

MICHAŁ BRACH, PIOTR WĘŻYK, KAMIL ONOSZKO

# Ocena przydatności danych teledetekcyjnych w procesie wyznaczania elementów przestrzennych rębni gniazdowych

Assessment of remote sensing data in determining the spatial elements of patch cutting

## ABSTRACT



Brach M., Wężyk P., Onoszko K. 2021. Ocena przydatności danych teledetekcyjnych w procesie wyznaczania elementów przestrzennych rębni gniazdowych. Sylwan 165 (5): 379-391. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2021031>.

The areas that do not constitute forest stands known also as forest gaps are one of the most frequently updated geometric elements on the Digital Forest Map. Field inventory of forest gaps is not an easy task taking into account their irregular shape, size, and random location within the forest compartments. In this research four types of multi-source and multi-resolution remote sensing data were evaluated as a geometry source in the process of forest gaps inventory. The analyses were conducted on 23 forest gaps which were vectorized by 28 independent testers. The 2567 polygons were collected in total what was the base to calculate the area errors taking into account the area classes based and the type of remote sensing data used in the research. It was found that data with a ground sample distance above 5 meters are suitable only for large forest gaps with an area of more than 45 a. The UAV true orthophoto mosaic are a good alternative to time-consuming field measurements and can be used for small forest gaps also. However the usage of UAV is associated with a significant load of computer resources and requires technical knowledge within field data capture and processing. The obtained results can be valuable guidance for digital forest map operators who are looking for new methods of determining the boundaries of forest gaps. Specific solutions were also proposed that can be implemented in the future in the matter of forest gaps inventory involving the remote sensing technology.

## KEY WORDS

UAV, Sentinel-2, RapidEye, PlanetScope Dove, digital forest map, true orthophoto mosaic, digital forest map update, patch cutting

## ADDRESSES

Michał Brach <sup>(1)</sup> – e-mail: [Michal\\_Brach@sggw.edu.pl](mailto:Michal_Brach@sggw.edu.pl)

Piotr Wężyk <sup>(2)</sup> – e-mail: [piotr.wezyk@urk.edu.pl](mailto:piotr.wezyk@urk.edu.pl)

Kamil Onoszko <sup>(3)</sup> – e-mail: [kamil.onoszko@olsztyn.lasy.gov.pl](mailto:kamil.onoszko@olsztyn.lasy.gov.pl)

<sup>(1)</sup> Samodzielny Zakład Geomatyki i Gospodarki Przestrzennej, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

<sup>(2)</sup> Katedra Zarządzania Zasobami Leśnymi, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

<sup>(3)</sup> Nadleśnictwo Dobrocin; Dobrocin 20, 14-330 Małdyty

## Wstęp

Precyzyjny opis struktury drzewostanu stanowi podstawę zrozumienia jego funkcjonowania, określenia poziomu bioróżnorodności czy szacowania zasobów drzewnych i oceny pozaprodukcyjnych funkcji lasu. Inwentaryzacja drzewostanów jest więc kluczowym elementem wspomagającym planowanie zabiegów hodowlanych i działań związanych z użytkowaniem lasu, co z kolei wiąże się ściśle z szeroko pojętym zarządzaniem przestrzenią leśną [Husch i in. 2003]. Powszechnym i wymagającym stałej inwentaryzacji procesem modyfikacji drzewostanów sosnowych dominujących w polskich lasach są cięcia gniazdowe. Jest to uznana przez leśników praktyków metoda przebudowy [Bolibok 2009], bowiem odgrywa istotną rolę w procesie odnawiania i wspomagania sukcesji naturalnej drzewostanu [Bauhus, Bartsch 1996]. Ze względu na wrażliwość wybranych gatunków lasotwórczych na przymrozki stosowanie rębni gniazdowych jest znacznie korzystniejsze dla odnowienia, niż ma to miejsce na dużych otwartych powierzchniach zrębowych [Andrzejczyk i in. 2014]. Nie dziwi więc fakt, że liczba tak zwanych gniazd odnowieniowych zaliczanych do Powierzchni Niestanowiących Wyłączeń drzewostanowych (PNSW) będzie w świetle realizacji obecnych instrukcji [Święcicki 2012] i polityk wciąż rosnąć, a towarzyszyć jej będzie konieczność stałej aktualizacji domeny geometrycznej Leśnej Mapy Numerycznej (LMN) oraz baz danych opisowych systemu informatycznego Lasów Państwowych (SILP). Gniazda – obok luk, kęp, szkółek, poletek łowieckich, oczek wodnych czy stanowisk archeologicznych – są często pojawiającym się elementem LMN, nie są jednak obiektem podstawowym w rozumieniu funkcjonowania standardu leśnej mapy numerycznej [Okła 2013]. Prawidłowo zaprojektowane PNSW pozwalają na osiągnięcie przyjętego celu hodowlanego wyrażonego udziałem gatunków zgodnych z docelowym typem drzewostanu, stąd też dokładność wyznaczenia ich granic i powierzchni jest istotnym elementem.

Nie budzi też wątpliwości fakt, że tradycyjna inwentaryzacja zasobów leśnych realizowana w terenie, a bazująca na rejestracji współrzędnych odbiornikami GNSS w trybie autonomicznym, jest czasochłonna i często obciążona błędami popełnianymi przez taksatorów [Brach i in. 2017]. Upowszechnienie w praktyce leśnej zobrazowań zdalnych, w tym zdjęć lotniczych [Wężyk i in. 2018], zobrazowań satelitarnych [Wężyk i in. 2004] czy chmur punktów lotniczego skanowania laserowego (ALS – Airborne Laser Scanning), w znacznej mierze przyczynia się do wsparcia pozyskiwania bardzo precyzyjnych danych przestrzennych nieodbiegających w zakresie dokładności od naziemnych metod pomiarowych [Wężyk, Solecki 2008; Wężyk i in. 2010; Dash i in. 2016]. Wykorzystanie zobrazowań satelitarnych na potrzeby gospodarki leśnej było już wielokrotnie przedmiotem licznych badań naukowych. Z powodzeniem stosuje się je do szacowania szkód po nawałnicach dla dużych obszarów leśnych [Einzmann i in. 2017; Haidu i in. 2019], określania defoliacji drzewostanów [Marx, Kleinschmit 2017], identyfikacji obszarów objętych sukcesją lasu [Szostak i in. 2018] czy wreszcie w określaniu rzeczywistej powierzchni lasów dla kraju [Hościło i in. 2016] oraz w skali kontynentalnej i globalnej [Xie i in. 2008]. Potencjał zobrazowań teledetekcyjnych z programu Copernicus, tj. misji Sentinel-2 European Space Agency oraz RapidEye Planet Labs., wykorzystano m.in. do określania fizycznej zawartości chlorofilu w aparacie asymilacyjnym drzewostanów świerkowych [Darvishzadeh i in. 2019]. Identyfikacji drzewostanów zaatakowanych przez szkodniki owadzie (wskaźnik defoliacji koron) dokonywano także na podstawie zmienności spektralnej obrazów pozyskanych przez sensory Sentinel-2 [Hawryło, Wężyk 2018] oraz Landsat-8 [Abdullah i in. 2019]. Znane są też badania naukowe nad uzyskiwaniem danych dotyczących szeregu cech taksacyjnych, takich jak liczba drzew, pierśnica i miąższość, na podstawie zobrazowań satelitarnych RapidEye [Wallner i in. 2015]. Mnogość zastoso-

