

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

DYSCYPLINA NAUKOWA INŻYNIERIA MECHANICZNA

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO- TECHNICZNYCH

Rozprawa doktorska

Mgr inż. Rafał Frąckowiak

**Badanie i optymalizacja zastosowań kamer multi-spektralnych
i termowizyjnych w inżynierii leśnej**

Promotor

Prof. Dr hab. Inż. Zdobysław Goraj

WARSZAWA, 2024

Streszczenie

Niniejsza rozprawa dokumentuje testy praktyczne specjalistycznych kamer (multispektralnej oraz termowizyjnej) zagregowanych z bezzałogowymi statkami powietrznymi w inżynierii leśnej. W pracy weryfikowane były dwie tezy badawcze: (1) wykorzystanie kamer termowizyjnych zagregowanych z bezzałogowymi statkami powietrznymi daje podstawę do skutecznej inwentaryzacji przyrodniczej – wiarygodnego oszacowania stanu liczebnego zwierzyny grubej (łoś euroazjatycki, jelen szlachetny, sarna europejska oraz dzik euroazjatycki) na wytypowanym obszarze; oraz (2) zdobycie wiedzy na temat bieżącego stanu sanitarnego lasu poprzez wykorzystanie kamer multispektralnych zagregowanych z bezzałogowymi statkami powietrznymi, dające podstawę do przeprowadzenia skutecznych, bezinwazyjnych zabiegów pielęgnacyjnych w lasach. W trakcie pracy korzystano z wielowirnikowców różnych konstrukcji – hexacoptera oraz quadrocoptera. Loty przeprowadzane były w różnych porach roku oraz doby. Wielowirnikowce w trakcie lotu generują pewien hałas. W związku z tym realizowane były też badania związane z pomiarem natężenia dźwięku. Głównym celem pomiaru natężenia dźwięku było ocenienie ryzyka odstraszenia inwentaryzowanej zwierzyny przez dźwięk generowany przez bezzałogowy statek powietrzny.

Prace realizowane były we współpracy pomiędzy Nadleśnictwem Czarna Białostocka (należącym do Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Białymstoku) a Politechniką Warszawską (reprezentowaną przez Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa). Praca powstała w ramach programu Ministerstwa Edukacji i Nauki pod nazwą „Doktorat Wdrożeniowy”. W trakcie pracy korzystano między innymi z programów geoinformacyjnych, takich jak Agisoft (wykorzystany na przykład do opracowywania ortofotomap, map indeksów wegetacyjnych) oraz program QGIS (dawniej nazywany: Quantum GIS), który wykorzystano na przykład do analizy wskaźników wegetacyjnych, kompozycji CIR oraz analiz przestrzennych związanych z inwentaryzacją zwierzyny. Pracę zakończono wnioskami z analiz pozyskanych materiałów. W rozprawie znalazły się również elementy związane z optymalizacją konstrukcji wielowirnikowca oraz badaniem zasięgu łączności platformy w zależności od rodzaju terenu, nad którym przeprowadzany jest nalot (teren leśny lub teren otwarty).

Słowa kluczowe: bezzałogowe statki powietrzne, inwentaryzacja zwierzyny, inwentaryzacja stanu lasu, leśnictwo

Abstract

This dissertation presents the results of practical tests involving specialized cameras (multispectral and thermal) integrated with unmanned aerial vehicles (UAVs) in the field of forestry engineering. The research is focused on verifying two scientific hypotheses: (1) the use of thermal cameras integrated with UAVs to provide a basis for effective natural inventory, enabling a reliable estimation of the population size of large game species (Eurasian elk, red deer, European roe deer, and Eurasian wild boar) in designated areas; and (2) the acquisition of knowledge regarding the current state of forest health through the utilization of multispectral cameras integrated with UAVs, offering a foundation for conducting effective, non-invasive forest maintenance procedures. Various multi-rotor UAVs of different designs, including hexacopters and quadrocopters, have been deployed for flights conducted at various times of the year and day. UAV flights generate a certain amount of noise, prompting investigations into the measurements of sound intensity level. The primary objective of these noise measurements was to assess the risk of deterring the surveyed wildlife due to the sound generated by the unmanned aerial vehicles.

These research activities have been carried out in collaboration with the Czarna Białostocka Forest District (as a part of the Regional Directorate of State Forests in Białystok) and the Warsaw University of Technology, represented by the *Faculty of Power and Aeronautical Engineering*. The dissertation was completed as part of the Ministry of Education and Science's "Implementation Doctorate" programme. Throughout the research, geoinformation software programs such as Agisoft (utilized, for example, in the development of orthophoto maps and vegetation index maps) and QGIS (formerly known as Quantum GIS) used for the analysis of vegetation indices, CIR composition, and spatial analysis related to wildlife inventory were used. The dissertation concludes with insights derived from the analysis of acquired data. Additionally, the study includes elements associated with the optimization of multi-rotor UAV design and an examination of the communication range of the platform based on the type of terrain overflown, either forested or open areas.

