śniegu i lodu. Zależnie od rodzaju zobrazowań (wielo-, super-, hiperspektralnych) można zdefiniować wskaźniki szerokopasmowe (w przypadku zobrazowań wielo- lub superspektralnych) albo wąskopasmowe (na podstawie danych hiperspektralnych). Te ostatnie dają bardziej szczegółowe informacje niż wskaźniki szerokopasmowe, np. możliwe jest szacowanie zawartości barwników fotosyntetyzujących w roślinach, takich jak chlorofil-a, chlorofil-b czy karoteny, albo ich wykorzystanie do oceny zawartości minerałów w glebie.

Wskaźniki spektralne w archeologii satelitarnej można traktować analogicznie jak wyróżniki roślinne i glebowe w archeologii lotniczej (zob. rozdz. 1.1).

Wskaźniki roślinności

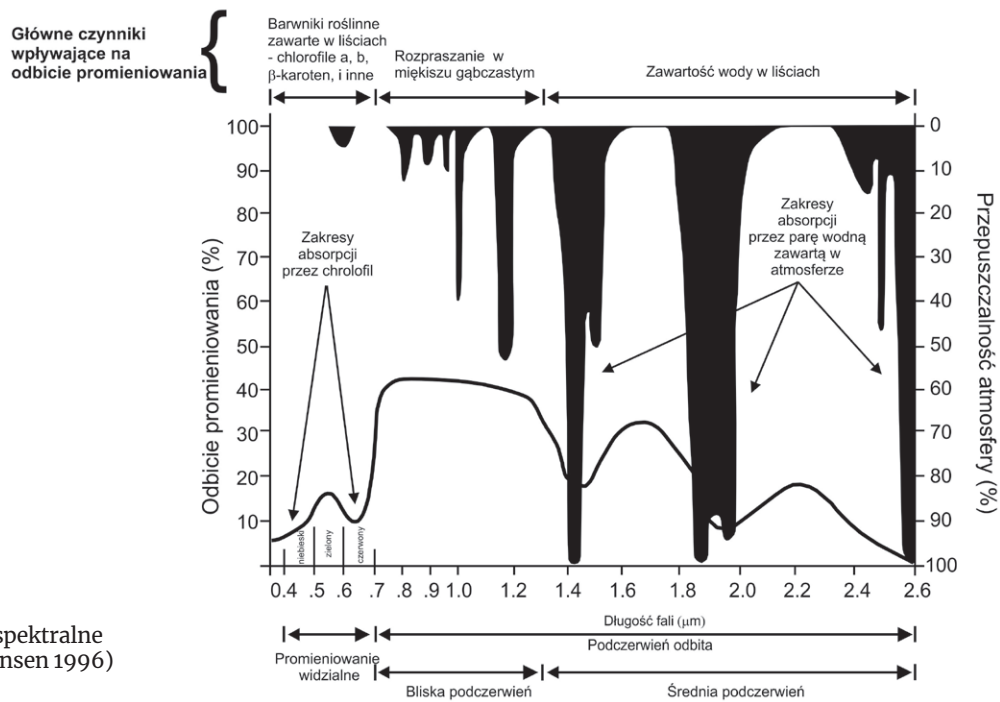
Przebieg charakterystyki spektralnej roślinności jest bardzo specyficzny i występują w nim lokalne minima i maksima (Ryc. 3.15). Wynikające z określonych cech roślinności (gatunki, odmiany, zaawansowanie wegetacji, intensywność nawożenia itp.). Odbicie promieniowania w zakresie widzialnym kształtowane jest przede wszystkim przez jego interakcje z barwnikami fotosyntetyzującymi, przede wszystkim chlorofilem-a i chlorofilem-b – barwnikami zawartymi w chloroplastach. Promieniowania niebieskie i czerwone są pochłaniane na potrzeby procesu fotosyntezy, a promieniowanie zielone odbija się od chloroplastów. W przypadku gdy rośliny intensywnie się rozwijają, ich zapotrzebowanie na energię jest duże, zatem różnica odbicia promieniowania zielonego i czerwonego również osiąga wysokie wartości. Odbicie w zakresie bliskiej podczerwieni wynika natomiast ze struktury komórek miękisza gąbczastego. Chlorofil dla tego promieniowania jest przeźroczysty, czyli nie stanowi przeszkody, dlatego promieniowanie przenika w głąb liści do miękisza gąbczastego, którego struktura i występujące w nim przestrzenie powietrzne powodują, że dochodzi do wielokrotnego załamania promieni słonecznych, co skutkuje dużym odbiciem promieniowania. Rośliny cechujące się dobrą kondycją wyróżnia wysoki stopień odbicia spektralnego w zakresie bliskiej podczerwieni. Odbicie w zakresie krótkiej podczerwieni wynika przede wszystkim z zawartości wody w liściach – wraz z obniżaniem się jej poziomu rośnie wartość odbicia spektralnego w tym zakresie promieniowania.

Wymienione tu charakterystyczne dla roślinności zakresy promieniowania są wykorzystywane do opracowania wskaźników spektralnych określanych jako wskaźniki roślinności. Wśród nich wymienia się także grupy wskaźników: ogólnej kondycji roślin, zawartości barwników, zawartości wody w liściach, zawartości lignin itp.

Jednym z najpopularniejszych wskaźników spektralnych jest znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności (Normalized Difference

Vegetation Index – NDVI), opracowany w 1974 roku (Rouse, Haas, Schell, Deering 1973). Jest to parametr z grupy wskaźników ogólnej kondycji

roślin, który dobrze różnicuje stan pokrywy roślinnej (Ryc. 3.16). Inne stosowane wskaźniki roślinności zestawiono w Tabeli 7.



Ryc. 3.15. Właściwości spektralne roślinności zielonej (Jensen 1996)



Ryc. 3.16. Obrazy wskaźnikowe wykonane na podstawie obrazu satelitarnego QuickBird z 4 lipca 2005 roku, (a) wskaźnik roślinności NDVI, (b) wskaźnik roślinności GNDVI, (c) wskaźnik roślinności MCARI2 (K. Osińska-Skotak)

Tabela 7. Zestawienie najpopularniejszych wskaźników roślinności

Nazwa wskaźnika spektralnego	Formuła obliczeniowa	Bibliografia
Ratio Vegetation Index	$RVI = \frac{NIR}{R}$	Pierson, Miller 1972
Vegetation Index	$VI = \frac{R}{NIR}$	Pierson, Miller 1972
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	Rouse, Haas, Schell, Deering 1974
Difference Vegetation Index	$DVI = NIR - R$	Richardson, Wiegand 1977
Transformed Vegetation Index	$TVI = \sqrt{\frac{NIR - R}{NIR + R}} + 0.5$	Deering, Rouse, Haas, Schell 1975
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{NIR - R}{(NIR + R + L) \cdot (1 + I)}$	Huete 1988
Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	$TSAVI = \frac{a \cdot (NIR - a \cdot R - b)}{a \cdot NIR + R - a \cdot b + X \cdot (1 + a^2)}$ gdzie: a, b – współczynniki regresji, X = 0,08	Baret, Guyo, Major 1989; Baret, Guyot 1991
Normalized Difference Greenness Index	$NDGI = \frac{G - R}{G + R}$	Charmand, Courel, Ducouso, Guénégo, Le Rhun, Levasseur, Loisel, Togola 1991
Soil Atmospheric Resistant Vegetation Index	$SARVI = \frac{(1 + L) \cdot (NIR - RB)}{(NIR + RB + L)}$ gdzie: $RB = R - \gamma \cdot (B - R)$	Kaufmann, Tanrer 1992
Atmospheric Resistant Vegetation Index	$ARVI = \frac{NIR - (2 \cdot R - B)}{NIR + (2 \cdot R - B)}$	Kaufmann, Tanrer 1992
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$MSAVI2 = \frac{1}{2} \left(2 \cdot NIR + 1 - \sqrt{((2 \cdot NIR + 1)^2 - 8 \cdot (NIR - R))} \right)$	Qi, Chehbouni, Huete, Kerr, Sorooshian 1994
Optimized Soil Adjusted Vegetation Index	$OSAVI = \frac{(1 + L) \cdot (NIR - R)}{(NIR + R + L)}$	Rondeaux, Steven, Baret 1996
Green NDVI	$GNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + G}$	Gitelson, Kaufmann, Merzlyak 1996
Red Edge Normalized Difference Vegetation Index	$NDRE \text{ lub } NDVI705 = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	Barnes, Clarke, Richards, Colaizzi, Haberland, Kostrzewski, Lascano 2000
Enhanced Vegetation Index	$EVI = g \frac{NIR - R}{NIR + c_1 \cdot R - c_2 \cdot B + L}$	Huete, Didan, Miura, Rodriguez, Gao, Ferreira 2002
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	$MCARI = (NIR - R) - 0.2 \cdot (NIR - G) \cdot \left(\frac{NIR}{R} \right)$	Daughtry, Walthall, Kim, Brown de Colstoun, McMurtrey 2000
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index 2	$MCARI2 = 1.5 \frac{2.5 \cdot (NIR - R) - 1.3 \cdot (NIR - G)}{\sqrt{\quad}}$	Haboudane, Miller, Pattey, Zarco-Tejada, Strachan 2004

Oznaczenia:

- NIR
- odbiecie spektralne w zakresie bliskiej podczerwieni;
- RE
- odbiecie spektralne w zakresie tzw. krawędzi promieniowania czerwonego i bliskiej podczerwieni;
- R
- odbiecie spektralne w zakresie promieniowania czerwonego;
- G
- odbiecie spektralne w zakresie promieniowania zielonego;
- B
- odbiecie spektralne w zakresie promieniowania niebieskiego;
- L
- parametr gęstości pokrycia roślinnością (canopy density), który minimalizuje wpływ gleby na wartość wskaźnika, dzięki czemu lepiej ukazuje on stan roślinności. L waha się od 0 przy dużym pokryciu roślinnością do 1 przy minimalnej pokrywie roślinnej. Najczęściej stosowaną wartością jest 0,5 – częściowe pokrycie roślinnością.
- c1, c2
- wartości stałe wyznaczone empirycznie, korygujące wpływ aerozolu. Najczęściej stosowane są wartości: c1 = 6,0; c2 = 7,5.

Wskaźniki zawartości wody w roślinności

Na podstawie zobrażeń optycznych można także obliczyć wskaźniki spektralne, które służą oszacowaniu zawartości wody w roślinności. W tym celu wykorzystywane są kanały spektralne bliskiej podczerwieni (NIR) i krótkiej podczerwieni (SWIR). Oba te zakresy wskazują na kondycję roślinności – odbicie promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni wynika z wewnętrznej budowy liścia, a wartość odbicia promieniowania

w zakresie krótkiej podczerwieni zależy od zawartości wody w liściach. Jednak te dwa zjawiska są ze sobą silnie powiązane. W sytuacji, gdy pogarsza się stan roślinności w zakresie bliskiej podczerwieni, obniża się odbicie promieniowania, natomiast w krótkiej podczerwieni dochodzi do jego wzrostu.

Najczęściej stosowane wskaźniki zawartości wody przedstawia [Tabela 8](#).

Tabela 8. Wskaźniki zawartości wody w roślinności

Nazwa wskaźnika	Formuła obliczeniowa	Bibliografia
Normalised Difference Water Index	$NDWI = \frac{\rho_{860nm} - \rho_{1240nm}}{\rho_{860nm} + \rho_{1240nm}}$ $NDWI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	Gao 1996
Water Index	$WI = \frac{\rho_{900nm}}{\rho_{970nm}}$	Peñuelas, Pinol, Ogaya, Filella1997
Normalised Difference Infrared Index	$NDII = \frac{\rho_{816nm} - \rho_{1600nm}}{\rho_{816nm} + \rho_{1600nm}}$ $NDWI = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$	Hardinsky, Smart 1983
Moisture Stress Index	$MSI = \frac{\rho_{1600nm}}{\rho_{819nm}}$ $MSI = \frac{SWIR2}{NIR}$	Hunt, Rock 1989

Wskaźniki glebowe

Kolejną grupą wskaźników są spektralne wskaźniki glebowe (gleb i minerałów). W przypadku tych parametrów również wykorzystywane są charakterystyczne minima bądź maksima odbicia spektralnego dla danego minerału bądź grupy związków znajdujących się w podłożu. Ich celem jest uwypuklenie zróżnicowania pokrywy glebowej lub składu mineralnego skał budujących powierzchnię danego terenu. Mogą one stanowić jeden z etapów opracowania danych teledetekcyjnych, zważywszy na to, że po działalności człowieka zostają pod powierzchnią ziemi inne ślady geochemiczne niż w otoczeniu. Jeśli do budowy obiektu używano materiałów wapiennych, udział związków wapnia (pochodzących

z niszczenia materiałów budowlanych) będzie na danym obszarze większy niż w sąsiedztwie. Do wykrycia niektórych związków potrzebne są dane zarejestrowane w bardzo wąskich przedziałach promieniowania elektromagnetycznego – czyli do skutecznego określenia zróżnicowania ich zawartości najlepsze byłoby wykorzystanie zobrażeń hiperspektralnych, które w zobrażowaniach satelitarnych mają słabą rozdzielczość przestrzenną (30 m × 30 m). Niemniej część wskaźników spektralnych została opracowana także w odniesieniu do danych wielospektralnych, przy czym niektóre wymagają kanału krótkiej podczerwieni (SWIR), a ta jest rejestrowana jedynie (spośród systemów wysokorozdzielczych)

Tabela 9. Wskaźniki gleb i minerałów

Nazwa wskaźnika	Formuła obliczeniowa	Znaczenie
Iron Oxide	$IO = \frac{\rho_{660nm}}{\rho_{485nm}}$	Wskaźnik zawartości tlenków żelaza
Ferric Oxide	$FO = \frac{\rho_{660nm}}{\rho_{560nm}}$	Wskaźnik zawartości tlenku żelaza (III) – związek ten jest głównym składnikiem rdzy
Ferrous Fe2+	$FerrousFe2+ = \frac{\rho_{2165nm}}{\rho_{810nm}} + \frac{\rho_{560nm}}{\rho_{660nm}}$	Wskaźnik zawartości kationów żelaza
Ferrous Minerals	$FM = \frac{\rho_{1650nm}}{\rho_{830nm}}$	Wskaźnik minerałów żelaza
Ferrous Iron Index	$FII = \frac{\rho_{2165nm}}{\rho_{1650nm}}$	Wskaźnik zawartości jonów żelaza
Clay Minerals	$CM = \frac{\rho_{1650nm}}{\rho_{2216nm}}$	Wskaźnik glinu, krzemianów i węglanów

Wskaźniki opracowane dla satelity WorldView-2		
WorldView Soil Index	$WVSI = \frac{Y - G}{Y + G}$	Dobrze różnicuje typy gleb
WorldView New Iron Index	$WVII = \frac{G \cdot Y}{B \cdot 1000}$	Wykrywanie związków żelaza

Źródło: ASL Remote Sensing 2008; Cudahy 2012; Kumar, Pandey, Jeyaseelan 2012; Musick, Pelletier 1988; Rougean, Breon 1995; Wolf 2010

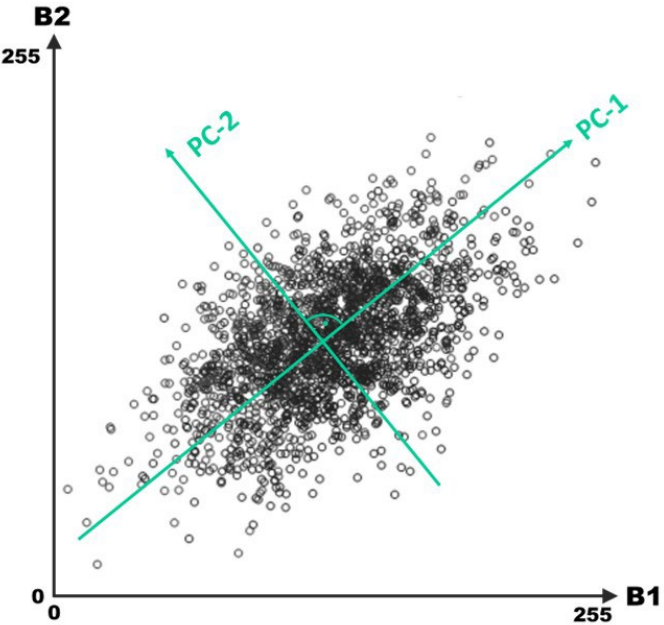
przez satelitę WorldView-3. Spektralne wskaźniki glebowe prezentuje **Tabela 9**.

Niektóre z minerałów znajdujących się w skałach podłoża można określić z zastosowaniem promieniowania cieplnego, którego jednak nie rejestruje żaden system satelitarny o bardzo wysokiej rozdzielczości przestrzennej.

Baza danych teledetekcyjnych wskaźników spektralnych prezentowana pod adresem <https://www.indexdatabase.de> zawiera większość dotychczas opracowanych wskaźników wraz z odniesieniami do literatury naukowej. Można ją przeszukiwać zarówno pod kątem obszarów zastosowania, jak i systemów satelitarnych, dla których takie wskaźniki zostały zaproponowane.

2.2.1.5.5. Analiza składowych głównych

Analiza składowych głównych (Principle Component Analysis) jest jedną z metod statystycznej analizy wieloczynnikowej. W przypadku analizy zobrazowań satelitarnych wartości pikseli obrazu w poszczególnych kanałach spektralnych traktuje się jak zbiór danych, który można interpretować jako chmurę N punktów w n-wymiarowej przestrzeni, gdzie n oznacza liczbę kanałów spektralnych obrazu satelitarnego. Osie tej przestrzeni tworzą poszczególne kanały spektralne, czyli każdy punkt w tej przestrzeni przedstawia położenie piksela o wartościach zarejestrowanych w każdym z kanałów spektralnych. Całe



Ryc. 3.17. Idea analizy składowych głównych na przykładzie obrazu zarejestrowanego w dwóch kanałach spektralnych B1 i B2; PC-1 – pierwsza składowa główna, PC-2 – druga składowa główna

zobrazowanie można zatem zwizualizować w postaci wykresu rozproszenia wartości pikseli (Ryc. 3.17).

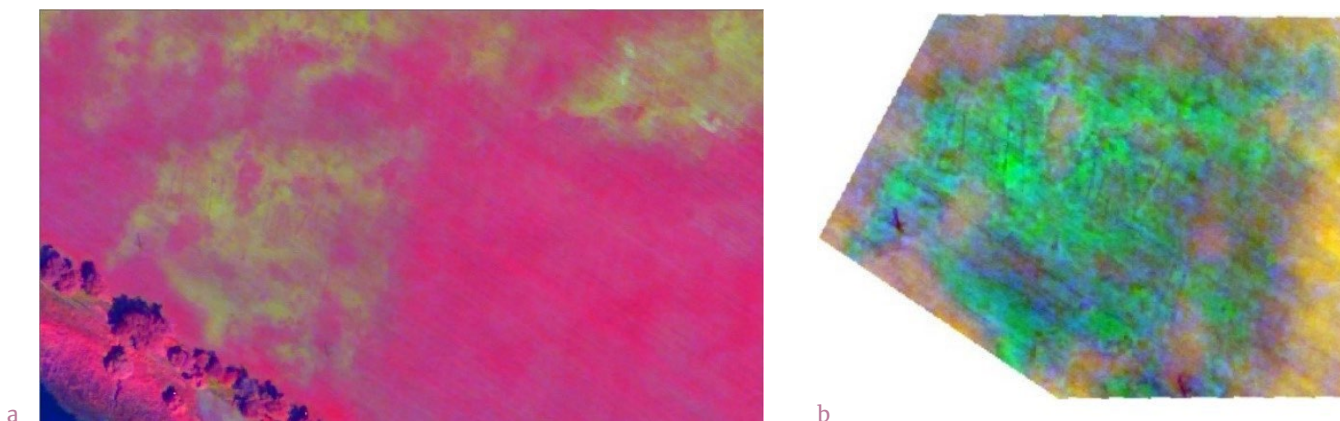
Celem analizy składowych głównych jest utworzenie nowego układu współrzędnych w taki sposób, aby maksymalizować kolejno wariancję (czyli zmienność wartości) pierwszej współrzędnej (pierwsza składowa główna), następnie wariancję drugiej współrzędnej (druga składowa główna), potem trzeciej współrzędnej (trzecia składowa główna) i tak do n-tej współrzędnej n-wymiarowego układu. Każda kolejna oś

nowo tworzonego układu musi być prostopadła do wcześniej wyznaczonych osi współrzędnych. Składowych głównych można obliczyć tyle, ile jest wejściowych kanałów spektralnych. Zgodnie z zasadą analizy tych składowych pierwsze składowe główne charakteryzują się najwyższą informacyjnością, a ostatnie zawierają na ogół informacje związane z szumem lub artefaktami innego rodzaju. Przykład składowych głównych utworzonych na podstawie fragmentu obrazu satelitarnego przedstawiono na Ryc. 3.18. Ponieważ w tym przypadku zobrazowanie satelitarne składało się z czterech kanałów spektralnych, można było wyznaczyć tu cztery składowe główne.

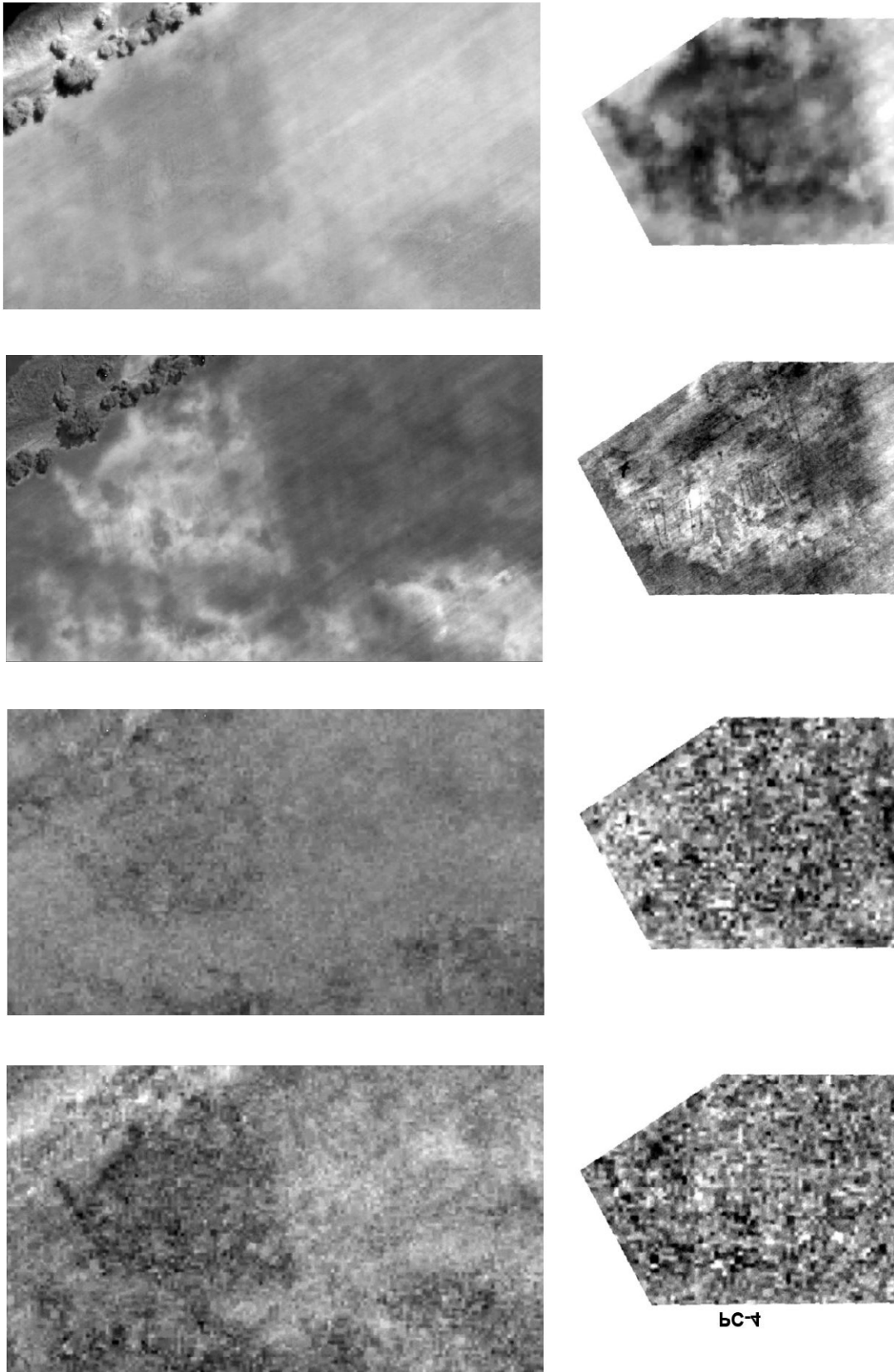
Należy podkreślić, że wyniki analizy składowych głównych zależą od tego, jaki obszar podlega badaniu. Skoro jest to metoda statystyczna, w odniesieniu do całego rozpatrywanego obszaru uzyskamy inne rezultaty niż przy analizie wybranego fragmentu tego samego zobrazowania

(Ryc. 3.18). W porównaniu do analizy składowych głównych wykonywanej dla całego obrazu zauważalne są znaczne różnice tonalne niemal dla każdej ze składowych głównych. Gdy na przykład poszukujemy niewielkich zmian tonalnych w obrazie pola uprawnego, na którym można spodziewać się obiektów archeologicznych, warto dokonać wydzielenia obszaru analizy w celu ich uwypuklenia.

Z nowo powstałych składowych głównych można również utworzyć kompozycje barwne. Najwięcej informacji zawierać będzie kompozycja barwna utworzona z trzech pierwszych składowych głównych: PC-1, PC-2, PC-3 (Ryc. 3.19a), co nie oznacza, że będzie ona najbardziej korzystna dla celów archeologicznych. Jest to zależne zarówno od charakteru poszukiwanych obiektów, od parametrów zobrazowania, jak i tego, czy analizujemy całe zobrazowanie jednocześnie, czy też wybrany jego fragment.



Ryc. 3.19. Kompozycje barwne (R = PC-1, G = PC-2, B = PC-3) utworzone ze składowych głównych obliczonych na podstawie obrazu satelitarnego QuickBird z 4 lipca 2005 roku (a) i jego fragmentu (b) (K. Osińska-Skotak)



Ryc. 3.18. Kolejne elementy analizy składowych głównych PCA uzyskane na podstawie obrazu satelitarnego QuickBird z 4 lipca 2005 roku. Po lewej stronie: wynik przetwarzania całego zobrazowania, po prawej stronie: wynik przetwarzania wybranego fragmentu zobrazowania

2.2.1.5.6. Transformacja Tasselet Cap

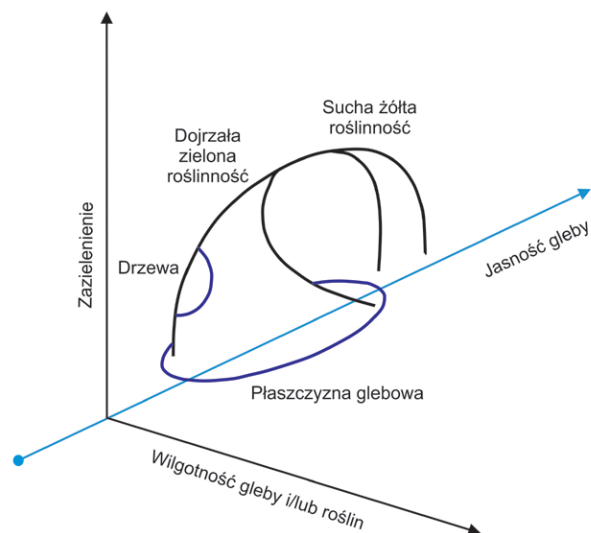
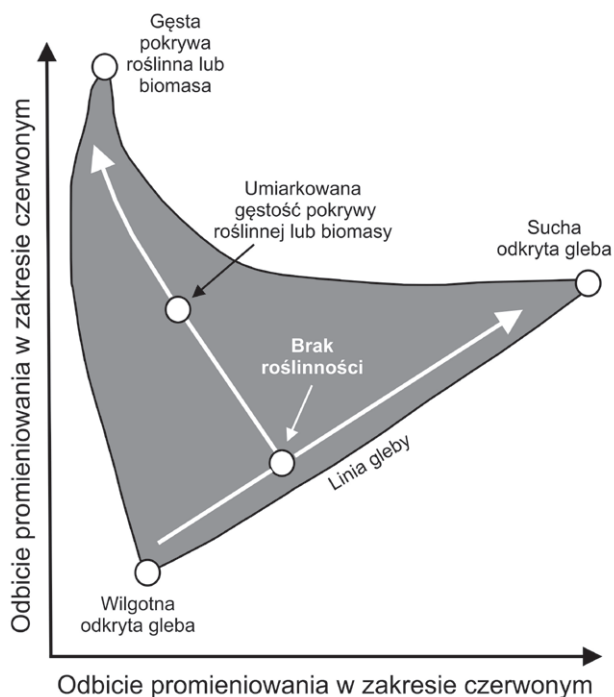
Transformacja Tasselet Cap (TCA) została zaproponowana przez Kautha i Thomasa w 1976 roku (Kauth, Thomas 1976), dlatego znana jest również jako transformacja Kautha–Thomasa (KTT). W badaniach prowadzonych przez tych naukowców chodziło o wyjaśnienie zależności między zjawiskami związanymi z rozwojem roślin uprawnych a ich odwzorowaniem w przestrzeni spektralnej danych satelitarnych LANDSAT (Crist 1985), co miało ułatwić ocenę stanu upraw w określonych fazach rozwoju. Takie ustalenie jest stosunkowo trudne przy analizie źródłowych kanałów spektralnych. W wyniku przeprowadzonych prac analitycznych zdefiniowano niejako nowy układ współrzędnych w n-wymiarowej przestrzeni spektralnej, gdzie poszczególne osie ukazują (Ryc. 3.20):

1. zróżnicowanie cech gleby (Soil Brightness Index lub Brightness),
2. właściwości badanej roślinności (Green Vegetation Index lub Greeness),
3. zróżnicowanie wilgotności (Wetness Index, czasami określany jako Yellowness).

Transformacja Tasselet Cap jest transformacją liniową (patrz formuły obliczeniowe w Tabeli 10), a współczynniki transformacji są różne w zależności od systemu satelitarnego, czyli od liczby, szerokości i rodzaju rejestrowanych zakresów promieniowania elektromagnetycznego. Współczynniki te można znaleźć w opracowaniach naukowych, ale zaimplementowano je także w oprogramowaniu teledetekcyjnym. Jednak nie każdy program zawiera formuły obliczeniowe dla wszystkich dostępnych systemów satelitarnych.

W Tabeli 10 zestawiono formuły obliczeniowe transformacji Tasselet Cap dla różnych systemów satelitarnych, co umożliwia wykonanie tych operacji samodzielnie – są to w istocie proste operacje matematyczne.

Formuły obliczeniowe transformacji Tasselet Cap dla innych systemów satelitarnych można znaleźć we wspomnianej już bazie danych wskaźników teledetekcyjnych pod adresem <https://www.indexdatabase.de>.



Ryc. 3.20. Idea transformacji Tasselet Cap (za: Kauth, Thomas 1976; Jensen 1996)

Tabela 10. Współczynniki transformacji Tasselet Cap dla różnych systemów satelitarnych, gdzie: B1, B2... Bn to oznaczenie poszczególnych kanałów spektralnych

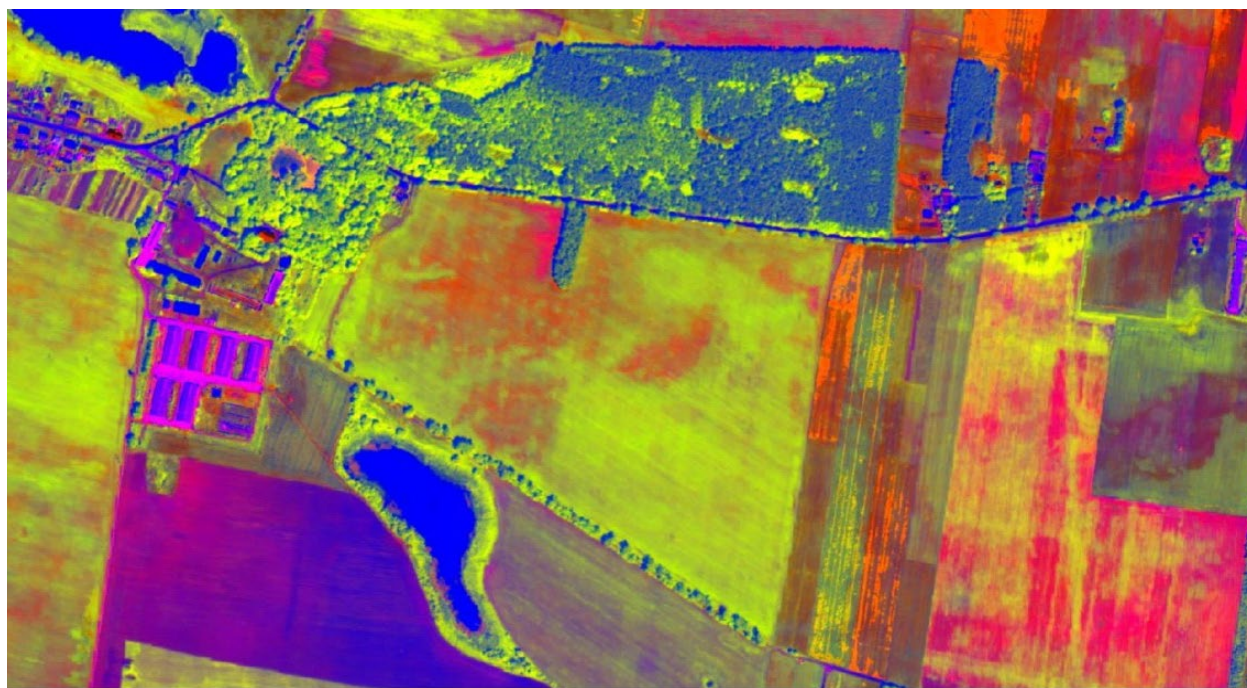
Sensor	Formuły obliczeniowe
Landsat 4-5 TM	$TCT1_{TM} \text{ (Brightness)} = 0,2043 \cdot B1 + 0,4158 \cdot B2 + 0,5524 \cdot B3 + 0,5741 \cdot B4 + 0,3124 \cdot B5 + 0,2303 \cdot B7$ $TCT2_{TM} \text{ (Greeness)} = -0,1603 \cdot B1 - 0,2819 \cdot B2 - 0,4934 \cdot B3 + 0,7940 \cdot B4 - 0,0002 \cdot B5 - 0,1446 \cdot B7$ $TCT3_{TM} \text{ (Wetness)} = 0,0315 \cdot B1 + 0,2021 \cdot B2 + 0,3102 \cdot B3 + 0,1594 \cdot B4 - 0,6806 \cdot B5 - 0,6109 \cdot B7$
LANDSAT 7 ETM+	$TCT1_{TM} \text{ (Brightness)} = 0,3561 \cdot B1 + 0,3972 \cdot B2 + 0,3904 \cdot B3 + 0,6966 \cdot B4 + 0,2286 \cdot B5 + 0,1596 \cdot B7$ $TCT2_{TM} \text{ (Greeness)} = -0,3344 \cdot B1 - 0,3544 \cdot B2 - 0,4556 \cdot B3 + 0,6966 \cdot B4 - 0,0242 \cdot B5 - 0,2630 \cdot B7$ $TCT3_{TM} \text{ (Wetness)} = 0,2626 \cdot B1 + 0,2141 \cdot B2 + 0,0926 \cdot B3 + 0,0656 \cdot B4 - 0,7629 \cdot B5 - 0,5388 \cdot B7$
LANDSAT 8 OLI ³⁴	$TCT1_{OLI} \text{ (Brightness)} = 0,3029 \cdot B2 + 0,2786 \cdot B3 + 0,4733 \cdot B4 + 0,5599 \cdot B5 + 0,5080 \cdot B6 + 0,1872 \cdot B7$ $TCT2_{OLI} \text{ (Greeness)} = -0,2941 \cdot B2 - 0,2430 \cdot B3 - 0,5424 \cdot B4 + 0,7276 \cdot B5 + 0,0713 \cdot B6 - 0,1608 \cdot B7$ $TCT3_{OLI} \text{ (Wetness)} = 0,1511 \cdot B2 + 0,1973 \cdot B3 + 0,3283 \cdot B4 + 0,3407 \cdot B5 - 0,7117 \cdot B6 - 0,4559 \cdot B7$
IKONOS (Horne 2003)	$TCT1_{IKONOS} \text{ (Brigthtness)} = 0,326 \cdot B1 + 0,509 \cdot B2 + 0,560 \cdot B3 + 0,567 \cdot B4$ $TCT2_{IKONOS} \text{ (Greeness)} = -0,311 \cdot B1 - 0,356 \cdot B2 - 0,325 \cdot B3 + 0,819 \cdot B4$ $TCT3_{IKONOS} \text{ (Wetness)} = -0,612 \cdot B1 - 0,312 \cdot B2 + 0,722 \cdot B3 - 0,081 \cdot B4$ $TCT4_{IKONOS} = -0,650 \cdot B1 + 0,719 \cdot B2 - 0,243 \cdot B3 - 0,031 \cdot B4$
QuickBird (Yarbrough, Easson, Kuszmaul 2005)	$TCT1_{QuickBird} \text{ (Brigthtness)} = 0,319 \cdot B1 + 0,542 \cdot B2 + 0,490 \cdot B3 + 0,604 \cdot B4$ $TCT2_{QuickBird} \text{ (Greeness)} = -0,121 \cdot B1 - 0,331 \cdot B2 - 0,517 \cdot B3 + 0,780 \cdot B4$ $TCT3_{QuickBird} \text{ (Wetness)} = 0,652 \cdot B1 + 0,375 \cdot B2 - 0,639 \cdot B3 - 0,163 \cdot B4$ $TCT4_{QuickBird} = 0,677 \cdot B1 - 0,675 \cdot B2 + 0,292 \cdot B3 + 0,011 \cdot B4$
WorldView-2 (Yarbrough, Navulur 2014)	$TCT1_{WorldView-2} \text{ (Brigthtness)} = -0,060436 \cdot B1 + 0,012147 \cdot B2 + 0,125846 \cdot B3 + 0,313039 \cdot B4 + 0,412175 \cdot B5 + 0,482758 \cdot B6 - 0,160654 \cdot B7 + 0,673510 \cdot B8$ $TCT2_{WorldView-2} \text{ (Greeness)} = -0,140191 \cdot B1 - 0,206224 \cdot B2 - 0,215854 \cdot B3 - 0,314441 \cdot B4 - 0,410892 \cdot B5 + 0,095786 \cdot B6 + 0,600549 \cdot B7 + 0,503672 \cdot B8$ $TCT3_{WorldView-2} \text{ (Wetness)} = -0,270951 \cdot B1 - 0,315708 \cdot B2 - 0,317263 \cdot B3 - 0,242544 \cdot B4 - 0,256463 \cdot B5 - 0,096550 \cdot B6 - 0,742535 \cdot B7 + 0,202430 \cdot B8$
Sentinel-2 (Nedkov 2017)	$TCT1_{Sentinel-2} \text{ (Brigthtness)} = 0,0356 \cdot B1 + 0,0822 \cdot B2 + 0,1360 \cdot B3 + 0,2611 \cdot B4 + 0,2964 \cdot B5 + 0,3338 \cdot B6 + 0,3877 \cdot B7 + 0,3895 \cdot B8 + 0,0949 \cdot B9 + 0,0009 \cdot B10 + 0,3882 \cdot B11 + 0,1366 \cdot B12 + 0,4750 \cdot B8A$ $TCT2_{Sentinel-2} \text{ (Greeness)} = -0,0635 \cdot B1 - 0,1128 \cdot B2 - 0,1680 \cdot B3 - 0,3480 \cdot B4 - 0,3303 \cdot B5 + 0,0852 \cdot B6 + 0,3302 \cdot B7 + 0,3165 \cdot B8 + 0,0467 \cdot B9 - 0,0009 \cdot B10 - 0,4578 \cdot B11 - 0,4064 \cdot B12 + 0,3625 \cdot B8A$ $TCT3_{Sentinel-2} \text{ (Wetness)} = 0,0649 \cdot B1 + 0,1363 \cdot B2 + 0,2802 \cdot B3 + 0,3072 \cdot B4 + 0,5288 \cdot B5 + 0,1379 \cdot B6 - 0,0001 \cdot B7 - 0,0807 \cdot B8 - 0,0302 \cdot B9 + 0,0003 \cdot B10 - 0,4064 \cdot B11 - 0,5602 \cdot B12 - 0,1389 \cdot B8A$

³⁴<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/2150704X.2014.915434>.