wań obrazów satelitarnych jest bardzo duża, ale nie zmienia to faktu, że leśna mapa numeryczna, wykorzystywana powszechnie w PGL Lasy Państwowe, będzie funkcjonować w najbliższym czasie jako podstawowy element bazy geometrycznej systemu GIS. Przemawia za tym przede wszystkim silne powiązanie modelu wektorowego GIS z SILP, w którym wydzielenie (pododział) jest podstawowym niepodzielnym obiektem. W nomenklaturze technologii GIS należy więc interpretować wydzielenie jako encję (ang. entity) charakteryzującą się poprawnością topologiczną (rozumienie granic, sąsiadów, kontrola powierzchni i przekształceń). Obiekty mniejsze niż wydzielenia (np. gniazda zrębowe czy luki), choć występują w postaci wektorowej (poligon) w strukturze bazy danych geometrycznej LMN, nie są jednak elementem budującym hierarchię zapisu danych wektorowych zgodnych z modelem fizycznym domeny. Sprawia to, że dokładność PNSW w zakresie położenia, kształtu i wymiarów często odbiega od oczekiwań użytkownika LMN, choć nie zostały one wprost doprecyzowane w standardzie tej bazy.

Mimo intensywnego wykorzystania modelu wektorowego w PGL LP obserwowany jest w ostatnich latach wzrost zainteresowania danymi teledetekcyjnymi w procesie weryfikacji i aktualizacji baz danych przestrzennych. Zmiany w tym zakresie są dostrzegane w szacowaniu szkód spowodowanych przez huragany [Ciesielski i in. 2016; Hościło, Lewandowska 2018; Forzieri i in. 2019] oraz w zastosowaniu lotniczego skanowania laserowego do szacowania miąższości drzewostanów na potrzeby sporządzania planów urządzenia lasu [Liszańczuk i in. 2020], opierającego się przede wszystkim na rastrowym modelu danych.

Również pracownicy PGL LP starają się samodzielnie wdrażać nowoczesne metody pozyskania danych przestrzennych, głównie przy wykorzystaniu bezzałogowych statków powietrznych BSP (UAV – Unmanned Aerial Vehicle), czego przykładem może być otwarcie własnego ośrodka szkoleniowego w Rzepinie oraz wypracowanie koncepcji stosowania BSP na poziomie regionalnym [Zubert 2020]. Znane są także pojedyncze przypadki wykorzystywania zobrażeń satelitarnych w lokalnych projektach realizowanych w PGL LP. Przykładem może być zastosowanie danych Sentinel-2 do inwentaryzacji szkód pohuraganowych w Puszczy Knyszyńskiej [Sołoguba 2016], w Nadleśnictwie Stare Jabłonki [Onoszko i in. 2019] czy do wspomaganie automatycznej detekcji zniszczeń po wiatrolomach z 2017 roku w Nadleśnictwie Przymuszewo [Wężyk i in. 2018].

W zaprezentowanej pracy dokonano szczegółowej analizy możliwości wykorzystania wieloźródłowych zobrażeń teledetekcyjnych (bliskiego i dalekiego zasięgu) o różnej wielkości terenowej piksela (GSD – Ground Sampling Distance) w procesie usprawniającym poprawne wyznaczenie lub weryfikowanie granic powierzchni niestanowiących wyłączeń drzewostanowych. Uwzględniono zarówno dane fotolotnicze pozyskane z nalotów fotogrametrycznych BSP, jak i nieodpłatne oraz komercyjne zobrażenia satelitarne. W założeniu autorów realizacja badań i uzyskane na tej drodze wyniki miały posłużyć jako praktyczna wskazówka dla pracowników administracji PGL LP w zakresie podejmowania decyzji związanych z właściwym doбором typu danych przestrzennych odpowiednich dla aktualizacji baz danych wektorowych LMN oraz wybranych tabel SILP.

## Material i metody

Badania zrealizowano na terenie 3 nadleśnictw: Ruda Malenicka (RDLP w Radomiu; 9 gniazd – PNSW), Spychowo (RDLP Olsztyn; 10 gniazd) oraz Srokowo (RDLP Olsztyn; 4 gniazda), łącznie analizując geometrię 23 PNSW. Powierzchnia gniazd nie przekraczała, poza jednym przypadkiem, wielkości wskazywanej przez Zasady... [2012] (5 do 50 arów). Wybrane do analiz drzewostany objęte były pierwszym etapem realizacji rębni gniazdowej zupełniej (IIIa), o składzie gatunkowym zdominowanym przez sosnę zwyczajną (tab. 1).

Tabela 1.

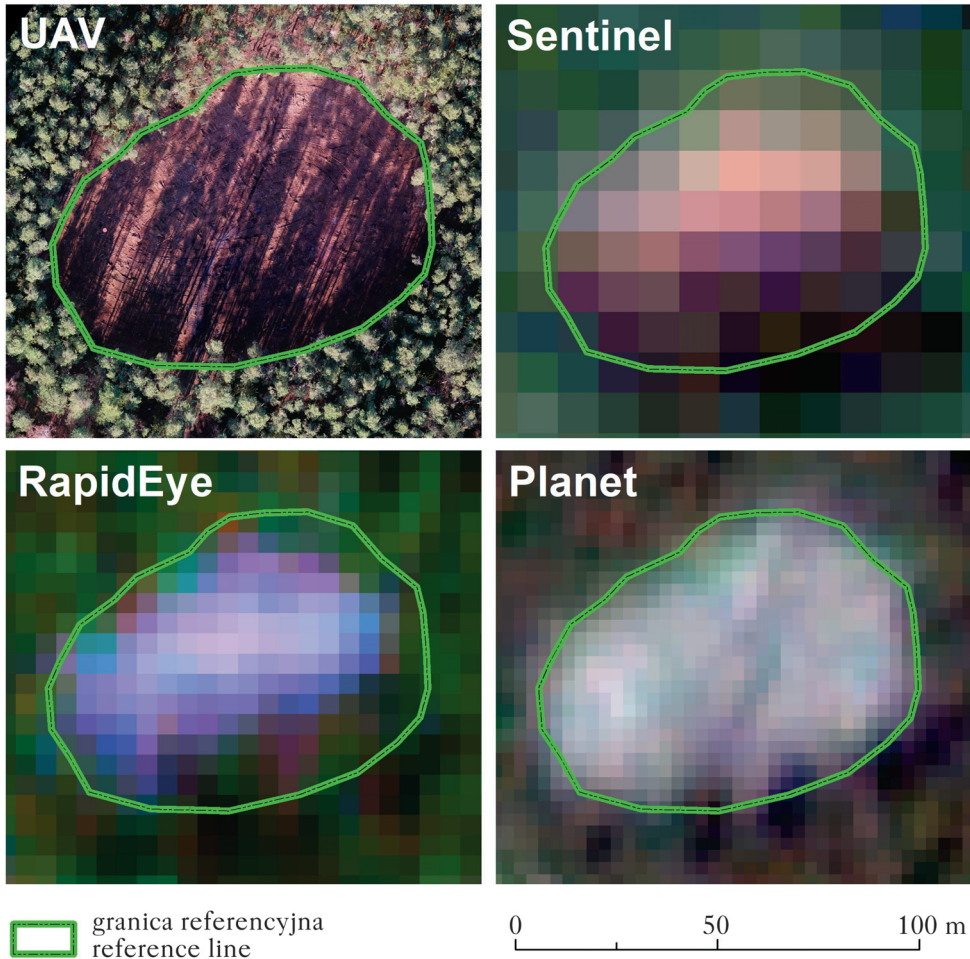
Liczba powierzchni niestanowiących wyłączenia (PNSW), udział sosny jako gatunku panującego (U [%]), wiek drzewostanu (W [lata]) i wysokość (H [m]) oraz średnia (M), maksymalna (Maks) i minimalna (Min) powierzchnia gniazda [a]