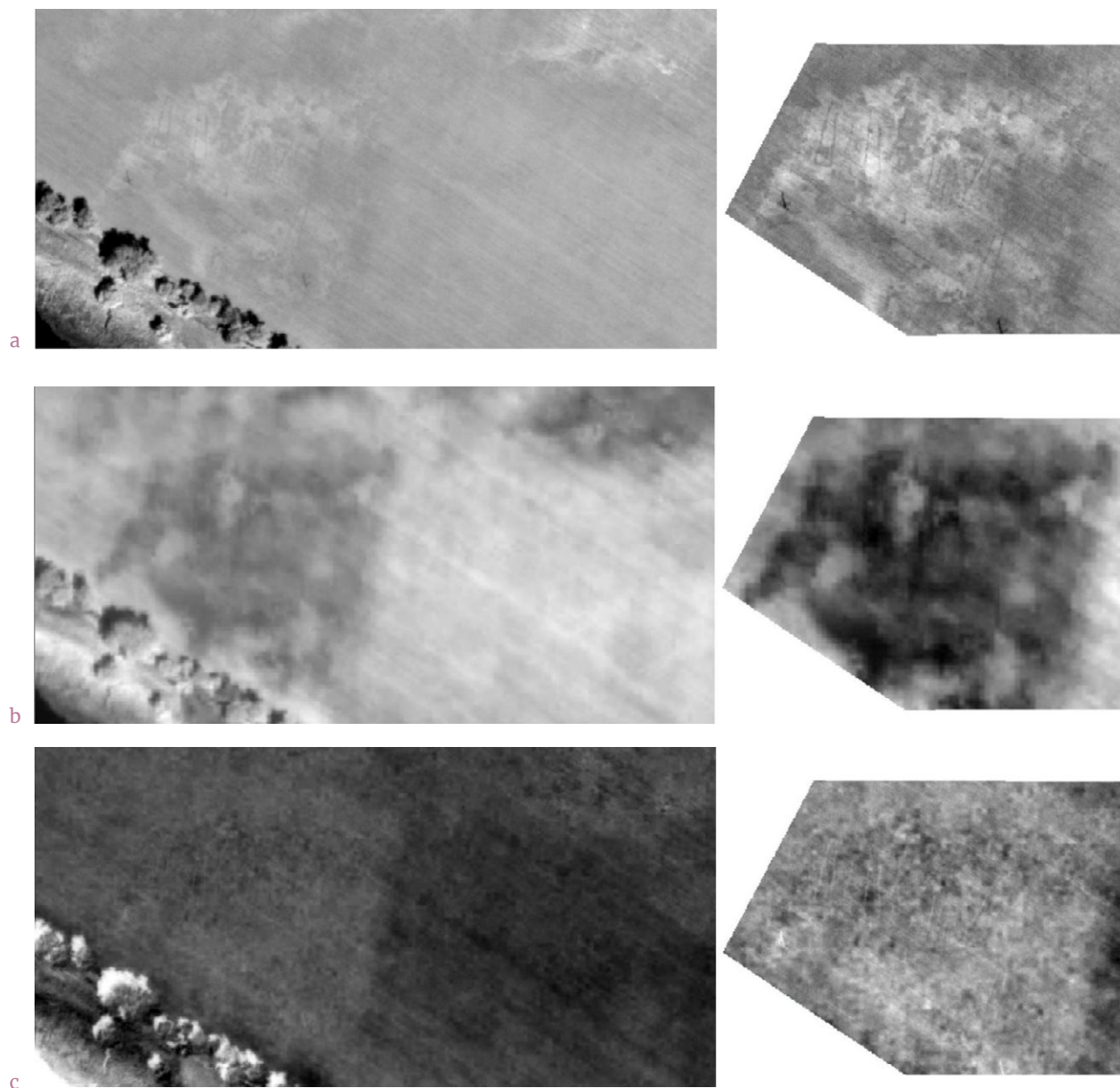
Przykład działania transformacji Tasselet Cap w odniesieniu do zobrazowania satelitarnego QuickBird z 4 lipca 2005 roku przedstawiono na [Ryc. 3.21](#) (pojedyncze składowe transformacji Tasselet Cap) i [Ryc. 3.22](#) (kompozycja barwna utworzona z trzech składowych transformacji Tasselet Cap). Pierwsza składowa transformacji (Brightness) dobrze uwypukla zróżnicowanie gleby, co można zauważyć na polu uprawnym oznaczonym jako A na [Ryc. 3.21a](#). Druga składowa – Greeness – ujawnia wyraźniej zróżnicowanie pokrywy roślinnej, co widać na polu uprawnym oznaczonym jako B na [Ryc. 3.21b](#). Składowa ta jest zbliżona w swojej wymowie do wskaźników roślinności. Trzecia składowa ukazuje z kolei zróżnicowanie wilgotności ([Ryc. 3.21c](#)). Warto nadmienić, że analogicznie jak podczas analizy zobrazowania panchromatycznego również tu ważny jest odpowiedni dobór funkcji wzmacniania kontrastu, aby nie „zgubić” zmienności tonalnej obrazu świadczącej o śladach przeszłości. Ponadto wyodrębnienie docelowego obszaru z całego zobrazowania satelitarnego pomaga lepiej uwidoczniać te ślady (por. [Ryc. 3.23](#)).



[Ryc. 3.21](#). Kolejne składowe transformacji Tasselet Cap wykonane na podstawie obrazu satelitarnego QuickBird z 4 lipca 2005 roku (K. Osińska-Skotak)



[Ryc. 3.22](#). Kompozycja barwna wykonana na podstawie składowych transformacji Tasselet Cap ($R = TCT-1$, $G = TCT-2$, $B = TCT-3$) uzyskana na podstawie obrazu satelitarnego QuickBird z 4 lipca 2005 roku (K. Osińska-Skotak)



Ryc. 3.23. Kolejne składowe transformacji Tasselet Cap: (a) Brightness, (b) Greeness, (c) Wetness, wykonane na podstawie obrazu satelitarnego QuickBird z 4 lipca 2005 roku. Po lewej stronie wizualizacja dla całego zobrazowania, po prawej – dla wyodrębnionego fragmentu (K. Osińska-Skotak)

2.2.1.6. Dostępność zobrazowań satelitarnych

Zobrazowania satelitarne – zarówno optyczne, jak i termalne oraz radarowe – są udostępniane na zasadach wolnego dostępu (np. LANDSAT, Sentinel), częściowo wolnego dostępu, choćby dla celów edukacyjnych lub badań naukowych (np. dane firmy Planet), bądź na zasadach komercyjnych (dotyczy to większości zobrazowań z wysokorozdzielczych systemów satelitarnych, takich jak WorldView, GeoEye, Pleiades).

Przeglądanie zobrazowań satelitarnych oraz ich zamawianie odbywa się poprzez specjalne serwisy internetowe poszczególnych operatorów. W przypadku danych dostępnych nieodpłatnie każdy użytkownik może samodzielnie wyszukać zobrazowania z danego okresu i pobrać je zdalnie po zalogowaniu się do systemu operatora. Analogicznie odbywa się wyszukiwanie danych dostępnych na zasadach komercyjnych, choć oczywiście w końcowej fazie należy złożyć zamówienie na wybrane dane, po czym szacowany

jest koszt ich zakupu. W przypadku tzw. danych archiwalnych (na ogół starszych niż trzy miesiące) średni koszt zakupu wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych (VHR) wynosi 15–20 USD za 1 km², a minimalny obszar zamówienia obejmuje z reguły 25 km².

Zobrazowania wysokorozdzielcze można zamówić bezpośrednio u operatora systemu lub za pośrednictwem dystrybutorów krajowych. Obecnie jedną z największych na świecie firm zajmujących się pozyskiwaniem i dystrybucją wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych jest firma MAXAR Technologies, operator systemów satelitarnych QuickBird, GeoEye i WorldView. Poza tym podmiotem duży udział na rynku polskim ma firma AIRBUS Defence&Space (w Polsce jej główny przedstawiciel to ASTRI Polska), która jest właścicielem satelitów SPOT, Pleiades i TerraSAR-X, a także firma PlanetLab – operator systemu SkySat. Ostatnio na rynku polskim bardzo aktywnie działa chiński operator komercyjnej konstelacji Jilin, której zobrazowania oferuje wielu krajowych dystrybutorów (m.in. ProGea 4D, MGGP Aero, CloudFerro, SmallGIS).

Warto zwrócić uwagę, że w przypadku zakupu danych od podmiotów zagranicznych przez krajowe podmioty publiczne mogą pojawić się problemy natury formalnej (bardziej skomplikowane zamówienia publiczne z udziałem podmiotu zagranicznego). Instytucje publiczne zamawiają więc najczęściej zobrazowania satelitarne za pośrednictwem firm krajowych, które zajmują się dystrybucją tego rodzaju danych. W zależności od polityki firmy – właściciela danego systemu satelitarnego – na lokalnych rynkach może działać wiele podmiotów pośredniczących w zakupie lub też jeden przedstawiciel firmy mający wyłączność na sprzedaż zobrazowań.

Najbardziej popularnymi katalogami internetowymi zobrazowań satelitarnych są:

- > EarthExplorer i GLOVIS – serwisy amerykańskiej służby geologicznej USGS, udostępniające m.in. dane z misji historycznych CORONA i HEXAGON oraz z satelitów serii LANDSAT i Sentinel-2;

- > SCI HUB – serwis Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), udostępniający przede wszystkim dane z programu Sentinel;
- > Archive Search & Discovery – serwis firmy MAXAR, udostępniający dane na zasadach komercyjnych z satelitów wysokorozdzielczych WorldView, GeoEye, IKONOS, QuickBird;
- > GeoStore – serwis firmy AIRBUS, udostępniający dane na zasadach komercyjnych z systemów SPOT, Pleiades, Pleiades NEO TerraSAR-X.

Poza tymi typowymi przeglądarkami zobrazowań satelitarnych w ostatnim czasie powstało szereg bardziej rozbudowanych serwisów internetowych, takich jak EO Browser czy CREODIAS Browser, które służą do wyszukiwania zobrazowań satelitarnych z różnych systemów satelitarnych, a jednocześnie stanowią intuicyjne narzędzie do wizualizacji zobrazowań oraz tworzenia i analizy produktów pochodnych, np. kompozycji barwnych w różnej konwencji kolorystycznej czy wskaźników teledetekcyjnych.

Wybór zobrazowań satelitarnych do analiz

Niezależnie od serwisu, poszukując zobrazowań satelitarnych, użytkownik zawsze musi zdefiniować: obszar badań, przedział czasu wykonania zobrazowań, rodzaj danych (określony system satelitarny) i/lub poziom przetworzenia danych. Punktem wyjścia przy wyborze danych satelitarnych jest precyzyjnie sformułowane zadanie badawcze. Nie ma potrzeby pobierać danych z Sentinela, jeżeli chcemy sprawdzić obecność wyróżników roślinnych w jakimś ściśle określonym miejscu. Wówczas niezbędne są zobrazowania wysokorozdzielcze, obecnie dostępne wyłącznie komercyjnie. Próbuąc pozyskać takie dane, warto sprawdzić dostępność zobrazowań aktualnych (dla większości dystrybutorów to dane z okresu trzech ostatnich miesięcy) lub przeszukać zasoby w archiwach firm dystrybuujących (zobrazowania starsze niż trzy miesiące uznawane są za tzw. dane archiwalne). Jeżeli chcemy zidentyfikować potencjalne wyróżniki roślinne, warto wyszukać zobrazowania wykonane

w czerwcu lub lipcu (zależnie od części kraju). Powinniśmy przy tym sprawdzić, czy w danym rejonie wystąpiła wówczas susza i jakie są lokalne warunki glebowe (por. rozdz. 1.1.3 i 2.1.2). Zasadniczo, przy zamówieniach zobrazowań komercyjnych, należy brać pod uwagę:

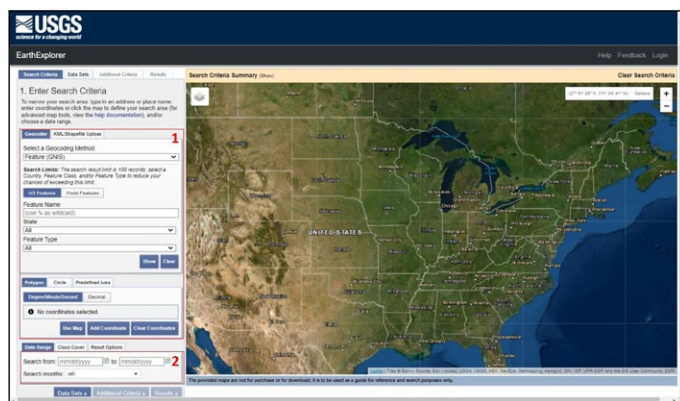
1. rozdzielczość przestrzenną obrazu panchromatycznego i kanałów obrazu wielospektralnego,
2. termin,
3. zachmurzenie,
4. poziom przetworzenia, a w szczególności georeferencję.

2.2.1.6.1. EarthExplorer – earthexplorer.usgs.gov

EarthExplorer jest prowadzony przez United States Geological Survey (USGS) – amerykańską agencję naukowo-badawczą.


W celu wyszukania danych w pierwszej kolejności należy zdefiniować kryteria wyszukiwania (zakładka **Search Criteria**), czyli:

1. wskazać obszar zainteresowania – można to zrobić np. poprzez:
 - a. wpisanie nazwy / adresu szukanego obszaru – **US Features** (dla terenów USA) lub **World Features** (dla całego świata);
 - b. wczytanie pliku z zasięgiem obszaru – **Predefined area** lub **KML/Shapefile Upload**;
 - c. narysowanie zasięgu przeszukiwania bezpośrednio w oknie mapy poprzez wskazanie punktów wielokąta definiującego obszar zainteresowania – **Polygon**;
 - d. zdefiniowanie punktu centralnego i długości promienia – **Circle**;
2. określić daty przeszukiwania – **Data Range** (Uwaga! W EarthExplorer stosowany jest amerykański system zapisu daty, czyli: MM/DD/YYYY). W przypadku definiowania daty można zawęzić okres przeszukiwania do konkretnych miesięcy (opcja: **Search Months**).
3. Ewentualnie określić maksymalny dopuszczalny procent zachmurzenia zobrazowania satelitarnego – zakładka **Cloud Cover**.



Ryc. 3.24. Serwis EarthExplorer – definiowanie kryteriów wyszukiwania

W serwisie EarthExplorer możliwe jest przeglądanie danych z różnych systemów satelitarnych, jak i danych z pułapu lotniczego (na obszar USA). Są to m.in. dane obrazowe (optyczne, termalne, radarowe – archiwalne i aktualne) oraz dane wysokościowe (NMT, NMPT – np. SRTM, ASTER DEM). Wybór rodzaju wyszukiwanych danych dokonywany jest w zakładce **Data Sets**.

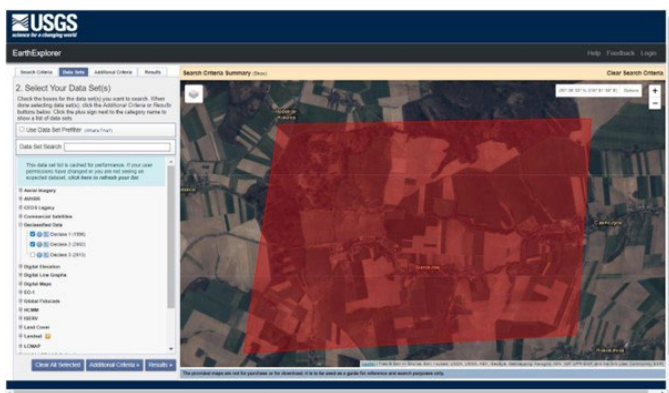
Serwis udostępnia część danych nieodpłatnie (np. z systemu LANDSAT, Sentinel, ASTER). Informację na temat licencji czy formy udostępniania poszczególnych zbiorów danych można znaleźć po naciśnięciu ikonki , umieszczonej przy każdym zbiorze danych z listy dołączonej do każdego podkatalogu.

W przypadku poszukiwania danych historycznych z amerykańskich misji rozpoznawczych CORONA, ARGON czy LANYARD należy zaznaczyć zbiór danych **Declassified Data => Declass 1**. Natomiast zobrazowania z misji rozpoznawczych KH-7 (GAMBIT) i KH-9 (HEXAGON) znajdują się w zbiorze oznaczonym jako **Declass 2**. Dane te są udostępniane nieodpłatnie pod warunkiem, że zostały już wcześniej zdigitalizowane. W przypadku danych, których nie przetworzono do postaci cyfrowej, koszt takiej operacji to 30 USD za jedno zobrazowanie.

Po zdefiniowaniu obszaru zainteresowania, okresu przeszukiwania i szukanego zbioru lub zbiorów danych można określić dodatkowe kryteria (**Additional Criteria**) dla każdego zbioru danych, np. maksymalne pokrycie chmurami; konkretny skaner, z którego dane chcemy otrzymać;







poziom produktu czy typ rejestracji (noc/dzień). W przypadku definiowania dopuszczalnego pokrycia chmurami szukanego zobrazowania trzeba zachować ostrożność, ponieważ może się zdarzyć, że obszar zainteresowania jest wolny od zachmurzenia, mimo że zobrazowanie satelitarne charakteryzuje się dużym zachmurzeniem.

Po przejściu do zakładki **Results** wyświetlona zostanie lista zobrazowań dostępnych dla zdefiniowanego obszaru zainteresowania.



Ryc. 3.25. Serwis EarthExplorer

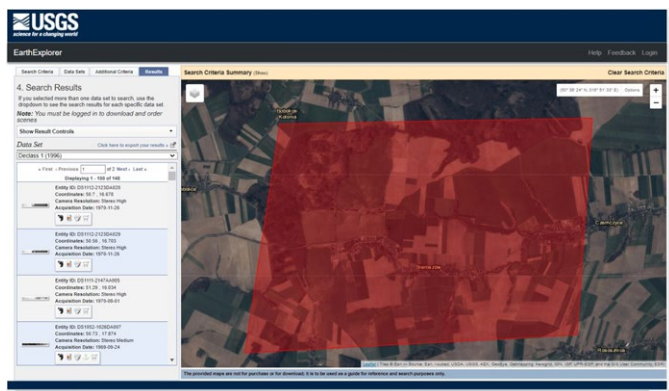
Przy każdej miniaturce obrazu znajdują się podstawowe dane dotyczące konkretnego zobrazowania, w tym numer identyfikacyjny, data rejestracji zobrazowania, współrzędne środka sceny satelitarnej lub jej numer katalogowy. Naciskając przyciski znajdujące się obok podglądu każdego z obrazów, można uzyskać bardziej szczegółowe informacje na temat zobrazowania (metainformacje), wyświetlić jego zasięg przestrzenny, podejrzeć zobrazowanie, dokonać jego zamówienia lub pobrać zobrazowanie bezpośrednio na dysk. Oznaczenia wymienionych funkcji:

-  zasięg sceny satelitarnej,
-  wyświetlenie podglądu sceny satelitarnej w oknie mapy,
-  porównanie dwóch podglądów,
-  wyświetlenie informacji szczegółowych na temat sceny satelitarnej,
-  pobranie danych satelitarnych,
-  zamówienie danych satelitarnych, gdy na przykład zobrazowanie jest niedostępne w formie cyfrowej.


Dane może pobrać jedynie użytkownik zarejestrowany, dlatego należy wcześniej założyć konto w EarthExplorer.




2.2.1.1.1. GloVis – glovis.usgs.gov

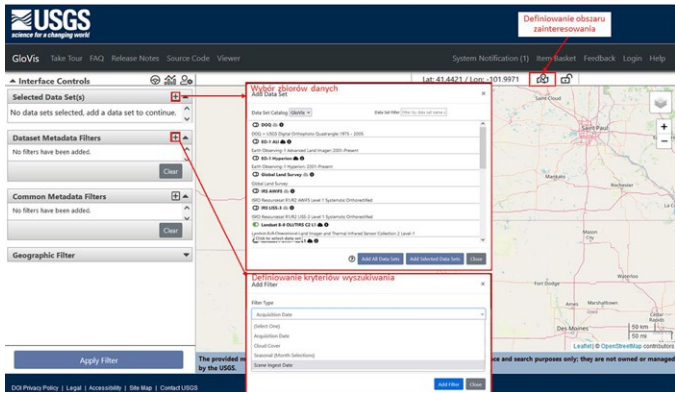
GloVis to nieco bardziej intuicyjna wersja serwisu EarthExplorer. Można w nim przeszukiwać jedynie wybrane zbiory danych, w tym dane z satelitów serii LANDSAT, a niedługo ma być uruchomiona możliwość przeglądania danych Sentinel. Serwis jest intuicyjny w obsłudze, przygotowany został także samouczek.



Ryc. 3.26. Serwis EarthExplorer – wynik wyszukiwania

Jak w przypadku każdego serwisu, należy tu zdefiniować: obszar zainteresowania , daty początku i końca przeszukiwania oraz zbiór przeszukiwanych danych (np. Global Land Survey, Sentinel-2). Dane zgromadzone w tym systemie są udostępniane według różnych licencji, a ich opis jest dostępny po naciśnięciu ikonki  przy zbiorze danych (opcja pojawia się po wskazaniu – w zakładce **Add Data Set** – przeszukiwanych zbiorów danych). Definiowanie kryteriów odbywa się poprzez wybór opcji **Dataset Metadata Filters**, gdzie do każdego zbioru danych można określić warunki wyszukiwania. Po zdefiniowaniu kryteriów należy wybrać przycisk **Apply Filter**. Wówczas wyszukane zostaną wszystkie dostępne zobrazowania spełniające te kryteria. Na górze serwisu (po lewej stronie) znajdują się dodatkowe przyciski umożliwiające wygodne przeglądanie kolejnych zobrazowań i ich

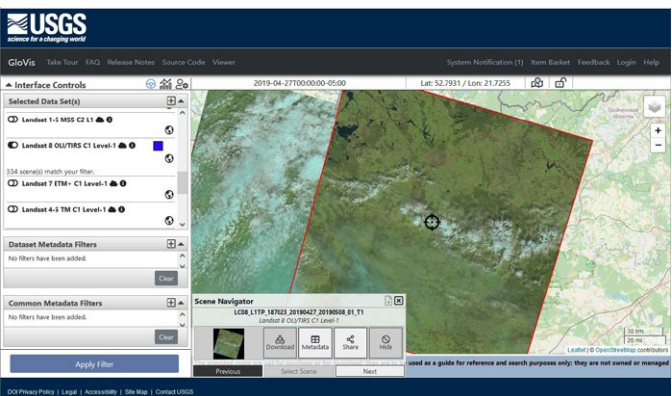
charakterystyki (opcja **Scene Navigator** ) , wyświetlanie wyników w chronologii ich rejestracji (opcja **Result Timeline** ) oraz ustalenie preferencji użytkownika dotyczących działania serwisu (**User Preferences** ) . Po uruchomieniu opcji **Scene Navigator** na dole serwisu pojawia się dodatkowy panel, w którym dostępne są kolejne funkcje. Wybierając przycisk **Download** użytkownik może pobrać dane satelitarne na dysk, a w przypadku danych dostępnych komercyjnie można je zamówić. Z kolei przycisk **Metadata** umożliwia uzyskanie szczegółowych informacji na temat wskazanego/wyświetlanego zobrazowania. Opcja **Share** pozwala na przekazanie linku do metadanych i podglądu wybranego zobrazowania satelitarnego, ale również pobranie lub zamówienie danych oraz wyeksportowanie metadanych do formatu xml. Funkcja **Hide** ukrywa wskazane przez użytkownika zobrazowanie. Jeśli wybieramy większą liczbę zobrazowań, wówczas wygodniej jest skorzystać z możliwości dodania wybranych zdjęć (**Select Scene**) i pobrania paczki danych z koszyka (**Item Basket**) . Opcje te są aktywne po zalogowaniu się do serwisu.





Ryc. 3.27 Serwis EarthExplorer – wybór kryteriów wyszukiwania

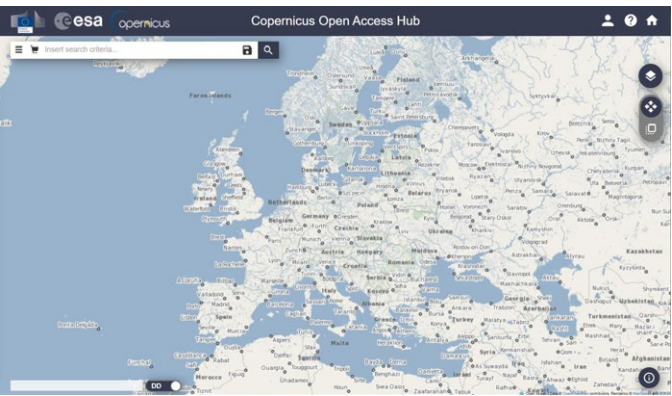
2.2.1.6.3. SCI HUB – scihub.copernicus.eu

SCI HUB jest platformą Europejskiej Agencji Kosmicznej, gdzie udostępnia się zobrazowania satelitarne pozyskiwane z satelitów serii Sentinel, w tym obrazy optyczne Sentinel-2 i dane radarowe Sentinel-1. Są one dostępne nieodpłatnie, ale żeby je przeglądać, trzeba się zalogować, czyli być użytkownikiem zarejestrowanym.








Ryc. 3.28. SCI HUB – widok głównego okna serwisu

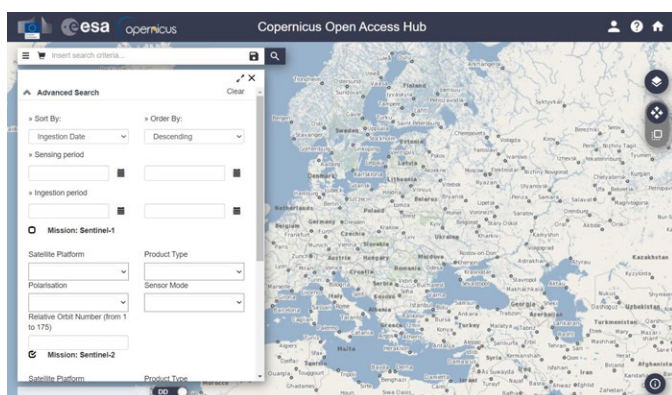
Zdefiniowanie obszaru zainteresowania polega tutaj na jego zaznaczeniu w oknie mapy prawym klawiszem myszy. Naciśnięcie przycisku  uruchamia wyszukiwanie danych. W celu zdefiniowania szczegółowych kryteriów wyszukiwania należy z kolei nacisnąć znak  i po rozwinięciu okna dialogowego można zdefiniować odpowiednie parametry dla poszczególnych systemów satelitarnych (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3), w tym okres przeszukiwania, wybór satelity, typ produktu – żądany poziom przetworzenia.



Ryc. 3.29. SCI HUB – kryteria wyszukiwania danych

Po akceptacji (kliknięcie w znak ) wyświetlone zostaną dane dla wybranego obszaru, spełniające określone kryteria.

Lista danych spełniających wybrane kryteria jest wyświetlana po lewej stronie okna mapy. Podświetlając dane na liście, uzyskuje się dostęp do opcji wyświetlania podglądu sceny satelitarnej , informacji na jej temat , dodania do zamówienia  czy bezpośredniego pobrania produktu na dysk lokalny .



Ryc. 3.30. SCI HUB – widok wyników wyszukiwania danych

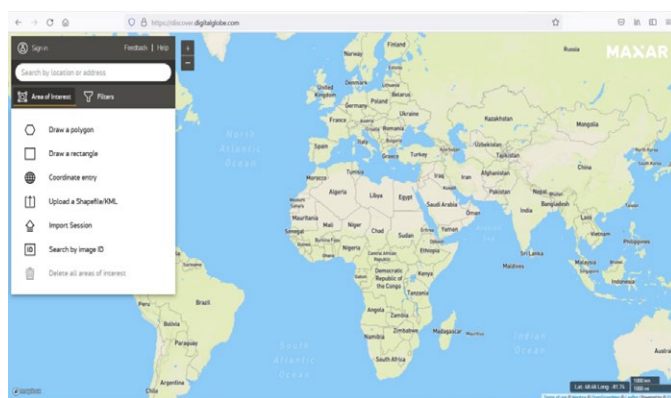
2.2.1.6.4. Archive Search & Discovery – discover.maxar.com

Obecnie głównym dystrybutorem optycznych obrazów satelitarnych o bardzo dużej rozdzielczości przestrzennej (tzw. VHR) w USA jest firma MAXAR Technologies. Oferuje ona zobrazenia z satelitów IKONOS, QuickBird, GeoEye, WorldView. Serwis internetowy umożliwiający przeglądanie dostępnych danych jest bardzo intuicyjny i przyjazny, oparty na najnowszych rozwiązaniach technologicznych.

Obszar zainteresowania można zdefiniować na różnorodne sposoby. Najwygodniej jest skorzystać z opcji wpisania w oknie dialogowym **Search by location or address** (znajdującym się w lewym górnym rogu głównego okna nazwy miasta czy regionu geograficznego). Po wprowadzeniu informacji pojawia się lista podpowiedzi. Wybór właściwej nazwy prowadzi do dokładniejszego określenia granic obszaru, dla którego będą wyszukiwane dane. Granice te

można wskazać poprzez narysowanie na mapie wielokąta/prostokąta, wpisanie współrzędnych geograficznych czy wczytanie pliku z granicami obszaru (w formacie shp lub kmz).

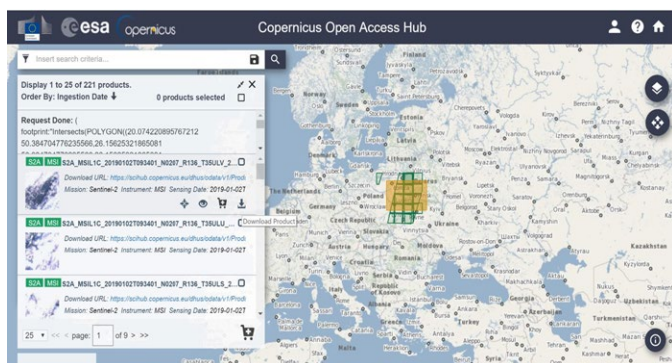
Po określeniu granic obszaru zainteresowania automatycznie rozpoczyna się przeszukiwanie zbioru danych. Rezultat wyszukiwania jest wyświetlany w bocznym (lewym) panelu okna z mapą, natomiast w oknie mapy pojawiają się podglądy wybranych zobrażeń.



Ryc. 3.32. Serwis Archive Search & Discovery firmy MAXAR – wyświetlanie wyników wyszukiwania danych

Rozwijając znak po prawej stronie każdego zobrazenia z listy, można uzyskać informację na temat: identyfikatora sceny satelitarnej (Image ID), wielkości maksymalnej piksela obrazu (Max GSD), stopnia zachmurzenia (Image Clouds), kąta odchylenia od nadiru (Image Off Nadir), liczby rejestrowanych kanałów spektralnych (Bands) wysokości Słońca w chwili rejestracji obrazu (Sun Elevation) i azymutu obserwacji (Max Target Azimuth). Opcja **Browse: view** umożliwia obejrzenie podglądu obrazu i ocenę jego jakości.

Gdy istnienia potrzeba określenia innych kryteriów wyszukiwania niż domyślnie zdefiniowane, należy wybrać opcję **Filters** i dokonać odpowiednich zmian. Można tu określić: tryb rejestracji obrazu (czy poszukiwane są obrazy pojedyncze; czy zarejestrowane w trybie stereo), maksymalną dopuszczalną rozdzielczość przestrzenną, rodzaj zobrazenia (PAN, 4-kanałowy, 8-kanałowy, SWIR), przedział czasowy, stopień zachmurzenia, maksymalny kąt odchylenia od nadiru i wysokość Słońca w chwili rejestracji obrazu.

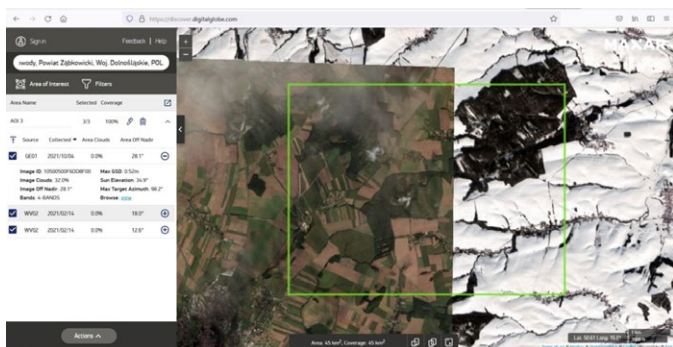


Ryc. 3.31. Serwis Archive Search & Discovery firmy MAXAR – po lewej widok panelu z możliwymi wariantami definiowania obszaru zainteresowania

Znajdująca się na dole bocznego panelu opcja **Actions** służy do zapisania wyników wyszukiwania danych (Ryc. 3.33.):

- > jako raportu w formacie csv;
- > poprzez wysłanie wiadomości e-mail;
- > jako link;
- > poprzez pobranie wybranych produktów w postaci plików shapefile, kmz lub GeoJson;
- > poprzez pobranie zasięgu obszaru zainteresowania w postaci pliku shapefile, kmz, GeoJson lub WKT;
- > poprzez pobranie obrazu mapy do pliku w formacie pdf.

Zamówienie zdjęć (odpłatne) jest możliwe po założeniu konta użytkownika i zalogowaniu się do serwisu.



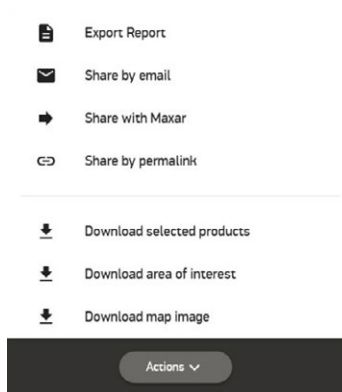
Ryc. 3.33. Widok panelu Actions z możliwymi opcjami zapisu wyników wyszukiwania danych

2.2.1.6.5. AIRBUS GEOSTORE – www.intelligence-airbusds.com/geostore

Platforma GeoStore firmy AIRBUS Defence and Space umożliwia przeglądanie i wyszukiwanie obrazowań z systemów satelitarnych dostępnych na zasadach komercyjnych, w tym optycznych z satelitów SPOT i Pleiades oraz radarowych z satelitów TerraSar-X. Serwis ten jest bardzo intuicyjny i przyjazny, oparty na najnowszych rozwiązaniach technologicznych.

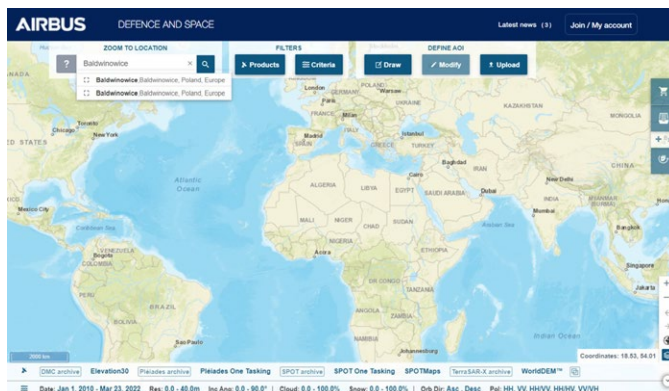
Początkową lokalizację obszaru zainteresowania można zdefiniować, wpisując nazwę miasta bądź regionu geograficznego, po czym pojawia się lista z podpowiedziami.

Po wskazaniu właściwego adresu serwis przybliży widok do zadanej lokalizacji. Wybierając jedną z opcji **Draw**, należy określić granice



Ryc. 3.34. AIRBUS GEOSTORE – widok głównego okna serwisu

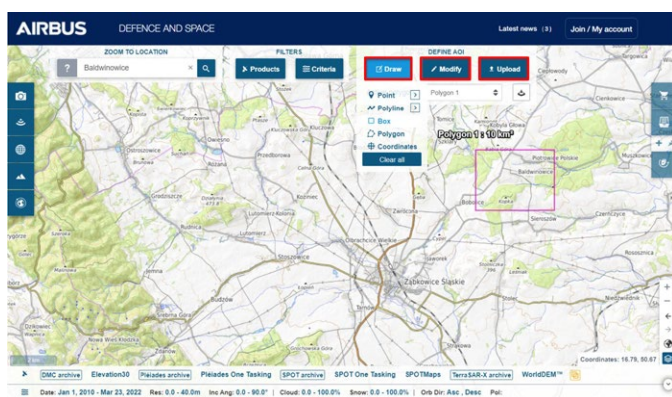
obszaru, dla którego będą wyszukiwane dane. Granice te można wskazać poprzez wskazanie środka obszaru (Point), narysowanie na mapie linii (Line), wielokąta (Polygon), prostokąta (Box) albo wpisanie współrzędnych geograficznych (Coordinates). Ponadto, stosując opcję **Upload**, możliwe jest wczytanie pliku z granicami obszaru zainteresowania (w formacie shapefile, kml/kmz lub WKT).



Ryc. 3.35. AIRBUS GEOSTORE – opcje definiowania obszaru zainteresowania

Opcja **Modify** służy do skorygowania przebiegu zdefiniowanego już zasięgu obszaru zainteresowania.

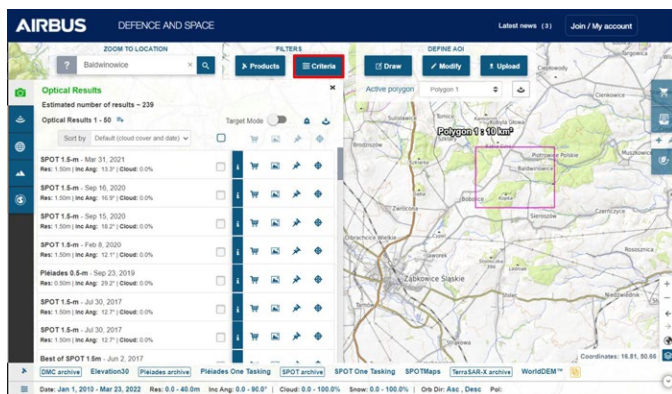
Po zdefiniowaniu obszaru serwis rozpoczyna automatycznie przeszukiwanie zbioru danych – wyniki są wyświetlane w bocznym (lewym) panelu okna z mapą. Wskazanie wybranej sceny satelitarnej na liście w oknie mapy uwidacznia zasięg wybranego (podświetlonego na liście) obrazu. Przy każdym obrazie znajdują się podstawowe informacje: data rejestracji, wielkość piksela, kąt odchylenia od nadiru czy stopień zachmurzenia. Po naciśnięciu **i** można się zapoznać



Ryc. 3.36. AIRBUS GEOSTORE – wyświetlanie wyników wyszukiwania danych

ze szczegółowymi metainformacjami konkretnego zobrazowania satelitarne.

Definiowanie kryteriów wyszukiwania innych niż domyślne odbywa się poprzez modyfikację zapisów w opcji **Criteria**, które są odmienne dla różnych typów zobrazowań – optycznych i radarowych. Ponadto serwis oferuje możliwość wyszukiwania poprzez wskazanie domyślnie zdefiniowanych produktów w opcji **Products**, gdzie dokonuje się wyboru jednego bądź wielu produktów.

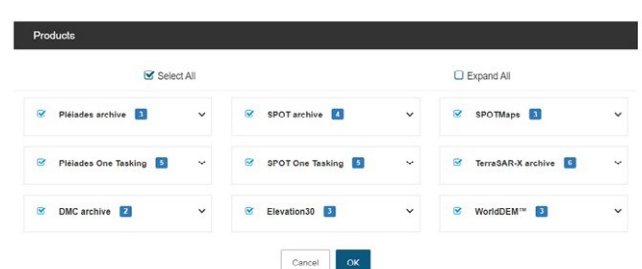


Ryc. 3.37. Widok panelu Products z predefiniowanymi kryteriami (wg rodzaju produktu) wyszukiwania danych






2.2.1.6.6. Sentinel Hub EO Browser – <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>

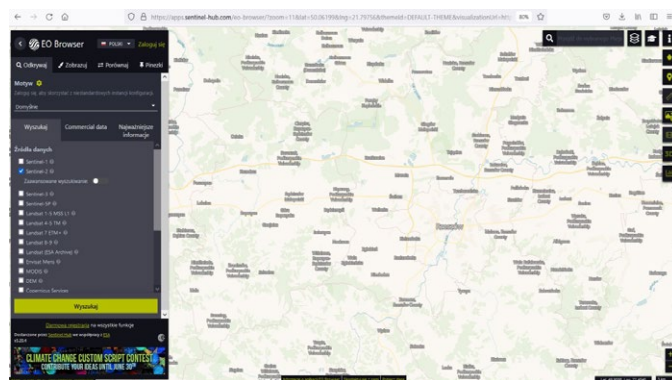
EO Browser jest jedną z platform pozwalających na wyszukiwanie zobrazowań satelitarnych i wizualizację różnych produktów powstałych w efekcie przetwarzania zobrazowań. Mamy tu narzędzie intuicyjne w obsłudze – nawet mało wprawny użytkownik nie powinien mieć problemów z jego wykorzystaniem. Dodatkowo przygotowano samouczek (<https://www.youtube.com/>

[embed/m3pron0C0kE](https://www.youtube.com/watch?v=embed/m3pron0C0kE)), podręcznik użytkownika (<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/user-guide/>), a także webinarium (<https://youtu.be/eK0OMn5H-kY>). Aplikacja ma osiem nakładek językowych, włącznie z wersją w języku polskim.




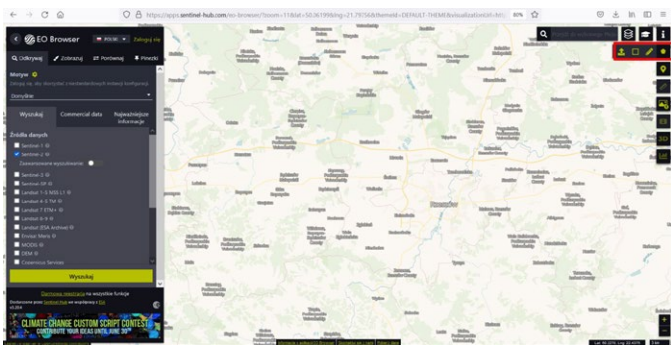
Ryc. 3.38. Sentinel Hub EO Browser – widok głównego okna serwisu

Aby rozpocząć wyszukiwanie danych, należy powiększyć mapę do obszaru zainteresowania albo skorzystać z opcji  w prawym górnym rogu serwisu, gdzie obszar zainteresowania można zdefiniować na cztery sposoby, a mianowicie poprzez: 1. wczytanie granic obszaru zainteresowania z pliku  (dostępne formaty to: KML/KMZ, GPX, GEOJSON/JSON), 2. narysowanie zasięgu w formie prostokąta , 3. narysowanie zasięgu w formie wielokąta , 4. wskazanie punktu zainteresowania .



Ryc. 3.39. Sentinel Hub EO Browser – widok panelu z listą zbiorów danych, które można przeszukiwać

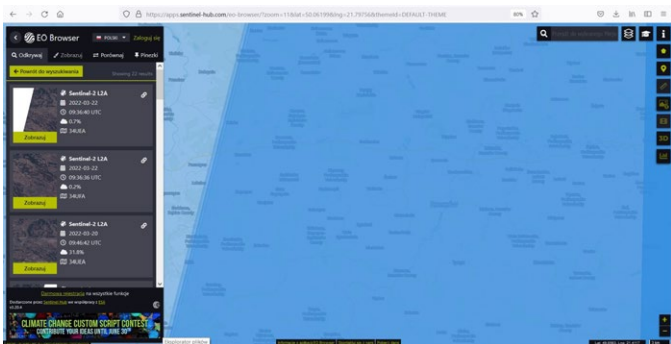
Wskazane punkty czy zasięgi można korygować bądź usuwać (zdefiniowanie obszaru zainteresowania sprawia, że pojawiają się dodatkowe opcje ). Po określeniu zasięgu obszaru należy wskazać dane, które są poszukiwane. Ponadto można zdefiniować przedział dat i podać miejsce, z jakich mają być wyszukiwane dane. Gdy



Ryc. 3.40. Sentinel Hub EO Browser – wyświetlenie wyników wyszukiwania danych

wszystkie parametry zostaną ustalone przez użytkownika, należy nacisnąć opcję **Wyszukaj**.

Po lewej stronie zostanie wyświetlona lista wyszukiwanych obrazów wraz z ich podglądem i podstawowymi informacjami (data i godzina rejestracji, stopień zachmurzenia i oznaczenie katalogowe sceny satelitarnej). Wybór opcji **Zobrazuj** przy danym obrazowaniu satelitarnym prowadzi do dalszych funkcji wizualizacji danych.

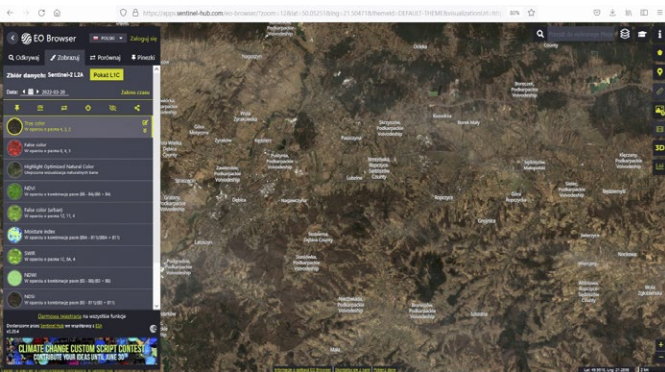


Ryc. 3.41. Sentinel Hub EO Browser – wyświetlenie obrazów i wyników i przetworzeń (np. kompozycji barwnych, obrazów wskaźnikowych)

W przypadku danych Sentinel-2 istnieje możliwość wizualizacji różnych przetworzeń: kompozycji w barwach naturalnych (True Color), kompozycji z wykorzystaniem podczerwieni bliżej (False color), ulepszonej wersji kompozycji w barwach naturalnych (Highlight Optimized Natural Color), Znormalizowanego Różnicowego Wskaźnika Roślinności (NDVI), kompozycji barwnej utworzonej z kanałów 12, 11 i 4, która uwypukla tereny zurbanizowane; wskaźnika wilgotności (Moisture index); kompozycji utworzonych z kanałów krótkiej podczerwieni (SWIR); Znormalizowanego Różnicowego Wskaźnika Wody (NDWI),

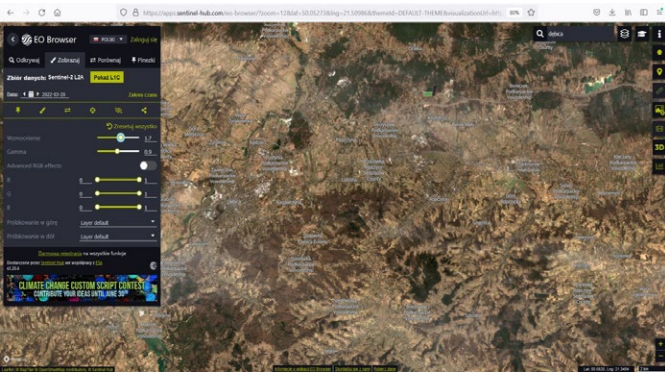
Znormalizowanego Różnicowego Wskaźnika Śniegu (NDSI) czy rezultatu automatycznej klasyfikacji pokrycia terenu (Scene classification map). Możliwe jest również przygotowanie własnej kompozycji barwnej lub obliczenie wskaźnika z dowolnych kanałów spektralnych (opcja: **Indywidualne dostosowanie**).

Ponadto w przypadku każdego produktu można samodzielnie zmienić sposób wyświetlania zobrazowania za pomocą opcji

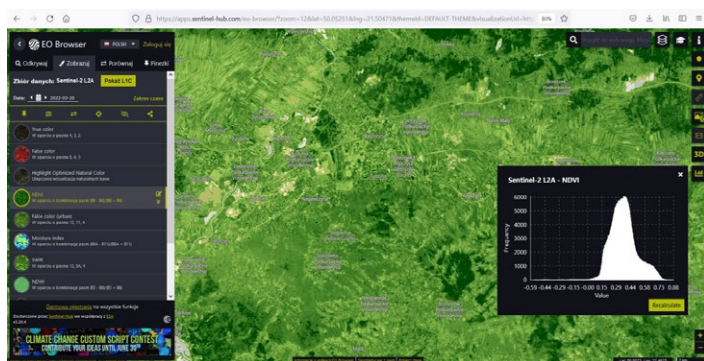


Ryc. 3.42. Sentinel Hub EO Browser – modyfikowanie sposobu wyświetlania obrazów


Ikony zlokalizowane po prawej stronie widoku mapy pozwalają: wykonać pomiar na obrazowaniu (opcja dostępna po zalogowaniu do aplikacji); pobrać obraz na dysk w formatach jpg lub png ; utworzyć animację poklatkową (opcja dostępna po zalogowaniu do aplikacji); zobrazować teren w widoku perspektywicznym **3D** (po uruchomieniu tej opcji pojawiają się kolejne ustawienia) i wyświetlić histogram danego zobrazowania lub obliczonych wskaźników .

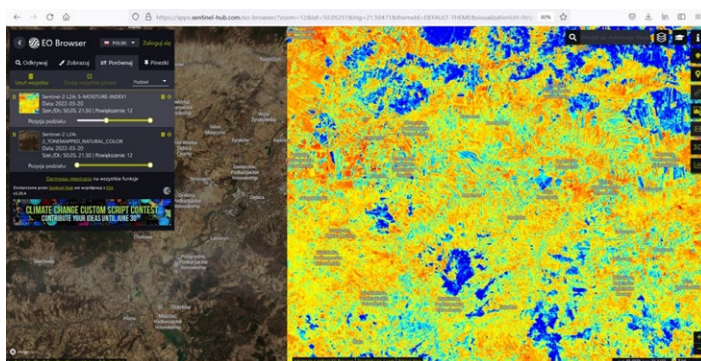


Ryc. 3.43. Sentinel Hub EO Browser – dodatkowe opcje analizy i wyświetlania obrazów



Ryc. 3.44. Sentinel Hub EO Browser – analiza porównawcza dwóch produktów tego samego zobrazowania

Aplikacja umożliwia również porównywanie poszczególnych produktów zarówno dla danego terminu, jak i różnych terminów. Aby wykorzystać te funkcje, należy wskazać produkty, które mają być porównywane poprzez ich aktywację, a następnie wybór opcji . Przejście do zakładki **Porównaj** pozwala na analizę porównawczą poprzez odświeżanie/przestawianie jednego produktu



Ryc. 3.45. Sentinel Hub EO Browser – analiza porównawcza dwóch zobrazowań

drugim lub zmieniać stopnia przezroczystości produktu nadrzędnego (w tym celu należy ustawić opcję **Nieprzezroczystość** zamiast funkcji **Podziel**).

Analogicznie działa aplikacja CREODIAS Browser (<https://browser.creodias.eu/>), przy czym obejmuje ona jeszcze inne funkcjonalności związane z wyszukiwaniem danych.

Bibliografia

- Agapiou A., Alexakis D.D., Sarris A., Hadjimitsis D.G. 2014. Evaluating the Potentials of Sentinel-2 for Archaeological Perspective. *Remote Sensing* 6, 2176–2194. <https://doi.org/10.3390/rs6032176>.
- Agapiou A., Lysandrou V., Hadjimitsis D.G. 2017. Optical Remote Sensing Potentials for Looting Detection. *Geosciences* 7, 98. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040098>.
- ASL Environmental Sciences Inc. 2008. *ASTER Mineral Exploration*. https://aslenv.com/assets/files/ASTER_Processing_for_Mineral_Exploration.pdf.
- Baret F., Guyot G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35, 161–173.
- Baret F., Guyot G., Major D. 1989. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR Estimation. W: *12th Canadian Symposium on Remote Sensing Symposium*, vol. 3. Vancouver, Canada: IGARSS, 1355–1358. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1989.576128>.
- Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T., Lascano R.J., Li H., Moran M.S. 2000. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. W: P.C. Robert, R.H. Rust, W.E. Larson (red.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16–19 July, 2000*. Madison: American Society of Agronomy, 1–15. <https://naldc.nal.usda.gov/download/4190/PDF>.
- Beck A., Philip G., Abdulkarim M., Donoghue D. 2007. Evaluation of Corona and Ikonos high resolution satellite imagery for archaeological prospection in western Syria. *Antiquity* 81, 161–175.
- Casana J., Cothren J. 2008. Stereo analysis, DEM extraction and orthorectification of CORONA satellite imagery: archaeological applications from the Near East. *Antiquity* 82, 732–749.
- Chamard P. et al. 1991. Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour une meilleure évaluation des formations végétales actives. *Télédétection et Cartographie*, Éd. AUPELF-UREF, 203–209.
- Crist E. 1985. A TM Tasseled Cap Equivalent Transformation for Reflectance Factor Data. *Remote Sensing of Environment* 17, 301–306.
- Cudahy T. 2012. *Australian ASTER Geoscience Product Notes*. https://www.dmp.wa.gov.au/Documents/Geological-Survey/GSWA-ASTER_GeoscienceProduct_Notes.pdf.
- Custer J. F. et al. 1986. Application of LANDSAT data and synoptic remote sensing to predictive models for prehistoric archaeological sites: an example from the Delaware Coastal Plain. *American Antiquity* 51, 572–588.
- Daughtry C.S.T. et al. 2000. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74(2), 229–239. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9).
- Deering D.W. et al. 1975. Measuring ‘forage production’ of grazing units from Landsat MSS data. W: *Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, October 6–10, 1975*. Ann Arbor: Environmental Institute of Michigan, 1169–1178.
- Dorsett J.E. et al. 1984. The UNESCO Libyan Valleys Survey VIII: Image analysis of Landsat satellite data for archaeological and environmental surveys, *Libyan Studies* 15, 71–80.
- Ebert J.I., Lyons T.R. 1980. Remote sensing in archaeology, cultural resources treatment and anthropology: The United States of America in 1978, *Aerial Archaeology* 5, 1–19.

- Ebert J.I. 1989. Techniques, Methods and Theoretical Goals in American Archaeological Remote Sensing: 'Predictive Modelling' as an Example. W: D. Kennedy (red.), *Into the Sun: essays in air photography in archaeology in honour of Derrick Riley*. Sheffield: J.R. Collis Publications, 86–101.
- Ebert J.I., Gutierrez A.A. 1981. Remote sensing of geomorphological factors affecting the visibility of archaeological materials. W: *Technical Papers of the American Society of Photogrammetry 47th Annual Meeting*, Washington, DC, February 22–27, 1981. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 226–236.
- Fowler M.J.F. 1995. Detection of archaeological features on multispectral satellite imagery. *AARGnews* 10, 7–14.
- Fowler M.J.F. 1999. High resolution satellite imagery from the Internet. *AARGnews* 18, 19–21.
- Fowler M.J.F. 2004. Declassified CORONA KH-4B satellite photography of remains from Rome's desert frontier, *International Journal of Remote Sensing* 24, 3549–3554.
- Fowler M.J.F. 2010. Satellite imagery and archaeology. W: D.C. Cowley, R.A. Standring, M.J. Abicht (red.), *Landscapes through the lens: aerial photographs and historic environment*, Oxford: Oxbow Books, 99–110.
- Fowler M.J.F., Fowler Y.M. 2005. Detection of archaeological crop marks on declassified CORONA KH-4B intelligence satellite photography of southern England. *Archaeological Prospection* 12, 257–264.
- Gao B. 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257–266.
- Gheyle W.R. et al. 2004. Evaluating CORONA: a case study in the Altai Republic (South Siberia). *Antiquity* 78, 391–403.
- Gitelson A.A., Kaufmann Y., Merzlyak M.N. 1996. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58, 289–298.
- Haboudane D. et al. 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90(3), 337–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>.
- Hardisky K.V., Smart R.M. 1983. The influence of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of *Spartina Alterniflora* Canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 49, 77–83.
- Horne J.H. 2003. A tasseled cap transformation for Ikonos images. W: *ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings*, Anchorage, AK, USA, May 3–9, 1–7.
- Huete A.R., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195–213.
- Huete A.R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 121–136.
- Hunt E.R., Rock B.N. 1989. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment* 30, 43–54.
- Jensen J.R. 1996. *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Johnson J.K. 1996. Delta Digitizing: GIS and Remote Sensing in Northwest Mississippi. W: H.D.G. Maschner (red.), *New Methods, Old Problems*. Carbondale: Center for Archaeological Investigations Southern Illinois University, 242–251.
- Kaufmann Y.J., Tanrer D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Geosci. Remote Sensing* 30, 261–270.

- Kauth R.J., Thomas G.S. 1976. The Tasseled Cap – A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. W: *Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*. West Lafayette: Purdue University. https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1160&context=lars_symp.
- Kennedy D. 1998. Declassified satellite photographs and archaeology in the Middle East: case studies from Turkey. *Antiquity* 72, 553–561.
- Kumar A., Pandey A., Jeyaseelan A.T. 2012. Built-up and vegetation extraction and density mapping using WorldView-II. *Geocarto International* 27 (7), 557–568. <https://doi.org/10.1080/10106049.2012.657695>.
- Lasaponara R., Masini N. 2007. Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery. *Journal of Archaeological Science* 34, 214–221.
- Lasaponara R., Masini N. (red.) 2012. *Satellite Remote Sensing. A New Tool for Archaeology*, Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8801-7>.
- Lasaponara R., Masini N. 2013. Satellite Synthetic Aperture Radar in Archaeology and Cultural Landscape: An Overview, *Archaeological Prospection* 20, 71–78. <https://doi.org/10.1002/arp.1452>.
- Lauer D. T., Morain S. A., Salomonson V. V. 1997. The Landsat program: Its origins, evolution and impacts, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63, 831–838.
- Musick H.B., Pelletier R.E. 1988. Response to soil moisture of spectral indexes derived from bidirectional reflectance in thematic mapper wavebands. *Remote Sensing Environment* 25(2), 167–184.
- Nedkov R. 2017. Orthogonal transformation of segmented images from the satellite Sentinel-2. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences*, 70, 687–692.
- NRO 1988. *The CORONA Story*. Chantilly: National Reconnaissance Office, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA640829.pdf>.
- NRO 1991. *The GAMBIT Story*. Chantilly: National Reconnaissance Office. <https://www.nro.gov/Portals/65/documents/foia/declass/GAMHEX/GAMBIT%20and%20HEXAGON%20Histories/6.PDF>.
- NRO 1992. *The HEXAGON Story*. Chantilly: National Reconnaissance Office. https://nsarchive2.gwu.edu/NSAEBB/NSAEBB438/docs/doc_44.pdf.
- Pearson R.L., Miller L.D. 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. W: *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, 1355–1379.
- Peñuelas J. et al. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing* 18(13), 2869–2875. <https://doi.org/10.1080/014311697217396>.
- Philip G. et al. 2002. CORONA satellite photography: an archaeological application from the Middle East. *Antiquity* 76, 109–118.
- Qi J. et al. 1994. A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment* 48, 119–126.
- Richardson A.J., Wiegand C.L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43, 1541–1552.
- Rondeaux G., Steven M., Baret F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Journal Remote Sensing of Environment* 55(2), 95–107. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7).
- Roujean J.L., Breon F.M. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 51(3), 375–384.

Rouse J.W. et al. 1973. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. Texas A&M University, Remote Sensing Center, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19730017588/downloads/19730017588.pdf>.

Ruffner K.C. (red.) 1995. *CORONA – America’s First Satellite Program*. History Staff Center for the Study of Intelligence. Washington D.C.: Central Intelligence Agency.

Stewart C. 2017. Detection of Archaeological Residues in Vegetated Areas Using Satellite Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing* 9, 118.

Tapete D. 2018. Remote Sensing and Geosciences for Archaeology. *Geosciences* 8, 41. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020041>.

Tapete D. (red.) 2019. *Earth Observation, Remote Sensing and Geoscientific Ground Investigations for Archaeological and Heritage Research*. Basel: MDPI, <https://www.mdpi.com/books/book/1455-earth-observation-remote-sensing-and-geoscientific-ground-investigations-for-archaeological-and>.

Tapete D., Cigna F. 2018. Appraisal of Opportunities and Perspectives for the Systematic Condition Assessment of Heritage Sites with Copernicus Sentinel-2 High-Resolution Multispectral Imagery. *Remote Sensing* 10, 561. <https://doi.org/10.3390/rs10040561>.

Tapete D., Cigna F. 2019a. COSMO-SkyMed SAR for Detection and Monitoring of Archaeological and Cultural Heritage Sites. *Remote Sensing* 11, 1326. <https://doi.org/10.3390/rs11111326>.

Tapete D., Cigna F. 2019b. Detection of Archaeological Looting from Space: Methods, Achievements and Challenges, *Remote Sensing* 11, 2389. <https://doi.org/10.3390/rs11202389>.

Tapete D., Cigna F., Donoghue D.N. 2016. ‘Looting marks’ in space-borne SAR imagery: Measuring rates of archaeological looting in Apamea (Syria) with TerraSAR-X Staring Spotlight. *Remote Sensing of Environment* 178, 42–58.

Ur J. 2003. CORONA satellite photography and ancient road networks: a Northern Mesopotamian case study. *Antiquity* 77, 102–115.

Wolf A. 2012. Using WorldView 2 Vis-NIR MSI Imagery to Support Land Mapping and Feature Extraction Using Normalized Difference Index Ratios. W: S.S. Shen, P.E. Lewis (red.), *Proceedings of SPIE*, vol. 8390: *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery*. Bellingham: International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.917717>.

Yarbrough L.D., Easson G., Kuzmaul J.S. 2005. QuickBird 2 Tasseled Cap Transform Coefficients: a Comparison of Derivation Methods. W: *Pecora 16 “Global Priorities in Land Remote Sensing” October 23 – 27, 2005, Sioux Falls, South Dakota*. https://www.researchgate.net/publication/228825263_QuickBird_2_Tasseled_Cap_Transform_coefficients_A_comparison_of_derivation_methods.

Yarbrough L.D., Navulur R. 2014. Presentation of the Kauth-Thomas transform for WorldView-2 reflectance data. *Remote Sensing Letters* 5(2), 131–138. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.885148>.



Grzegorz Kiarszys, Łukasz Banaszek

2.3. Lotnicze skanowanie laserowe w archeologii

2.3.1. Czym jest lotnicze skanowanie laserowe?

Lotnicze skanowanie laserowe (Airborne Laser Scanning, ALS) należy do grupy aktywnych metod teledetekcyjnych i opiera się głównie na technologii lidarowej (Banaszek 2015: 39–43; Kurczyński 2014). Zamontowany na platformie lotniczej i wycelowany w kierunku ziemi lidar (Light Detection and Ranging), czyli urządzenie emitujące energię o określonej długości fali i rejestrujące odbite echa, pozwala na zbieranie danych wysokościowych na lądzie, a przy zastosowaniu systemów batymetrycznych – na pomiar dna zbiorników wodnych i obiektów podwodnych (np. Kraus, Pfeifer 2001; Cowley, Opitz 2013, 1; Opitz 2013, 13; 16–17; Štular et al. 2021, 1–2). Możliwość penetracji szaty roślinnej oraz duża gęstość próbkowania pozwalająca na szczegółowe modelowanie powierzchni terenów otwartych, zurbanizowanych, zalesionych i rozmaitych obiektów znajdujących się na skanowanym obszarze spowodowały szerokie zastosowanie tej metody w wielu dziedzinach gospodarki oraz nauki. Dane pochodzące ze skanowania lotniczego wykorzystuje się między innymi w przewidywaniu i modelowaniu klęsk żywiołowych, w celach planistycznych, gospodarce leśnej i rolnej, przemyśle wydobywczym, a także przy monitorowaniu osuwisk i zmian zagospodarowania przestrzennego (por. Wężyk 2006; Wężyk (red.) 2014; Banaszek 2015, 58).

2.3.2. Jakie zastosowanie ma lotnicze skanowanie laserowe w archeologii?

Lotnicze skanowanie laserowe pozwala na rejestrację dziedzictwa historycznego, w tym zażytków architektury oraz niektórych obiektów i struktur archeologicznych, a produkty skanowania służą interpretacji przeszłych krajobrazów oraz monitorowaniu zasobów dziedzictwa. W ciągu ostatnich dwóch dekad metoda ta znalazła zastosowanie w badaniach archeologicznych

prowadzonych na wszystkich kontynentach poza Antarktydą (np. Crutchley, Crow 2009, 3–4; Opitz 2013, 14–15; Doneus, Kühnleiber 2013, 32–33; Banaszek 2015, 66–69; Štular, Lozić 2020, 1–2).

Archeolodzy wykorzystują produkty pochodne skanowania najczęściej w celu identyfikacji i analizy obiektów o własnej formie krajobrazowej, głównie na obszarach nieużytkowanych rolniczo. Długotrwała, powtarzalna, intensywna i zmechanizowana działalność rolnicza oraz procesy urbanizacyjne będące głównym czynnikiem, który prowadzi do niwelacji wcześniejszych zmian w topografii terenu, minimalizują bowiem prawdopodobieństwo wystąpienia obiektów o własnej formie krajobrazowej na terenach rolniczych, porolnych i zabudowanych, a w konsekwencji ich detekcji. Choć na wymienionych obszarach nie można wykluczyć obecności takich obiektów, czyli możliwości ich rejestracji za pomocą ALS, to inne metody prospekcji archeologicznej, włącznie z interpretacją zdjęć lotniczych, dostarczają często pełniejszego zasobu informacji o dziedzictwie archeologicznym na terenach otwartych. Wykorzystanie danych ALS przez archeologów dotyczy zatem w głównej mierze obszarów porośniętych gęstą roślinnością, a także miejsc, gdzie użycie dotychczasowych metod prospekcji terenowej było utrudnione i gdzie obiekty o własnej formie terenowej mają największą szansę na przetrwanie (np. Banaszek, Rączkowski 2010; Risbøl 2013). Dzięki penetracji szaty roślinnej ALS ma przewagę nad fotografią lotniczą, która znajduje niewielkie zastosowanie na obszarach zalesionych oraz nad prospekcją powierzchniową wymagającą dobrej widoczności na poziomie gruntu i powierzchniowych przemieszczeń luźnego materiału archeologicznego (Lozić, Štular 2021, 1–2).

Choć ALS pozwala na szczegółową dokumentację powierzchni terenu, zwłaszcza gdy skanowanie prowadzone jest w warunkach bezlistnych (por. Doneus, Banaszek, Verhoeven 2022), należy zaznaczyć, że zniwelowane obiekty

archeologiczne są często nieuchwytne tą metodą, nawet jeżeli struktury archeologiczne znajdujące się pod powierzchnią gruntu przetrwały w dobrym stanie. Przy sprzyjających warunkach takie obiekty mogą ujawniać się na zobrażowaniu intensywności odbicia, czyli jednym z produktów pochodnych skanowania lotniczego. W sposób podobny do zdjęć lotniczych i zobrażeń satelitarnych analiza intensywności odbicia pozwala bowiem dostrzec zmiany wilgotności gleby i stanu roślin uprawnych, a przez to wskazać na obecność zniwelowanych obiektów archeologicznych. Taka perspektywa dotyczy przede wszystkim obszarów otwartych i użytkowanych rolniczo, gdzie dla pojedynczej wiązki emitowanej energii rejestrowane jest jedno echo, przy czym sugeruje się wykonanie kalibracji radiometrycznej danych intensywności odbicia (Sevara et al. 2019). Powodzenie wspomnianych analiz zależy jednak od tego, czy skanowanie laserowe wykonano w wąskim oknie czasowym sprzyjającym ujawnianiu się obiektów w obrazach intensywności. Ponadto zniwelowane obiekty archeologiczne w obrębie terenów rolnych ujawniają się niekiedy w danych wysokościowych pozyskanych metodą ALS, jeśli nalot miał miejsce w późnych stadiach rozwoju zbóż. Możliwa jest wówczas identyfikacja różnic w wysokości roślin porastających podziemne struktury. W praktyce jest to więc rejestrowanie pozytywnych i negatywnych wyróżników roślinnych (Crutchley, Crow 2009, 7–8; Challis, Howard 2013, Stott et al. 2015).

Zastosowanie systemów batymetrycznych umożliwia rozpoznanie i analizę obiektów o własnej formie terenowej, które znajdują się w strefie przybrzeżnej i na dnie płytkich zbiorników wodnych. Takie struktury mogą być analizowane wraz z zatopionym kontekstem środowiskowym, stanowiąc przyczynek do interpretacji najdawniejszych krajobrazów. Obszary, które dotąd stanowiły wyzwanie dla archeologów, w tym bardzo płytkie strefy przybrzeżne, gdzie dostęp z lądu, jak i za pomocą łodzi jest utrudniony, mogą zatem podlegać dokumentowaniu z wysoką szczegółowością i w relatywnie krótkim czasie, co zależy jednak od stanu wód i ich mętności.

Zastosowanie skanowania lotniczego doprowadziło do pozyskania danych ALS dla dużych obszarów. W Polsce dostępne dane mają pokrycie dla całego kraju, a na niektórych obszarach skanowanie wykonano kilkakrotnie. Osoby prywatne, środowiska archeologów, jak i służby konserwatorskie oraz inne instytucje, zyskały olbrzymi zasób systematycznych danych, które są wykorzystywane w celu rozpoznania dziedzictwa historycznego, jego zarządzania i ochrony (<https://www.geoportal.gov.pl/>). Jednocześnie to bogate źródło informacji uzmysłowiło badaczom i organizacjom zarządzającym dziedzictwem, że przeanalizowanie tej sfery pod kątem obecności relikwów archeologicznych wymaga wiele czasu i dużych nakładów, w tym zaangażowania interpretatorów wyszkolonych w pracy z danymi ALS, którzy umieją je „czytać” (np. Banaszek et al. 2018). W związku z rozwojem sztucznej inteligencji, a przede wszystkim uczenia maszynowego, pojawiły się próby zautomatyzowanej identyfikacji obiektów archeologicznych w produktach pochodnych skanowania. Rezultaty tych prac znajdują powoli zastosowanie w systemach używanych przez służby zarządzające dziedzictwem. Uczenie maszynowe pozwala przyspieszyć detekcję wybranych typów obiektów o własnej formie krajobrazowej, lecz wymóg walidacji rezultatów takiego rozpoznania wciąż stanowi istotny problem. Realizowane są więc projekty nauki obywatelskiej, zapraszające do współpracy przy ocenie rezultatów dostarczanych przez sieci neuronowe (Lambers et al. 2019). Z powodu ograniczonej wiedzy eksperckiej w interpretacji produktów pochodnych skanowania wśród uczestników takich projektów możemy uzyskiwać tu umiarkowane wyniki (por. Casana 2020).

Cykliczne pozyskiwanie danych ALS na dużą skalę przy użyciu samolotów lub helikopterów, dla mniejszych zaś obszarów również z wykorzystaniem statków bezzałogowych, pozwala archeologom na analizę przekształceń terenu i zmian zagospodarowania obszarów, w których znajdują się obiekty archeologiczne, a także na identyfikację zniszczeń i zagrożeń dla dziedzictwa. Należy podkreślić, że zarówno dane aktualne, jak

i historyczne różnią się szczegółowością i zostały pozyskane dla rozmaitych celów, nie tylko archeologicznych.

2.3.3. Czym różnią się dane ogólnodostępne od dedykowanych?

Istnieje wiele czynników, które powodują, że dane ALS pochodzące z dwóch nalotów mogą się wyraźnie różnić. Wśród tych czynników należy wymienić elementy techniczne, związane z typem skanera i sposobem pozyskiwania danych, jak i z platformą nośną oraz parametrami lotu. Ponadto naloty mogą odbywać się podczas różnych pór roku, charakteryzować się różną gęstością próbkowania i być wykonywane dla rozmaitych celów oraz na zamówienie różnych instytucji. Dodatkowo pomiędzy dwoma nalotami mogą zaistnieć zmiany w zagospodarowaniu terenu oraz inne naturalne i antropogeniczne przekształcenia powierzchni ziemi. Przydatność omawianych danych dla celów archeologicznych i zarządzania dziedzictwem może być zatem różna i wymaga zastanowienia się nad charakterystyką i parametrami dostępnego zbioru informacji (por. Banaszek 2014). Istotna jest przy tym różnica pomiędzy danymi, które pozyskuje się w celu odpowiedzi na pytania archeologiczne, a zasobem pochodzącym z realizacji innych zadań. W praktyce te pierwsze dane mogą wymagać zlecenia dedykowanego nalotu ALS, podczas gdy drugi zasób stanowi łatwo- lub ogólnodostępne źródło danych.

2.3.3.1. Skąd pochodzą i jak pozyskać ogólnodostępne dane ALS?

Dane z lotniczego skanowania laserowego są pozyskiwane i gromadzone w Polsce przez różne organizacje, np. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, instytucje samorządowe, uczelnie i instytuty badawcze, Lasy Państwowe, nadleśnictwa, parki narodowe czy urzędy morskie. Niektóre te dane są ogólnodostępne, a wykorzystanie innych wymaga dokonania odpowiednich uzgodnień. Omawiane zasoby nie były zwykle pozyskiwane z myślą o dokumentowaniu dziedzictwa

archeologicznego, a przez to praca z nimi wymaga poznania ich specyfikacji, która w skrajnych przypadkach może wykluczyć przydatność danego zasobu do analizy i interpretacji dziedzictwa oraz krajobrazów archeologicznych. Niemniej po wykonaniu odpowiednich przetworzeń te często rozproszone zasoby nadają się do zastosowań archeologicznych.

Nie ulega wątpliwości, że w polskiej archeologii metoda lotniczego skanowania laserowego upowszechniła się za sprawą budowy Informatycznego Systemu Osłony Kraju (ISOK) przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (np. Królikowski 2012, 19–20; Maślanka, Wężyk 2014). Na potrzeby tego systemu, powstałego w celu tworzenia map ryzyka i zagrożenia powodziowego oraz stanowiącego węzeł krajowej infrastruktury informacji przestrzennej, Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK) zlecił i nadzorował pozyskanie danych ALS na szeroką skalę. W konsekwencji, wraz z informacjami pochodzącymi z innych zleceń GUGiK, w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym znajdują się dane lidarowe pozyskane dla całego kraju, które są na bieżąco aktualizowane. Wśród produktów skanowania bezpłatnie dostępne są zarówno chmury punktów, jak i ich pochodne – numeryczne modele terenu NMT oraz numeryczne modele pokrycia terenu NMPT (Szadkowski 2012; Kiarszys, Szalast 2014, 271–273; Banaszek 2014). Udostępnione w cięciu arkuszowym dane można pobierać bezpośrednio ze stron krajowego geoportalu (https://mapy.geoportal.gov.pl/imap/lmgp_2.html?gpmmap=gp0) lub za pomocą oprogramowania Systemów Informacji Przestrzennej (GIS), np. za pomocą wtyczki Pobieracz Danych GUGiK dostępnej w popularnym oprogramowaniu QGIS. Istnieje również możliwość przeglądania, między innymi wizualizacji cieniowanego NMT, na stronach krajowego geoportalu lub importowania warstwy WMTS (Web Map Tile Service) prezentującej tę wizualizację w oprogramowaniu GIS.

Dane lidarowe przechowywane w zasobie GUGiK pozyskiwane są głównie w dwóch standardach. W standardzie I deklarowana średnia gęstość próbkowania wynosi co najmniej 4 pkt/ m²,

natomiast w standardzie II to minimum 12 pkt/m², choć dostępne są nawet dane o gęstości do 20 pkt/m². Gęstość skanowania nie zawsze jednak przesądza o wyższej wartości danych dla celów archeologicznych. Skanowanie w standardzie II prowadzone jest bowiem przede wszystkim dla obszarów silnie zurbanizowanych, a często było ono wykonywane w okresie wegetacji roślin, co obniża przydatność takich danych w detekcji obiektów archeologicznych.

Choć dane przechowywane w krajowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym nie były pobierane i przetwarzane z myślą o szczegółowym dokumentowaniu obiektów dziedzictwa, to stanowią one niezwykle łatwy, perswazyjny i przydatny produkt dla analizy oraz interpretacji archeologicznej. Prowadzona aktualizacja danych lidarowych jest również niezwykle istotna, gdyż umożliwia wykorzystanie aktualnych i historycznych produktów zarówno w monitoringu i ochronie zasobów dziedzictwa, jak i w analizie przekształceń krajobrazu. Należy jednak podkreślić, że wykorzystanie pełnego potencjału ogólnodostępnych danych wymaga ich przetworzenia zgodnie z archeologiczną praktyką i potrzebami. O ile to możliwe, prace takie powinny być prowadzone w odniesieniu do chmury punktów, czyli podstawowego produktu skanowania.

2.3.3.2. Czy, kiedy i jak pozyskać dane dla celów archeologicznych?

Bez wątpienia polscy archeolodzy stali się beneficjentami pokrycia całego kraju danymi lidarowymi i ten bezpłatny zasób cieszy się niezwykle popularnością wśród badaczy (Zalewska, Kiarzys 2021, Stereńczak 2020). Zatem wraz z ułatwieniem w ostatnich latach przez GUGiK dostępu do chmur punktów, jak i produktów pochodnych skanowania, spada zainteresowanie zleceniami kosztownych nalogów dla celów archeologicznych. Pierwsza tego typu kampania odbyła się w 2010 roku (Nowakowski 2010), czyli niedługo przed pozyskaniem pierwszych danych w ramach projektu ISOK. W kolejnych latach skanowaniu poddano zaś wybrane obszary

Polski (np. Banaszek 2015, Czebreszuk et al. 2013; Przybył 2014). O ile początkowo nalogy dla celów archeologicznych wiązały się często z brakiem jakiegokolwiek alternatywy, gdyż skala prac zamówionych przez GUGiK wymagała czasu na pozyskanie, przetworzenie i udostępnienie danych, to należy podkreślić, że skanowanie zlecone przez archeologów pozwala zapobiec redukcji potencjału poznawczego metody w porównaniu do wykorzystania ogólnodostępnego zasobu (por. Banaszek 2015). Jakość danych pozyskanych dla celów archeologicznych mierzona gęstością chmury punktów była w wielu przypadkach wyższa niż oferowana przez GUGiK dla obszarów niezurbanizowanych (np. Banaszek 2020). Tym samym klaruje się jakościowa przewaga nalogów zlecanych na potrzeby archeologiczne ze względu na możliwość lepszego dopasowania wymagań zamawianych produktów końcowych do celu opracowania.

Przygotowanie nalogu i zdefiniowanie warunków, w jakich ma się odbyć pozyskanie danych, a także parametrów badań pozwala na określenie specyfikacji danych i nie powinno być pozostawione przypadkowi. Decyzje podjęte w tej fazie mają bezpośredni wpływ na możliwości przetwarzania i prezentowania informacji oraz na stopień, w jakim będą one spełniały określone wcześniej oczekiwania badawcze. Podczas planowania nalogu wykonywanego w celu rejestracji dziedzictwa archeologicznego należy wziąć pod uwagę rozmaite czynniki. Przede wszystkim trzeba dopasować specyfikację nalogu do postawionych pytań badawczych, charakterystyki analizowanego obszaru i czasu wykonywania nalogu, np. niezbędne jest określenie optymalnej daty skanowania ze względu na stan rozwoju roślin, poziom zapylenia i wilgotności powietrza oraz zamglenia. Ponadto należy zaplanować lot zapewniający oczekiwaną gęstość skanowania (zob. niżej) poprzez uwzględnienie między innymi: lokalnych warunków, dopuszczalnego pułapu lotu i innych przepisów lotniczych, a także możliwości platformy wykorzystywanej do skanowania. Zarejestrowane dane pierwotne, zanim zostaną użyte w interpretacjach archeologicznych, wymagają choćby

scalenia pasów nalogów, kalibracji i nadania georeferencji. Przygotowanie danych pierwotnych do zastosowań archeologicznych ma też na celu ocenę ich jakości, głównie poprzez usunięcie błędów i rozbieżności w nachodzących na siebie fragmentach pasów nalogów i przygotowanie chmury punktów, która będzie mogła zostać poddana dalszym przetworzeniom (por. Lozić, Štular 2021, 6).

Archeologiczne analizy danych lidarowych wskazują korelację pomiędzy średnią gęstością chmury punktów a możliwością zidentyfikowania zarejestrowanych w niej obiektów archeologicznych. Wzrost gęstości chmury prowadzi do obserwacji większej liczby obiektów archeologicznych przez interpretatora, zwłaszcza w przedziale pomiędzy 1 pkt/m² a 5 pkt/m². Dalszy wzrost gęstości chmury punktów wpływa mniej na jej potencjał informacyjny, średnia zaś gęstość poniżej 1 pkt/m² prowadzi do stopniowej eliminacji coraz większych form terenowych (Štular et al. 2021, 10).

W ostatnich latach obok klasycznych kampanii pomiarowych prowadzonych za pomocą samolotów lub helikopterów wykorzystuje się również bezzałogowe statki powietrzne (drony) (Risbøl, Gustavsen 2018). Ich zastosowanie przez archeologów lub w celach archeologicznych pozwala w zdecydowany sposób ograniczyć koszty i daje dużą kontrolę na parametrami nalogu oraz umożliwia dostosowanie pomiarów do lokalnych warunków topograficznych, pogodowych i pokrycia terenu. Wykorzystanie dronów pozwala na pozyskanie bardzo gęstych chmur punktów i szczegółowe analizy form archeologicznych. Jednocześnie z uwagi na ograniczenia sprzętowe oraz restrykcje związane z kontrolą lotów obszary skanowane przy użyciu dronów są zdecydowanie mniejsze niż w przypadku klasycznych statków powietrznych. Niektóre strefy są całkowicie zamknięte dla nalogu bezzałogowego. Dzięki coraz niższym kosztom przeprowadzania kampanii pomiarowych za pomocą bezzałogowców możliwe jest częste skanowanie tego samego obszaru, co pozwala na śledzenie zmian w mikrotopografii obiektów i struktur archeologicznych czy też obiektów dziedzictwa. Analiza takiego zasobu danych pozwala więc obserwować subtelne przekształcenia terenu

w czasie, a jej wyniki mogą ilustrować postępujące niszczenie obiektów archeologicznych i wspomóc mechanizmy zapobiegania destrukcji substancji zabytkowej.