Number of areas that do not constitute forest stands (PNSW), share of Scots pine as the dominant species (U [%]), age (W [years]) and height (H [m]) of the stand as well as mean (M), maximum (Maks) and minimum (Min) gap area [a]

	PNSW	U	W	H	M	Maks	Min
Ruda	5	100	101	27	32,9	52,6	12,2
Malenicka	4	70	96	27	45,6	48,8	41,9
Spychowo	10	80	137	30	35,9	45,7	20,4
Srokowo	4	70	95	29	19,6	28,0	11,4

Granice, a tym samym powierzchnię referencyjną gniazd zrębowych, ustalono, stosując wektoryzację ekranową wysokorozdzielczej (GSD=0,05 m) prawdziwej ortomozajki (true orthophotomosaic) wygenerowanej w procesie ortorektyfikacji zdjęć pozyskanych z niskopłupowej platformy BSP oraz modelu NMPT (Numeryczny Model Pokrycia Terenu), opracowanego na drodze gęstego dopasowania zdjęć (dense matching). Do stworzenia prawdziwej ortofotomozajki wykorzystano zdjęcia BSP rejestrowane z platformy DJI Inspire 2, wyposażonej w kamerę RGB (Zemuse X5S) o stałej ogniskowej (15 mm) oraz matrycy 20,8 Mpx. Nalot realizowano na wysokości około 100 m względem powierzchni terenu (AGL – Above Ground Level). Prawdziwe ortomozajki generowano w oprogramowaniu Metashape (AgiSoft) z wykorzystaniem punktów dostosowania (GCP – Ground Control Points), których współrzędne XYZ wyznaczono w drodze pomiarów GNSS (odbiornik klasy geodezyjnej) HiPer SR (Topcon) w trybie RTK, bazując na poprawkach z sieci stacji referencyjnych TPI NETpro. Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie błędu położenia GCP nieprzekraczającego  $\pm 0,03$  m w poziomie i  $\pm 0,05$  m dla rzędnej wysokości [Specht i in. 2017]. Zastosowany algorytm dopasowania zdjęć (przeprowadzenie orientacji wewnętrznej – autokalibracja kamery; wzajemnej i bezwzględnej – wyznaczenie orientacji zewnętrznej) w programie Metashape, opierający się na tysiącach punktów wiążących (tie points), pozwolił na uzyskanie błędu średniokwadratowego wynoszącego zaledwie 0,15 m. W dalszym etapie prac z chmury punktów wygenerowanej metodą gęstego dopasowania utworzono NMPT w formie rastrowej, który posłużył do procesu ortorektyfikacji zdjęć i opracowania referencyjnej prawdziwej ortomozajki RGB. W każdym z przypadków referencyjną granicę gniazda zrębowego wyznaczał operator dobrze znający obiekt – na podstawie pomiarów GNSS, ortomozajki i numerycznego modelu pokrycia terenu wraz z weryfikacją terenową. Wyniki interpretacji przebiegu granicy gniazd na prawdziwym ortoobrazie zostały zapisane w formacie wektorowym (geobaza Esri) i stanowiły podstawę do dalszych analiz przestrzennych (ryc. 1).

Trzy kolejne zestawy danych teledetekcyjnych stanowiły zobrazowania satelitarne z satelitów okołobiegunowych (tzw. niskich orbit; LEO), tj.: Sentinel-2 (ESA), RapidEye (Planet Labs) oraz PlanetScope Dove (Planet Labs) (ryc. 1). W przypadku zobrazowań Sentinel-2 niewątpliwą ich zaletą jest nieodpłatny dostęp, poprzez np. platformy typu DIAS oraz dedykowane nieodpłatne oprogramowanie służące do klasyfikacji obrazu, np. QGIS lub SNAP (ESA). Należące do Europejskiej Agencji Kosmicznej satelity misji Sentinel-2 pozwalają na rejestrację obrazu w 13 kanałach spektralnych, a terenowa wielkość pikseli w zakresie światła widzialnego (kanały nr 4, 3 oraz 2) oraz bliskiej podczerwieni (NIR – Near InfraRed; kanał nr 8) wynosi 10,0 m. Dużą zaletą danych misji Sentinel-2 jest również dość krótki czas rewizyty (około 5 dni), uzyskiwany dzięki dwóm bliźniaczynom satelitom A oraz B, ulokowanym na tej samej orbicie LEO.



Ryc. 1.

Typy danych teledetekcyjnych wykorzystywanych w projekcie: obraz referencyjny BSP (UAV; GSD=0,05 m), obraz RGB Sentinel-2 ESA (GSD=10 m); RapidEye (kompozycja RGB GSD=5,0 m) i PlanetScope Dove (kompozycja RGB; GSD=3,0 m)

Type of remote sensing data used in the research: UAV reference data (GSD=0.05 m), satellite RGB Sentinel-2 ESA (GSD=10 m), satellite RGB composition RapidEye (GSD=5.0 m) and satellite RGB composition PlanetScope Dove (GSD=3.0 m)

Sceny satelitarne RapidEye (Planet Labs) rejestrowane były w latach 2009-2020 dzięki konstelacji 5 satelitów krążących na tej samej orbicie okołobiegunowej LEO, dostarczając komercyjnych zobrazowań wielospektralnych aż w 5 kanałach spektralnych, w tym w zakresie RedEdge (tzw. czerwieni krawędziowej) oraz w kanale NIR. Rozdzielczość przestrzenna tego systemu wynosiła 5,0 m. Rozdzielczość czasowa zobrazowań RapidEye wahała się dzięki 5 satelitom w granicach 1-2 dni. Po 11 latach pozyskiwania danych konstelacja została deaktywowana, jednak bardzo cenne archiwum wysokorozdzielczych obrazów (HR – High Resolution) satelitarnych jest wciąż utrzymywane.