2.3.4. Na czym polega przetwarzanie danych ALS na potrzeby badań archeologicznych?

Aby możliwe było wykorzystanie pełnego potencjału poznawczego tkwiącego w chmurach punktów ALS muszą one zostać przetworzone w odpowiedni sposób (Lozić, Štular 2021, 6–7; 19–20). Chodzi tu przede wszystkim o optymalne i prawidłowe sklasyfikowanie pomiarów odzwierciedlających ukształtowanie terenu i obecnych w nim reliktyw archeologicznych oraz wytworzenie modeli wysokościowych i obrazów rastrowych, które będą podane późniejszej analizie. Proces ten ma istotny wpływ na interpretację i kartowanie obiektów archeologicznych (Kiarszys, Szalast 2014, 268; Štular, Lozić 2020, 2). Błędy popełnione podczas przetwarzania mogą doprowadzić do usunięcia ze zbioru niektórych obiektów archeologicznych (w całości lub częściowo), ich zniekształcenia, wystąpienia artefaktów graficznych lub szumów. Schemat pracy z danymi ALS można opisać w sposób uproszczony w poniższych punktach:

- 1) kontrola jakości danych wejściowych (chmur punktów) i uzyskanie informacji na temat ich specyfikacji technicznej oraz warunków i terminu skanowania;
- 2) przeprowadzenie klasyfikacji chmury punktów przy wykorzystaniu wariantów ustawień algorytmów filtracyjnych dopasowanych do charakterystyki analizowanego krajobrazu – w razie potrzeby usunięcie nieprawidłowych punktów, szumów i innych potencjalnych błędów występujących w chmurze punktów;
- 3) tworzenie rastrowych produktów chmury punktów, czyli numerycznego modelu terenu oraz – w zależności od potrzeb – numerycznego modelu pokrycia terenu;
- 4) generowanie rastrowych pochodnych modeli numerycznych (wizualizacji);
- 5) analiza uzyskanych produktów rastrowych w celu oceny jakości przetworzeń pochodzących

z różnych filtracji oraz wybór do dalszych analiz obrazów rastrowych, które w sposób optymalny (z najmniejszą liczbą błędów, uproszczeń, artefaktów graficznych) prezentują archeologiczne formy terenowe;

- 6) wektoryzacja (identyfikacja/kartowanie) zarejestrowanych obiektów archeologicznych;
- 7) prace terenowe.

2.3.4.1. Czym jest chmura punktów?

Chmura punktów z lotniczego skanowania laserowego jest zbiorem punktów reprezentujących odbicia, które pochodzą z różnych kategorii obiektów (Kurczyński 2014). W celu uporządkowania chmury – i na potrzeby generowania przetworzeń – poddaje się ją procesom filtracji oraz klasyfikacji. Etap ten polega na użyciu algorytmów filtracyjnych z uwzględnieniem m.in. relacji topologicznych i właściwości odbić w celu przyporządkowania punktów pomiarowych do różnych kategorii: grunt, niska roślinność, średnia roślinność, zabudowania itd. (np. Kraus, Pfeifer 1998, Haugerund, Harding 2001; Zakšek, Pfeifer 2006; Banaszek 2015, 56; Štular, Lozić 2020; Lozić, Štular 2021, 6–7). W pewnych sytuacjach stosuje się także korektę manualną, której celem jest miejscowe skorygowanie błędów popełnionych przez algorytm. Filtracja stanowi najistotniejszy etap przetwarzania chmury punktów.

Klasy wydzielone w chmurach punktów są zazwyczaj uporządkowane zgodnie z wytycznymi organizacji ASPRS (np. w programie ISOK), ale numeracja poszczególnych grup i przypisane do nich kategorie mogą się różnić w zależności od pochodzenia danych (np. Banaszek 2015: 56). Do najważniejszych kategorii należy zaliczyć: 1) punkty przetwarzane, niesklasyfikowane; 2) grunt; 3) niską roślinność, tj. w zakresie 0–0,40 m; 4) średnią roślinność, tj. w zakresie 0,40–2,00 m; 5) wysoką roślinność, tj. w zakresie powyżej 2,00 m; 6) budynki i obiekty inżynierskie; 7) szum.

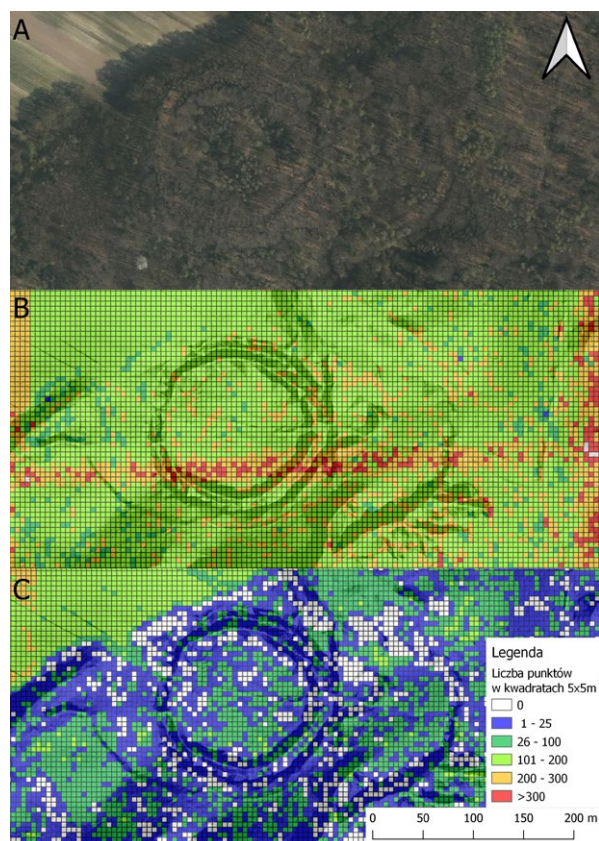
W zależności od specyfiki zeskanowanego krajobrazu wykorzystuje się różne metody filtracji i klasyfikacji (por. Opitz 2013, 20–23). W zastosowaniach archeologicznych szczególnie istotne jest

poprawne wyodrębnienie kategorii, do której przypisane są odbicia od gruntu, ponieważ to przede wszystkim w nich można odnaleźć antropogeniczne relikty krajobrazowe i ich kontekst. Jeżeli natomiast na badanym obszarze występują również obiekty naziemne, np. zabytkowa architektura lub ruiny, wówczas przeprowadza się filtrację mającą na celu wyodrębnienie takich obiektów (Lozić, Štular 2021, 6). Nieuwzględnienie tych okoliczności i wytworzenie modelu jedynie z kategorii gruntu spowodowałoby usunięcie ze zbioru danych wszelkich informacji o obiektach naziemnych, będących przedmiotem zainteresowania. Zależnie od celów badawczych czasami przydatne w analizie są pomiary roślinności (np. określenie przebiegu dawnych traktów na podstawie zarejestrowanego starodrzewu w obszarach zalesionych), a dla celów konserwatorskich również odbicia od współczesnych obiektów inżynierskich, budynków itp., zagrażających dziedzictwu archeologicznemu. Na każdym etapie pracy z danymi ALS należy więc brać pod uwagę cel prowadzonych badań i pod tym kątem dobierać metody przetwarzania.

Dane niepozyskane pierwotnie dla celów archeologicznych są zazwyczaj sklasyfikowane w sposób nieuwzględniający potrzeby rejestracji dziedzictwa archeologicznego. W większości przypadków te informacje wymagają powtórnej filtracji i reklasyfikacji. Należy też zwrócić uwagę na to, że automatyczne algorytmy filtracyjne mogą pomijać pomiary subtelnych form terenowych i silnie zniwelowanych obiektów archeologicznych, przez co na numerycznym modelu terenu i jego pochodnych będą one wygładzone lub odwzorowane fragmentarycznie, a w skrajnych sytuacjach nie będzie ich w ogóle widać (por. Banaszek 2015, 56–57). Poza obiektami archeologicznymi z kategorii gruntu mogą zostać w ten sposób usunięte również inne informacje, dotyczące np. procesów podepozycyjnych.

Kluczową rolę dla jakości danych – obok takich czynników, jak pułap lotu, z którego wykonano skanowanie; zanieczyszczenie powietrza i jego wilgotność; zastosowany model skanera oraz warunki pogodowe – odgrywa również pora roku i charakterystyka szaty roślinnej. Zaawansowana

wegetacja może wyraźnie redukować rejestrowaną w chmurze liczbę odbić od gruntu (Doneus et al. 2022). Taką sytuację ilustruje zamieszczony poniżej przykład danych (Ryc. 4.1) z wczesnośredniowiecznego grodziska w Lubomi, pow. wodzisławski, woj. śląskie (Bugaj et al. 2021), które zostało zeskanowane 6 maja 2011 roku w standardzie I, w ramach projektu ISOK. Obiekt jest porośnięty lasem liściastym, co spowodowało, że wiosenny okres wykonania nalotu nie był optymalny. Współczynnik penetracji szaty roślinnej dla lotniczego skanowania laserowego jest bowiem najkorzystniejszy późną jesienią i wczesną wiosną, gdy na drzewach nie ma liści (Crutchley, Crow 2009, 33). Na obszarze grodziska były zatem liczne miejsca, dla których nie było żadnych pomiarów. W konsekwencji numeryczny model wygenerowany na podstawie tych danych nie odwzorowywał precyzyjnie topografii obiektu.

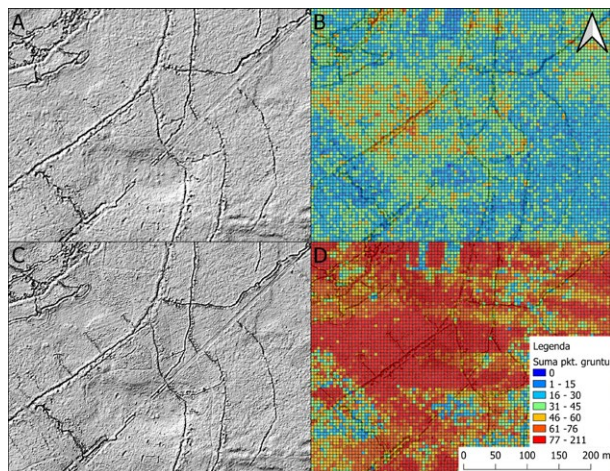


Ryc. 4.1. Grodzisko w Lubomii: A) wygląd grodziska na ortofotomapie; B) analiza rozkładu średniej gęstości chmury w kwadratach o powierzchni 25m² (5 x 5 m) (dane ISOK), rozkład średniej gęstości wszystkich punktów w chmurze; C) rozkład średniej gęstości punktów przyporządkowanych do kategorii gruntu (G. Karsys)

Powtórne próby filtracji i reklasyfikacji chmury punktów mogą wówczas tylko nieznacznie poprawić sytuację i niezbędne jest wykonanie skanowania w lepszych warunkach.

W przypadku danych o dobrej jakości ponowne przetworzenie chmury punktów i poddanie jej reklasyfikacji może dostarczyć istotnych informacji o analizowanych obiektach. Rycina nr 4.2 ilustruje różnicę pomiędzy średnią gęstością punktów przypisanych do klasy gruntu w oryginalnej klasyfikacji z programu ISOK (gęstość 1,25 pkt/1 m², Ryc. 4.2B), a średnią gęstością punktów gruntu z ponownej klasyfikacji (gęstość 2,84 pkt/1 m²), przeprowadzonej w celu analizy krajobrazu historycznego pola bitwy z okresu I wojny światowej (Ryc. 4.2D). W omawianym przykładzie większa liczba punktów gruntu pozwoliła na o wiele bardziej szczegółowe przedstawienie reliktów umocnień polowych (por. Ryc. 4.2A i 4.2C).

Nieco wyprzedzając tematykę tego rozdziału, omawiane ilustracje nr 4.2A i 4.2C przedstawiają również tzw. cieniowane modele terenu, obliczone na podstawie obu wariantów klasyfikacji. Jest to zabieg celowy, by wykazać bezpośredni związek między wykonanymi filtracjami a uzyskanymi rezultatami. W tym przypadku zróżnicowanie obu obrazów dotyczy przede wszystkim szczegółowości odwzorowania fortyfikacji polowych. Na wizualizacjach z filtracji ISOK-owej umocnienia są w wielu miejscach mniej czytelne, ich krawędzie okazują się niewyraźne, występuje ponadto efekt „wygładzenia” małych form terenowych. Nie ma to jednak dużego wpływu na ogólną interpretację. W bardziej skrajnych sytuacjach ponowne przetworzenie chmury punktów może spowodować ujawnienie się obiektów, które wcześniej zostały usunięte ze zbioru danych poprzez nieprawidłowo dobrany algorytm i nie byłyby widoczne na generowanych później numerycznych modelach terenu. Nie zawsze też większa liczba punktów gruntu po ponownej klasyfikacji oznacza uzyskanie lepszego efektu, ponieważ zastosowanie nieodpowiednich ustawień algorytmu filtracyjnego może błędnie przypisać do kategorii gruntu obiekty naziemne i niską lub średnią roślinność, co spowoduje, że takie przetworzenie będzie „zaszumione”, mylące



Ryc. 4.2. Porównanie rezultatów filtracji chmury punktów dla odcinka umocnień polowych z okresu I wojny światowej, Bitwa pod Bolimowem: A) cieniowany model terenu wygenerowany na podstawie klasyfikacji gruntu z programu ISOK; B) średnia gęstość punktów przyporządkowanych do kategorii gruntu w ramach programu ISOK, w siatce o wymiarach oczka 5 m x 5 m; C) pochodna NMT wygenerowana na podstawie ponownej klasyfikacji wykonanej na potrzeby projektu APP; D) średnia gęstość punktów przyporządkowanych do kategorii gruntu w chmurze punktów poddanej ponownej klasyfikacji na potrzeby projektu APP, w siatce o wymiarach oczka 5 m x 5 m (G. Kiarszys)

lub zupełnie nie będzie nadawało się do analiz archeologicznych.

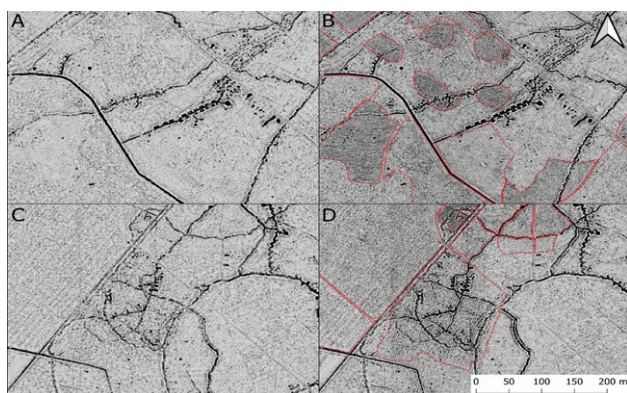
Jak już wspomniano, sposób wykonania filtracji chmury punktów może wpłynąć nie tylko na błędne odwzorowanie obiektów archeologicznych, lecz także doprowadzić do usunięcia ze zbioru danych współczesnych śladów działalności człowieka, które mają duże znaczenie w interpretacji procesów podepozycyjnych i wynikającego z nich stanu zachowania zabytków.

Rycina 4.3 przedstawia jedną z takich sytuacji. Na obrazach A i C (klasyfikacja ISOK) nie widać śladów niedawnej orki leśnej, która spowodowała częściowe zniszczenie (zatarcie) reliktyw umocnień z czasów I wojny światowej. Pochodne B i D (ponowna klasyfikacja dla potrzeb archeologicznych) ujawniają natomiast wyraźnie miejsca, w których przeprowadzono prace leśne. Informacja ta jest istotna przede wszystkim ze względu na wiedzę o procesach podepozycyjnych i skali postępującej stopniowo degradacji historycznego

pola bitwy. Z interpretacji obrazu 3D można także wywnioskować, że zachodzące niszczenie systemu okopów i ziemianek zlokalizowanych w centralnej części ilustracji zostało spowodowane właśnie przez orkę leśną, której ślady są wyraźne (strefy zaznaczone czerwonym kolorem). Podobnego wniosku nie można natomiast sformułować na podstawie interpretacji obrazu C, gdzie ślady orki są niemal całkowicie nieczytelne, a przyczyny obserwowanych zniszczeń pozostają enigmatyczne.

2.3.4.2. Czym są rastrowe produkty skanowania?

Chmura punktów jest nieciągłym zbiorem danych pomiarowych, który trudno poddaje się wizualnej interpretacji w jej pierwotnej formie. W związku z tym przekształca się ją najczęściej do postaci rastrowego numerycznego modelu terenu (pol. NMT, digital terrain model – DTM), generowanego z punktów przypisanych do kategorii gruntu (Kiarszys, Szalast 2014, 276-277; Banaszek 2015, 58-63; Łożić, Śtular 2021, 7; Śtular et al. 2021, 2). Model ten jest szczególnie użyteczny przy analizach obszarów zalesionych, ponieważ pozwala na zaprezentowanie szczegółowej topografii



Ryc. 4.3. Fragment pola pobitewnego z okresu I wojny światowej z okolic Bolimowa. Porównanie widoczności śladów orki leśnej (zaznaczona czerwoną linią) oraz reliktyw fortifikacji polowych na pochodnych (otwartość pozytywna) wytworzonych z klasyfikacji przeprowadzonej w programie ISOK (A i C) oraz ponownej klasyfikacji wykonanej na potrzeby badań archeologicznych (B i D) (G. Kiarszys)

terenu i ujawnianie obiektów archeologicznych znajdujących się pod koronami drzew lub porośniętych gęstą roślinnością. W przypadku obszarów otwartych do analiz archeologicznych może być użyteczny również numeryczny model pokrycia terenu (NMPT, *digital surface model* – DSM), który wykonuje się z punktów będących pierwszymi odbiciami powrotnymi. Zastosowanie w archeologii mają również numeryczne modele generowane z różnych klas, np. połączenie punktów gruntu i obiektów naziemnych, pomiarów ruin, roślinności itd. (Devereux et al. 2005; Crutchley, Crow 2009, 11; Doneus, Kühtreiber 2013, 35–39). Należy do nich na przykład archeologiczny model wysokościowy (*archaeological digital elevation model*, *digital feature model* – DFM). Tworzy się go z punktów pochodzących z różnych kategorii, m.in. odbić gruntu oraz pomiarów innych istotnych archeologicznie obiektów czytelnych w mikrotopografii, takich jak: mury, ruiny, drogi, kanały, nasypy czy współczesne budynki (Štular et al. 2021). Pozwala to na interpretowanie obiektów archeologicznych w kontekście elementów współczesnego krajobrazu kulturowego. Taki model umożliwia również rejestrowanie reliktów architektury, podczas gdy na tradycyjnym NMT obiekty te zazwyczaj nie występują, ponieważ zostały wcześniej odfiltrowane i przypisane do kategorii budynków lub innych obiektów naziemnych.

Numeryczne modele wysokościowe z danych ALS mogą być tworzone na kilka sposobów. Należy zwrócić uwagę na to, że niektóre algorytmy interpolacyjne mają tendencję do „wygładzania” pewnych obszarów i tworzenia artefaktów graficznych (np. w miejscach, dla których nie było pomiarów, ponieważ wiązka lasera nie spenetrowała szaty roślinnej). Można też przekształcić wszystkie punkty przypisane do kategorii gruntu w model TIN (*triangulated irregular network*), a następnie sprowadzić go do postaci obrazu rastrowego.

Rozdzielczość przestrzenna numerycznego modelu powinna odpowiadać średniej gęstości punktów, z których był on wytworzony; dystrybucji (odległości między sobą) i korelacji

przestrzennej tych punktów; precyzji pionowej i złożoności krajobrazu (Štular et al. 2021, 10–12). Należy również podkreślić, że zaniżanie rozdzielczości numerycznych modeli wpływa negatywnie na możliwość detekcji obiektów archeologicznych, gdyż wyraźnie obniża szczegółowość uzyskanych zobrazowań. W takiej sytuacji potencjał informacyjny opracowywanych danych zostanie już wstępnie zredukowany. Z kolei zawyżenie rozdzielczości powyżej średniej gęstości punktów, z których generowany jest model, nie spowoduje, że będzie on bardziej szczegółowy. W praktyce komórki rastra, dla których nie było pomiarów, zostaną obliczone w odniesieniu do wartości komórek sąsiadujących, dla których takie pomiary występowały. Może to doprowadzić do wystąpienia uogólnień utrudniających późniejszą interpretację, a na pewno zwiększy niepotrzebnie rozmiar pliku.

Obecnie w zastosowaniach archeologicznych wykorzystuje się najczęściej numeryczne modele o minimalnej rozdzielczości 1 m, natomiast za optymalną wartość uznaje się rozdzielczość rzędu 0,5 m i większą. Z danych gorszej jakości korzysta się głównie wtedy, gdy są one akurat jedynym dostępnym źródłem. Trzeba również wziąć pod uwagę, że wielkość komórek rastra w numerycznym modelu musi być co najmniej dwa razy mniejsza od najmniejszego obiektu, który ma zostać potencjalnie zarejestrowany. Jak zatem pokazaliśmy, wartości te należy uwzględnić już na etapie planowania nalotu oraz definiowania oczekiwanej gęstości chmury punktów i uzgodnić je z wykonawcą nalołów lotniczych, a później na etapie przetwarzania chmury w numeryczne modele terenu.

2.3.4.3. Jakie wizualizacje danych ALS stosowane są w analizach archeologicznych?

Numeryczne modele zapisane w postaci rastrowej przechowują w poszczególnych komórkach informacje na temat ukształtowania terenu (wartość wysokości). Wypracowano różne metody analityczne pozwalające na tworzenie szerokiego wachlarza wizualizacji, nazywanych w literaturze

także „pochodnymi numerycznych modeli” (por. Devereux et al. 2008; Hesse 2010; Zakšek et al. 2011). Pochodne NMT są w praktyce różnymi sposobami prezentowania trójwymiarowych danych (modeli terenu) w postaci dwuwymiarowych obrazów. Przetworzenia te wspomagają istotnie identyfikację obiektów archeologicznych oraz ich mapowanie (Kokalj, Somrak 2019, 3).

Nie istnieje jeden uniwersalny sposób prezentowania danych ALS, który pozwalałby na ujawnienie wszystkich potencjalnych typów obiektów archeologicznych (Banaszek 2015, 88–105; Kokalj, Somrak 2019, 2–4). W procesie interpretacji łączy się więc różne pochodne numerycznych modeli, ponieważ każdy algorytm ujawnia nieco inne aspekty przestrzenne analizowanych obiektów oraz ich kontekstu krajobrazowego. Niektóre z algorytmów opracowano w celu detekcji bardzo subtelnych form terenowych kosztem usunięcia informacji o ogólnej topografii terenu, inne nadają się lepiej do prezentowania większych form terenowych, np. rowów czy nasypów.

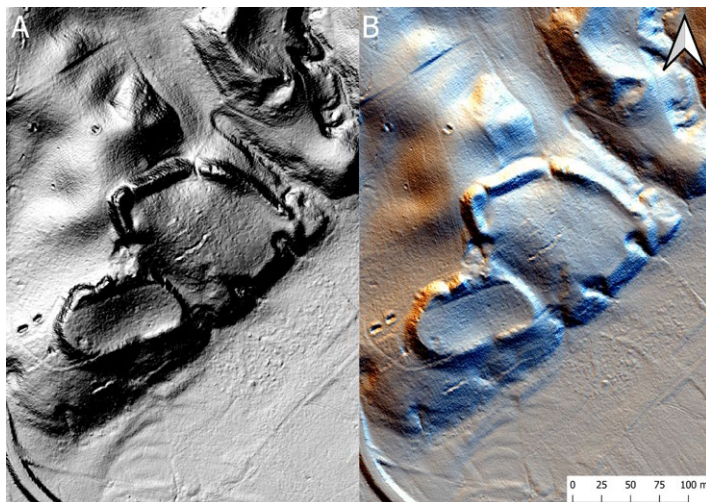
Wykorzystanie kilku różnych algorytmów wizualizacyjnych w celu identyfikacji obiektów archeologicznych pozwala na uzyskanie informacji o różnych aspektach przestrzennych. Poniżej omawiamy wybrane metody prezentowania numerycznych modeli, które obecnie są najczęściej stosowane w archeologii. Należą do nich: analiza cieniowania (Hillshading), analiza cieniowania z wielu kierunków (Hillshading from multiple directions), Sky View Factor (SVF), analiza otwartości pozytywnej (Openness-Positive), analiza otwartości negatywnej (Openness-Negative), Local Relief Model (LRM) czy Local Dominance.

2.3.4.3.1. Analiza cieniowania

W opinii wielu archeologów cieniowanie stoków (Ryc. 4.4A) stanowi podstawową technikę wizualizacji (Kokalj et al. 2013, 100). Polega ona na wygenerowaniu wirtualnego źródła światła znajdującego się daleko poza analizowanym modelem (np. Horn 1981; Blinn 1977). Wyboru parametrów wysokości kątowej i azymutu

naświetlania dokonuje analityk danych. Dzięki takiemu rozwiązaniu wszystkie piksele poddane są „naśloniecznieniu” z tego samego kierunku.

Dzięki uzyskanej plastyczności analizowanego modelu numerycznego możliwa jest identyfikacja obiektów archeologicznych mających własną formę krajobrazową, a także rozpoznanie ich struktury (wkop lub nasyp). W tym sensie elementy zorientowane prostopadle do kierunku naśloniecznienia są najbardziej wyraźne, podczas gdy zmniejszenie kąta pomiędzy promieniami wirtualnego światła a orientacją formy terenowej utrudnia obserwację. Równoległe ukierunkowanie struktury krajobrazowej względem źródła światła maskuje taki obiekt. Tym samym interpretacja archeologiczna oparta wyłącznie na pojedynczej wizualizacji cieniowania stoków jest ograniczona, gdyż pewna grupa obiektów nie zostaje zidentyfikowana. Dotyczy to przede wszystkim obiektów liniowych (historyczne drogi, systemy pól i formy upraw, umocnienia wojskowe itp.). Dopiero oświetlenie modelu numerycznego z innej strony pozwala na detekcję wcześniej „zakamuflowanych” form.



Ryc. 4.4. Porównanie analizy cieniowania z jednego kierunku (A) z analizą cieniowania z wielu kierunków (B). Obie pochodne w różny sposób prezentują detale wczesnośredniowiecznego grodziska. W przypadku cieniowania z jednego kierunku zacienione obszary zasłaniają mniejsze obiekty, przez co te stają się niemal niewidoczne. W analizie cieniowania z wielu kierunków problem ten natomiast nie występuje (G. Kiarszys)

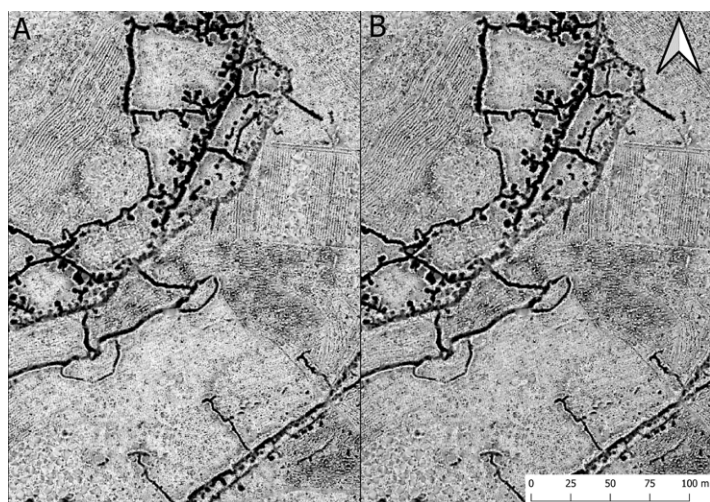
2.3.4.3.2. Cieniowanie z wielu kierunków

Wykorzystywana w archeologii analiza cieniowania z szesnastu kierunków (Ryc. 4.4B) polega na powieleniu tych samych obliczeń co $22,5^\circ$ azymutu (np. Devereux et al. 2008, 471–472; Kokalj, Hesse 2017, 16–18). Otrzymane rezultaty przechowywane są w jednym pliku jako różne kanały tego samego zobrazowania. W konsekwencji poszczególne komponenty multiplikowanej analizy mogą być prezentowane jako osobne kanały palety barwnej. Różnice pomiędzy lokalizacją cienia a obszarów oświetlonych na badanym terenie odwzorowane są wówczas przy użyciu podstawowych kolorów: czerwonego, zielonego i niebieskiego. Pomimo że obliczenia prowadzone są dla szesnastu kierunków, wyświetlane na ekranie zobrazowanie w jednym czasie oferuje kompozycję jedynie trzech z nich. To bardzo istotny czynnik, który może powodować jedynie intuicyjne, a w konsekwencji ograniczone, wykorzystanie omawianej wizualizacji, jeśli archeolog nie będzie go świadomy. Standardowe ustawienie parametrów oferowane przez aplikacje GIS-owe powoduje, że jako kanały czerwony, zielony i niebieski wyświetlane są rezultaty oświetlenia z bliskich sobie azymutów (ich rozpiętość wynosi jedynie 45° , a zbiorczy kierunek zależy od oprogramowania użytego do obliczeń tej analizy). Zmiana wyświetlanych kanałów, a więc rozszerzenie kąta między poszczególnymi kierunkami naświetlania pozwala na uzyskanie większej plastyczności i eliminację aspektu przystońnięcia,

charakterystycznego dla cieniowania. Jednocześnie zbyt duża rozpiętość może spowodować utrudnioną dla ludzkiego oka obserwację wskutek zbyt dużej różnorodności barw.

2.3.4.3.3. Sky-View Factor

Analiza Sky-View Factor SVF (Ryc. 4.5A) polega na obliczeniu wartości „dostępnego” nieba (hemisfery powyżej wirtualnego horyzontu) dla każdego piksela w modelu numerycznym z osobna. Analiza ta bazuje na kilku założeniach, a mianowicie że: (a) jasność hemisfery jest jednakowa w każdym jej punkcie; (b) nie istnieją dodatkowe źródła światła; (c) krzywizna Ziemi nie jest brana pod uwagę na małych dystansach, nie większych niż 10 km (Zakšek et al. 2011; Kokalj, Hesse 2017, 22–23). Dzięki obliczeniom Sky-View Factor generowane jest zobrazowanie ukazujące relacje topologiczne, w jakich znajduje się wybrany punkt (do określonego parametrami zasięgu – np. w promieniu od 1 do 12 m). Jeżeli żadna przeszkoda nie zaburza widoczności nieba określonemu pikselowi rastra (nie góruje nad nim) w obrębie zdefiniowanego zasięgu, wartość „obserwowanej” hemisfery jest największa i wynosi „1”. Z kolei każdy element przysłaniający hemisferę powoduje spadek tej wartości. Obszary płaskie na wizualizacjach wyników tej analizy reprezentowane są zatem przez jasne odcienie, a nieregularności rzeźby terenu uzyskują ciemniejsze tony. Jednocześnie z powodu prowadzenia obliczeń jedynie dla kątów powyżej



Ryc. 4.5. Porównanie widoczności reliktyw umocnień polowych z okresu I wojny światowej przy analizach Sky-View Factor (A) i otwartości pozytywnej (B). Oba typy pochodnych dają bardzo podobny wizualnie rezultat i są często stosowane zamiennie (G. Kiarszys)

wirtualnego horyzontu (generowanego osobno dla poszczególnych punktów w modelu numerycznym) formy wklęsłe (np. rowy, jamy) ujawniają się zdecydowanie lepiej niż wypukłe. Ograniczona dostępność dna takich form obiektów do hemisfery skutkuje osiągnięciem bardzo niskich wartości (bardzo ciemne fototony).

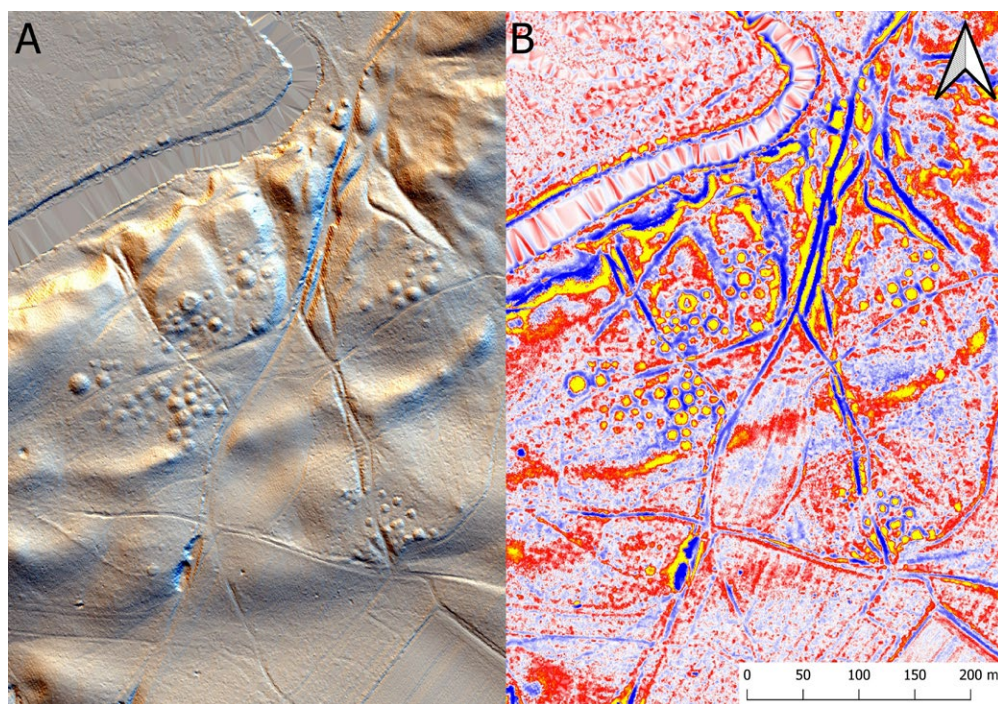
2.3.4.3.4. Analiza otwartości

W ramach tej techniki w obrębie założonego zasięgu i opierając się co najmniej na ośmiu profilach (Ryc. 4.5B), dla każdego piksela obliczane są dwa kąty pionowe: jeden względem zenitu, drugi w stosunku do nadiru (Yokoyama et al. 2002; Kokalj, Hesse 2017, 24). Zwraca się tu zatem uwagę na maksymalne kąty, pod którymi sąsiadujący z punktem obliczeń wycinek powierzchni terenu (ograniczony zdefiniowanym zasięgiem) „przystania” tenże punkt. Jednocześnie takie działania nie są ograniczone płaszczyzną horyzontu (w przeciwieństwie do SVF). Tym samym kąt pomiędzy punktem położonym w obrębie równej

(gładkiej) powierzchni a jej profilem będzie identyczny niezależnie czy jest to powierzchnia pozioma, czy przechylona (Doneus 2013, 6435; Ryc. 6). Jeżeli mamy do czynienia z punktem na szczycie stromego wyniesienia, wartości kąta „przystąpienia” względem zenitu są duże, a w stosunku do nadiru niewielkie. Odwrotna sytuacja wiąże się z punktem zlokalizowanym na dnie wklęsłej formy. Średnia wartość wszystkich kątów względem zenitu (skalkulowana na podstawie rezultatów obliczeń na wszystkich profilach) stanowi pozytywną otwartość (OP, positive openness), uśrednienie zaś wartości kątów względem nadiru to negatywna otwartość (ON, negative openness).

2.3.4.3.5. Local Relief Model

Analiza Local Relief Model LRM (Ryc. 4.6B), podobnie jak obliczenia SVF, choć odnosi się do całości przetwarzanego modelu numerycznego, wykonywana jest lokalnie, dla każdego miejsca w modelu numerycznym z osobna (Kiarszys, Banaszek 2017; Kokalj, Hesse 2017, 20–21). To zatem nie



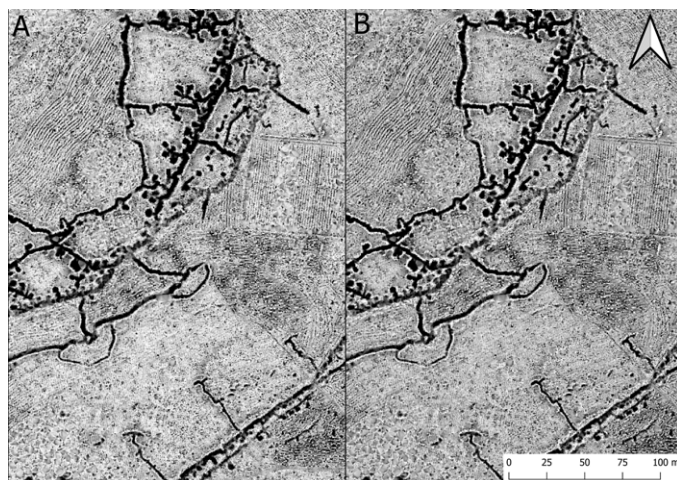
Ryc. 4.6. Cmentarzysko kurhanowe oraz relikty dawnych dróg przedstawione na analizie cieniowania z wielu kierunków (A) i analizie Local Relief Model (B). Interpretacja pochodnej LRM jest znacznie mniej intuicyjna i wymaga zrozumienia zasad jej tworzenia. Nie ma na niej także informacji na temat ukształtowania terenu. W przypadku analiz rozległych obszarów LRM ułatwia dostrzeżenie obiektów antropogenicznych. W określonych przypadkach pochodna LRM lepiej niż analiza cieniowania oddaje bardzo subtelne formy terenowe (G. Kiarszys)

„globalna” rzeźba terenu jest brana tu pod uwagę, lecz jej zróżnicowanie względem najbliższego sąsiedztwa. Zwrócenie uwagi na miejscowe różnice wysokości przy jednoczesnym odrzuceniu dużych form terenowych okazuje się szczególnie ważne w przypadku prób rozpoznania obiektów archeologicznych. Elementy dziedzictwa charakteryzują się zazwyczaj niewielkimi rozmiarami w kontekście rozległych struktur geomorfologicznych. Dzięki wykorzystaniu filtra dolnoprzepustowego (Low Pass Filter), a następnie działaniom na rastrach, małe formy w analizowanym krajobrazie zostają „uwypuklone”. Rozległe struktury ulegają wówczas „spłaszczeniu” (do izolinii „0”). Pozostawione są jedynie miejscowe różnice rzeźby terenu. W opracowanej przez R. Hessego (2010) metodzie dochodzi również do generacji uśrednionego NMT, który pozwala na jeszcze bardziej plastyczne oddanie badanego obszaru. Algorytmy zaimplementowane w niektórych dostępnych aplikacjach nie uwzględniają tego etapu przetwarzania i w celu ich odróżnienia określa się je często uproszczonymi LRM (Simplified LRM – SLRM). Analiza LRM pozwala dostrzec zmiany w mikrorzeźbie terenu (możliwe do identyfikacji w obrębie zasięgu określonego parametrami). Ten sposób wizualizacji umożliwia jednoznaczne określenie, czy obserwowany obiekt jest wklęsły czy wypukły, co stanowi ważną informację dla interpretatora. Uzyskany produkt nie daje jednak żadnych wskazówek dotyczących „globalnych” relacji topologicznych zachodzących na analizowanym obszarze.

2.3.4.3.6. Local dominance

Local dominance, czyli lokalna dominacja (Ryc. 4.7B), jest analizą, w której dla każdej komórki rastra numerycznego modelu obliczana jest jej dominacja względem otaczającego obszaru (Kokalj, Hesse 2017, 25). Analiza ta opiera się na obliczeniu wartości kąta, pod którym teoretyczny obserwator spoglądałby na otaczający go teren w promieniu określonym przez użytkownika. Wartość tego kąta wzrasta w miejscach ekspozowanych oraz na stokach i maleje na obszarach płaskich oraz obniżeniach terenowych. Obok

„promienia obserwacji” w tej analizie określa się wysokość „obserwatora”. Rezultat analizy jest najczęściej przedstawiany w odcieniach szarości. Obiekty dominujące nad otoczeniem są jaśniejsze, z kolei obszary ciemniejsze wskazują obniżenia terenowe i miejsca nieekspozowane. Local dominance uwypukla (podobnie jak LRM) mniejsze obiekty obecne w mikrotopografii i usuwa informacje o dużych formach terenowych. Bardzo dobrze odwzorowuje więc subtelne obiekty archeologiczne, takie jak dawne granice pól, silnie zniwelowane grobowce megalityczne, kurhany czy relikty dróg. Pochodna ta nie zawiera natomiast informacji o ukształtowaniu terenu (obecności wzniesień, dolin itp.).