Produktem rozwijanym przez firmę Planet Labs już od kilku lat, który zastąpił konstelację RapidEye, jest największa w dziejach cywilizacji chmara nanosatelitów środowiskowych (jed-

nostki tzw. 3U=10×10×30 cm), znana pod nazwą PlanetScope Dove. Obecnie składa się ona z około 180 nanosatelitów zlokalizowanych na 2 orbitach LEO, dostarczających każdego dnia zobrazowań wszystkich kontynentów z rozdzielczością 3,0 m GSD. Dane dystrybuowane są komercyjnie, szczególnie do klientów zainteresowanych monitorowaniem zjawisk zachodzących w środowisku, w tym w rolnictwie i leśnictwie. Firma Planet Labs rozpoczęła w 2020 roku umieszczanie na orbicie nowego bloku nanosatelitów, tzw. Super Dove (SD), pozyskujących dane w 5 kanałach spektralnych (dodano RedEdge), a w niedalekiej przyszłości zapowiadane są sensory 8- oraz 12-kanałowe (zbliżone spektralnie do sensora MSI – MultiSpectral Instrument na satelicie Sentinel-2).

Wszystkie zobrazowania satelitarne wykorzystane w niniejszej pracy zostały zarejestrowane w oknie czasowym nieprzekraczającym miesiąca, a wpływ na konkretne daty miały w zasadzie jedynie warunki pogodowe.

Proces wyznaczania granic gniazd (PNSW) był realizowany przez zespół 28 testerów pracujących niezależnie oraz niedysponujących wiedzą o tym terenie. Doświadczenie osób biorących udział w badaniu w zakresie fotointerpretacji należy oceniać wysoko, gdyż miały one styczność z tego typu materiałami lub też wykonywały wielokrotnie podobne zadania. Zespół testerów wykorzystywał 4 rodzaje zobrazowań teledetekcyjnych zarejestrowanych w różnych rozdzielczościach przestrzennych (tab. 2). Wektoryzację granic gniazd zrębowych wykonano w oprogramowaniu ArcMap (Esri) i zapisano w formacie wektorowym (geobaza Esri). Łącznie zespół 28 testerów zwektoryzował 2576 poligonów. Każdy opracowywał niezależnie wszystkie 23 gniazda, wykorzystując 4 rodzaje danych teledetekcyjnych i zapisując je w standardzie LMN, zgodnym z układem współrzędnych płaskich prostokątnych PL-1992 [Święcicki 2012]. W pracy poddano szczegółowej analizie procesy i wyniki uzyskiwanych cech PNSW, tj. ich powierzchnię oraz liczbę wierzchołków poligonów. Wyniki zaprezentowano w dwóch głównych kategoriach, uwzględniających wykorzystaną platformę teledetekcyjną (tab. 2) oraz wielkość gniazda (interwały 10-arowe).

Zmienność prezentującą odchyłki wynikające z subiektywnej fotointerpretacji i wektoryzacji dokonywanej przez zespół testerów (co powodowało zawyżanie lub zaniżanie powierzchni gniazd) wyznaczono za pomocą błędu średniego pojedynczego pomiaru:

$$M_{ST} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (P_{pom} - P_{ref})^2}{n}} \quad [1]$$

gdzie:

$P_{pom}$  – powierzchnia wyznaczona na podstawie interpretacji materiałów teledetekcyjnych przez testerów,

$P_{ref}$  – powierzchnia referencyjna,

$n$  – liczba spostrzeżeń.

Wyznaczona wartość błędu była podstawą do obliczenia względnego błędu procentowego ( $M_W$ ) za pomocą równania:

$$M_W = \frac{|M_{ST}|}{P_S} \cdot 100$$

gdzie:

$M_{ST}$  – średni błąd pojedynczego pomiaru [1],

$P_S$  – średnia wielkość powierzchni analizowanych obiektów dla danej klasy wielkości gniazda.

Kategorie obliczeń podzielono, uwzględniając błędy popełniane przez testerów, wykorzystany sensor oraz klasę powierzchni obiektu. Na podstawie analizy histogramu analizowanych powierzchni gniazd zrębowych przyjęto podział na klasy: 20, 30, 40 oraz 50 arów. Konwersja poligonów do warstwy punktowej pozwoliła ponadto na wyznaczenie liczby wierzchołków każdego wektoryzowanego PNSW. Uzyskane wyniki były podstawą do oceny pracochłonności procesu wektoryzacji w zależności od zastosowanego sensora teledetekcyjnego.

## Wyniki

Za kluczowy parametr służący ocenie wyników analiz uznano względny błąd procentowy – będący wartością względnie niezależną od powierzchni PNSW. Wartość  $M_W$  kształtowała się na poziomie 27% w przypadku zobrażeń Sentinel-2, 25% dla obrazów RapidEye (Planet) oraz 20% dla PlanetScope Dove (Planet). Określenie powierzchni gniazd (wektoryzacja) na podstawie ortomosaik BSP wykazało błąd średni pojedynczego pomiaru na poziomie  $\pm 12\%$  (tab. 3).

Błąd względny  $M_W$  wykorzystano do oceny dystrybucji błędów popełnianych przez testerów (ryc. 2). Pozwoliło to na ogólną ocenę błędów wektoryzacji każdego z testerów oraz stopnia trudności powierzonego zadania w zależności od otrzymanego materiału źródłowego.

Przyporządkowanie 23 gniazd zrębowych do 4 klas powierzchni (10 arów) pozwoliło na równomierną, a tym samym reprezentatywną, analizę rozkładu błędów określania powierzchni w wyniku fotointerpretacji granicy obiektu. W przypadku zobrażeń satelitarnych stwierdzono jednoznacznie, że wartość względnego błędu procentowego malała wraz ze wzrostem powierzchni

Tabela 2.

Podstawowe charakterystyki wykorzystanych danych teledetekcyjnych  
Basic characteristics of remote sensing data used in the research

Platforma Sensor	Wielkość terenowa piksela [m] Ground Sample Distance	Licencja License	Kanały spektralne Spectral Time	Czas rewizyty [dni] Revisit time [days]	Rozmiar pliku dla obszaru 1 a [kb] File size for the area of 1 a
BSP	0,05	SGGW/LP	RGB	na żądanie upon request	90 000
PlanetScope Dove	3,0	komercyjna commercial	RGB+NIR	1	8,5
RapidEye	5,0	nieodpłatna free	RGB+RE+NIR	1-2	3,9
Sentinel-2	10,0	nieodpłatna free	RGB+NIR	3	0,6

Tabela 3.

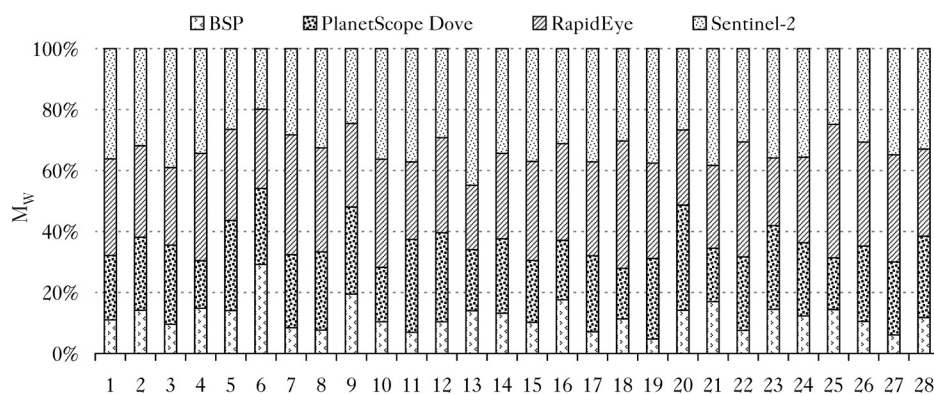
Rozkład wartości średniego błędu pojedynczego pomiaru ( $M_{ST}$  [a]) i błędu względnego ( $M_W$  [%]) w poszczególnych klasach powierzchni gniazda

Distribution of mean error for single measurement ( $M_{ST}$  [a]) and relative error ( $M_W$  [%]) in the area classes

	BSP		PlanetScope Dove		RapidEye		Sentinel-2	
	$M_{ST}$	$M_W$	$M_{ST}$	$M_W$	$M_{ST}$	$M_W$	$M_{ST}$	$M_W$
20	3,31	18,03	4,77	26,00	5,56	30,29	6,39	34,82
30	3,91	13,00	5,13	17,08	5,46	18,19	7,04	23,43
40	3,90	9,33	9,33	22,34	11,87	28,44	11,84	28,37
50	3,14	6,68	6,59	14,05	10,65	22,69	10,55	22,48

gniazda (ryc. 3, tab. 3), średnio o około 10%. Dokładność określania powierzchni gniazd bazująca na materiałach pozyskanych z sensora Sentinel-2 i RapidEye kształtuje się na poziomie 28% dla gniazd 40-arowych i 22% dla gniazd 50-arowych. Najniższe błędy uzyskano dla danych otrzymanych na podstawie wektoryzacji ortomosaiki BSP, przy czym malały one z 18% dla powierzchni gniazd o wielkości 20 arów do niemal 7% w przypadku dużych gniazd, o powierzchni 50 arów.

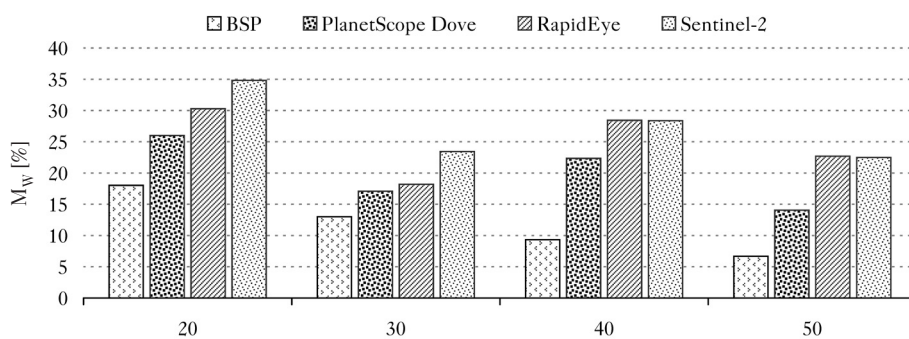
Rozdzielczość obrazów teledetekcyjnych ma zasadniczy wpływ na kształtowanie się względnego błędu procentowego, jednak zależność ta nie jest wprost proporcjonalna (ryc. 4). Różnice w medianie błędu względnego procentowego pomiędzy danymi z sensora Sentinel-2 o GSD=10,0 m a obrazami z sensora RapidEye o GSD=5,0 m (czyli o czterokrotnie większej liczbie pikseli) wyniosły zaledwie 4%. Zauważalny spadek błędu zaobserwowano w sytuacji wykorzystania obrazów PlanetScope Dove, kiedy mediana wyniosła 18%. W przypadku analizy prawdziwej ortomosaiki BSP wartość ta osiągnęła zaledwie 9%.



Ryc. 2.

Rozkład względnego błędu procentowego ( $M_W$ ) wśród testerów (1-28) z uwzględnieniem typu obrazów teledetekcyjnych, w tym referencyjnej ortomosaiki BSP

Distribution of relative percentage error ( $M_W$ ) within the group of testers (1-28) including the type of remote sensing data



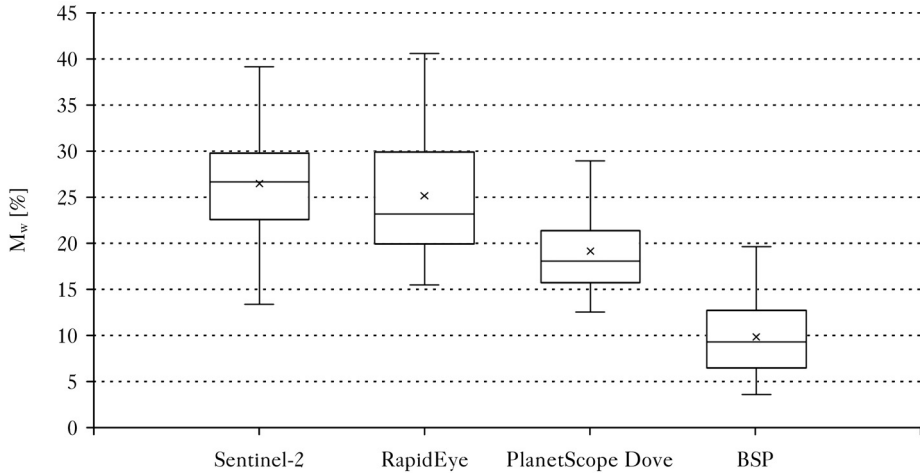
Ryc. 3.

Względny błąd procentowy ( $M_W$ ) w klasach powierzchni z uwzględnieniem materiału źródłowego wykorzystywanego do interpretacji kształtu gniazd

Relative percentage error ( $M_W$ ) in the area classes based on the type of remote sensing data used in the research