Ryc. 4.7. Cmentarzysko kurhanowe przedstawione na analizie cieniowania z jednego kierunku (A) i analizie local dominance (B). Analiza local dominance wyraźniej oddaje poszczególne nasypy oraz uwypukla obecność zerodowanych dróg; nie jest natomiast przydatna w interpretacji ukształtowania terenu (G. Kiarszys)

2.3.4.3.7. Integracja produktów rastrowych ALS. Zobrazowania scalone

Na zakończenie warto również zaznaczyć, że istnieją różne techniki łączenia pochodnych numerycznych modeli terenu zaprojektowane w celu ułatwienia analizy danych. Wiąże się to z faktem, że o wiele wygodniej jest interpretatorowi pracować z jednym lub dwoma skalonymi obrazami (np. Ryc. 4.8A) niż przelatywać się nieustannie pomiędzy kilkoma różnymi wizualizacjami, z których każda prezentuje inny aspekt analizowanego

krajobrazu. Omawiane techniki polegają na łączeniu wybranych wizualizacji z równoczesną ingerencją w histogram, modyfikacją skali w celu uwypuklenia niektórych obiektów itd. Z jednej strony zatem pozwala to na wyróżnienie słabo widocznych obiektów, z drugiej zaś – może prowadzić do pewnych zniekształceń w odwzorowaniu ich kształtów czy powierzchni. Jedną z omawianych metod prezentowania scalonych pochodnych jest VAT (Visualization for Archaeological Topography), który tworzy się z takich wizualizacji, jak SVF, otwartość pozytywna, nachylenie stoku, cieniowanie i cieniowanie z wielu kierunków, łączonych za pomocą różnych formuł matematycznych – przy różnych kolejnościach mieszania, nakładania, mnożenia, rozjaśniania, ustawiania przezroczystości, kontrastu itd. (Kokalj, Somrak 2019).

2.3.5. Na czym polega interpretacja i kartowanie obiektów archeologicznych według danych ALS?

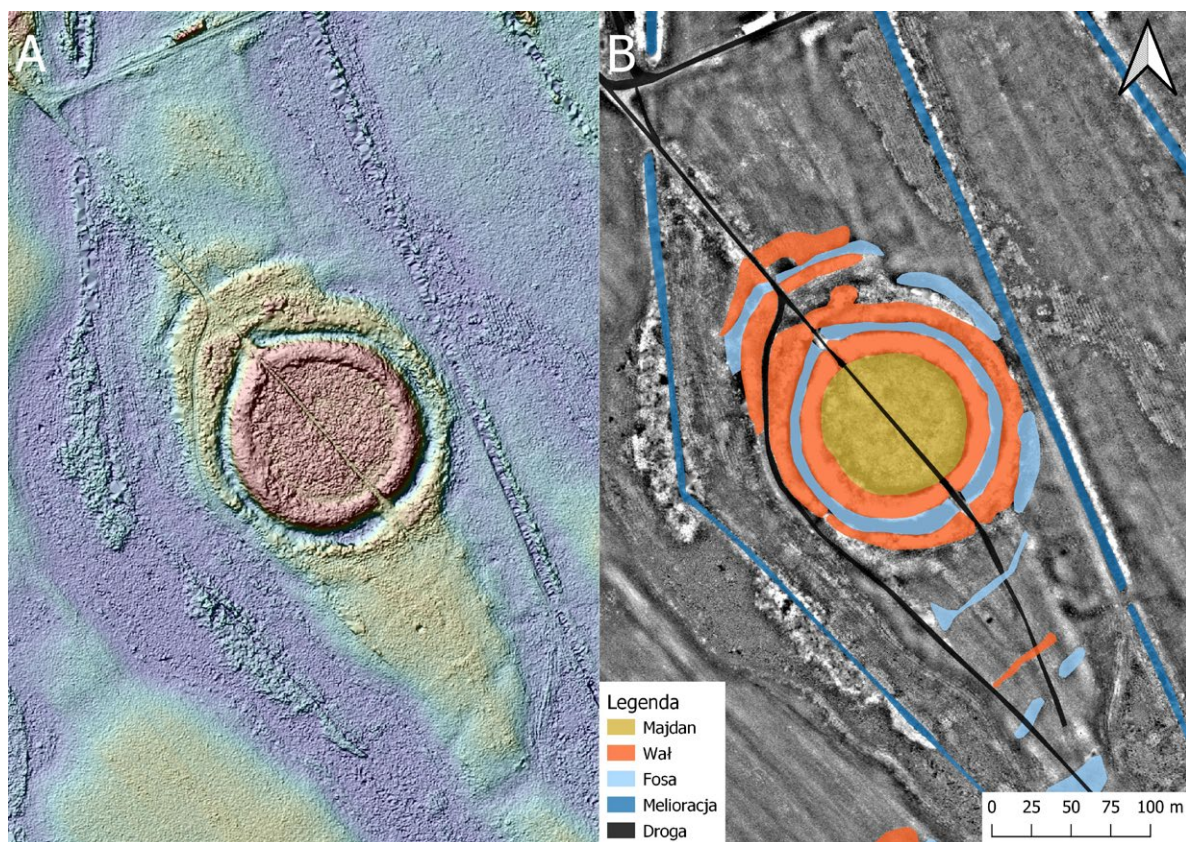
Po przetworzeniu danych i zadowalającej ocenie jakości uzyskanych rezultatów następuje etap interpretacyjny, który ma na celu zidentyfikowanie obiektów archeologicznych na wygenerowanych przetworzeniach oraz ich skartowanie (np. Lozić, Štular 2021, 7). Wykonuje się je w środowisku Systemów Informacji Geograficznej (GIS). Podczas kartowania (wektoryzacji/mapowania) obiektów i struktur archeologicznych nie tylko zaznacza się formę oraz kształt dostrzeżonych obiektów, lecz również w miarę możliwości, relikty są kategoryzowane (np. funkcjonalnie), przypisuje się im chronologię i inne rodzaje metadanych, uwzględniające np. kontekst znalezisk. Należy jednak zaznaczyć, że w wielu sytuacjach nawet podstawowa identyfikacja chronologiczno-funkcjonalna dokonywana na podstawie samych danych ALS może okazać się niemożliwa i będzie wymagała użycia innych metod badawczych.

W przypadku wykorzystania do detekcji obiektów archeologicznych sieci neuronowych proces ten dokonuje się raczej w sposób automatyczny, a ingerencja archeologa jest potrzebna

na końcowym etapie – do oceny uzyskanych wyników, poprawienia ewentualnych błędów i kategoryzacji obiektów. W powszechnej praktyce jednak interpretacja danych lidarowych nie jest zautomatyzowana i wykonuje ją sam interpretator. Jego rola polega wówczas na uważnym przejrzeniu zasobu danych, odnalezieniu i interpretacji wszelkich „podejrzanych” obiektów, które mogłyby zostać uznane za dziedzictwo archeologiczne (Lozić, Štular 2021, 15–16).

Na jakość powyższego procesu istotny wpływ mają m.in. takie czynniki, jak doświadczenie osoby analizującej dane czy umiejętności i wiedza tego badacza na temat wyglądu i różnorodności potencjalnych archeologicznych form terenowych. Należy bowiem podkreślić, że „widzenie” nie jest tożsame z „rozumieniem” (np. Berkeley 1709; Kiarszys, Banaszek 2017). Występowanie pewnych obiektów w wizualizacjach danych ALS wcale nie musi zatem oznaczać, że będą one prawidłowo zidentyfikowane czy nawet dostrzeżone przez interpretatora. Wynika to z faktu, że w procesie interpretacji wiedza wstępna pełni rolę klucza interpretacyjnego, który jest niezbędny również do rozpoznawania obiektów archeologicznych. Według filozofa Edmunda Husserla (Gosden 1994, 104) percepcja ma zawsze charakter intencjonalny i czerpie znaczenia z konwencji kulturowych. Interpretator przystępujący do analizy danych cechuje się z góry określoną intencją rozpoznania obiektów archeologicznych.

Analizując produkty pochodne skanowania, należy w miarę możliwości korzystać z innych źródeł danych teledetekcyjnych. Mogą to być zarówno dane pierwotne, jak i źródła ogólnodostępne (współczesne i historyczne), udostępniane poprzez usługi WMS i WMTS (np. Lozić, Štular 2021, 7–9). Porównywanie ze sobą zobrazowań ALS ze zdjęciami lotniczymi i satelitarnymi, historyczną kartografią, rezultatami rozpoznania terenowego czy zasobami AZP pozwala na lepsze zrozumienie kontekstu reliktywów archeologicznych i procesów podepozycyjnych, zdefiniowanie potencjalnych zagrożeń oraz eliminację artefaktów graficznych powstałych podczas przetwarzania danych (np. false-positive). Nie bez znaczenia dla



Ryc. 4.8. Przykład podstawowej wektoryzacji elementów umocnień wczesnośredniowiecznego grodziska oraz towarzyszących mu współczesnych obiektów: A) scalona kompozycja analizy cieniowania i numerycznego modelu terenu, B) zmapowane relikty archeologiczne na tle analizy Local Dominance (G. Kiarszys)

interpretacji antropogenicznych form terenowych jest również wiedza o obecnym zagospodarowaniu terenu i jego przekształcaniu w przeszłości.

Dobór zastosowanego w kartowaniu rodzaju geometrii wektorowej i szczegółowość skali realizowanych analiz – w Programie AZP+ określanych jako „poziomy rozpoznania”, zdefiniowane pytania badawcze czy cele konserwatorskie, dla których zamówiono opracowanie danych. Wpływa to bowiem istotnie na pracochłonność i koszty realizacji omawianego etapu. Na przykład określenie zasięgu strefy ochrony konserwatorskiej wymaga niższej szczegółowości mapowania niż studium konkretnych średniowiecznych umocnień obronnych, w którym każdy pojedynczy relikty terenowy powinien zostać poddany wektoryzacji. Z podobnych powodów określenie zasięgu cmentarzyska kurhanowego w celu objęcia go ochroną nie wymaga oddzielnego wektoryzowania każdego z występujących na nim nasypów, a jedynie zaznaczenia obszaru występowania tych obiektów.

Jest to szczególnie istotne, gdy analizie poddawane są rozległe obszary z dużym nagromadzeniem obiektów dziedzictwa archeologicznego. Z punktu widzenia celów konserwatorskich wiedza o precyzyjnych zasięgach wielu obiektów i struktur archeologicznych może być istotniejsza niż szczegółowa interpretacja najdrobniejszych elementów morfologii terenu. Zignorowanie takiej wskazówki może prowadzić nie tylko do nieuzasadnionego wzrostu kosztów i wydłużenia czasu niezbędnego na opracowanie danych, lecz również do wygenerowania informacji, które nie zostaną później w żaden sposób wykorzystane.

2.3.6. Wnioski

Lotnicze skanowanie laserowe osiągnęło w ostatnich dwóch dekadach metodyczną dojrzałość, co doprowadziło do szerokiego zastosowania danych lidarowych w badaniach archeologicznych. Otworzyło to przed badaczami liczne możliwości

studiowania obiektów i krajobrazów archeologicznych, a także przyczyniło się do lepszego zarządzania dziedzictwem, przynosząc jednocześnie wiele wyzwań. Udostępnienie danych przez GUGiK jest bezsprzecznie osiągnięciem zmieniającym polską archeologię. Dane ALS pozyskane dla całego kraju w ściśle określonych standardach i w relatywnie krótkim czasie stanowią obecnie podstawę dla wielu lokalnych i regionalnych projektów badawczych oraz konserwatorskich. Należy spodziewać się, że zasób ten będzie dalej powszechnie wykorzystywany. Łatwy dostęp do opracowanych przez GUGiK wizualizacji cieniowania numerycznego modelu terenu przynosi jednocześnie pułapkę. Oferowane na geoportalach wizualizacje wydają się być łatwe w interpretacji, zwłaszcza w przypadku obiektów archeologicznych o wyraźnej formie terenowej, co może powodować mylne przekonanie, że głębsza analiza danych jest zbędna. To niebezpieczna konkluzja, gdyż pomija problematykę jakości danych pierwotnych, sposobów ich przetwarzania i prezentacji. Te zagadnienia, które są ukryte przed nieświadomym odbiorcą, mają kluczowy wpływ na końcowy rezultat skanowania, który poddawany jest interpretacji archeologicznej. Należy zatem przeciwdziałać naiwnemu wykorzystywaniu danych ogólnodostępnych. Choć są one niezwykle ważne, ich swobodna dostępność i pozorność reprezentacji rzeczywistości mogą bardzo ograniczyć rezultaty analiz archeologicznych. Szkolenia z analizy i interpretacji danych lidarowych muszą stanowić ważny punkt w rozwoju kadry w sektorze archeologicznym. Należy spodziewać się jednocześnie dalszych prac rozwojowych, prowadzących do lepszego zrozumienia metody, charakteru oferowanych danych i możliwości ich wykorzystania.

Zakładana i obecnie realizowana przez GUGiK powtarzalność nalołów ALS w interwale kilku lat dla całego kraju nie tylko doprowadzi do zwiększenia aktualności danych, ale umożliwi również opracowanie systemu monitoringu obiektów archeologicznych. Pozwoli to na lepsze rozumienie procesów i zmian w krajobrazie oraz zagospodarowaniu terenu, a tym samym usprawni

zarządzanie zasobami dziedzictwa. Przyczyni się również do identyfikacji zniszczeń obiektów zabytkowych w skali całego kraju. Natomiast system, który umożliwi śledzenie oraz prognozę zmian, będzie mógł być wykorzystywany w celu zapobiegania zniszczeniom, wzmacniając tym samym ochronę nieodnawialnego zasobu dziedzictwa.

Należy jednak podkreślić, że w obecnych założeniach dane udostępniane przez GUGiK mają być pozyskiwane w tych samych standardach co dotychczas. Oznacza to, że choć oferowana gęstość punktów jest wystarczająca do prowadzenia podstawowych analiz, możliwość bardziej szczegółowego opracowania będzie ograniczona. W istocie, wraz z pojawieniem się danych ogólnodostępnych, spadła liczba projektów archeologicznych nastawionych na pozyskanie dedykowanych danych ALS, które często charakteryzowały się większą gęstością punktów (np. Banaszek 2015; Czebreszuk et al. 2013; Przybył 2014). Archeolodzy zaczęli korzystać z darmowego zasobu, rezygnując z kosztownych specjalistycznych nalołów, a takie ograniczenie do dwóch standardów GUGiK może kształtować oczekiwania. Niewkluczone, że dalszą konsekwencją będzie nawet rezygnacja z zamiaru wykorzystania metody, która przy tak zdefiniowanej gęstości chmury może przynosić niezadowalające rezultaty.

Aby odpowiedzieć na bardziej szczegółowe pytania, wymagane jest zatem wykonanie nalołu o większej gęstości punktów pomiarowych. O ile dla większych obszarów będzie to opierać się na użyciu klasycznej platformy nośnej, tj. samolotu lub helikoptera, w przypadku lokalnych projektów badawczo-konserwatorskich zwiększy się udział statków bezzałogowych. Dane ALS pozyskane za pomocą dronów charakteryzują się bardzo dużą gęstością chmury punktów, a relatywnie niskie koszty nalołu pozwalają na częste wykorzystanie tej metody, oferując wartościowy zasób danych możliwy do wykorzystania w celu szczegółowego monitoringu zasobów dziedzictwa. Powinniśmy więc spodziewać się coraz częstszego używania tych platform nośnych zarówno w pracach badawczych, jak i konserwatorskich.

Bibliografia

- Banaszek Ł. 2014. Lotniczy skaning laserowy w polskiej archeologii. Czy w pełni wykorzystywany jest potencjał prospekcyjny metody? *Folia Praehistorica Posnaniensia* 19, 207–251. <https://doi.org/10.14746%2Ffpp.2014.19.10>.
- Banaszek Ł. 2015. *Przeszłe krajobrazy w chmurze punktów*. Poznań: Wydawnictwo UAM.
- Banaszek Ł. et al. 2018. Lotnicze skanowanie laserowe: wyzwanie konserwatorskie. W: M. Gojda, Z. Kobylński (red.), *Archaeologica Hereditas*, t. 11, *Lotnicze skanowanie laserowe jako narzędzie archeologii*. Warszawa: Fundacja Res Publica Multiethnica, 189–203.
- Berkeley G. 1709. *An Essay Towards a New Theory of Vision*. Dublin: Jeremy Pepyat.
- Blinn J.F. 1977. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *SIGGRAPH Computer Graphics* 11(2), 192–198.
- Bugaj M., Kiarszys G., Przybyła M.M. 2021. Nieinwazyjne rozpoznanie wczesnośredniowiecznego grodziska w Lubomi, w powiecie wodzisławskim, woj. śląskie. *Raport* 15, 191–218.
- Casana J. 2020. Global-scale archaeological prospection using CORONA satellite imagery: Automated, crowd-sourced, and expert-led approaches. *Journal of Field Archaeology* 45(1), 89–100. <https://doi.org/10.1080/00934690.2020.1713285>.
- Challis K., Howard A.J. 2013. The role of lidar intensity data in interpreting environmental and cultural archaeological landscapes. W: R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting archaeological topography, airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxford: Oxbow Books, 161–170.
- Cowley D.C., Opitz R.S. 2013. Interpreting archaeological topography: lasers, 3D data, observations, visualization and applications. W: R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting archaeological topography, airborne laser scanning, 3D data and ground observation*, Oxford: Oxbow Books, 1–12.
- Crutchley S., Crow P. 2009. *The Light Fantastic: Using airborne laser scanning in archaeological survey*. Swindon: English Heritage.
- Czebreszuk J. et al. 2013. Modelowe badania nieinwazyjne obszarów leśnych – Las Krotoszyn. Z badań nad przemianami krajobrazu kulturowego w pradziejach Wielkopolski. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 49, 157–175.
- Devereux B.J. et al. 2005. The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity* 79, 648–660. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00114589>.
- Doneus M. 2013. Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Digital Terrain Models. *Remote Sensing* 5, 6427–6442. <https://doi.org/10.3390/rs5126427>.
- Doneus M., Kühnleiber T. 2013. Airborne laser scanning and archaeological interpretation – bringing back the people. W: R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting archaeological topography, airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxford: Oxbow Books, 32–50.
- Haugerund R., Harding D.J. 2001. Some Algorithms for Virtual Deforestation (VDF) of Lidar Topographic Survey Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34(3), 211–217.
- Hesse R. 2010. LiDAR-derived Local Relief Models – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 17(2), 67–72. <https://doi.org/10.1002/arp.374>.
- Horn B.K.P. 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE* 69(1), 14–47.

- Kiarszys G., Banaszek Ł. 2017. Dostrzec i zrozumieć. Porównanie wybranych metod wizualizacji danych ALS wykorzystywanych w archeologii. *Folia Praehistorica Posnaniensia* XXII, 233–270. <http://dx.doi.org/10.14746/fpp.2017.22.11>.
- Kiarszys G., Szalast G. 2014. Archeologia w chmurze punktów. Porównanie rezultatów filtracji i klasyfikacji gruntu w projekcie ISOK z wynikami opracowanymi w oprogramowaniu LAsTools i Terrasolid. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 19, 267–292. <https://doi.org/10.14746/fpp.2014.19.12>.
- Kokalj Ž., Hesse R. 2017. *Airborne laser scanning raster data visualization. A guide to good practice*. Ljubljana: Založba ZRC.
- Kokalj Ž., Somrak M. 2019. Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. *Remote Sensing* 11, 747. <https://doi.org/10.3390/rs11070747>.
- Kokalj Ž., Zakšek K., Oštir K. 2013. Visualizations of lidar derived relief models. W: R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting archaeological topography, airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxford: Oxbow Books, 100–114.
- Kraus K., Pfeifer N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53, 193–203.
- Kraus K., Pfeifer N. 2001. Advanced DTM generation from LiDAR data. *International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34/3, 23–30.
- Królikowski J. 2012. ISOK od kuchni. *Geodeta* 7, 19–22.
- Kurczyński Z. 2014. Lotnicze skanowanie laserowe – podstawy teoretyczne. W: P. Wężyk (red.), *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. Warszawa: GUGiK, 59–84.
- Lambers K., Verschoof-van der Vaart W.B., Bourgeois Q.P.J. 2019. Integrating Remote Sensing, Machine Learning, and Citizen Science in Dutch Archaeological Prospection. *Remote Sensing* 11(7), 794. <https://doi.org/10.3390/rs11070794>.
- Lozić E., Štular B. 2021. Documentation of Archaeology-Specific Workflow for Airborne LiDAR Data Processing. *Geosciences* 11/26. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010026>.
- Maślanka M., Wężyk P. 2014. Projekt ISOK – geneza i cel realizacji. W: P. Wężyk (red.), *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. Warszawa: GUGiK, 12–21.
- Opitz R. S. 2013. An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology. W: R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting archaeological topography, airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxford: Oxbow Books, 13–31.
- Nowakowski, J. 2010. Airborne Laser Scanning (ALS) w polskiej archeologii. Próby, Doświadczenia. XIX Konferencja Sprawozdawcza. *Badania archeologiczne na Nizinie Wielkopolsko-Kujawskiej w latach 2008–2009, Poznań, 26–27.04.2010* [niepublikowane].
- Przybył A. 2014. Newly recorded Neolithic earthen long barrows in south-western Poland: unexpected discoveries, expanded perspectives, new interpretations. *Préhistoires Méditerranéennes, (Colloque)*. https://www.researchgate.net/publication/270274622_Newly_recorded_Neolithic_earthen_long_barrows_in_south-western_Poland_unexpected_discoveries_expanded_perspectives_new_interpretations.
- Risbøl O. 2013. Cultivating the ‘wilderness’ – how lidar can improve archaeological landscape understanding. W: R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting archaeological topography, airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxford: Oxbow Books, 51–62.

- Risbøl O., Gustavsen L. 2018. LiDAR from drones employed for mapping archaeology – Potential, benefits and challenges. *Archaeological Prospection* 25, 329–338. <https://doi.org/10.1002/arp.1712>.
- Sevara C. et al. 2019. Relative Radiometric Calibration of Airborne LiDAR Data for Archaeological Applications. *Remote Sensing* 11(8), 945. <https://doi.org/10.3390/rs11080945>.
- Stereńczak K. et al. 2020. ALS-Based Detection of Past Human Activities in the Białowieża Forest—New Evidence of Unknown Remains of Past Agricultural Systems. *Remote Sensing* 12(16), 2657. <https://doi.org/10.3390/rs12162657>.
- Stott D. et al. 2015. Airborne LiDAR for the Detection of Archaeological Vegetation Marks Using Biomass as a Proxy. *Remote Sensing* 7, 1594–1618. <https://doi.org/10.3390/rs70201594>.
- Szadkowski A. 2012. ISOK – co znajdziemy w zasobie? *Geodeta* 7, 14–18.
- Štular B., Lozić E. 2020. Comparison of Filters for Archaeology-Specific Ground Extraction from Airborne LiDAR Point Clouds. *Remote Sensing* 12/3025. <https://doi.org/10.3390/rs12183025>.
- Štular B., Lozić E., Eichert S. 2021. Airborne LiDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology. *Remote Sensing* 13/1855. <https://doi.org/10.3390/rs13091855>.
- Wężyk P. 2006. Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki* 4/4, 119–132.
- Wężyk P. (red.) 2014. *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. Warszawa: GUGiK.
- Yokoyama R., Shirasawa M., Pike R. J. 2002. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68, 257–265.
- Zakšek K., Kokalj Ž., Oštir K. 2011. Application of sky-view factor for the visualization of historic landscape features in lidar-derived relief models. *Antiquity* 85, 263–273. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00067594>.
- Zakšek K., Pfeifer N. 2006. *An improved morphological filter for selecting relief points from a lidar point cloud in steep areas with dense vegetation*. Innsbruck, Ljubljana: Delft.
- Zalewska A., Kiarszys G. 2021. The forgotten Eastern Front: Dealing with the social and archaeological legacies of the Battle of the Rawka and Bzura Rivers (1914–1915), central Poland. *Antiquity* 95(384), 1565–1583. <https://doi.org/10.15184/aqy.2021.134>.

Tomasz Herbich, Wiesław Małkowski*

2.4. Metody geofizyczne w archeologii

2.4.1. Czym są badania geofizyczne w archeologii?

Ta część poradnika ma na celu przedstawienie przeglądu problemów, które należy brać pod uwagę przy podejmowaniu lub zlecaniu badań geofizycznych w archeologii. W projektach wykorzystujących badania geofizyczne często formułowane są pytania o potrzebę zastosowania kilku metod. Jest to jak najbardziej zrozumiałe, ponieważ realizacja badań w różnych warunkach geologicznych i środowiskowych wymaga wyboru konkretnych rozwiązań technicznych optymalizujących proces budowania wiedzy o terenie poddanym prospekcji geofizycznej. Już we wstępie wypada zatem wyrazić przekonanie, że nie ma jednej uniwersalnej metody ani jednego uniwersalnego sposobu prowadzenia badań geofizycznych na obszarze występowania reliktywów archeologicznych. Postaramy się przedstawić szereg wskazówek, które mogą być pomocne zarówno przed zleceniem badań geofizycznych, w trakcie ich przebiegu, jak i w procesie analiz zakończonych sprawozdaniem. Należy w tym miejscu podkreślić, że istnieje wiele publikacji, które omawiają problematykę prowadzenia prac geofizycznych (np. Misiewicz 2006; David, Linford N., Linford P. 2008). Niniejszy tekst ma za zadanie wskazać te elementy, które są związane z programem pozyskiwania danych i informacji przestrzennych poszerzających wiedzę w ramach Programu AZP+. Chcemy przy tej okazji podkreślić, że geofizyczne badania archeologiczne powinny być wykonywane przez zespoły odpowiednio do tego przygotowane i przeszkolone, gwarantujące swoją wiedzę i doświadczeniem prawidłową realizację zarówno prac terenowych, jak i opracowania wyników. Niniejsze wskazówki nie są zbiorem wiedzy, której nabycie zapewnia

uzyskanie kompetencji w zakresie wykonywania badań terenowych czy też opracowania ich rezultatów. Jest to natomiast zasób informacji na temat metod i technik pomocnych w trakcie poszczególnych etapów prac geofizycznych. Wiedza teoretyczna nie zastępuje oczywiście konieczności uzyskania doświadczenia w dziedzinie geofizyki archeologicznej. Podejmowanie zadań geofizycznych tylko na podstawie tego poradnika może skutkować brakiem pozytywnych rezultatów podjętych prac, a w efekcie wpłynąć na kształtowanie i utrwalanie niekorzystnych opinii na temat stosowania opisywanych tutaj metod.

Standaryzacja prac w ramach geofizycznych badań archeologicznych jest niezbędna, gdyż istotną rolę odgrywa wiele parametrów, które decydują o wynikach. Posługiwanie się wypracowanymi już technikami (np. korelowaniem pomiarów magnetycznych, elektrooporowych, georadarowych) wpływa korzystnie na wyniki końcowe, ale ocena przydatności zastosowania odpowiedniego repertuaru metod powinna być wynikiem wspólnych ustaleń strony zlecającej i wykonującej prace. Obydwie strony muszą mieć zatem pewną wiedzę na temat metod, ich potencjału badawczego oraz ograniczeń wynikających z warunków naturalnych, charakteru oczekiwanych reliktywów i innych parametrów badanego terenu. Wiedza płynąca z tych ustaleń może znacznie podnieść wartość wyników, pozwoli uniknąć niepotrzebnych rozczarowań, jak również może przysłużyć się poszerzeniu zasobu informacji AZP+.

Badania geofizyczne obejmują działania mające na celu obserwację i dokumentację zmian wybranych parametrów fizycznych gruntu. Dzięki nim uzyskujemy informacje o zasięgu poziomym i głębokości obiektów archeologicznych znajdujących się pod powierzchnią ziemi. Pierwotnie metody

* Autorzy konsultowali ten tekst z Leonem Muchą, Krzysztofem Misiewiczem i Radosławem Mieszkowskim, i w tym miejscu dziękują im za bezinteresowną pomoc, wsparcie merytoryczne i podzielenie się własnymi doświadczeniami.

badzeń geofizycznych wypracowane zostały dla potrzeb badań geologicznych i służyły rozpoznaniu budowy geologicznej podłoża, w tym określenia miąższości nawarstwień i ich charakteru. Dostosowanie tych metod do potrzeb archeologii polegało przede wszystkim na zmianie głębokościowego zasięgu obserwacji z setek czy tysięcy metrów zaledwie do kilku. W badaniach archeologicznych szerokie zastosowanie znalazły trzy metody: magnetyczna, elektrooporowa i elektromagnetyczna (z zastosowaniem georadaru zwana potocznie metodą georadarową). Inne metody, jak np. sejsmiczna czy grawimetryczna, stosowane są sporadycznie.

Zależnie od sposobu prowadzenia obserwacji metody geofizyczne podzielić można na pasywne i aktywne (zob. rozdz. 1.2.1). Do pasywnych zaliczają się metody rejestrujące parametry o wartościach niezależnych od naszych działań. Metody aktywne wymagają wytwarzania obserwowanych parametrów. Ze stosowanych w archeologii metod do pasywnych zalicza się metodę magnetyczną (zwaną też magnetometryczną lub geomagnetyczną). Metodami aktywnymi są metody geoelektryczne i elektromagnetyczne.

Korzystne dla efektywności prospekcji geofizycznej jest jednocześnie zastosowanie kilku metod obserwacji przy założeniu ich precyzyjnej lokalizacji geodezyjnej x, y, z . Korelacja wyników uzyskanych różnymi technikami obserwacji może znacznie wzbogacić wiedzę o obiektach archeologicznych. Na przykład rodzaj materiału użytego do budowy muru zarejestrowanego przy użyciu metody elektrooporowej lub radarowej może być określony metodą magnetyczną, a zasięg głębokościowy struktur zarejestrowanych przy użyciu metody magnetycznej (choćby reliktów zabudowy) można precyzyjnie określić przy pomocy metody radarowej.

Powszechność stosowania metod geofizycznych w badaniach archeologicznych spowodowała, że w przypadku kilku metod (głównie magnetycznej i elektrooporowej) badacze mają do dyspozycji przyrządy pomiarowe zaprojektowane specjalnie pod kątem potrzeb prospekcji archeologicznej. Uwzględniane cechy tych

instrumentów to ich ergonomia, szybkość i precyzja pomiaru oraz prostota obsługi. Dostępność instrumentów, w powiązaniu z odpowiednim oprogramowaniem, spowodowała, że badania geofizyczne, które w pierwszej fazie ich wdrażania do archeologii, czyli w trzeciej ćwierci XX wieku, wykonywane były przez specjalistów w dziedzinie geofizyki, obecnie są prowadzone także przez archeologów wdrożonych w podstawy stosowania tych metod. Zmiana ta miała fundamentalne znaczenie w podejściu do oceny efektywności metod geofizycznych w rejestracji struktur archeologicznych i interpretacji wyników. Ocena ta była podstawowym czynnikiem decydującym o upowszechnieniu metod geofizycznych w archeologii.

2.4.4. Metoda magnetyczna

Metoda magnetyczna polega na rejestracji zmian zachodzących w naturalnym polu magnetycznym Ziemi. W badaniach archeologicznych służy m.in. do stwierdzenia obecności obiektów i nawarstwień o odmiennej od otoczenia podatności magnetycznej, wywołujących lokalne zakłócenia pola magnetycznego Ziemi. Źródłem tych anomalii jest magnetyzacja szczątkowa (remanentna) oraz magnetyzacja indukcyjna. Oba te procesy wymagają obecności cząstek (tlenków) żelaza. Innym źródłem mającym wpływ na wynik prospekcji archeologicznej jest zjawisko termomagnetyzacji, będącej rodzajem magnetyzacji szczątkowej. W wyniku podgrzania (do temperatury Curie), a następnie schłodzenia materiału zawierającego tlenki żelaza następuje ich trwała polaryzacja, co powoduje powstanie dodatkowego pola magnetycznego. Jego wektor sumuje się z wektorem naturalnego pola magnetycznego Ziemi, powodując lokalne zmiany jego natężenia. Dzięki termomagnetyzacji dodatkowym polem magnetycznym cechują się relikty pieców i paleniska, przepalona glina (w tym ceramika i cegła palona), skupiska żużli. Efektem procesów związanych z redukcją i utlenianiem minerałów magnetycznych, zarówno w wyniku wypalania roślinności (zjawisko Le Borgne'a), jak i działania bakterii magnetotaktycznych, jest

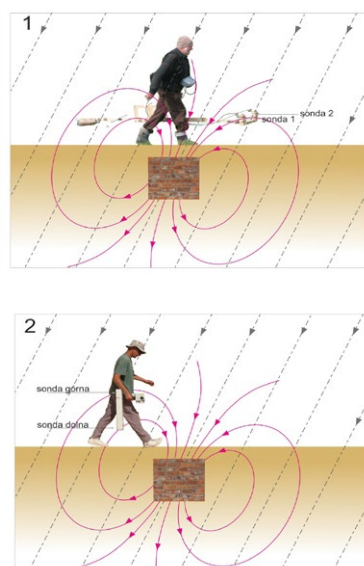
wzrost podatności magnetycznej poziomów próchnicznych gleby. Pozwala to na rejestrację obiektów wtórnie wypełnianych osadami próchnicznymi, np. jam, rowów czy grobów wykopanych w kontrastujące podłoże. Silnie magnetyczne są przedmioty wykonane z metali (ferromagnetyki) oraz skały zawierające minerały magnetyczne, np. niektóre głazy narzutowe pochodzenia północnego.

2.4.2.1. Przyrządy pomiarowe

Do prowadzenia pomiarów w terenie stosowane są różnego typu magnetometry rejestrujące zmiany wartości wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego lub rejestrujące jedną ze składowych (najczęściej pionową) wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego. Drugi ze wspomnianych typów magnetometrów stosowany jest w badaniach archeologicznych w wersji gradientometru, który rejestruje wyłącznie różnicę pomiędzy odczytami dwóch czujników.

Zmiany wartości wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego rejestrowane są obecnie przy użyciu magnetometrów cezowych, zaliczanych do grupy magnetometrów pompowanych optycznie (Ryc. 5.1.1, 5.2.1–5.2.2). Magnetometry te cechuje krótki czas pomiaru (nie dłuższy niż 0,1 sek.) oraz wysoka rozdzielczość (0,01–0,001 nT). Stosowane wcześniej magnetometry protonowe, ze względu na długi czas pomiaru (1,5–6 sek.), przestały być używane. Z kolei do pomiaru gradientu powszechnie stosowane są magnetometry (gradientometry) transduktorowe (fluxgate) (Ryc. 5.1–2, 5.2–3, 5.2–4). Instrumenty stosowane w archeologii mierzą gradient składowej pionowej wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego. Pomiar gradientu pozwalają uniknąć

wpływu strefowych zmian natężenia pola magnetycznego (np. związanego z budową geologiczną podłoża) oraz zmian czasowych (natężenie pola magnetycznego Ziemi podlega stałym wahaniom, których amplituda może być wyższa niż amplituda anomalii wywołanej przez obiekt archeologiczny). Procedura taka pozwala zawęzić pole obserwacji



Ryc. 5.1. Pomiar natężenia pola magnetycznego. Linie przerywane – linie pola magnetycznego Ziemi, linie czerwone – linie pola magnetycznego obiektu (np. muru ceglanego) tworzące lokalne pole magnetyczne. 1 – pomiar całkowitego natężenia pola, przy jednoczesnym użyciu dwóch sond (wzdłuż dwóch linii pomiarowych). 2 – pomiar różnicy natężenia pola (pomiędzy dolnym i górnym czujnikiem (T. Herbich)



Ryc. 5.2. Magnetometry. 1 – magnetometr cezowy wyposażony w dwie sondy, mierzące wektor całkowitego natężenia pola magnetycznego jednocześnie wzdłuż dwóch linii odległych od siebie o 0,5 m. 2 – pomiar magnetometrem cezowym wyposażonym w dwie sondy; lokalizacja pomiaru przy użyciu GNSS RTK. 3 – pomiar gradientometrem transduktorowym (pomiar wzdłuż jednej linii). 4 – pomiar gradientometrem transduktorowym z dwiema sondami (pomiar wzdłuż dwóch linii). 5 – pomiar 16-kanalowym gradientometrem transduktorowym, lokalizacja pomiaru przy użyciu RTK. 1, 3 i 4 – pomiar w obrębie poligonów, linia pomiarowa wytyczona skalowaną linką (T. Herbich)

do zmian powodowanych wyłącznie przez obiekty i struktury umiejscowione blisko powierzchni.

Do pomiarów używa się przyrządów jednokanałowych (pracujących z jedną sondą lub jednym zestawem sond) w przypadku pomiaru gradientu lub aparaturę wielokanałową, umożliwiającą równoczesny pomiar kilkoma sondami (Ryc. 5.2.1, 5.2.2, 5.2.4, 5.2.5). Podczas pomiarów przyrządy jedno- i dwukanałowe (z jedną lub dwoma sondami) przenoszone są ręcznie (Ryc. 5.2.1–5.2.4), a przyrządy z większą liczbą sond użytkowane są w zestawach mobilnych, które mogą być przenoszone przy użyciu różnego rodzaju ciągników/pojazdów (Ryc. 5.2.5).

2.4.2.2. Metodyka badań terenowych

Przy doborze instrumentu do badań powinno uwzględnić się podatność magnetyczną śledzonych struktur archeologicznych oraz głębokość

ich zalegania. Instrumenty cezowe, o wysokiej czułości, są bardziej przydatne do rejestracji struktur o mniej zróżnicowanej podatności magnetycznej i struktur zalegających na większych (poniżej 1 m) głębokościach. Gradientometry transduktorowe są bardziej przydatne w rejestracji obiektów zalegających płycej niż 1 m poniżej powierzchni gruntu. Pomiary gradientometrem dają zwykle dokładniejszy obraz struktur zalegających w warstwach przypowierzchniowych w odróżnieniu do pomiarów wartości wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego, które z kolei są bardziej przydatne do pozyskiwania informacji o warstwach i obiektach zalegających głębiej.

Dokładność obrazowania struktur o różnej od otoczenia podatności magnetycznej zależy także od gęstości próbkowania (Ryc. 5.3). W praktyce archeologicznej przyjmuje się, że odległość między liniami pomiarowymi (profilami) nie jest

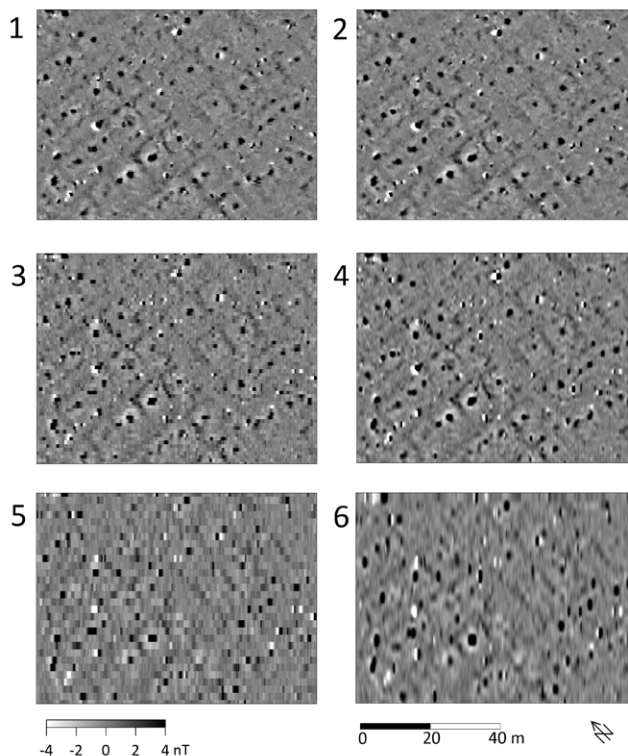
Tabela 1. Podatności magnetyczne skał, warstw i obiektów archeologicznych (Misiewicz 2006)

Wybrany rodzaj gruntu / skały	Podatność magnetyczna $K \times 10^6$ SI
piasek	0
ił	+4 do +50
gлина	+30
wapień	+4 do +70
humus	+10 do +400
bazalt	+60 do +6000
Wybrany rodzaj obiektu archeologicznego	
wypełniska rowów i jam	+30 do +200
polepa	+100 do +500
cegły	+100 do +550

większa niż 0,5 m. Dla ogólnego rozpoznania stanowisk można zastosować rozstaw profili co 1 m, jednak odległość pomiędzy punktami pomiarowymi na profilu nie powinna być mniejsza niż 0,25 m. Stosowanie gęstej siatki pomiarowej jest wymagane w przypadku, gdy rejestracji podlegają obiekty o niewielkich rozmiarach (np. doły po słupach). W przypadku badań obszarów, na których struktury mają wspólną orientację (np. znaną przed rozpoczęciem badań, jednolitą orientację zabudowy), istotny okazuje się również kierunek profili – powinien być ukośny w stosunku do orientacji struktur.