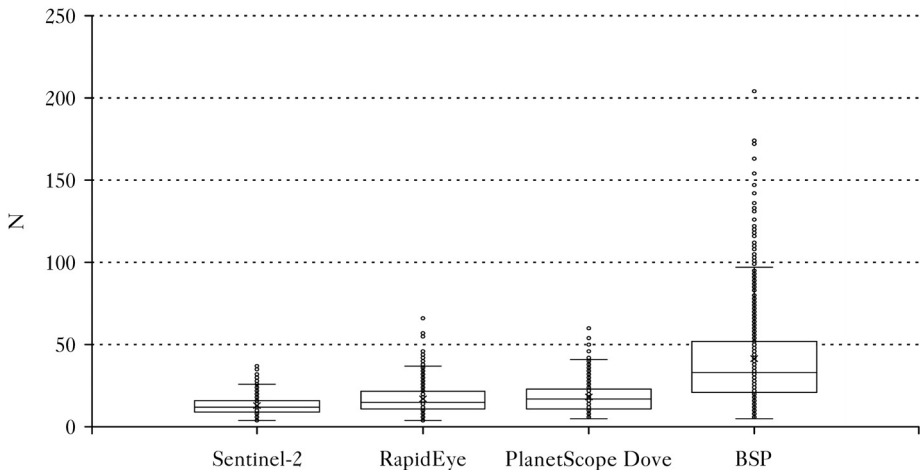
Miarą pracochłonności wykonywanej przez testerów wektoryzacji była liczba wierzchołków tworzących poligony reprezentujące kształt gniazd zrębowych, czyli PNSW (ryc. 5). Podczas gdy w przypadku obrazów satelitarnych (Sentinel-2, RapidEye oraz PlanetScope Dove), niezależnie od GSD obrazu, wartość średnia kształtowała się na poziomie około 15 wierzchołków dla pojedynczego poligonu, to w przypadku prawdziwej ortomozaiki BSP była blisko trzykrotnie większa i wyniosła 41 wierzchołków. W skrajnych przypadkach liczba wierzchołków dla obiektów wektoryzowanych na danych BSP przekroczyła nawet 200.



Ryc. 4.

Zmienność względnego błędu procentowego ( $M_w$ ) dla wyznaczania powierzchni gniazd zrębowych w zależności od zastosowanego sensora

Variability of relative percentage error ( $M_w$ ) for determining areas boundaries that do not constitute forest stands based on the type of remote sensing data used in the research



Ryc. 5.

Zmienność liczby wierzchołków tworzących poligony obiektów PNSW ( $N$ ) w zależności od zastosowanego sensora teledetekcyjnego

Variability of vertex number for vectorized polygons ( $N$ ) based on the type of remote sensing data used in the research

## Dyskusja

Otrzymane wyniki pozwoliły autorom jednoznacznie stwierdzić, że zobrażenia satelitarne o większym GSD generują zdecydowanie większe błędy w zakresie prawidłowego wyznaczenia powierzchni PNSW w procesie ich interpretacji i wektoryzacji. Ten oczywisty fakt należy jednak rozpatrywać w kontekście wielkości tworzonych gniazd zrębowych, bowiem względne błędy procentowe maleją wraz ze wzrostem powierzchni obiektu. Wysokie wartości błędów (przekraczające 30%), które wystąpiły w przypadku zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 (ESA) oraz RapidEye (Planet Lab.) dla klasy gniazd 20-arowych, stawiają pod znakiem zapytania ich przydatność w aktualizacji i weryfikacji baz danych LMN i SILP. Wiąże się to przede wszystkim z wielkością pikseli, których liczba w przypadku małych gniazd dla danych z sensora Sentinel-2 może wynosić zaledwie kilkanaście. W tej sytuacji interpretacja granicy gniazda jest zadaniem niezwykle trudnym i ryzykownym, co może być spotęgowane niewłaściwym wyświetleniem obrazu czy też występującym odnowieniem. Sporym wyzwaniem przy materiałach o większym GSD jest także umiejętność odpowiedniego powiększenia obiektu na ekranie, bowiem przy zbyt dużych zbliżeniach wskazanie przebiegu granicy gniazda jest niemożliwe. Warto też zaznaczyć, że dwukrotnie większa rozdzielczość przestrzenna zobrażeń satelitarnych RapidEye (GSD=5,0 m) w stosunku do powszechnie dostępnych zobrażeń Sentinel-2 (GSD=10,0 m) w niewielkim stopniu poprawiała wyniki wektoryzacji. Wydaje się, że w przypadku dużych powierzchni gniazd zrębowych stosowanie obrazów satelitarnych może być brane pod uwagę, jednak obrazy te powinny być wykonane w okresie wegetacji o możliwie najkrótszym cieniu. Podejście takie jest szczególnie uzasadnione przy rozpatrywaniu możliwości zastosowania precyzyjnych ortofotomap generowanych na podstawie zdjęć BSP. Niewątpliwie wysoka jakość obrazów BSP wynikająca z małej wartości GSD bardzo poprawia możliwości fotointerpretacyjne, nie można jednak zapominać, że słabym punktem tego typu danych jest spora czasochłonność ich pozyskania i opracowania. Konieczność wykonywania stosunkowo krótkich misji fotolotniczych z częstymi międzylądowaniami (niezbędnymi do wymiany zestawów baterii), znaczne rozmiary ilościowe (tysiące zdjęć) oraz objętościowe (GB), a przede wszystkim wielogodzinny proces generowania finalnej ortomosaiki sprawiają, że metoda BSP nie należy do bardzo szybkich i wydajnych dla pojedynczego nadleśnictwa, a już na pewno nie w skali obszaru RDLP. Warto też zwrócić uwagę, że manualne opracowanie danych wektorowych na podstawie ortomosaik BSP pochłania więcej czasu, co dobrze odzwierciedla liczba wierzchołków poligonów pojedynczego PNSW (ryc. 5). Wysoka rozdzielczość przestrzenna materiałów fotolotniczych BSP w sposób naturalny zmusza operatora do większego skupienia i poszukiwania granic obiektu badań, niż ma to miejsce w przypadku obrazów z dużą wartością GSD (np. 5,0 czy 10,0 m). W praktyce PNSW na leśnej mapie numerycznej nie mają w większości przypadków skomplikowanych kształtów, precyzyjnie opisujących ich granice. Są one najczęściej generalizowane i składają się z kilku do kilkunastu odcinków polilini, zatem wyniki wektoryzacji ortomosaik BSP będą prawdopodobnie podlegać generalizacji przy ich imporcie do LMN. Niewątpliwą zaletą wysokorozdzielczych danych BSP jest stosunkowo mała wrażliwość na warunki pogodowe (możliwy zbiór danych w pochmurne dni). Niski pułap lotu oraz niewielki rozmiar piksela ułatwiają wskazanie granicy obiektu nawet przy dużym zaciemieniu. Powierzchnia gniazd zrębowych na obrazach satelitarnych jest najczęściej zaniżana przez operatora, co ma związek z problemem interpretacji ich granicy przebiegających po krawędziach koron drzew. Tester próbuje intuicyjnie tworzyć gniazda zrębowe w miejscach, gdzie drzewostan nie występuje. Odwrotna sytuacja zachodzi w przypadku wysokorozdzielczych prawdziwych ortomosaik BSP, bowiem zwiększenie szczegółowości wektoryzacji wpływa na wielkość