W praktyce pomiarowej dla potrzeb badań archeologicznych, ze względu na stosowany sprzęt, stosowana jest metoda rejestracji danych w obrębie poligonów – kwadratów o boku od 20 do 40 m wyznaczonych przy pomocy sprzętu geodezyjnego. Procedura taka dostosowana jest do wymogów oprogramowania służącego do opracowywania wyników pomiarów (patrz poniżej). Dla zapewnienia precyzyjnej lokalizacji pomiarów w osiach x i y profile wyznaczane są przy pomocy taśm mierniczych (lub linek ze znacznikami co 1 m). Pomiary wykonuje się w dwóch trybach: równoległym i naprzemiennym („zygzak”). Przy trybie równoległym instrument przenoszony jest zawsze w jednym kierunku w obrębie poligonu, przy trybie naprzemiennym – w dwóch kierunkach. Tryb naprzemienny skraca czas pomiaru (nie ma „pustych” przejść z instrumentem), wymaga jednak korekcji błędu związanego z przesunięciem zarejestrowanej anomalii w stosunku do położenia obiektu, który ją wywołuje.

Przyspieszenie prac i ich ekonomizację (poprzez zmniejszenie liczby osób zaangażowanych w pomiary) uzyskać można poprzez połączenie magnetometru z odbiornikiem GNSS skonfigurowanym w trybie RTK (Ryc. 5.2.2, 5.2.5). Pozwala to na dokładną lokalizację zmian wartości pola magnetycznego bez konieczności przenoszenia taśm wyznaczających poligony i linek rozłożonych wzdłuż profili. Takie rozwiązanie jest szczególnie istotne w przypadku badań obejmujących rozległe, wielohektarowe powierzchnie.



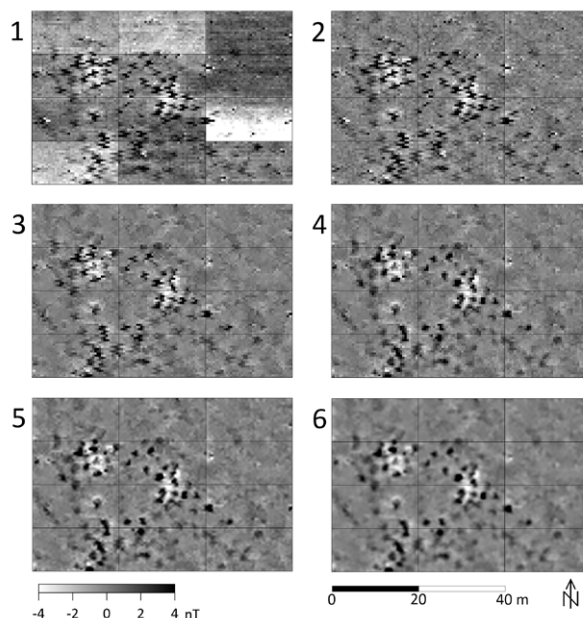
Ryc. 5.3. Mapa magnetyczna fragmentu osady kultury łużyckiej w Smuszewie. Pomiary wzdłuż linii o kierunku północny zachód – południowy wschód. 1 – gęstość próbkowania 8 pomiarów/m² (pomiar co 0,25 m wzdłuż linii odległych o 0,5 m); 2 – mapa 1 interpolowana do siatki 0,25 x 0,25 m; 3 – gęstość próbkowania 4 pomiary/m² (pomiar co 0,25 m wzdłuż linii odległych o 1 m); 4 – mapa 3 interpolowana do siatki 0,25 x 0,25 m; 5 – gęstość próbkowania 2 pomiary/m² (pomiar co 0,25 m wzdłuż linii odległych o 2 m); 6 – mapa 5 interpolowana do siatki 0,25 x 0,25 m (T. Herbich)

2.4.2.3. Opracowanie i prezentacja wyniku

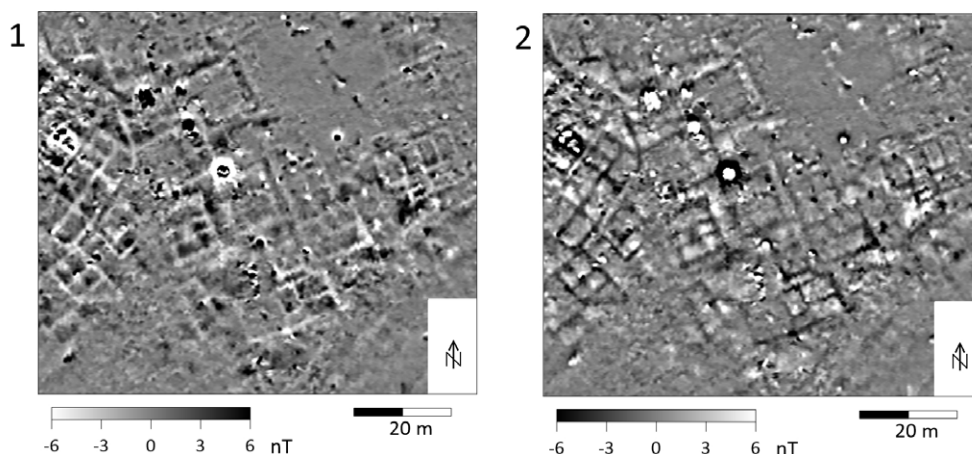
Do opracowania wyników badań służy specjalistyczne oprogramowanie przygotowane z uwzględnieniem specyfiki pomiarów magnetycznych prowadzonych dla potrzeb archeologii. Stosuje się m.in. programy Geoplot, Terrasurveyor, Surfer i QGIS. Dane transmitowane są do komputera w zbiorach tworzonych osobno dla każdego z poligonów. Ogólnym celem działań, jakim poddaje się wyniki pomiarów, jest uczytelnienie obrazu graficznego rezultatów i uwydatnienie w tym obrazie anomalii, które mogą odpowiadać strukturom archeologicznym. Działania polegają tu na zastosowaniu szeregu algorytmów (filtrów) korygujących błędy pomiarowe (poprzez usunięcie pomiarów o wartościach, które odbiegają od wartości z ich otoczenia); ponadto chodzi

o ujednolicenie danych (poprzez sprowadzenie ich do średniego poziomu wartości w obrębie poligonu i całego obszaru objętego badaniami), skorygowanie błędów (wynikających z opóźnienia czasowego w rejestracji pomiaru w trybie zygzak) oraz likwidację zmian wartości pola magnetycznego związanego ze zmianami czasowymi (Ryc. 5.4). Algorytmy umożliwiają likwidację zakłóceń powstałych w trakcie pomiarów systemami wielokanałowymi. Należy jednak pamiętać, że stosowanie algorytmów może osłabić obraz anomalii związanych ze strukturami archeologicznymi, a nawet – w skrajnych przypadkach – całkowicie wyeliminować te anomalie.

Po opracowaniu wartości pomiarów prezentowane są graficznie w postaci map zmian dotyczących wartości wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego lub gradientu składowej wektora, zwanych mapami magnetycznymi. W publikacjach i raportach przeważają obrazowania, na których zmiany wartości pola oddane są w skali odcieni szarości, a wartościom skrajnym odpowiadają biel i czerni. W zależności od tego, jak chcemy uwypuklić obraz zarejestrowanych struktur, mapy mogą być prezentowane w skali pozytywowej (wartościom najniższym odpowiada biel, najwyższym – czerni) lub negatywowej (najniższe – czerni, najwyższe – biel) (Ryc. 5.5).

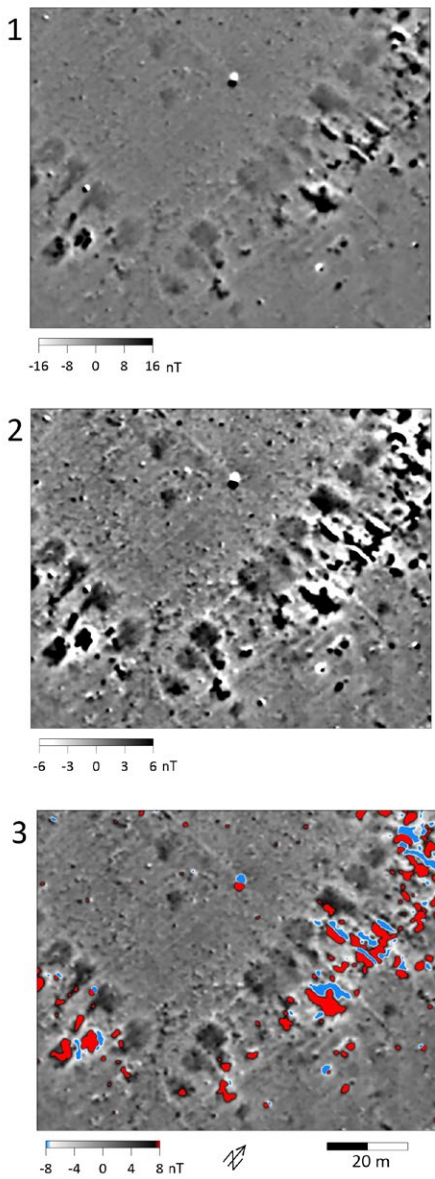


Ryc. 5.4. Mapa magnetyczna z zespołem anomalii o podwyższonych wartościach natężenia pola magnetycznego, odpowiadających paleniskom na cmentarzysku kurhanowym z wczesnej epoki brązu w Łękach Małych. Opracowanie wyników pomiarów metodą magnetyczną w programie Geoplot. Gęstość próbkowania 4 pomiary/m² (pomiar co 0,5 m wzdłuż linii odległych o 0,5 m). Pomiary w trybie naprzemiennym („zygzak”) w obrębie poligonów 10 x 20 m, po liniach wschód–zachód. 1 – mapa utworzona z danych bezpośrednio po transmisji z instrumentu; 2 – dane po zastosowaniu filtru zero mean traverse, uśredniającego wartości pomiarów w obrębie poligonów; 3 – dane po zastosowaniu filtru despiking, likwidującego pomiary wyraźnie różniące się od najbliższego otoczenia (błędy pomiarowe lub anomalie wywołane niewielkimi obiektami metalowymi); 4 – dane po zastosowaniu filtru destegger likwidującego efekt pomiarów w trybie naprzemiennym; 5 – dane po interpolacji do siatki do gęstości 0,25 x 0,25 m; 6 – dane po zastosowaniu low pass filter (T. Herbich)



Ryc. 5.5. Mapy magnetyczne zespołu zabudowy z bloków wapiennych w Marei (okres rzymski, Egipt). 1 – mapa pozytywowa (skrajne wartości dodatnie oddane czernią, skrajne wartości ujemne oddane bielą); 2 – mapa negatywowa (skrajne wartości dodatnie oddane bielą, skrajne wartości ujemne oddane czernią). Obraz w skali negatywowej jest bardziej naturalny dla odbiorcy – murom odpowiadają linie ciemniejsze od otoczenia, zgodnie z powszechnie przyjętą konwencją prezentacji planów zabudowy (T. Herbich)

W celu uwydatnienia obrazu struktur wywołujących zmiany wartości natężenia pola o dużej amplitudzie na mapach magnetycznych prezentuje się dane w szerokim zakresie mierzonych wartości (Ryc. 5.6.1). Natomiast w celu uwydatnienia obrazu struktur powodujących zmiany o niewielkiej amplitudzie prezentowane są wahania wartości w wąskim zakresie (Ryc. 5.6.2). Niekiedy autorzy uznają za przydatne obrazowania z wprowadzeniem dodatkowych barw (Ryc. 5.6.3), w postaci modeli 3D lub modeli reliefowych.



Ryc. 5.6. Mapa magnetyczna obrazująca fragment zabudowy wokół rynku pierwotnego założenia Szamotuł. 1 – mapa w szerokim przedziale wartości; 2 – mapa w wąskim przedziale wartości; 3 – mapa z wprowadzeniem barw czerwonej i niebieskiej, oznaczających skrajne wartości anomalii o największej amplitudzie wartości (T. Herbich)

2.4.5. Metoda geoelektryczna elektrooporowa – profilowania

Podczas prospekcji elektrooporowych rejestrowane są zmiany w rozkładzie pola elektrycznego, sztucznie wytworzonego w podłożu przy pomocy systemu elektrod. W badaniach geologicznych metoda ta służy do określenia oporności skał znajdujących się w obrębie wytworzonego sztucznie pola elektrycznego i pozwala na określenie ich położenia – o ile skały są zróżnicowane pod względem zdolności do przewodzenia prądu. W praktyce badań archeologicznych omawiana metoda służy do określania położenia i wymiarów struktur archeologicznych o różnej zdolności do przewodzenia prądu (Tabela 2 i 3). Do przeprowadzenia pomiaru potrzebny jest układ czterech elektrod wbitych w grunt, w odpowiedniej konfiguracji geometrycznej zwanej układem pomiarowym. Pole elektryczne wytwarza się poprzez elektrody prądowe (oznaczane jako A i B). Rozkład przestrzenny pola zależy od charakterystyki

Tabela 2. Oporności elektryczne gruntów (Fajkiewicz 1972, Stenzel, Szymanko 1973)

Rodzaj podłoża	Przedział oporności elektrycznej ρ [Ω m]
utwory ilaste (iły, gliny silnie zailone)	< 25
utwory organiczne (torfy, namuły)	10 ÷ 30
utwory gliniaste (gliny pylaste, gliny zwałowe, gliny piaszczyste)	25 ÷ 70
utwory piaszczyste (piaski gliniaste, piaski drobne, piaski średnie, piaski grube, żwiry)	70 ÷ 1000 im większa granulacja, tym wyższa oporność
kawerna	kilka tysięcy

Tabela 3. Oporność ρ oraz przewodność elektryczna [S/m] skał, warstw i obiektów archeologicznych (Misiewicz 2006)

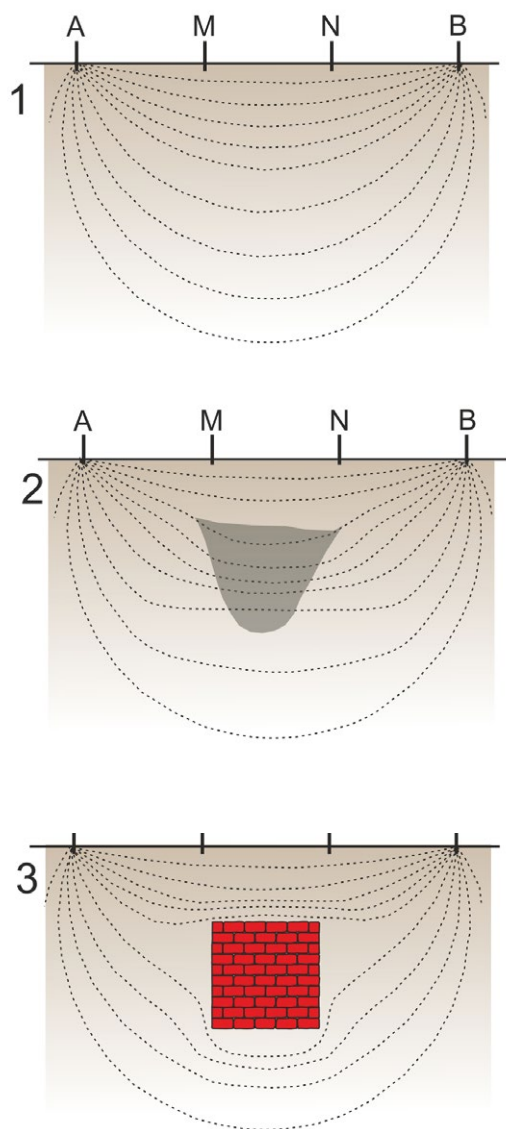
Wybrany rodzaj gruntu / skały	Opór właściwy ρ [Ωm]	Przewodność elektryczna σ [S/m]
ił	< 30	0,005–001
lessy	20 ÷ 60	0,005–0,02
humus	30 ÷ 80	0,01–1
glina	35 ÷ 80	0,01–1
żwir	80–350	0,004
bazalt	> 1000	10^{-6} – 10^{-3}
granit	> 5000	10^{-6} –0,005
piasek	250–10 000	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Wybrany rodzaj obiektu archeologicznego	Opór właściwy ρ [Ωm]	Przewodność elektryczna σ [S/m]
polepa	< 35	0,001–0,01
wypełniska rowów i jam	30–80	0,1–1
cegły	> 1000	10^{-5} – 10^{-2}

opornościowej warstw, przez które przepływa prąd. Do badania rozkładu pola elektrycznego służą elektrody potencjałowe M i N, pomiędzy którymi mierzony jest spadek napięcia. Oporność gruntu (tzw. oporność pozorna będąca średnią ważoną oporności warstw objętych pomiarami) jest obliczana ze stosunku wartości różnicy napięcia mierzonego na elektrodach potencjałowych do prądu wytwarzającego pole elektryczne, z uwzględnieniem współczynnika geometrycznego określonego konfiguracją elektrod. W ośrodku jednorodnym linie pola elektrycznego układają się regularnie. Obecność w polu elektrycznym obiektu o oporności różnej od otoczenia powoduje zaburzenie przebiegu linii prądowej, znajdujące odbicie w zmianie

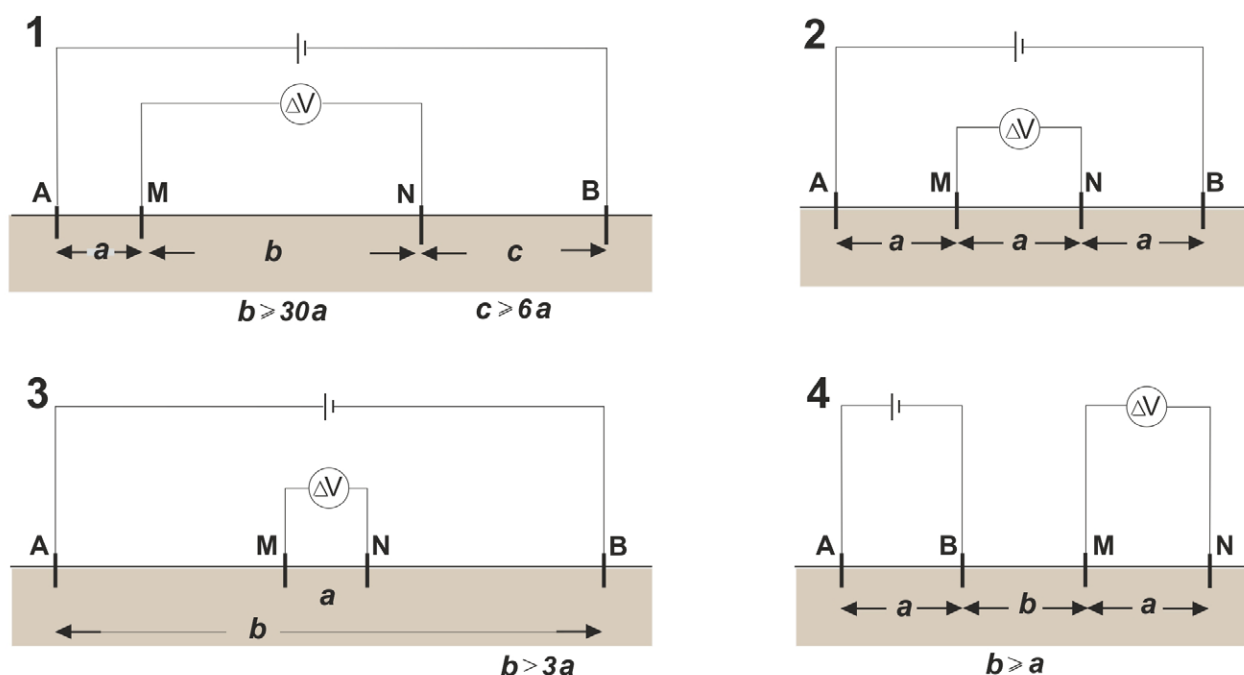
wartości potencjału (Ryc. 5.7). Metoda elektrooporowa jest przydatna przede wszystkim do rejestracji reliktów zabudowy kamiennej i ceglanej, zachowanych pod powierzchnią ziemi. Wśród czynników mających wpływ na oporność skał podłoża jest ich ułożenie w stosunku do powierzchni gruntu, miąższość i zawilgocenie, dlatego też struktury wtórnie wypełnione osadami podłoża (np. jamy) widoczne są w pomiarach tylko wówczas, gdy ich wilgotność różni się od wilgotności otoczenia.

2.4.3.1. Przyrządy i układy pomiarowe

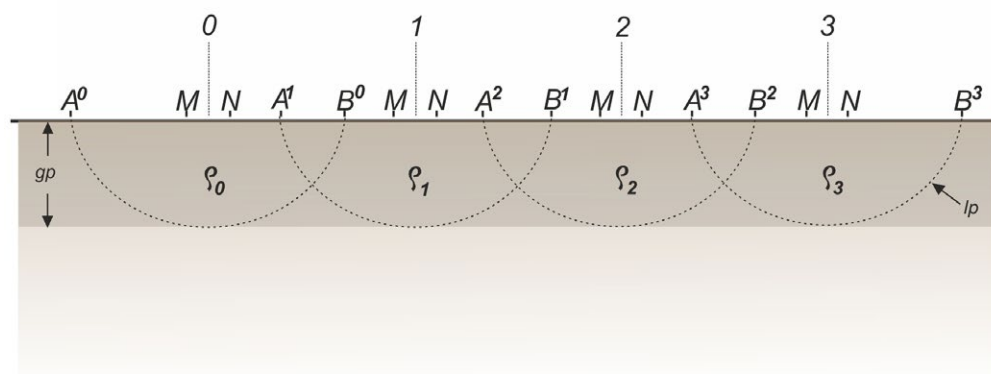
Obecnie badania elektrooporowe prowadzone są najczęściej przy użyciu aparatury zmiennoprądowej. W skład zestawu pomiarowego wchodzi generator, do którego podłączone są elektrody prądowe A i B oraz miliwoltomierz rejestrujący zmiany spadku napięcia pomiędzy elektrodami potencjałowymi M i N. Głębokość wnikania prądu, a co za tym idzie zasięg głębokościowy prospekcji zależy od odległości pomiędzy elektrodami prądowymi. W badaniach metodą profilowań (area resistivity survey, rzadziej resistivity profiling method) pomiary prowadzone są układem o stałej geometrii dla danego obszaru, w siatce (w osiach xy) o stałej gęstości próbkowania (Ryc. 5.8, Ryc. 5.9). Pozwala to na rejestrowanie zmian oporności w obrębie warstwy o stałej głębokości. Przyjmuje się zasadę, że w przypadku stosowania układów symetrycznych (np. Wennera i Schlumbergera, Ryc. 5.8.2,3) głębokość prospekcji może sięgać wartości $1/6$ odstępu pomiędzy elektrodami prądowymi. Należy jednak zauważyć, że im większa jest głębokość prospekcji, tym mniejsza rozdzielczość pomiarów, a zatem możliwość lokalizacji obiektów o niewielkich wymiarach. Tę niedogodność można niwelować, stosując układy pomiarowe o różnej konfiguracji elektrod, czyli



Ryc. 5.7. Rozkład linii prądowych w podłożu. 1 – podłoże o jednorodnej oporności; 2 – obiekt zaburzający rozkład linii prądowych ma niższą oporność od otoczenia, czyli następuje zagęszczenie linii prądowych; 3 – obiekt zaburzający rozkład linii prądowych ma wyższą oporność od otoczenia, czyli następuje zwiększenie odległości pomiędzy liniami prądowymi (T. Herbach)



Ryc. 5.8. Wybrane układy pomiarowe. 1 – układ dwuelektrodowy (twin-probe); 2 – układ Wennera; 3 – układ Schlumbergera; 4 – układ dipolowy (T. Herbach)



Ryc. 5.9. Schemat profilowania elektrooporowego. 0-3 – punkty pomiarowe; ρ_0 - ρ_3 – wartości oporności pozornej w poszczególnych punktach pomiarowych; I_p – linie prądowe; gp – warstwa objęta pomiarami (T. Herbach)

różnej kolejności elektrod w układzie i zróżnicowanej proporcji odległości między nimi.

Pomiary można wykonywać w trybie automatycznej akwizycji danych lub zatwierdzając je w trybie manualnym. Tryb manualny pozwala eliminować pomiary błędne, wydłuża jednakże procedurę pomiarową w stosunku do instrumentów z możliwością zatwierdzania automatycznego (np. instrumenty RM Geoscan Research). Praktyka wskazuje, że przy zatwierdzaniu automatycznym liczba pomiarów błędnych nie przekracza 1-2%. Możliwość eliminacji błędnych pomiarów zapewnia oprogramowanie

stosowane przy obróbce danych (np. Geoplot – poprzez zastosowanie algorytmu, który analizuje średnie wartości pomiarów na sąsiadujących ze sobą punktach).

2.4.3.2. Metodyka badań terenowych

Dla rejestracji obecności obiektów zalegających na niewielkiej głębokości najpowszechniej stosowany jest tzw. układ dwuelektrodowy (Ryc. 5.8.1, Ryc. 5.10.1). Na powszechność jego stosowania złożyły się dwa czynniki: podczas pomiarów przestawia się tylko dwie elektrody A i M,

podczas gdy B i N pozostają nieruchome. Pozwala to zredukować liczbę osób zaangażowanych w pomiary. W przypadku gdy rozstaw elektrod ruchomych AM wynosi nie więcej niż 1,5–2 m i zamocowane są one na stałe do ramy (do której przytwierdzony jest także instrument), pomiary może prowadzić jedna osoba. Drugim czynnikiem jest fakt, że pomiary te precyzyjnie rejestrują pozycję struktury wywołującej anomalne wartości oporności. Taki układ pozwala śledzić zmiany oporności w warstwie o głębokości równej 1 do 1,5 odstępu pomiędzy elektrodami ruchomymi. W przypadku konieczności obserwacji zmian w warstwach do większych głębokości (a co za tym idzie zwiększenia odstępu pomiędzy elektrodami prądowymi) można stosować układy niesymetryczne. Są to układy, gdy jedna z elektrod prądowych (B) jest w tzw. nieskończoności i jej pozycja nie zmienia się w trakcie przesuwania pozostałych elektrod (AMN). Taki układ zwiększa dwukrotnie zasięg obserwacji w stosunku do układu symetrycznego. Jego zaletą jest zmniejszenie liczebności ekipy zaangażowanej w prace oraz zwiększenie powierzchni obszaru badań (układ symetryczny wymaga dostępu do większej o połowę przestrzeni; jest to istotne w przypadku pomiarów na niewielkich obszarach, bez możliwości wykraczania poza ich granice). Zaleca się także stosowanie układów dipolowych czy średniego gradientu. Ich użycie pozwala na prospekcję także na większych głębokościach, przy niewielkich rozmiarach układu. Należy jednak pamiętać, że rozdzielczość, czyli możliwość wykrywania obiektów o niewielkich rozmiarach, spada wraz ze wzrostem głębokości. Profilowanie elektrooporowe można również prowadzić przy pomocy układów wielopoziomowych, w których jednej pozycji elektrod MN odpowiadają dwie (lub więcej) pary elektrod AB o różnych rozstawach. Stosowanie takiego układu pozwala na obserwację zmian w warstwach do głębokości określonych rozstawami elektrod AB. Gęstość próbkowania podczas profilowań elektrooporowych zależy od rozmiarów poszukiwanych struktur, co w praktyce badań archeologicznych wynosi zwykle jeden lub dwa pomiary na 1 m².



Ryc. 5.10. Pomiary oporności pozornej gruntu metodą profilowań. 1 – pomiar układem dwuelektrodowym o rozstawie elektrod ruchomych AM równym 0,5 m. 2 – pomiar układem Wennera. Rozstaw elektrod prądowych AB równy 1,5 m, rozstaw elektrod potencjałowych MN równy 0,5 m. 3 – pomiary w systemie ciągłym, wielopoziomowe, z użyciem elektrod kołowych (T. Herbach, M. Dabas)

W profilowaniach elektrooporowych zastosowanie znalazły także układy mobilne, montowane za pojazdem przesuającym układ pomiarowy. Stosowane są wówczas elektrody kołowe, a odpowiednia konfiguracja elektrod umożliwia obserwacje wielopoziomowe (Ryc. 5.10.3).

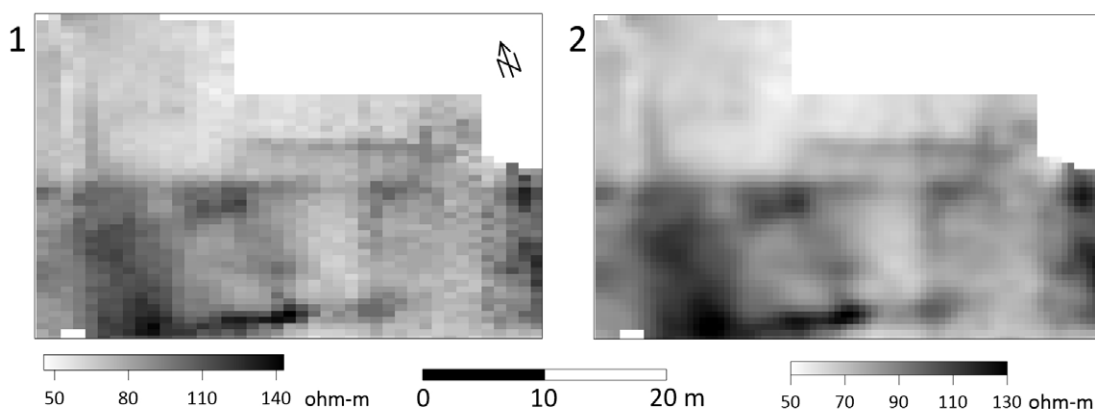
W przypadku pomiarów oporności, szczególnie gdy prospekcja dotyczy warstw przypowierzchniowych (nieprzekraczających 1 m), istotny jest wybór pory roku do prowadzenia badań. Właściwa dla danej pory roku wilgotność gruntu w warstwach przypowierzchniowych, powstała w wyniku opadów, roztopów lub suszy, powoduje zmiany w relacji pomiędzy opornością struktur archeologicznych a opornością ich otoczenia. Zjawisko to powoduje, że struktury o opornościach kontrastowych w stosunku do otoczenia przy danej wilgotności podłoża w innych warunkach nie wyróżniają się na tle otoczenia.

2.4.3.3. Opracowanie i prezentacja wyniku

Do opracowania wyników prospekcji, jeśli pochodzą one z poligonów o wymiarach nieprzekraczających kwadratów o boku 40 m, zastosować można wspomniane powyżej oprogramowanie, np. Geoplot lub Terrasurveyor. Ze względu na znacznie mniejszą liczbę pomiarów niż w przypadku badań magnetycznych i w sytuacji, gdy obszar badań znacznie wykracza

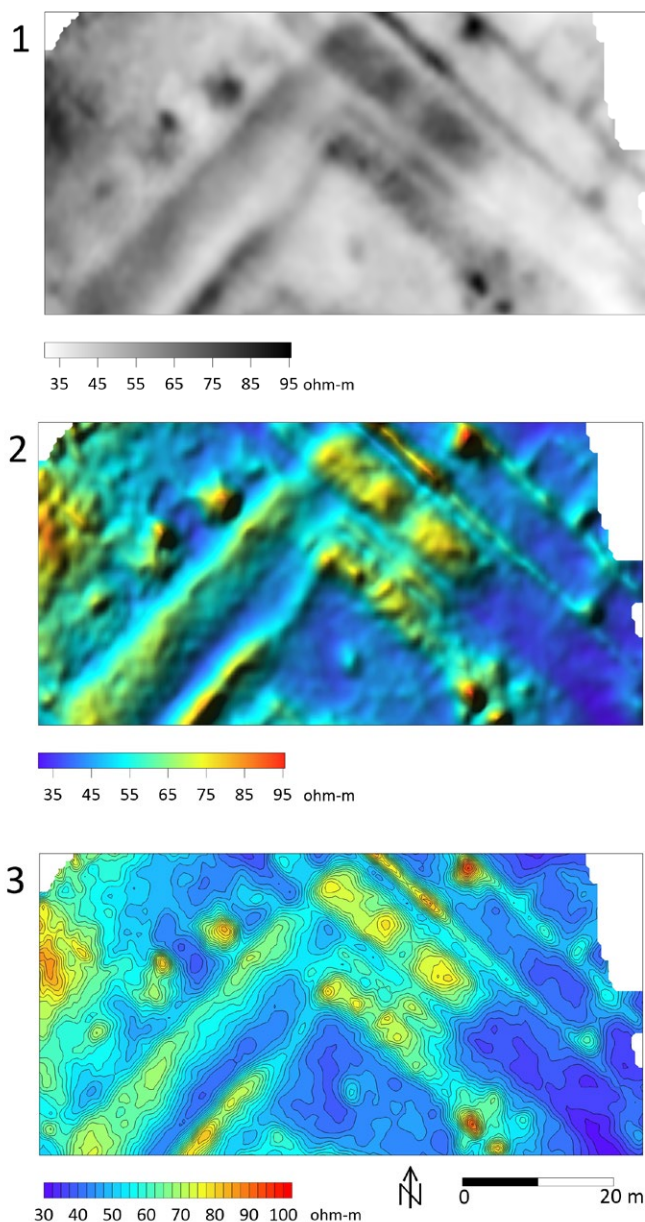
poza poligon o boku 40 m, można wyniki pogrupować w zbiory odpowiadające wymiarom poligonów akceptowanym przez oprogramowanie (np. przy zastosowaniu arkuszy kalkulacyjnych). Podczas obróbki danych stosowane są te same filtry, jakie wykorzystuje się w przypadku obróbki danych z pomiarów magnetycznych. Dane z profilowań elektrooporowych interpoluje się do gęstszej siatki (zwykle o boku 0,5 m) oraz poddaje działaniu filtra low pass, którego celem jest uśrednienie pomiarów w założonym obszarze (obejmującym np. 9 punktów pomiarowych). Taka procedura pozwala na uplastycznienie obrazowań i uwypuklenie granic wydzielanych struktur (Ryc. 5.11). Procedurę tę usprawiedliwia większa niż w przypadku badań magnetycznych różnica pomiędzy wartościami mierzonymi w sąsiadujących ze sobą punktach. Różnice powodowane są tu przez zmiany w rozkładzie pola elektrycznego (zatem w wartościach potencjału mierzonych przez elektrody MN) przy każdej zmianie pozycji elektrod (odstępu między nimi czy głębokości wbicia w ziemię).

Wyniki pomiarów prezentowane są w formie graficznej jako mapy zmian rozkładu oporności pozornej gruntu (potocznie: mapy oporności) lub jako modele 3D, opracowywane analogicznie do map magnetycznych. W przypadku map oporności częściej niż w przypadku prezentacji wyników badań magnetycznych używa się skali barwnej i map reliefowych. Stosuje się ponadto

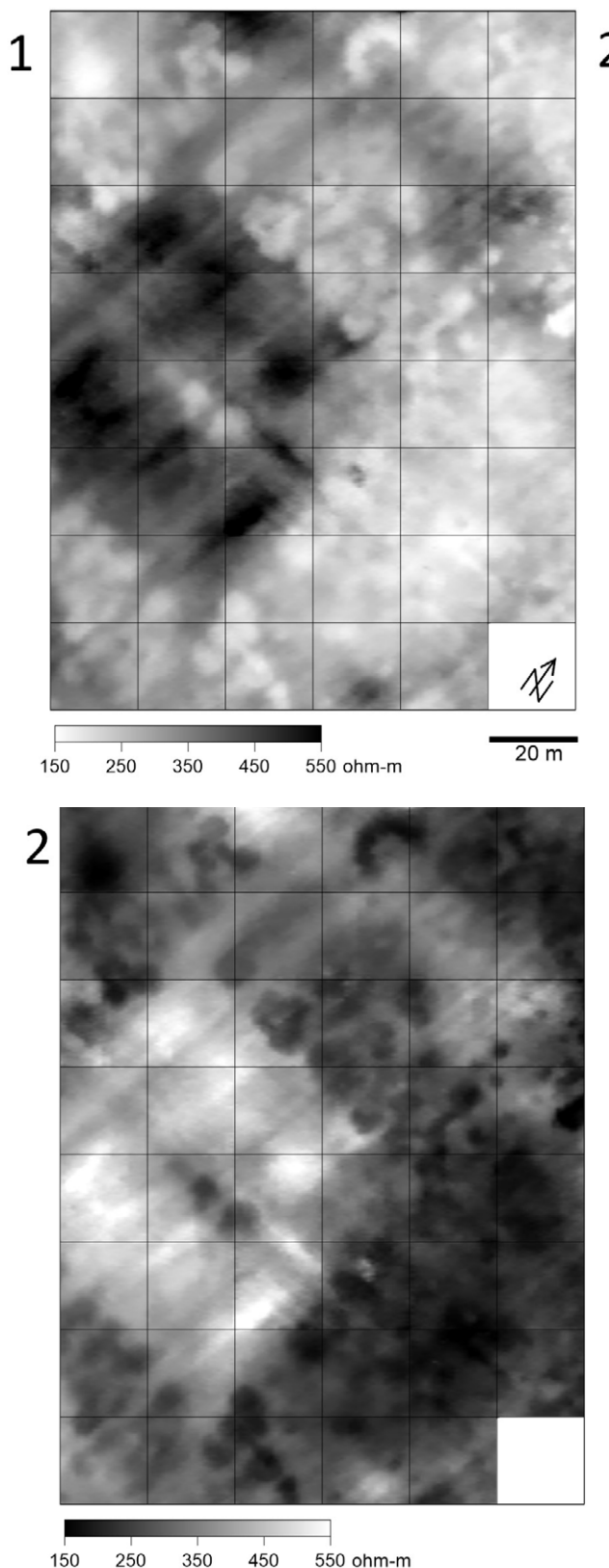


Ryc. 5.11. Mapa rozkładu oporności pozornej gruntu na obszarze niezachowanego, południowego skrzydła klasztoru św. Jakuba w Sandomierzu. Pomiary co 0,5 m wzdłuż linii co 1 m (po liniach o kierunku północ-południe). 1 – dane przed obróbką; 2 – dane interpolowane do siatki 0,5 x 0,5 m i poddane filtrowi low pass (T. Herbich)

obrazowanie z wykorzystaniem izolinii przy jednoczesnym zastosowaniu skali barwnej (Ryc. 5.12). Odmienność prezentacji wynika z faktu, że zróżnicowanie wartości oporności jest zwykle mniejsze niż w przypadku badań magnetycznych i zastosowanie skali barwnej, cieniowanego reliefu, modeli 3D czy mapy czarno-białej w skali negatywowej (Ryc. 5.13) może uczynić obraz wydzielonych struktur bardziej czytelnym.



Ryc. 5.12. Mapa rozkładu oporności pozornej gruntu obrazująca północny narożnik późnośredniowiecznego założenia obronnego w Żelechowie. 1 – białoczarna mapa pozytywna; 2 – barwna, cieniowana mapa reliefowa. 3 – barwna mapa i zoom (linii zakreślające obszary o wartościach oporności w ustalonych przedziałach wartości) (T. Herlich)



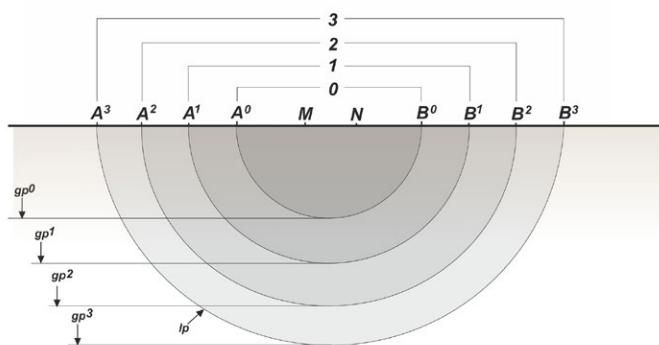
Ryc. 5.13. Mapa rozkładu oporności pozornej gruntu obrazująca fragment zabudowy wokół rynku pierwotnego założenia Szamotuł. 1 – mapa pozytywna; 2 – mapa negatywna. Przedstawienie anomalii odpowiadających budynkom i ich zapleczom gospodarczym w ciemnych odcieniach pozwala lepiej zrozumieć plan zabudowy (por. Ryc. 5.5) (T. Herlich)

2.4.4. Metoda elektrooporowa – sondowania i tomografia elektrooporowa

2.4.4.1. Metodyka pomiaru, przyrządy pomiarowe

Sondowania elektrooporowe oraz ich wersja w postaci tomografii elektrooporowej służą do wertykalnych obserwacji zmian oporności. Wykonując sondowane (vertical electrical sounding, VES), podczas kolejnych pomiarów zwiększany jest odstęp pomiędzy elektrodami prądowymi A i B, co skutkuje wzrostem jego zasięgu głębokościowego. Pozwala to na wydzielenie w podłożu warstw na podstawie ich oporności. Taka metoda jest wyjątkowo przydatna do wyodrębniania warstw antropogenicznych w obrębie powierzchniowych utworów geologicznych. Punkt sondowania stanowi miejsce przypadające na połowę odstępów między elektrodami potencjałowymi (Ryc. 5.14). Ze względu na dokładność pomiaru wymagane jest zachowanie proporcji

między rozstawem elektrod MN i AB. Powoduje to parokrotne zwiększanie odstępów między elektrodami MN w trakcie pomiarów. Wykonywanie szeregu sondowań wzdłuż linii (ciągu) pozwala na uzyskanie przekroju podłoża wzdłuż



Ryc. 5.14. Schemat sondowania elektrooporowego. 0–3 – numery pomiarów (pomiar 0 = pomiar elektrodami A⁰B⁰, pomiar 1 = pomiar elektrodami A¹B¹ itd., gp⁰ – warstwa objęta pomiarem 0, gp¹ – warstwa objęta pomiarem 1 itd., lp – linie prądowe (R. Mieszkowski)

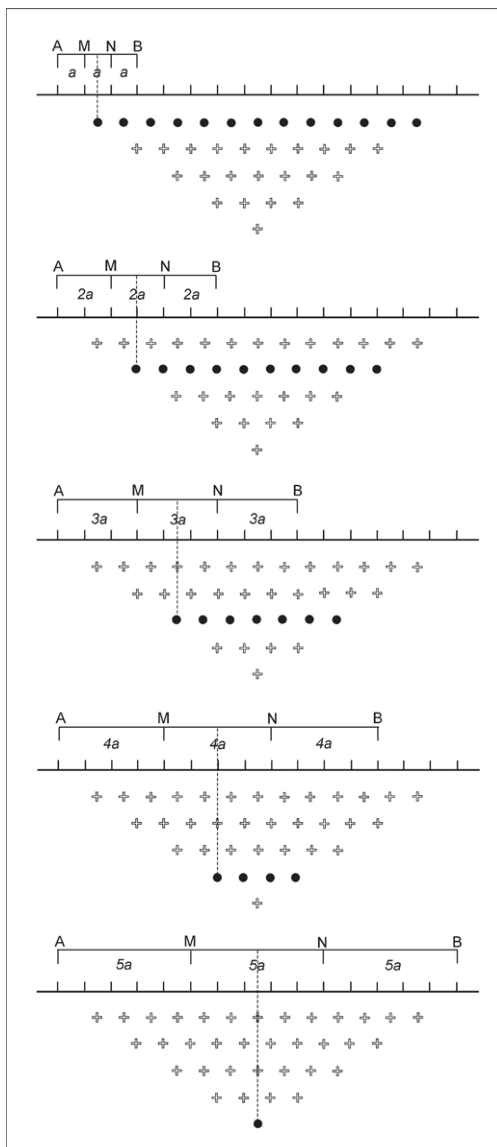


Ryc. 5.15. Pomiary aparaturą ABEM LS2 – metoda tomografii elektrooporowej ERT (W. Małkowski)

danego ciągu. Do wykonywania sondowań przystosowana jest ta sama aparatura, która służy do prowadzenia profilowań elektrooporowych. Sondowania wykonywane są zwykle z zastosowaniem symetrycznego układu Schlumbergera. Układy niesymetryczne (z jedną elektrodą prądową w nieskończoności) stosuje się wówczas, gdy przeszkody terenowe nie pozwalają na wystarczający – dla uzyskania oczekiwanej głębokości prospekcji – rozstaw elektrod w układzie symetrycznym.

Podczas wykonywania tomografii elektrooporowej (electrical resistivity tomography, ERT) aparatura podłączona jest do kilkudziesięciu czy nawet kilkuset elektrod umieszczonych w stałych odstępach (Ryc. 5.15). Proces pomiaru jest całkowicie zautomatyzowany. Program wybiera kolejne pary elektrod AB i MN, wykonując pomiary w warstwach do różnych głębokości. Głębokość pomiaru jest największa w środkowej części linii elektrod (Ryc. 5.16). Tomografia wymaga zastosowania specjalistycznej aparatury, zaprojektowanej specjalnie dla tego typu prospekcji.

Ryc. 5.16. Schemat pomiarów metodą tomografii elektrooporowej. Krzyżyki oznaczają głębokości wszystkich pomiarów, jakie są możliwe do wykonania przy danej liczbie elektrod; kropki oznaczają lokalizację wyników pomiarów układem o identycznej konfiguracji elektrod (według Gater, Gaffney 2003, Ryc. 12)

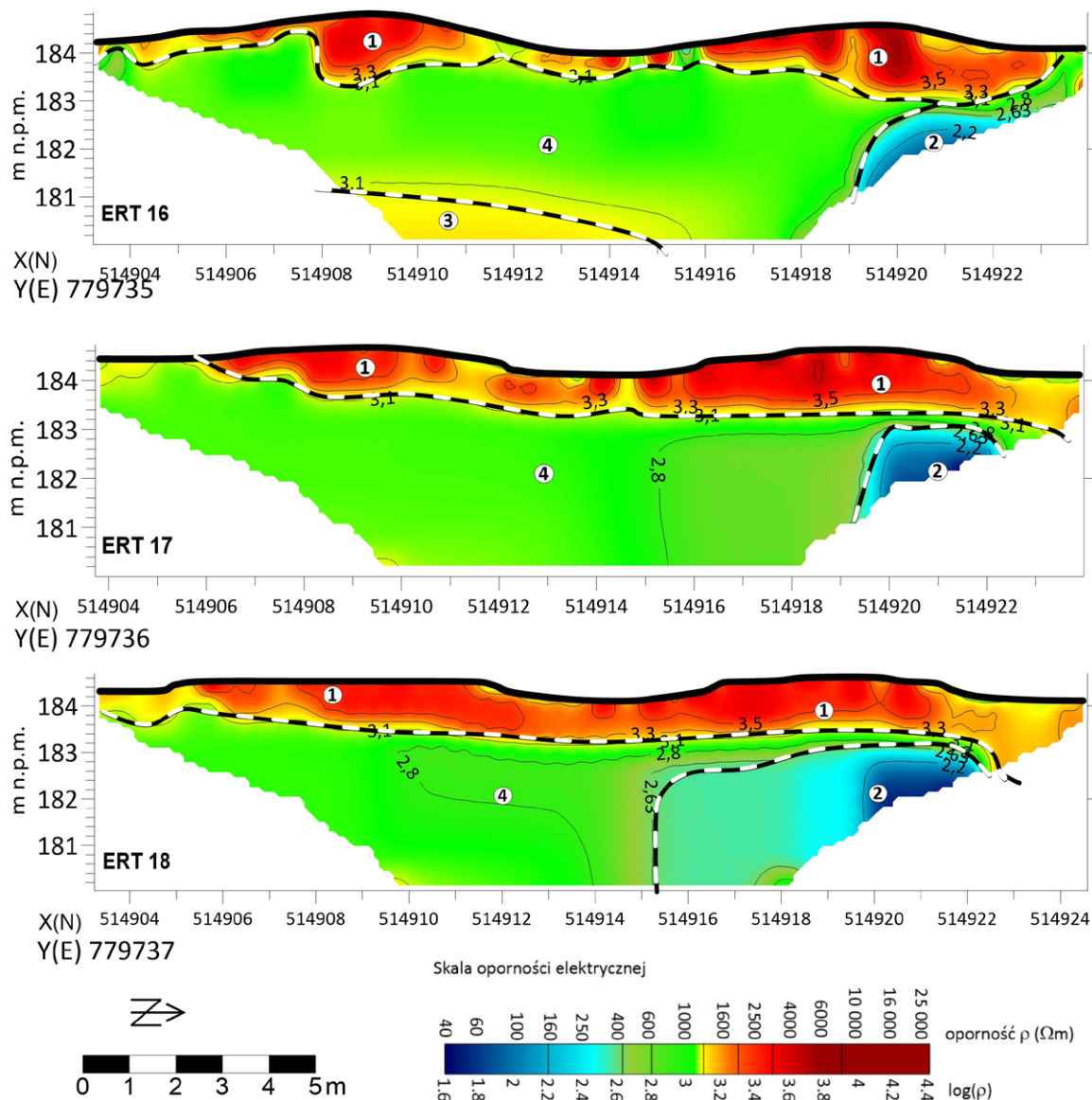


2.4.4.2. Opracowanie i prezentacja wyników

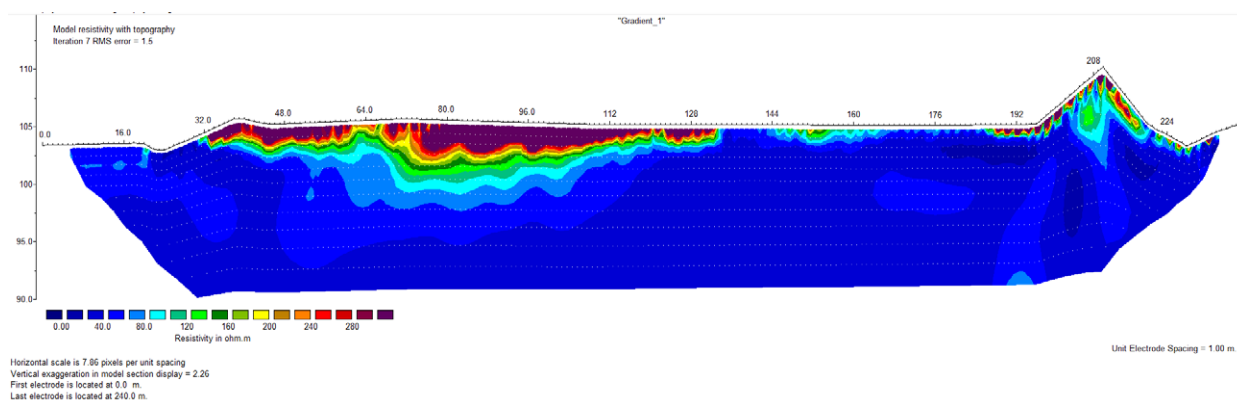
Wyniki sondowań geoelektrycznych pozwalają na określenie oporności właściwej i miąższości wydzielanych warstw. W tym celu używa się programów komputerowych do interpretacji rezultatów sondowań i modelowania układów warstw z zastosowaniem modeli blokowych. Efektem przetwarzania zbioru danych są przekroje rozkładu oporności elektrycznej (resistivity sections) oraz mapy (resistivity slices).

W metodzie VES wynikiem pomiarów terenowych jest wykres krzywej rozkładu oporności pozornej względem połowy rozstawu elektrod prądowych (AB/2), sporządzony oddzielnie dla

każdego sondowania. Oporność pozorna jest pewną wielkością wypadkową (uśrednioną) odnoszącą się do całej półprzestrzeni, przez którą przepływa prąd elektryczny. Zestawianie krzywych wykonanych na ciągu sondowań pozwala przygotować przekroje rozkładu oporności pozornej. Istotną cechą metody VES w przypadku wykonania jednego sondowania jest „jednowymiarowość” wyniku, tzn. określenie zmian wartości oporności elektrycznej ośrodka w danym punkcie jedynie w pionie. Metoda VES obejmuje istotne założenie o płasko-równoległym układzie warstw geologicznych. Założenie to w warunkach terenowych jest rzadko spełnione. Jeżeli z taką sytuacją mamy akurat do czynienia,



Ryc. 5.17. Przykładowy przekrój ERT na terenie z występującymi kurhanami (R. Mieszkowski)



Ryc. 5.18. Przykładowy przekrój ERT na terenie grodziska. Podwyższenie oporności spowodowane jest przetworzeniem składu warstw gruntu w wyniku działalności osadniczej (w obrębie grodziska oraz w miejscu umocnień obronnych) (R. Mieszkowski)

przetwarzanie i interpretacja krzywej VES może mieć charakter wieloznaczny. Efektem tego są ograniczenia interpretacyjne – zwłaszcza w przypadku, gdy podłoże jest niejednorodne, a dodatkowo zawiera artefakty czy też relikty obiektów historycznych. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że wiarygodna interpretacja rezultatów badań elektrooporowych wymaga również podstawowej wiedzy o budowie geologicznej badanego terenu (chodzi o układ warstw oraz ich litologię). Najefektywniej pomiary wykonuje się wzdłuż linii sondowań, a czasami wzdłuż kilku równoległych ciągów.

Cechą charakterystyczną interpretacji krzywych sondowań VES jest ich ekwiwalentność, tzn. możliwość interpretowania od kilku do kilkunastu modeli relacji miąższość – oporność warstw. Tę wieloznaczność można ograniczyć, jeżeli dysponuje się wiedzą o warunkach gruntowo-wodnych analizowanego terenu.

Standardowym oprogramowaniem do przetwarzania i interpretacji wyników VES jest IPI-2Win. W wyniku interpretacji poszczególnych sondowań na ciągu uzyskujemy możliwość wyliczenia oporu właściwego i miąższości wydzielonych warstw. Wspomniane oprogramowanie dopuszcza jednak całkowicie automatyczną interpretację danych, która może doprowadzić do rezultatów niezgodnych z rzeczywistą sytuacją w terenie. Uwzględniając takie zagrożenie, wprowadzona została możliwość naniesienia poprawek przez interpretatora zgodnych z wiedzą na temat układu stratyfikacyjnego podłoża, pozyskaną na drodze obserwacji bezpośrednich (wiercenia, odkrywki).

Metoda ERT umożliwia wizualizację rozkładów oporności elektrycznej podłoża w układzie 2D (Ryc. 5.17, Ryc. 5.18). Dysponując obrazem głębokości i miąższości warstw wzdłuż szeregu równoległych do siebie linii, możliwe jest też modelowanie układów warstw w postaci 3D. Przetwarzanie danych ERT opiera się na przygotowaniu modelu blokowego, w którym istnieje zmienność zarówno wertykalna, jak i horyzontalna.

Obecnie najczęściej stosowanym oprogramowaniem w Polsce do przetwarzania danych

z metody ERT są programy: Res2DInv, Res3DInv i ZondRes2D. Umożliwiają one uwzględnienie koordynat X, Y i Z rozwiniętych profili ERT, dzięki czemu możliwe jest opracowanie i zobrazowanie wyników rozkładu oporności w formie przekrojów odniesionych do topografii terenu, jak również map w konkretnych układach współrzędnych geograficznych czy geodezyjnych.

2.4.5. Metoda elektromagnetyczna z zastosowaniem georadaru (GPR)

2.4.5.1. Metodyka pomiaru, przyrządy

Badania geofizyczne z użyciem systemów georadarowych (ground penetration radar, GPR) opierają się na zjawisku odbicia fal elektromagnetycznych o wysokich częstotliwościach, emitowanych za pomocą anten nadawczych w głąb ośrodka geologicznego. Odbite fale odbierane są przez antenę odbiorczą i archiwizowane przy użyciu odpowiednio skonfigurowanych systemów rejestracji (Ryc. 5.19). Emisja i odbiór fal prowadzony jest impulsowo. System georadarowy prowadzi w określonym przedziale czasowym rejestrację fal odbitych od powierzchni i z wnętrza ośrodka.

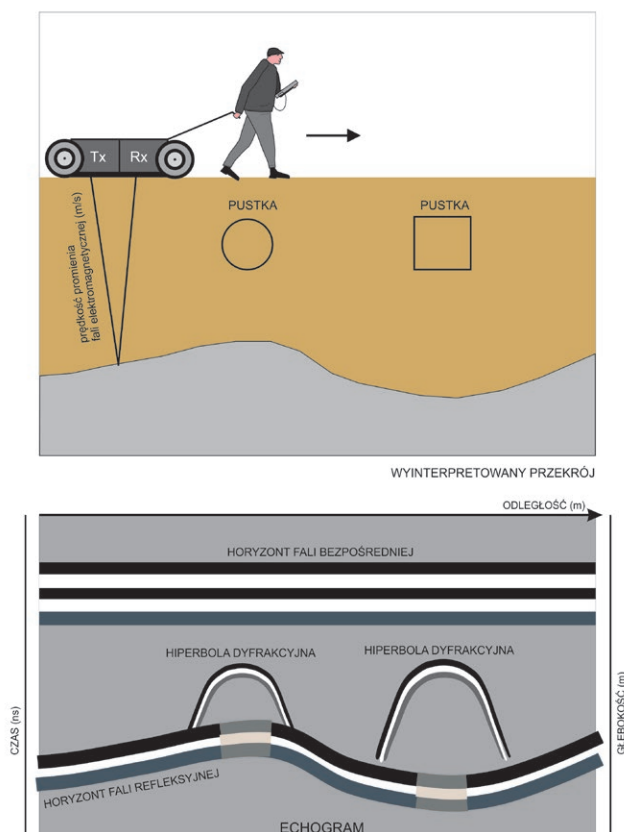
Tłumienie energii, zmiana fazy i częstotliwości oraz czas powrotu odbitej fali radarowej zależą od własności fizycznych ośrodka, z których główną rolę odgrywają:

- > **oporność elektryczna** (wpływa na głębokość prospekcji – im oporność podłoża wyższa, tym głębsza możliwość prospekcji, a im oporność elektryczna jest niższa, tym większe tłumienie fali i spadek zasięgu prospekcji georadarowej);
- > **stała dielektryczna** mająca wpływ na wyrazistość powstawania fal odbitych (im wyższy kontrast stałej dielektrycznej, tym wyraźniej rejestrowany jest horyzont refleksyjny, czyli granica warstw podłoża).

W praktyce przyjmuje się, że dobre warunki dla prospekcji georadarowej występują dla oporności ośrodka powyżej 100 Ωm (zestawienie przykładowych oporności podano w tabelach 2 i 3). Oznacza to, że pomiary georadarowe dają

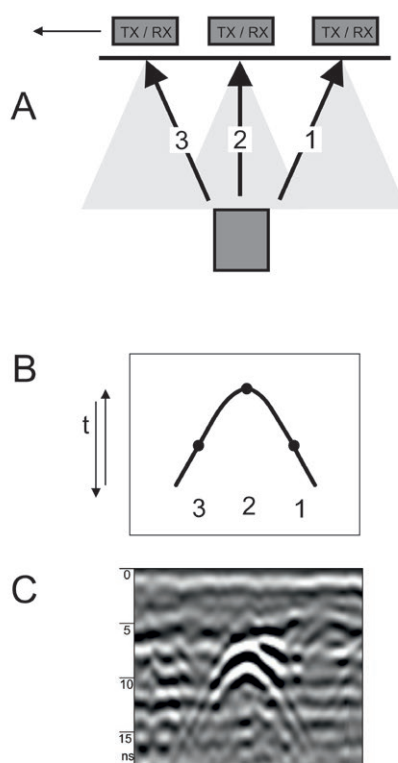
dobrze rezultaty na podłożu o wysokiej oporności, co dotyczy np. suchych piasków, żwirów czy skał. Natomiast badania georadarowe mają istotne ograniczenia głębokości i rozdzielczości na podłożu spoistym, takim jak gliny, ropy, pyły czy torfy. W metodzie georadarowej wyróżnia się trzy główne typy anomalii, rejestrowanych na echem (Ryc. 5.19, u dołu):

- > horyzont fal bezpośrednich, rejestrowana fala bezpośrednia powstaje przy kontakcie anteny z powierzchnią terenu;
- > horyzont refleksyjny, który powstaje w wyniku odbicia promienia fali elektromagnetycznej od granicy w gruncie oddzielającej warstwy o różnych stałych dielektrycznych;
- > hiperbola dyfrakcyjna, która powstaje w wyniku rozproszenia fal elektromagnetycznych na powierzchni niewielkich obiektów znajdujących się w gruncie (Ryc. 5.20).



Ryc. 5.19. Schemat wykonywania pomiaru z zastosowaniem georadaru (u góry) oraz przykład interpretacji echogramu z elementami typowych anomalii georadarowych; Tx – antena nadawcza, Rx – antena odbiorcza (R. Mieszkowski)

Skrócony schemat pomiarów georadarowych można opisać następująco: antena przesuwana po powierzchni terenu emituje sygnał fali elektromagnetycznej z anteny nadawczej (Tx) w głąb gruntu. Czoło fali po dotarciu do granicy rozdzielającej warstwy o różnych stałych dielektrycznych ulega odbiciu i jest następnie rejestrowane przez antenę odbiorczą (Rx) (Ryc. 5.19, u góry).



Ryc. 5.20. Schemat powstawania hiperboli dyfrakcyjnej (rejestracji odbicia fali elektromagnetycznej) podczas pomiarów georadarowych. A – strzałka pozioma wskazuje kierunek przesuwania anteny nadawczo-odbiorczej (tx/rx) wzdłuż linii pomiarowej (profilu). Antena emituje falę elektromagnetyczną do gruntu w wycinku przestrzeni, który można opisać jako stożek eliptyczny, definiujący obszar, gdzie wykonywany jest pomiar. Odbicie fali elektromagnetycznej od obiektu następuje nie tylko wówczas, gdy antena jest bezpośrednio nad nim, ale również w jego bezpośredniej okolicy. Strzałki 1-3 oznaczają czas pomiędzy emisją a powrotem fali odbitej, zróżnicowany ze względu na różną odległość pomiędzy anteną a obiektem odbijającym fale. B – sygnał zarejestrowany w danym punkcie na powierzchni gruntu zapisywany jest jako pojedynczy ślad. Powoduje to, że graficzny zapis czasu przebiegu fali przyjmuje kształt hiperboli (punkty 1-3 obrazują zmianę czasu przebiegu fali, zgodnie ze strzałkami 1-3 z rysunku A; t to czas przebiegu fali od emisji do rejestracji odbicia). C – obraz hiperboli na echogramie. Skala pionowa w nanosekundach. Możliwość ustalenia prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w gruncie pozwala na dokonanie konwersji czasowo-głębokościowej, czyli określenie głębokości poniżej powierzchni obiektu odbijającego falę (T. Herbach)

W badaniach georadarowych wyróżnia się pomiary jednokanałowe (2D – Ryc. 5.21) i wielokanałowe (3D – Ryc. 5.22). Różnica polega na zastosowaniu jednego lub kilku (np. dwóch, czterech, ośmiu, szesnastu) systemów anten nadawczo-odbiorczych. W efekcie prospekcji georadarowej, w zależności od liczby użytych anten, uzyskiwane są wyniki wzdłuż jednego profilu lub kilku równoległych w rozstawie, np. co 10 cm (w ramach systemów wielokanałowych). W przypadku pomiaru jednokanałowego odstęp między profilami wynosi zwykle 0,5–1 m.

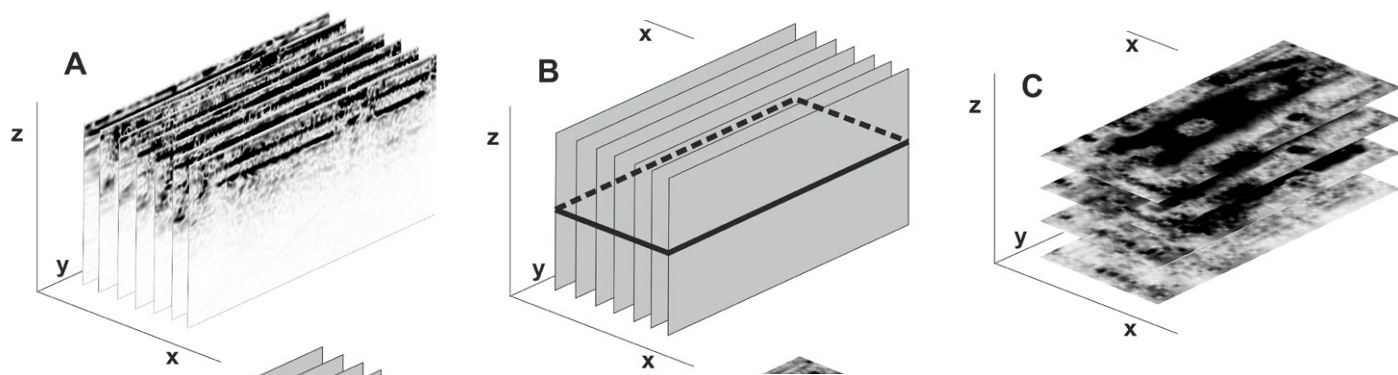
W trakcie pomiarów georadarowych istnieje możliwość podglądu wyników w czasie rzeczywistym.

Widoczne na podglądzie obrazy rozkładu/przebiegu fal elektromagnetycznych są wstępnym wynikiem prospekcji. Kolejny etap przetwarzania danych, wizualizacja i interpretacja następują po transmisji danych do komputera, przy zastosowaniu specjalistycznego oprogramowania. Dokładność zobrażeń wykrytych struktur zależy od gęstości próbkowania – odległości pomiędzy profilami. Wizualizacja wyników może być przedstawiona w formie przekrojów zmienności dotyczących amplitud fal elektromagnetycznych (echogramów) bądź w postaci cięć poziomych (time-slices) (Ryc. 5.23, Ryc. 5.24, Ryc. 5.25).

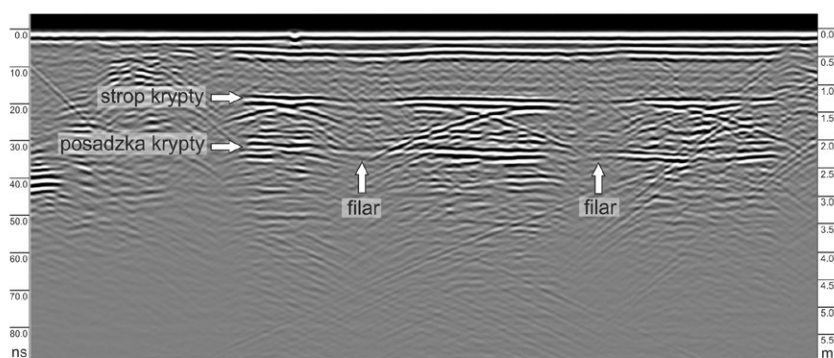


Ryc. 5.21. Pomiary georadarem – jednokanałowe. U góry: antena umieszczona na wózku. U dołu: antena umieszczona na płozie, do której przymocowany jest odometr (przyrząd pozycjonujący pomiar)

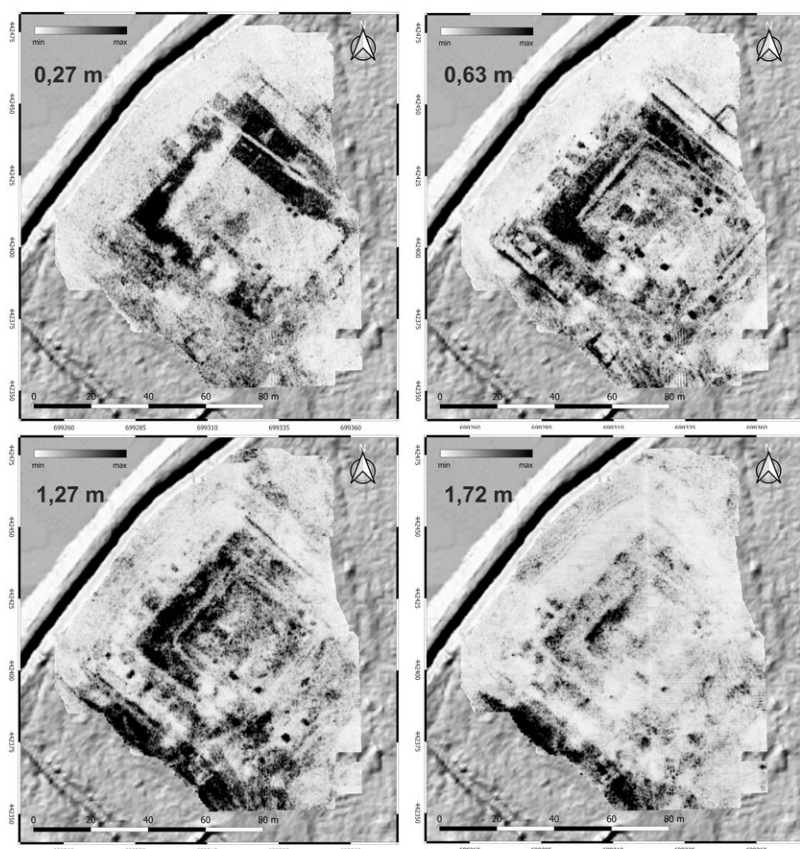
Ryc. 5.22. Pomiary georadarowe – system ośmiokanałowy. Pozycjonowanie pomiaru przy pomocy systemu GNSS (W. Małkowski)



Ryc. 5.23. Opracowanie wyników pomiaru georadarem. A – zestaw echogramów uzyskanych poprzez pomiary wzdłuż równoległych do siebie linii pomiarowych (osie x, y pozwalają lokalizować punkt na przebadanym obszarze; oś z określa głębokość obiektu odzwierciedlonego na echogramie; B – interpolacja danych z poszczególnych echogramów prowadzona jest horyzontalnie (w osiach x, y) dla danej głębokości (oznaczonej na osi z); C – zestaw cięć poziomych (time-slices), czyli horyzontalnych zobrazowań zmian w odbiciu fali elektromagnetycznej na wybranych głębokościach (T. Herlich)



Ryc. 5.24. Wizualizacja wyników badań georadarowych. Interpretacja echogramu z wnętrza kościoła w Nowym Kazanowie (T. Herlich)



Ryc. 5.25. Wizualizacja wyników badań georadarowych. Cięcia czasowe dla wybranych głębokości na terenie założenia obronnego w Żelechowie (T. Herlich, R. Ryndziejewicz, J. Majewski)

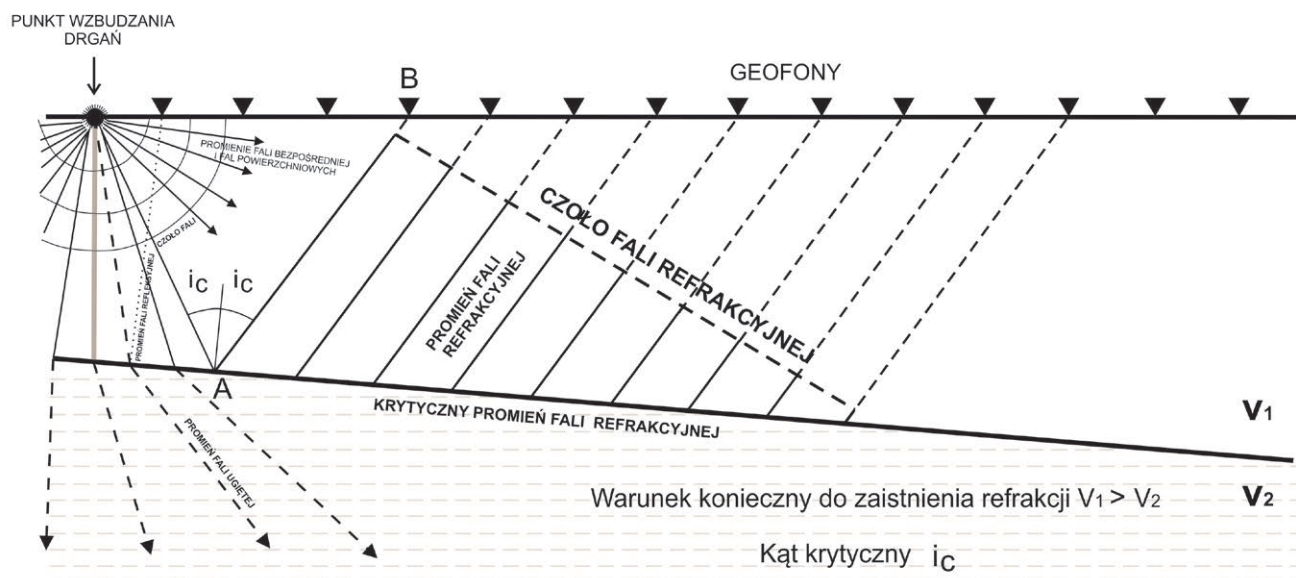
2.4.6. Inne metody

2.4.6.1. Metoda tomografii refrakcyjnej (SRT) – badania sejsmiczne

Idea metody sejsmiki refrakcyjnej polega na założeniu, że fala sejsmiczna rozchodzi się sferycznie w gruncie od punktu wzbudzenia drgań, następnie dociera do granicy refrakcyjnej (np. granicy warstw czy struktur geologicznych), na niej ulega załamaniu i ślizga się po jej powierzchni, a następnie powraca na powierzchnię ziemi, gdzie jest rejestrowana przez czujniki – geofony (Ryc. 5.26). Przy użyciu aparatury do badań sejsmicznych rejestruje się czasy przejścia fali od momentu wzbudzenia do momentu powrotu w zasięg geofonu (Ryc. 5.27).



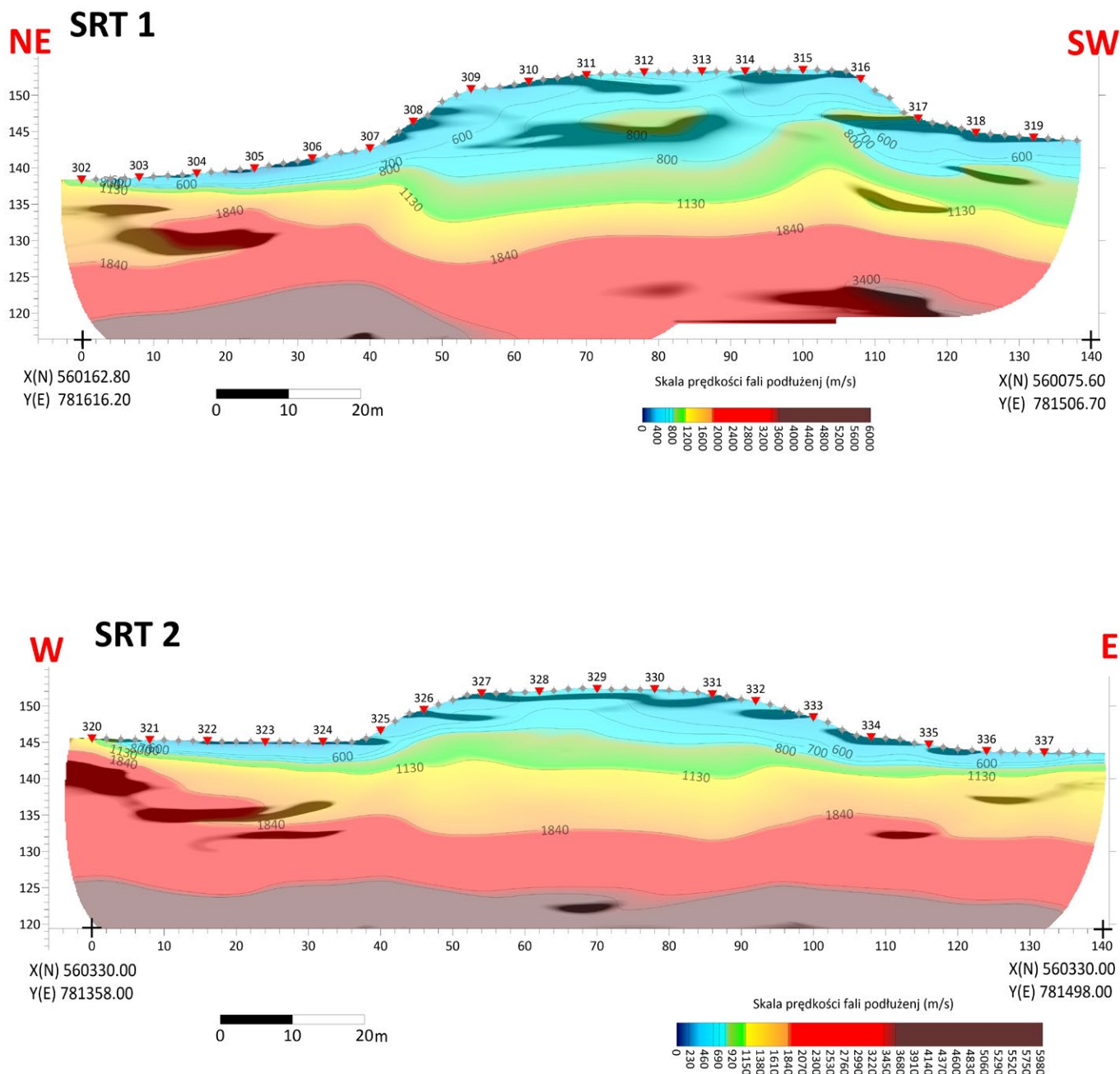
Ryc. 5.26. Badania metodą tomografii refrakcyjnej SRT (M. Bogacki)



Ryc. 5.27. Schemat ideowy rozchodzenia się promieni fal sejsmicznych w podłożu. V_1 , V_2 – prędkości fal sejsmicznych, odpowiednio w warstwie 1 i warstwie 2 (R. Mieszkowski)

Zróznicowanie rozchodzenia się prędkości fal sejsmicznych w podłożu wynika z różnicy jego sprężystości i gęstości. SRT jest metodą rzadko stosowaną dla potrzeb rozpoznania archeologicznego z uwagi na jej czasochłonność i dużą trudność opracowania wyników pomiarów terenowych,

a także z powodu stosunkowo niewielkiej rozdzielczości w porównaniu do innych metod geofizycznych stosowanych w archeologii (około 1–2 m w poziomie). Metoda ta może być stosowana uzupełniająco, np. gdy inne metody nie dają informacji istotnych dla archeologa.



Ryc. 5.28. Profil tomografii refrakcyjnej SRT

Wynikiem pomiarów sejsmicznych są przekroje i mapy rozkładu prędkości fal sejsmicznych (Ryc. 5.28). Przykładowy obraz podziemnych relików murów będzie się zaznaczać w metodzie SRT jako anomalia podwyższonych prędkości fal sejsmicznych, a kawerna w podłożu – jako

anomalia obniżonych prędkości. Omawiana metoda wykazuje przydatność podczas analizy budowy geologicznej badanego terenu i określeniu pustych przestrzeni pod powierzchnią – zarówno tych pochodzenia naturalnego (np. kawerny), jak i antropogenicznych (np. pomieszczenia).

2.4.6.2. Badania z zastosowaniem urządzeń EM (electromagnetic conductivity)

Badania z zastosowaniem urządzeń EM, podobnie jak badania z zastosowaniem georadaru, polegają na obserwacji rozchodzenia się fali elektromagnetycznej. Urządzenia te umożliwiają jednocześnie badanie własności magnetycznych (podatności magnetycznej) i elektrycznych (przewodności elektrycznej) ośrodków, przez które przechodzi fala elektromagnetyczna. Metoda ta stosowana jest w archeologii rzadko ze względu na niższą precyzję obrazu struktur w obrębie gruntu niż przy zastosowaniu metody magnetycznej i metody profilowań elektrooporowych. Technika pomiaru jest podobna do pomiarów metodą magnetyczną czy radarową: w zależności od modelu instrument przenosi się w ręku lub przesuwają na płozie. Ta metoda przydaje się do obserwacji w skali makro, czyli przy rzadszej siatce profili pozwala na szybkie wydzielenie zmian w gruncie związanych np. z produkcją ceramiczną lub metalurgiczną czy też zmian w płytkiej budowie geologicznej przydatnych do identyfikacji struktur litologicznych. Omawiana metoda okazuje się skuteczna w miejscach, gdzie spodziewane jest zróżnicowanie podłoża pod względem przewodności elektrycznej, ale warunki nie pozwalają na pomiary oporności przy użyciu elektrod wprowadzanych w grunt (np. pomiary pod posadzką kościoła). Opracowanie i prezentacja wyników ma analogiczny charakter jak w przypadku metody magnetycznej czy elektrooporowej, a więc przyjmuje postać map rozkładu zmian dotyczących właściwości elektrycznych i magnetycznych badanego obszaru.

2.4.6.3. Badania podatności magnetycznej gruntu

Ta metoda polega na obserwacji zmian właściwości magnetycznych gruntu przy użyciu kappametrów. Pomiary prowadzone są w skali makro, czyli np. jeden pomiar w kwadracie o boku 10 m, lub też mikro – do precyzyjnego określenia

zasięgu niewielkich struktur, np. w obrębie dna wykopu. Możliwość pomiaru podatności magnetycznej, dzięki określeniu różnicy pomiędzy właściwościami magnetycznymi obiektów archeologicznych a ich otoczeniem, pozwala określić potencjał metody magnetycznej w badaniu stanowiska przy użyciu magnetometrów. Zasięg pomiarów jest tu niewielki – zazwyczaj do 30 cm od powierzchni. Pomiary w skali makro pozwalają na szybką identyfikację obszarów, których warstwa powierzchniowa charakteryzuje się anomalnymi właściwościami magnetycznymi. Pomiary prowadzi się poprzez przykładanie instrumentu do powierzchni gruntu. Wyniki przedstawiane są w postaci map rozkładu zmian dotyczących podatności magnetycznej, mierzonych w jednostkach SI.