powierzchni obiektu. Operator niejednokrotnie wskazuje granicę gniazda pod koronami drzew (przy widocznych pniach; w zależności od pokrycia poprzecznego i podłużnego mogą wystąpić takie sytuacje), podczas gdy powierzchnia operacyjna jest w rzeczywistości mniejsza. Warto w tym przypadku zwrócić uwagę na możliwe niejednoznaczności w zakresie sposobu określenia powierzchni gniazd. Powierzchnia geometryczna PNSW wyznaczona jest bowiem poprzez pnie stojących drzew i będzie zawsze większa od powierzchni odnowieniowej, tj. powierzchni zajętej przez pasy wyorywane pod sadzenie nowego pokolenia drzew, które są z reguły zlokalizowane kilka metrów od stojących drzew. Tym samym granica powierzchni odnowieniowej na PNSW może być jednoznacznie określona w zasadzie dopiero na etapie przygotowania gleby pod uprawę. W przypadku bardzo małych gniazd, szczególnie tych, które występują w drzewostanach o skomplikowanej strukturze przerębowej, alternatywą jest w zasadzie kosztochłonny pomiar naziemny (pomiar GNSS w centrum gniazda oraz OFF-SET dalmierzem laserowym), stosowanie skanowania laserowego TLS, platform niskopułapowych BSP wyposażonych w innowacyjne skanery laserowe (tzw. platformy ULS; ang. Unmanned Laser Scanning) lub też zamówienie specjalistycznych nalotów fotogrametrycznych. Alternatywą, choć dość kosztowną, może być zamówienie wielospektralnych zobrażeń satelitarnych o GSD=0,3 m (tzw. pan-sharpened) WorldView-3 (MAXAR) czy GSD=0,5 m SkySat (Planet Labs) lub GeoEye (MAXAR). Jednak realizacja zamówienia tego typu płatnych rejestracji danych satelitarnych trwać może nawet do kilku tygodni czy miesięcy – ze względu na konieczność spełnienia odpowiednich warunków pogodowych i kolejkę realizacji innych zamówień komercyjnych. Czynnikiem mogącym istotnie wspomóc interpretację granic gniazd zrębowych jest niewątpliwie stosowanie innych kompozycji barwnych (np. CIR) lub nawet map pochodnych, jak wskaźnika roślinności (np. NDVI). Przesłanką do niniejszego badania był jednak fakt, że tego typu dane nie są jeszcze powszechnie wykorzystywane w praktyce przez PGL LP.

Pomiar naziemny (GNSS i dalmierz laserowy bądź bardziej kosztowny TLS) oraz technologia BSP mogą być więc wciąż alternatywą dla wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych (np. <1,0 m GSD) lub lotniczego skanowania laserowego ALS czy ULS. Biorąc pod uwagę prace wdrożeniowe, które trwają nad nową IUL pod kątem wykorzystania aktualnych danych ALS w pracach nad PUL, należy przyjąć, że będzie to najbardziej szczegółowy zestaw danych możliwy do wykorzystania podczas weryfikacji geometrii PNSW oraz uzupełnienia nowych poligonów tworzonych przez gniazda. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że tego typu chmury punktów LiDAR będą pozyskiwane dla celów PUL nie częściej niż co 10 lat.

Na tym tle najbardziej efektywnie kształtuje się wykorzystanie BSP – płatowców typu VTOL (Vertical Take Off and Landing) o możliwościach realizacji misji fotolotniczej nawet do kilkuset ha na jednym pakiecie baterii – w porównaniu do kilkudziesięciu przy nalotach wielowirnikowcami (przy tym samym AGL i innych parametrach kamer oraz pokrycia). Samo pozyskanie zdjęć z BSP nie jest wprawdzie zadaniem bardzo skomplikowanym, jednak już ich poprawne opracowanie i dalsze analizy powinny być zintegrowane z środowiskiem obliczeniowym w chmurze. Takie rozwiązanie mogłoby stanowić z pewnością upowszechnienie w Lasach Państwowych platform bezzałogowych.

## Wnioski

- ✦ Rozdzielczość przestrzenna (GSD) materiałów fotogrametrycznych w sposób istotny wpływa na pojawianie się błędów określania powierzchni gniazd zrębowych – będących najczęstszym elementem PNSW w bazie geometrycznej LMN.

- ✦ Wyższa rozdzielczość przestrzenna (mniejszy GSD) wpływa znacząco na zmniejszenie średniego błędu pojedynczego pomiaru i błędu względnego określania powierzchni obiektów PNSW.
- ✦ Wykorzystanie zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 (ESA), RapidEye (Planet Labs) oraz PlanetScope Dove (Planet Labs) do wyznaczania granic powierzchni gniazd zrębowych nies-tanowiących wyłączeń drzewostanowych może mieć miejsce w przypadku dużych obiektów PNSW (>45 arów) zlokalizowanych w drzewostanach o stosunkowo jednorodnej strukturze gatunkowej i wiekowej.
- ✦ Realizację nalołów BSP są bardzo dobrą alternatywą dla pomiarów naziemnych i z powodze-niem mogą być stosowane dla gniazd zrębowych, bez względu na ich powierzchnię (zgodnie z IUL). Trzeba jednak pamiętać, że jest to technologia wymagająca umiejętności rejestrowania oraz opracowywania pozyskanych danych przestrzennych i pociąga za sobą konieczność wykorzystania znacznych zasobów obliczeniowych.
- ✦ Autorzy sugerują rozważenie koncepcji przetwarzania zdjęć BSP w chmurach obliczeniowych, co może w istotny sposób poprawić czas generowania produktów oraz ich jakość, a tym samym wpłynąć na proces weryfikacji i aktualizacji warstw wektorowych LMN.

## Podziękowania

Autorzy składają podziękowania studentom Sekcji Geomatyki Koła Naukowego Leśników SGGW oraz Sekcji Geomatyki Koła Naukowego Leśników Wydziału Leśnego Uniwersytetu Rolni-czego w Krakowie, Panu Nadleśniczemu Michałowi Ostrowskiemu z Nadleśnictwa Daleszyce, Pani Annie Paprockiej z Nadleśnictwa Stare Jabłonki oraz Panu Lechowi Stańczakowi z Nadle-śnictwa Pułtusk. Specjalne podziękowania autorzy kierują do polskiego dystrybutora Planet Labs (USA), tj. firmy ProGea 4D sp. z o.o. – za nieodpłatne udostępnienie do prac naukowych zobrażeń satelitarnych RapidEye oraz PlanetScope Dove oraz firmie TPI Sp. z o.o. za wspar-cie w zakresie dostępu do sieci stacji referencyjnych TPI NETpro.