2.4.6.4. Metoda grawimetryczna – badania mikrogravimetryczne

Metodę grawimetryczną stosuje się do lokalizacji pustych przestrzeni pochodzenia antropogenicznego. Pomiary prowadzi się przy użyciu grawimetrów. Mierzonym parametrem jest siła przyciągania ziemskiego, zmieniająca się w zależności od masy. Istnienie pustki, czyli ubytek masy, powoduje obniżenie mierzonej siły ciężkości w stosunku do otoczenia. Na podstawie amplitudy i rozmiarów anomalii można wnioskować o wielkości i kształcie pustki. Na mapach grawimetrycznych podczas rejestracji pustek widoczne są wyraźne anomalie o regularnym kształcie. Metoda grawimetryczna nie jest podatna na zakłócenia elektromagnetyczne, natomiast wykazuje bardzo dużą czułość wobec drgań dynamicznych (ruch pojazdów, praca maszyn itd.). Punkty pomiarowe muszą być szczegółowo lokalizowane geodezyjnie ze względu na wprowadzanie poprawek XYZ podczas przetwarzania wyników pomiaru.

2.4.7. Podsumowanie

Powyższe omówienie poszczególnych metod geofizycznych stosowanych w archeologii pozwala względnie kompetentnie oceniać ich

Tabela 4. Zestawienie rodzajów reliktyw w odniesieniu do stosowanych metod geofizycznych (oprac. T. Herbich, W. Małkowski, R. Mieszkowski, K. Misiewicz)

Rodzaj reliktyw	Prospekcja magnetyczna	Profilowania elektrooporowe	Badania georadarowe	Tomografia elektrooporowa	Badania mikrosejsmiczne
osada	5	4	2	3	1
duże jamy > 2 m średnicy	5	4	2	2	1
małe jamy < 1 m średnicy	5	3	2	1	0
doły po słupach	4	1	2	0	0
paleniska	5	1	2	1	0
piece/dymarki	5	3	4	1	1
długie rowy/fosy	5	5	3	3	2
grodzisko spalone	5	4	4	4	2
grodzisko niespalone	4	4	4	4	2
fundamenty kamienne/cegłane	3	5	5	5	4
pustki	0	5	5	5	5
bruk kamienny	2	5	5	5	4
wykopy archeologiczne	4	3	3	2	1
drogi/ścieżki	5	5	5	3	1
miedze	5	4	4	4	1
groby szkieletowe	1	1	2	1	1
groby ciałopalne	4	1	2	1	1
groby skrzynkowe/ w obstawach kamiennych	2	4	5	2	1
kurhany – nasypy ziemne	3	4	2	4	2
kurhany z konstrukcjami kamiennymi/płaszczem kamiennym	3	5	4	4	2
pola bitewne	5	3	4	3	1

Skala użyteczności zastosowania konkretnej metody w przypadku określonego rodzaju stanowiska/obiektu archeologicznego:

- 5 – metoda bardzo polecana;
- 4 – metoda polecana;
- 3 – metoda do rozważenia jako uzupełniająca;
- 2 – metoda raczej niepolecana;
- 1 – metoda niepolecana;
- 0 – metoda zdecydowanie niepolecana.

przydatność w rozpoznawaniu specyficznych kategorii reliktyw. Przedstawiona **tabela 4** opracowana została na podstawie analogicznych zestawień publikowanych w literaturze polskiej i brytyjskiej (Misiewicz 2006; David et al. 2008) oraz własnego doświadczenia autorów.

Analizując tę tabelę, warto pamiętać, że zastosowanie jednej metody może dać satysfakcjonujący wynik w przypadku pytań o charakterze ogólnym, przede wszystkim związanych z lokalizacją obiektów. Na przykład metoda magnetyczna sprawdza się w badaniu reliktyw osadnictwa w postaci jam, konstrukcji drewnianych (najlepiej spalonych), przepalonych warstw polepy, pieców i palenisk. Taka informacja pozwala określić intensywność i charakter zasiedlenia oraz użytkowania terenu czy też określić zasięg zasiedlonego obszaru. Jeśli jednak celem badań jest lokalizacja, w obrębie której spodziewane są relikty architektury drewnianej i kamiennej, wówczas – jeśli dążymy do zobrazowania całości zabudowy w sposób analogiczny do wspomnianego powyżej – metoda magnetyczna musi zostać uzupełniona o metodę elektrooporową czy radarową. Gdy postawimy kolejne, bardziej szczegółowe pytanie, np. o głębokość zalegania reliktyw architektury murowanej, obecność podpiwniczeń czy obecność bruków pomiędzy budynkami, wskazane jest skorzystanie z tomografii elektrooporowej lub georadaru.

Mając na uwadze efektywność metod geofizycznych w rejestracji struktur archeologicznych, istotna jest też znajomość kontekstu litologiczno-glebowego. Wiedza w tym zakresie pozwala bowiem określić, czy zaistnieje niezbędny do wykrycia takich struktur kontrast pomiędzy wartościami badanej cechy fizycznej, typowej dla rozpatrywanych struktur archeologicznych, a wartościami charakterystyczną dla warstw sąsiednich. Aby badania były efektywne, musi bowiem istnieć rejestrowalny kontrast między wartościami badanej cechy fizycznej struktury archeologicznej a wartościami typową dla warstw sąsiednich, czyli lokalna anomalia. Na przykład zdecydowanie różnić się będzie wynik badań elektrooporowych mających na celu określenie

pozycji fundamentu kamiennego w glebie silnie zapiaszczonej (zarówno obiekt, jak i jego otoczenie będą się charakteryzować wysokimi wartościami oporności, co spowoduje trudność w lokalizacji fundamentu), a inny będzie efekt badań takiego fundamentu w glebie gliniastej o niższej oporności, gdy wynikiem pomiarów okaże się odpowiadająca fundamentowi wyrazista anomalia wysokooporowa widoczna w otoczeniu o wartościach niskooporowych. Rejestracja typowych pozostałości osadniczych, jakimi są jamy wypełnione w wyniku procesów podepozycyjnych warstwami powierzchniowymi, przyniesie inny skutek na glebach lessowych (jak np. w Słonowicach, patrz dalsza część poradnika), gdy istnieje silny kontrast między pobudliwością magnetyczną wypełniska jamy a jej lessowym otoczeniem, inny zaś wynik przyniesie śledzenie jam na glebach gliniastych i piaszczystych o słabo wykształconej warstwie próchnicznej. Brak bowiem kontrastu pomiędzy niską podatnością magnetyczną wypełniska jamy a niską podatnością otoczenia nie uwidoczni się w postaci zauważalnych zmian na mapie magnetycznej pozwalających określić pozycje jamy. Na etapie przygotowywania planu dotyczącego zastosowania metod geofizycznych ogólne informacje o kontekście litologiczno-glebowym można uzyskać z map glebowych, Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, map sozologicznych i odwiertów, a także wcześniejszych badań wykopaliskowych.

Z doborem metody, która ma odpowiedzieć na zadane przez nas pytania, wiąże się ściśle dobór metodyki pomiarów, przede wszystkim gęstości próbkowania rozumianej głównie jako odstęp między liniami profilowymi. Odstępy między liniami pomiarowymi mają bowiem zdecydowany wpływ na czas trwania pomiarów, przekładający się zwykle na ich koszt. O doborze gęstości próbkowania decydują wymiary poszukiwanych obiektów, a także oczekiwany stopień szczegółowości geofizycznego zobrazowania struktur.

Metody teledetekcyjne pozwalają na prowadzenie obserwacji w zakresie zmian widocznych

Tabela 5. Zastosowanie metod geofizycznych w kontekście wybranych struktur litologiczno–glebowych (oprac. T. Herbich, W. Małkowski, R. Mieszkowski, K. Misiewicz)

Rodzaj podłoża	Badania magnetyczne	Profilowania elektrooporowe	Badania georadarowe	Tomografia elektrooporowa	Badania mikrosejsmiczne
Podstawowa klasyfikacja					
grunty sypkie	ZALECANE	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być wysokie uziemienia elektrod)	ZALECANE	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być wysokie uziemienia elektrod)	ZALECANE
grunty spoiste	ZALECANE	ZALECANE	NIEZALETANE	ZALECANE	ZALECANE
teren zurbanizowany	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (zakłócenia ze strony infrastruktury i zabudowy)	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być zakłócenia pola el.)	ZALECANE	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być zakłócenia pola el.)	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być zakłócenia od drgań)
Szczegółowa klasyfikacja					
piaski suche	ZALECANE	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być wysokie uziemienia elektrod)	ZALECANE	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być wysokie uziemienia elektrod)	ZALECANE
piaski mokre	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE
gliny/iły	ZALECANE	ZALECANE	NIEZALETANE	ZALECANE	ZALECANE
grunty orne	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (geofon może być luźno wciśnięty w ziemię)
ściółka leśna	ZALECANE	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być wysokie uziemienia elektrod)	ZALECANE	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (mogą być wysokie uziemienia elektrod)	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (geofon może być luźno wciśnięty w ziemię)
Skąły	ZALECANE Z PEWNYMI OGRANICZENIAMİ (wysoka podatność magnetyczna, np. bazalt)	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE
akweny wód słodkich	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE	ZALECANE
akweny zasolone	ZALECANE	ZALECANE	NIEZALETANE	ZALECANE	ZALECANE

na powierzchni, uwarunkowanych składem czy właściwościami warstw (bądź obiektów) znajdujących się pod powierzchnią. Wartość metod geofizycznych polega na tym, że są one jedy-
nymi, które – mieszcząc się w kategorii metod nieinwazyjnych – pozwalają na bezpośred-
nie określenie parametrów fizycznych warstw i obiektów. Określenie tych parametrów pozwala poszerzyć wiedzę o strukturach niewidocznych na powierzchni, przynosząc informacje np. o głę-
bokości ich zalegania, miąższości czy rodzajach materiałów tworzących struktury. Pozwala tak-
że wnioskować o stanie ich zachowania i procesach podepozycyjnych.

Bibliografia

- Aspinall A., Gaffney C., Schmidt A. 2008. *Magnetometry for archaeologists*. Lanham: Altamira Press.
- Benech C. (red.) 2021. 14th International Conference on Archaeological Prospection. *Archeosciences. Revue d'Archéométrie* 45 (1).
- Benech C., Fabre D., Schmitt A., Tabbagh A. (red.) 2009. Mémoire du sol, espace des hommes. *Archeosciences. Revue d'Archéométrie* 33 (suppl.).
- Bonsall J. (red.) 2019. *New global perspectives on archaeological prospection. 13th International Conference on Archaeological Prospection*. Oxford: Archaeopress.
- Campana S., Piro S. (red.) 2009. *Seeing the unseen. Geophysics and landscape archaeology*. Leiden: CRC Press/Balkema.
- Conyers L.B. 2004. *Ground-penetrating radar for archaeology*. Lanham: Altamira Press.
- Conyers L.B. 2012. *Interpreting ground-penetrating radar for archaeology*. Walnut Creek: Left Coast Press.
- Conyers L.B. 2015. Analysis and interpretation of GPR datasets for integrated archaeological mapping: Multiple GPR datasets for integrated archaeological mapping. *Journal of Near-surface Geophysics* 31 (1), 2241–2262.
- David A., Linford N., Linford P. 2008. *Geophysical survey in Archaeological Field Evaluation*. Swindon: English Heritage.
- Doneus M., Eder-Hinterleitner A., Neubauer W. (red.) 2001. *Archaeological Prospection. 4th International conference on archaeological prospection*. Vienna: Austrian Academy of Sciences.
- Drahor M.G., Berge M.A. (red.) 2011. *Archaeological Prospection. 9th International Conference on Archaeological Prospection*. Istanbul: Archaeology and Art Publications.
- Fajkiewicz Z. 2007. *Grawimetria stosowana*. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- Fajkiewicz Z. (red.) 1972. *Zarys geofizyki stosowanej*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Fassbinder J. 2015. Seeing beneath the farmland, steppe and desert soil: magnetic prospecting and soil magnetism. *Journal of Archaeological Science* 56, 85–95.
- Fassbinder J., Irlinger W. (red.) 1999. *Archaeological Prospection. Third International Conference on Archaeological Prospection. Arbeitshefte des Bayerisches Landesamtes fuer Denkmalpflege* 108, 1999.
- Furmanek M., Herbich T., Mackiewicz M. (red.) 2016. *Metody geofizyczne w archeologii polskiej 2016*. Wrocław: Instytut Archeologii Uniwersytetu Wrocławskiego, Fundacja Nauki „Archaeologia Silesiae”.
- Gaffney C., Gater J. 2003. *Revealing the buried past. Geophysics for archaeologists*. Stroud: Tempus.
- Gurwicz I. 1958. *Badania sejsmiczne*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Herbich T. (red.) 2003. *Archaeological Prospection. 5th International conference on archaeological prospection. Archaeologia Polona* 41.

- Herbich T. 2014. Problematyka standaryzacji komercyjnych badań archeologiczno-geofizycznych: od pomiaru do interpretacji. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 50 (2), 19–43.
- Herbich T. 2015. Magnetic prospecting in archaeological research: a historical outline. *Archaeologia Polona* 53, 21–68.
- Herbich T., Zych I. (red.) 2015. Archaeological Prospection. 11th International Conference on Archaeological Prospection. *Archaeologia Polona* 53.
- Jol H.M. (red.) 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Application*. Amsterdam: Elsevier.
- Jennings B., Gaffney C., Sparrow T., Gaffney S. (red.) 2017. *12th International Conference of Archaeological Prospection*. Oxford: Archaeopress.
- Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M. 2011. *Zarys metody georadarowej*. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- Kuzma I. (red.) 2007. Archaeological prospection. 7th conference on Archaeological Prospection. *Studijne Zvesti Archeologického Ústavu Slovenskej Akadémie Vied* 41.
- Linford N. 2006. The application of geophysical methods to archaeological prospection. *Reports on Progress in Physics* 69, 2205–2257.
- Misiewicz K. 2006. *Geofizyka archeologiczna*. Warszawa: Instytut Archeologii i Etnologii PAN.
- Neubauer W., Trinks I., Salisbury R.B., Einwögerer C. (red) 2013. *Archaeological Prospection. Proceedings of the 10th International Conference on Archaeological Prospection*. Vienna: Austrian Academy of Sciences.
- Perisco R., Piro S., Linford N. (red.) 2019. *Innovation in near-surface geophysics. Instrumentation, application and data processing methods*. Amsterdam: Elsevier.
- Piro S. (red.) 2005. *6th Conference on Archaeological Prospection*. Rome: Institute of Technologies Applied to Cultural Heritage.
- Reynolds J. M. 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Oxford: Wiley–Blackwell.
- Schmidt A. 2013. *Earth resistance for archaeologists*. Lanha: Altamira Press.
- Schmidt A. et al. 2015. *EAC guidelines for use of geophysics in archaeology: questions to ask and points to consider*. Namur: Europae Archaeologia Concilium (EAC).
- Sikora J., Andrzejewski A. (red.) 2017. *Grodziska wczesnośredniowieczne Polski centralnej. Archeologiczne badania nieinwazyjne z lat 2013–2016*. Łódź: Stowarzyszenie Naukowe Archeologów Polskich, Instytut Archeologii Uniwersytetu Łódzkiego.
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wiewióra M., Herbich T. (red.) 2018. *Metody geofizyczne w archeologii polskiej. Spotkanie V. 21–23 listopada 2018 r.* Toruń: Instytut Archeologii UMK, Instytut Archeologii i Etnologii PAN, Instytut Archeologii UAM.



3.

Perspektywy i wyzwania związane z rozwojem aplikacji metod teledetekcyjnych w archeologii

Włodzimierz Rączkowski, Anna Zalewska, Katarzyna Osińska-Skotak

Ostatnie dekady przyniosły gwałtowny rozwój technologii teledetekcyjnych, a konwencja maltańska przyczyniła się do wzrostu zainteresowania archeologów ich aplikacjami w badaniu przeszłości i ochronie dziedzictwa archeologicznego. Czy można tu prognozować kierunki zmian? Jest to raczej trudne, lecz na dalszą obecność metod teledetekcyjnych w archeologii możemy spojrzeć przynajmniej z dwóch głównych perspektyw. Pierwszą z nich są zmiany w szeroko rozumianym wymiarze technologicznym, a drugą – namysł archeologów nad przydatnością i zakresami zastosowań tych technologii w wymiarze archeologicznym.

3.1. Perspektywa technologiczna

Istnieją zwłaszcza dwa obszary, w obrębie których zmiany technologiczne mogą mieć znaczenie dla archeologii. Są to rozwiązania pozwalające na podniesienie efektywności pozyskiwania danych i ich jakości (1) oraz procedury przetwarzania danych na potrzeby archeologów (2).

Pozyskiwanie danych (1), w tym urzędzenia, ich charakterystyka, sposoby operowania nimi w znaczącym stopniu poszerzają spektrum działań i z pewnością w niedalekiej przyszłości będą istotnie stymulować zakresy aplikacji metod

teledetekcyjnych. Na chwilę obecną, najważniejsze wydają się być działania, których celem jest zwiększanie liczby satelitów i konstelacji satelitów pozwalających na uzyskiwanie danych o wyższej rozdzielczości przestrzennej, czasowej i spektralnej (np. McGrath et al. 2020). Archeolodzy doceniają już możliwość korzystania z komercyjnych optycznych obrazowań satelitarnych o rozdzielczości przestrzennej 30–40 cm. Uzyskanie takich obrazowań w dużej częstotliwości czasowej (np. co 3, 4, 5 dni) jest z pewnością kwestią czasu. Już dziś konstelacja satelitów Sentinel daje taką częstotliwość (choć przy rozdzielczości przestrzennej 10 × 10 m). Kolejnym wymiarem jest rozdzielczość spektralna, która pozwala analizować specyficzne procesy zachodzące na powierzchni Ziemi (dotyczące pokrywy roślinnej, gleb, atmosfery, wszelkiego rodzaju zbiorników i cieków wodnych oraz rzeźby terenu i powierzchniowej budowy geologicznej). O ile satelity hiperspektralne oferują obecnie obrazowania w rozdzielczości 30 × 30 m, jej zwiększenie jest zapewne tylko kwestią czasu, choć nie należy się tu spodziewać osiągnięcia terenowego wymiaru piksela na poziomie obrazowań wysokorozdzielczych, czyli decymetrów. Już dziś natomiast można umieszczać sensory wielo-, super- czy hiperspektralne na platformach pozwalających wynieść je na lotnicze pułapy: niski,

średni i wysoki. Zatem otwierają się nowe możliwości pozyskiwania danych, w tym jednocześnie rejestracji z wielu sensorów.

Od pewnego czasu rozwijana jest także technologia SAR i znajduje ona coraz szersze zastosowanie w archeologii. Technologia ta zaliczana jest do metod aktywnych (por. 1.2.1) i polega na wysyłaniu wiązki promieniowania mikrofalowego w kierunku badanego obiektu (np. powierzchni Ziemi), a potem następuje odbiór sygnału powracającego. Mikrofałe po odbiciu od powierzchni zmieniają swoją fazę, amplitudę i polaryzację, a zmiany te zależą od właściwości powierzchni (m.in. jej geometrii, szorstkości, wilgotności, właściwości dielektrycznych). Na podstawie sygnału powracającego uzyskiwane są dane o jego amplitudzie, fazie i intensywności, które stanowią podstawę do dalszych przetworzeń i opracowania produktów udostępnianych użytkownikom. Mikrofałe mają szereg zalet: 1) nie są wrażliwe na warunki pogodowe, przenikają chmury, mogą być rejestrowane podczas opadów; 2) są niezależne od oświetlenia słonecznego, a więc można je rejestrować zarówno podczas dnia, jak i nocy; 3) są wrażliwe na inne cechy obiektu niż właściwości wykrywane metodami teledetekcji optycznej – chodzi o barwę, skład chemiczny i 4) przenikają w głąb powierzchni, a głębokość penetracji zależy z jednej strony od właściwości obiektu, z drugiej zaś – od długości emitowanej fali, czyli im dłuższa fala, tym głębsza penetracja. Wszystkie wymienione zalety spowodowały intensywny rozwój technologii radarowych, zwłaszcza w obszarze zarządzania kryzysowego, monitorowania klęsk żywiołowych, jak i dla celów militarnych. Jednak właściwości penetracji warstwy powierzchniowej przez mikrofałe stwarzają nowe możliwości również w archeologii. Obecnie największą rozdzielczość przestrzenną zobrażeń radarowych SAR oferuje system TerraSar-X (nawet 25 cm), lecz są to dane udostępniane na zasadach komercyjnych. Wśród danych dostępnych nieodpłatnie należy wymienić zobrażenia Sentinel-1, które mogą być pozyskiwane nawet co trzy dni, a terenowy wymiar piksela sięga 5 m, w wariancie Strip Map – SM (np. Chen et al. 2022; Zaina, Tapete 2022).

Również w zakresie lotniczego skanowania laserowego oraz metod geofizycznych pojawiają się i będą pojawiać nowe rozwiązania technologiczne. W przypadku lotniczego skanowania laserowego dotyczy to coraz częściej możliwości montowania skanerów na BSP i wykonywania skanowania z bardzo dużą szczegółowością (dużą gęstością wynikowej chmury punktów). Rozwijane są ponadto nowe technologie skanowania laserowego pozwalające na zwiększenie wydajności skanowania dzięki możliwości rejestracji bardzo gęstej chmury punktów z dużej wysokości przy większej prędkości lotu samolotu. Można tu wymienić skanery Geigera (Geiger Mode LIDAR – GmL) i skanery jednofotonowe (Single Photon Lidar – SPL), które mogą stać się technologiami przełomowymi na rynku fotolotniczym. Technologie te nadal są w fazie rozwoju. Kwestią dyskusyjną jest przydatność w archeologii super dużej liczby pomiarów, gdyż w konsekwencji może to utrudnić przetwarzanie i analizę danych. Inną opcją, jeszcze słabo rozpoznaną w archeologii, jest wykorzystanie skanerów laserowych, które umożliwiają rejestrację i analizę pełnego kształtu fali powracającej (FWF). Kolejnym intensywnie rozwijanym nurtem w obszarze technologii skanowania laserowego jest skanowanie wielospektralne, czyli jednocześnie pozyskiwanie danych laserowych w więcej niż jednym zakresie spektralnym. Dane tego rodzaju mogą być rejestrowane albo co najmniej dwoma skanerami pracującymi w różnych zakresach promieniowania, albo za pomocą specjalnego urządzenia skanującego w dwóch, trzech kanałach spektralnych (np. dwukanałowy skaner Riegl VQ-1560i-DW, trzykanałowy skaner Titan Optech). Obecnie w technice skanowania wielospektralnego wykorzystuje się fale o długości 532 nm (promieniowanie zielone) oraz 1064 nm (bliska podczerwień), ale możliwe jest również rejestrowanie zakresów fal o długości 1550 nm i 2050 nm.

Prowadzone są prace nad potencjałem skanowania z wykorzystaniem promieniowania zielonego do rejestracji obiektów pod wodą. Środowisko wodne generuje dużo więcej trudności

związanych z rozwiązaniami technicznymi i wypracowaniem odpowiednich algorytmów, ale rysuje się już perspektywa efektywnego skanowania den zbiorników wodnych i rejestracji reliktyw (Doneus et al. 2015; Raber, Kitajima, Geraghty 2022). Wykorzystanie zakresu promieniowania zielonego w batymetrii oznacza też otwarcie potencjału wielospektralnych zobrażeń satelitarnych na tym polu – satellite derived bathymetry (np. Mavraeidopoulos, Pallikaris, Oikonomou 2017; Poppenga et al. 2018).

Bardzo dynamicznie rozwijane są różne BSP. Zwiększany jest ich czas lotu, udźwig i znacznie prostiej się je obsługuje. Montowane są na nich różne aparaty fotograficzne oraz sensory (skanery wielo-, super- i hiperspektralne, kamery termalne, skanery laserowe), co znacznie poszerza możliwości pozyskiwania danych (oszczędza czas, koszty), w tym pozwala na prawie równoczesne rejestrowanie danych z różnych sensorów.

Drugi istotny wymiar kierunków zmian technologicznych dotyczy procesów przetwarzania i analizy pozyskanych danych. Informacje podlegają opracowaniu (są korygowane, filtrowane, przetwarzane itp.), by w konsekwencji mogły zostać zwizualizowane i zinterpretowane. Stosuje się tu rozmaite algorytmy, których celem jest wzmocnienie ważnych z perspektywy użytkownika cech lub osłabienie zakłóceń. Dotyczy to wszystkich danych pozyskiwanych za pomocą sensorów umieszczonych na satelitach, platformach lotniczych w obrębie różnych pułapów podczas lotniczego skanowania laserowego czy przy zastosowaniu metod geofizycznych (Kokalj, Somrak 2019). Z pewnością będą się pojawiać nowe algorytmy i nowe statystyczne metody analiz danych, w tym zautomatyzowane.

Dysponując bowiem ogromną ilością danych, w szczególności pozyskanych ze zobrażeń satelitarnych czy lotniczego skanowania laserowego, mierzymy się z problemem ich analizy i interpretacji. Realizowane są zatem coraz liczniejsze prace badawcze mające na celu automatyzację procesów przetwarzania danych teledetekcyjnych i identyfikacji obiektów archeologicznych za pomocą sztucznej inteligencji (np.

Bennett, Cowley, De Laet 2014; Maxwell, Warner, Fang 2018). Wykorzystanie uczenia maszynowego (machine learning, deep learning) czy sieci neuronowych przynosi obiecujące rezultaty i dostarcza zasobu informacji, które mogą zostać użyte zarówno w celach badawczych, jak i do zarządzania pozyskanymi danymi oraz dziedzictwem archeologicznym. Na obecnym etapie automatyczna detekcja sprawdza się podczas identyfikacji relatywnie prostych form (np. Davies, Sanger, Lipo 2019; Verschoof-van der Vaart, Lambers 2019). Coraz bardziej wyrafinowane rozwiązania pozwalają na rozpoznawanie bardziej skomplikowanych w formie pozostałości po dawnej działalności człowieka. Choć takie rozwiązania wciąż wymagają wkładu interpretatora dysponującego wiedzą archeologiczną w celu filtracji błędnie zidentyfikowanych form i uzupełnienia rezultatów o obiekty nierozpoznane przez sztuczną inteligencję, postępy w tej dziedzinie są bardzo dynamiczne i w niedługim czasie należy spodziewać się bardzo zaawansowanych opcji.

Automatyzacja detekcji obiektów archeologicznych nie może się rozwijać bez pokaźnych zbiorów uczących, a więc przykładów znanych obiektów, na podstawie których sztuczna inteligencja może podejmować decyzje i identyfikować analizowane relikty. Należy zwrócić uwagę, że archeologiczne zbiory uczące są bardziej ograniczone niż te dostępne w innych dziedzinach, co ma wpływ na jakość otrzymywanych rezultatów. Oznacza to potrzebę stworzenia zasobu takich danych „wzorcowych”, co w przypadku reliktyw będących pozostałościami po dawnej działalności człowieka i podlegających różnym procesom podepozycyjnym jest ogromnym wyzwaniem.

Współczesne dyskusje nad statusem poznawczym wyników automatycznej detekcji (Trier, Cowley, Waldeland 2018; Rączkowski 2020) prowadzą do drugiego wymiaru aplikacji technologii na gruncie archeologii, czyli perspektywy humanistycznej wynikającej z roli archeologów i różnych grup społecznych w procesie interpretacji i wykorzystywania ustaleń wynikających z aplikacji metod teledetekcyjnych.

3.2. Perspektywa humanistyczna

Celem w archeologii nie jest odkrycie samo w sobie, wyznaczenie „stanowiska archeologicznego” czy zebranie jak największej liczby zabytków, lecz zrozumienie sensu śladu oraz wniknięcie w istotę zjawiska. Zgodnie z koncepcją Martina Heideggera (1977) zasadne jest poznanie zarówno uwarunkowań epistemologicznych, jak i technologicznych, które nas do tego mogą prowadzić. W namyśle nad obecnością techniki we współczesnym świecie (też w nauce) Heidegger wskazywał, że technika jest zagrożeniem. Według niego nauka przestaje myśleć, koncentrując się na tym, co techniczne. Archeologia, aspirując do tego, by być nauką humanistyczną, wiele by zyskała, zwracając się ku źródłowemu myśleniu, które leży u podstaw każdego myślenia, także w humanistyce. W kontekście myśli Heideggera, nie mniej istotne niż poznawanie potencjału technologii, jest zwrócenie uwagi na potrzebę krytycznego namysłu w archeologii – zarówno w wymiarze ontologicznym, jak i epistemologicznym.

Archeologia jako nauka ma długą historię, a jeszcze dłuższą jako działalność antykwaryczna. W dziejach myśli archeologicznej zmieniały się inspiracje teoretyczne, podstawy metodologiczne, a w konsekwencji pytania badawcze i sposoby odpowiedzi na nie oraz formy prezentacji wiedzy archeologicznej. Zatem warunkiem niezbędnym do tego, by nowe technologie znalazły swoje miejsce w procedurach badawczych archeologii, jest ciągłe modyfikowanie i poszerzanie zakresu pytań badawczych i krytycznego namysłu nad danymi archeologicznymi oraz użytymi do ich pozyskania metodami (np. Huggett 2012; Rączkowski 2019).

Tymczasem wśród archeologów, ale też szerzej humanistów, widoczna jest narastająca fascynacja zaawansowanymi technologiami. Nie optyjemy za tym, by każdy archeolog starał się zrozumieć procesy technologiczne towarzyszące stosowaniu często bardzo złożonych technologii, np. teledetekcyjnych. W praktyce mamy bowiem do czynienia z całym szeregiem tzw. czarnych skrzynek (black boxes), czyli urządzeń, praktyk,

procedur, powiązań i organizacji, których zasady działania są nieprzejrzyste lub nie w pełni zrozumiałe dla osób z zewnątrz (Latour 1987; 1991). Dotyczą one procesów pozyskiwania, przetwarzania wizualizowania danych. Brak krytycznego namysłu oraz wiedzy pozwalającej na dostrzeżenie złożoności wciąż rozwijanych technologii, procedur etc. może prowadzić do pochopnych, nieuzasadnionych wniosków czy interpretacji, w tym tendencji do obiektywizacji uzyskiwanych wyników już na poziomie podstawowego wnioskowania.

Z perspektywy humanistycznej w archeologii obecne jest ryzyko, że w wyniku stosowania nowych technologii (w tym zaawansowanych metod teledetekcyjnych), utrwali się przekonanie o obiektywności danych uzyskiwanych za ich pośrednictwem. Tymczasem tak nie jest. Każdy wynik uzyskany w toku badań (również archeologicznych) jest warunkowy i doraźny, a fakty i maszyny w trakcie tworzenia są zawsze niezde-terminowane (Latour 1987: 13).

Dane zbierane w efekcie zastosowania metod teledetekcyjnych (ale także wszelkich metod archeologicznych) w archeologii są to jedynie takiego rodzaju dane, które znalazły się w zasobie referencyjnym, możliwym dla nas do zoperacjonalizowania tu i teraz. Odzwierciedlają one aktualny, niezmiennie doraźny stan wiedzy. Potwierdza to opinię Heideggera, że technologie (w tym sposoby ich aplikowania w procesie poznawczym) nie są neutralne kulturowo, ale też uwalniają na to, by tworzyć już teraz optymalne warunki do możliwie pełnego ich spożytkowania w przyszłości.

Brak wyjściowej, pogłębionej refleksji nad naturą danych, może skutkować ograniczeniami w realizacji celów wskazanych w Programie AZP+ odnoszących się do przyrostu wiedzy (cel 1) i nowoczesnego zarządzania danymi o dziedzictwie w oparciu o system informatyczny (cel 2). Kolejnym wyzwaniem, na które warto zwrócić uwagę w refleksji na temat rozwoju aplikacji metod teledetekcyjnych w archeologii jest potrzeba stawiania wciąż nowych pytań badawczych i poszerzenia kwestionariusza pytań.

Metody teledetekcyjne są bardzo pomocne w ich formułowaniu. Jeżeli poprzestaniemy na pytaniach: co, gdzie i kiedy, to aplikacje nowych możliwości technologicznych zostaną sprowadzone do podejścia antykwarycznego i kumulatywnego, a ich ogromny potencjał nie zostanie wykorzystany.

Na znaczący potencjał danych zbieranych z zastosowaniem metod nieinwazyjnych zwraca się obecnie uwagę m.in. w dyskusjach nad zastosowaniami sztucznej inteligencji w archeologii. Badania z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych dostarczają ogromnej ilości danych i zawartych w nich informacji. W praktyce często prowadzi to do działań archeologów, które ograniczają się do kumulowania, tj. poszerzania zasobu danych empirycznych, rozbudowywania katalogów znalezisk etc. Tymczasem dane te mogą być pełniej spożytkowane, np. poprzez ich wdrażanie do różnorodnych systemów sprzyjających metodom uczenia maszynowego, które mogą się w przyszłości okazać pomocne w różnych procesach analitycznych i interpretacyjnych oraz w uzyskiwaniu bardziej wnikliwych informacji o przeszłości I oraz precyzyjnych danych dotyczących przeszłości II (w tym wymagających lepszego poznania procesów podepozycyjnych).

Technologia (w tym sztuczna inteligencja) może też zostać zaangażowana – np. do sortowania i systematyzacji informacji z zastosowaniem algorytmów przygotowanych na realizację potrzeb archeologii. Analizując obrazy, system ten może nie tylko precyzować ukierunkowania poszukiwań archeologicznych, ale także sugerować obszary czy formy krajobrazowe, które mają podobne wzory lub struktury – jako potencjalne odniesienia interpretacyjne. Archeolodzy zaczęli również wdrażać sztuczną inteligencję do „rekonstrukcji” zniszczonych elementów rozpoznawanych struktur, określania ich ram czasowych, pochodzenia oraz poszukiwania analogii. Ostatnio badacze podejmują także próby wykorzystania języka programowania i sztucznej inteligencji do wizualnego modelowania różnorodnych obiektów historycznych, tworzenia wirtualnych

muzeów i aktualizowania oraz poszerzania informacji na temat miejsc znaczących dla kultury.

Wszystko to może mieć bardzo istotny wpływ na wzrost zrozumienia i szacunku dla dziedzictwa kulturowego w społeczeństwie, a tym samym na tworzenie warunków sprzyjających działaniom na rzecz ochrony dziedzictwa archeologicznego. Takie ukierunkowanie myślenia pozwala także na realizację kolejnych dwóch celów Programu AZP+, a mianowicie stałego podnoszenia kwalifikacji zarówno służb konserwatorskich, jak i badaczy (cel 3) oraz upowszechniania informacji o dziedzictwie archeologicznym i edukacji archeologicznej (cel 4).

W polskich warunkach polityka udostępniania danych i produktów w formie np. ortofotomap czy numerycznych modeli terenu jest już realizowana przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK). Każdy zainteresowany może obejrzeć wysokorozdzielcze optyczne zobrażenia satelitarne (np. na platformach Google Earth, Bing). W efekcie mnóstwo danych teledetekcyjnych jest powszechnie dostępnych i wiele osób i grup społecznych z takiego dostępu korzysta. Jest to istotny i na ogół pozytywny kierunek włączania społeczeństwa w zagadnienia poznawania przeszłości i ochrony dziedzictwa. To jednak również wyzwanie, z którym muszą się mierzyć zarówno archeolodzy, jak i służby konserwatorskie z uwagi na możliwość wykorzystywania danych o zabytkach (w tym o ich precyzyjnej lokalizacji) przez osoby podejmujące działania na szkodę substancji zabytkowej.

Zakładamy, że przedstawione w tym podręczniku ukierunkowania, metody oraz rozwiązania technologiczne związane z teledetekcją mogą sprzyjać zarówno poszerzaniu dostępności danych, jak i systematyzacji oraz konceptualizacji wiedzy archeologicznej. Jeśli towarzyszyć temu będzie przekonanie, że metody teledetekcyjne nie są jedynie wstępem do planowania badań wykopaliskowych lub sposobem na uzyskanie efektownej prezentacji reliktywów archeologicznych, to mogą one wnieść wiele korzyści również do polskiej archeologii.

Bibliografia

- Bennett R., Cowley D., De Laet V. 2014. The data explosion: Tackling the taboo of automatic feature recognition in airborne survey data. *Antiquity* 88, 896–905.
- Chen F., Guo H., Tapete D., Cigna F. 2022. The role of imaging radar in cultural heritage: From technologies to applications. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 112(3):102907. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102907>.
- Davies D.S., Sanger M.C., Lipo C.P. 2019. Automated mound detection using lidar and object-based image analysis in Beaufort County, South Carolina. *Southeastern Archaeology* 38, 23–37.
- Doneus M. et al. 2015 Airborne Laser Bathymetry for Documentation of Submerged Archaeological Sites in Shallow Water. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL-5/W5, 99–107; doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-99-2015.
- Heidegger M. 1977. *The Question Concerning Technology and Other Essays*. New York, NY, USA: Harper and Row.
- Huggett J. 2012. What lies beneath: Lifting the lid on archaeological computing. W: A. Crysanthi, P. Murieta Flores, C. Papadopoulos (red.), *Thinking beyond the Tool: Archaeological Computing and the Interpretive Process*. Oxford: Archaeopress, 204–214.
- Kokalj Ž., Somrak M. 2019. Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. *Remote Sensing* 11, 747. <https://doi.org/10.3390/rs11070747>.
- Lambers K. Verschoof-van der Vaart W.B., Bourgeois Q.P.J. 2019. Integrating Remote Sensing, Machine Learning, and Citizen Science in Dutch Archaeological Prospection. *Remote Sensing* 11, 794. <https://doi.org/10.3390/rs11070794>.
- Latour B. 1987. *Science in Action. How to Follow Scientists and Engineers Through Society*. Harvard: Harvard University Press.
- Latour B. 1991. Technology is society made durable. W: J. Law (red.), *A Sociology of Monsters Essays on Power, Technology and Domination*. London: Routledge, 103–131.
- Mavraeidopoulos A.K., Pallikaris A., Oikonomou E. 2017. Satellite derived bathymetry (SDB) and safety of navigation, *International Hydrographic Review* 17, 7–19.
- Maxwell A.E., Warner T.A., Fang F. 2018. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International Journal of Remote Sensing* 39, 2784–2817. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>.
- McGrath C.N., Scott C., Cowley D., Macdonald M. 2020. Towards a Satellite System for Archaeology? Simulation of an Optical Satellite Mission with Ideal Spatial and Temporal Resolution, Illustrated by a Case Study in Scotland, *Remote Sensing* 12, 4100; doi:10.3390/rs12244100.
- Poppenga S.K., Palaseanu-Lovejoy M., Gesch D.B., Danielson J.J., Tyler D.J. 2018. *Evaluating the potential for near-shore bathymetry on the Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, using Landsat 8 and WorldView-3*

imagery: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5024. Reston: U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20185024>.

Raber S., Kitajima A., Geraghty C. 2022. *Addressing Change in Coastal Environments with Advanced Topobathymetric Elevation Modelling*. <https://www.hydro-international.com/content/article/addressing-change-in-coastal-environments-with-advanced-topobathymetric-elevation-modelling>.

Rączkowski W. 2019. Fetyszyzacja: chwila namysłu nad technologiami i wizualizacjami w archeologii. W: A. Posern-Zieliński, J. Sawicka, J. Kabaciński, M. Kara, K. Zamelska-Monczak (red.), *Archeologia jako humanistyczna interpretacja przeszłości. Studia dedykowane Profesorowi Henrykowi Mamzerowi*. Poznań: IAI PAN, 221–237.

Rączkowski W. 2020. Power and/or Penury of Visualizations: Some Thoughts on Remote Sensing Data and Products in Archaeology. *Remote Sensing* 12, 2996. <https://doi.org/10.3390/rs12182996>.

Trier Ø.T., Cowley D.C., Waldeland A.U. 2018. Using deep neural networks on airborne laser scanning data: Results from a case study of semi-automatic mapping of archaeological topography on Arran, Scotland. *Archaeological Prospection* 26, 1–11.

Verschoof-van der Vaart W.B., Lambers K. 2019. Learning to Look at LiDAR: The Use of R-CNN in the Automated Detection of Archaeological Objects in LiDAR Data from the Netherlands. *Journal of Computer Applications in Archaeology* 2(1), 31–40. <https://doi.org/10.5334/jcaa.32>.

Zaina F., Tapete D. 2022. Satellite-Based Methodology for Purposes of Rescue Archaeology of Cultural Heritage Threatened by Dam Construction. *Remote Sensing* 14, 1009. <https://doi.org/10.3390/rs1404100>.