## Literatura

- Abdullah H., Skidmore A. K., Darvishzadeh R., Heurich M. 2019. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 5 (1): 87-106. DOI: <https://doi.org/10.1002/rse.2.93>.
- Andrzejczyk T., Bolibok L., Buraczek W., Drozdowski S., Szeligowski H. 2014. Wpływ warunków siedliskowych na zróżnicowanie wysokości dębu na gniazdach. *Sylwan* 158 (6): 404-413. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2013098>.
- Bauhus J., Bartsch N. 1996. Fine-root growth in beech (*Fagus sylvatica*) forest gaps. *Canadian Journal of Forest Research* 26 (12): 2153-2159. DOI: <https://doi.org/10.1139/x26-244>.
- Bolibok L. 2009. Regulacja warunków wzrostu odnowień na gniazdach – wpływ parametrów gniazd na oddziaływanie czynników biotycznych. *Sylwan* 153 (11): 733-744. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2009029>.
- Brach M., Stańczak L., Szymański P. 2017. Dokładność szybkich metod inwentaryzacji leśnej mapy numerycznej. *Sylwan* 161 (1): 1826. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2016090>.
- Ciesielski M., Balazy R., Hycza T., Dmyterko E., Bruchwald A. 2016. Szacowanie szkód spowodowanych przez wiatr w drzewostanach przy wykorzystaniu zobrażeń satelitarnych i danych Systemu Informatycznego Lasów Państwowych. *Sylwan* 160 (5): 371-377. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2015129>.
- Darvishzadeh R., Skidmore A., Abdullah H., Cherenet E., Ali A., Wang T., Nieuwenhuis W., Heurich M., Vrieling A., O'Connor B., Paganini M. 2019. Mapping leaf chlorophyll content from Sentinel-2 and RapidEye data in spruce stands using the invertible forest reflectance model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 79: 58-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.003>.
- Dash J. P., Watt M. S., Bhandari S., Watt P. 2016. Characterising forest structure using combinations of airborne laser scanning data, RapidEye satellite imagery and environmental variables. *Forestry* 89 (2): 159-169. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv048>.
- Einzmann K., Immitzer M., Böck S., Bauer O., Schmitt A., Atzberger C. 2017. Windthrow Detection in European Forests with Very High-Resolution Optical Data. *Forests* 8 (1): 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8010021>.

- Forzieri G., Pecchi M., Girardello M., Mauri A., Klaus M., Nikolov C., Rüetschi M., Gardiner B., Tomaštk J., Small D., Nistor C., Jonikavicius D., Spinoni J., Feyen L., Giannetti F., Comino R., Wolynski A., Pirotti F., Maistrelli F., Ionut S., Lucas-Stephanie W., Stefan K., Zieba-Kulawik K., Strojczek-Jazwinska P., Mokroš M., Stefan F., Krejci L., Haidu I., Nilsson M., Wezyk P., Chirici G., Cescatti A., Beck P. S. A. 2019. A spatially-explicit database of wind disturbances in European forest over the period 2000-2018. Preprint. *Biosphere – Biogeosciences*.
- Haidu I., Furtuna P. R., Lebaut S. 2019. Detection of old scattered windthrow using low cost resources. The case of Storm Xynthia in the Vosges Mountains, 28 February 2010. *Open Geosciences* 11 (1): 492-504. DOI: <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0040>.
- Hawryło P., Wężyk P. 2018. Predicting Growing Stock Volume of Scots Pine Stands Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Airborne Image-Derived Point Clouds. *Forests* 9 (5): 274. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9050274>.
- Hościło A., Lewandowska A. 2018. Zastosowanie danych z satelity Sentinel-2 do szacowania rozmiaru szkód spowodowanych w lasach huraganowym wiatrem w sierpniu 2017 roku. *Sylwan* 162 (8): 619-627. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2018055>.
- Hościło A., Mironczuk A., Lewandowska A. 2016. Określenie rzeczywistej powierzchni lasów w Polsce na podstawie dostępnych danych przestrzennych. *Sylwan* 160 (8): 627-634. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2016067>.
- Husch B., Beers T. W., Jr J. A. K. 2003. *Forest Mensuration*. 4th edition. Wiley, New York.
- Lisańczuk M., Mitelsztet K., Parkitna K., Krok G., Stereńczak K., Wysocka-Fijorek E., Miścicki S. 2020. Influence of sampling intensity on performance of two-phase forest inventory using airborne laser scanning. *Forest Ecosystems* 7 (1). DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00277-6>.
- Marx A., Kleinschmit B. 2017. Sensitivity analysis of RapidEye spectral bands and derived vegetation indices for insect defoliation detection in pure Scots pine stands. *IForest – Biogeosciences and Forestry* 10 (4): 659-668. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor1727-010>.
- Okła K. 2013. *Geomatyka w Lasach Państwowych. Cz. II. CILP*. Warszawa.
- Onoszko K., Hawryło P., Krawczyk J., Mieleczarek D. 2019. Inwentaryzacja szkód pohuraganowych w drzewostanach z wykorzystaniem wieloźródłowych zobrazowań teledetekcyjnych na przykładzie Nadleśnictwa Stare Jablonki. I Krajowe Forum Użytkowników LiDAR. 22-23 października 2019 r., Sękocin Stary.
- Sołoguba M. 2016. Analiza w GIS w zasięgu (i od) ręki. *Las Polski* 18: 8-9.
- Specht C., Specht M., Dąbrowski P. 2017. Comparative analysis of active geodetic networks in Poland. *SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, Sofia. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017/22>.
- Święcicki Z. 2012. *Instrukcja urzędowania lasu. T. 1-3. CILP*. Warszawa.
- Szostak M., Hawryło P., Piela D. 2018. Using of Sentinel-2 images for automation of the forest succession detection. *European Journal of Remote Sensing* 51 (1): 142-149. DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1412272>.
- Wallner A., Elatawneh A., Schneider T., Knoke T. 2015. Estimation of forest structural information using RapidEye satellite data. *Forestry* 88 (1): 96-107. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu032>.
- Wężyk P., Brach M., Hawryło P., Zieba-Kulawik K., Ratajczak M., Szymański P., Szostak M. 2018. Przekalowanie informacji ze zintegrowanych chmur punktów ULS i TLS w metodzie automatycznej detekcji zniszczeń lasu na obrazach Dove (Planet) oraz Sentinel-2 (ESA) w Borach Tucholskich. XXIII Ogólnopolska Konferencja Fotointerpretacji i Teledetekcji „Współczesna teledetekcja w badaniach środowiska geograficznego”. 24-25 września 2018 r., Łódź.
- Wężyk P., Hawryło P., Janus B., Weidenbach M., Szostak M. 2018. Forest cover changes in Gorce NP (Poland) using photointerpretation of analogue photographs and GEOBIA of orthophotos and nDSM based on image-matching based approach. *European Journal of Remote Sensing* 51 (1): 501-510. DOI: <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1455158>.
- Wężyk P., Kok R. D., Zajęzkowski G. 2004. The role of statistical and structural texture analysis in VHR image analysis for forest applications – A case study on Quickbird data in the Niepolomice Forest. *Angewandte Geoinformatik* 770-775.
- Wężyk P., Solecki K. 2008. Określanie wysokości drzewostanów nadleśnictwa Chojna w oparciu o lotniczy skaningu laserowy (ALS). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 18: 663-672.
- Wężyk P., Szostak M., Tompański P. 2010. Aktualizacja baz danych SILP oraz Leśnej Mapy Numerycznej w oparciu o dane z lotniczego skaningu laserowego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 21: 437-446.
- Xie Y., Sha Z., Yu M. 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology* 1 (1): 9-23. DOI: <https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005>.
- Zasady hodowli lasu. 2012. DGLP, Warszawa.
- Zubert U. 2020. Drony na poziomie regionalnym. *Las Polski* (1) 4.