Keywords: unmanned aerial vehicles, wildlife inventory, forest health assessment, forestry

Spis treści

1. WSTĘP	9
1.1 Wprowadzenie	9
1.2 Miejsce badań	11
1.2.1 Położenie geograficzne i wysokościowe.....	12
1.2.2 Wybrane cechy klimatu mające wpływ na bezpieczeństwo lotu UAV	13
1.2.3 Gatunki drzew występujące na terenie Nadleśnictwa Czarna Białostocka.....	15
1.3 Cel, teza i zakres pracy	17
1.3.1 Zadanie naukowe	17
1.3.2 Cele szczegółowe.....	17
1.3.3 Teza.....	18
1.4 Przegląd literatury.....	19
1.4.1 Charakterystyka zadań, które Bezzałogowy Statek Powietrzny (BSP) może realizować w leśnictwie	19
1.4.2 Istotne parametry kamery	32
1.4.3 Fizyka obserwacji termicznej w podczerwieni	35
1.4.4 Przegląd inwentaryzowanych gatunków zwierząt	37
2. Potrzeby funkcjonalne, ograniczenia technologiczne i wymagania dla połączenia struktury nośnej z kamerami multispektralną i termowizyjną.....	43
3. Ewolucja koncepcji typu platformy nośnej i zespołu napędowego	46
4. Wyznaczenie obciążeń kluczowych elementów platformy nośnej i zespołu napędowego	48
5. Proces projektowania i testowania systemu platformy i kamer.....	53
5.1 Testowanie kamery termowizyjnej.....	53
5.1.1 Inwentaryzowany obszar.....	53
5.1.2 Metodyka ¹ badań	54
5.2 Testowanie kamery multispektralnej.....	69
5.3 Pomiary natężenia dźwięku (dB) generowanego przez wielowirnikowiec.....	74
5.4 Badanie zasięgu łączności platformy	77
5.4.1 Testowanie zasięgu łączności platformy w terenie leśnym	78
5.4.2 Testowanie zasięgu łączności platformy w terenie otwartym	79
6. Wyniki.....	81
6.1 Weryfikacja użyteczności kamery termowizyjnej.....	81

6.1.1 Podsumowanie lotów jesiennych 2021 roku.....	81
6.1.2 Podsumowanie lotów zimowych 2022 roku	93
6.1.3 Podsumowanie lotów letnich 2022 roku.....	100
6.2 Weryfikacja użyteczności kamery multispektralnej.....	105
6.2.1 Podsumowanie lotów wiosennych 2022 roku.....	105
6.3 Pomiar natężenia dźwięku (dB) generowanego przez wielowirnikowiec.....	117
6.4 Wyniki zasięgu łączności platformy.....	123
6.4.1 Teren leśny.....	123
6.4.2 Teren otwarty	128
7. Narzędzie „xcopterCalc” jako pomoc przy szacowaniu parametrów lotu wielowirnikowca	130
8. Wnioski końcowe.....	135
9. BIBLIOGRAFIA	140
10. AKRONIMY.....	148
11. Załączniki.....	150

¹ w języku polskim istnieją 3 podobnie brzmiące rzeczowniki:

- a) metoda – sposób postępowania, świadomy i powtarzalny wybór działania; zespół celowych czynności i środków; sposób wykonywania zadania lub rozwiązania problemu; zespół ogólnych założeń badawczych, wytycznych w postępowaniu naukowym [43];
- b) metodyka – zbiór zasad dotyczących sposobów postępowania przy wykonywaniu pewnej pracy lub zmierzających do danego celu; niekiedy nazwa szczegółowych norm postępowania swoistego dla danej nauki [43];
- c) metodologia nauk – nauka o metodach badań naukowych, o sposobach dociekania ich wartości poznawczej [123].

1. WSTĘP

1.1 Wprowadzenie

Bezzałogowe statki powietrzne (BSP; UAV) są coraz powszechniej wykorzystywane w badaniach przyrodniczych. Wynika to z tego, że okazują się często bezpieczniejsze, tańsze i dają możliwość zaoszczędzenia czasu w porównaniu do załogowych statków powietrznych tradycyjnie używanych do inwentaryzacji przyrody [79, 138]. UAV mogą być również bardziej efektywne podczas badania trudno dostępnego terenu w porównaniu do badaczy przemieszczających się pieszo. Dane pochodzące z UAV są często dokładniejsze, natomiast samo pozyskanie danych może okazać się dużo mniej uciążliwe dla zwierząt, w porównaniu do tradycyjnej inwentaryzacji z ziemi [120, 28].

UAV były już wykorzystywane do różnych zadań, począwszy od lokalizacji gniazd aligatora amerykańskiego (*Alligator mississippiensis*) w Luizjanie [42], zapobiegaly również kłusownictwu słonia afrykańskiego (*Loxodonta africana*) w Kenii [8], wykorzystywane były również do badań dużych stad gęsi [27].

Wyposażenie UAV w kamery, które pracują poza zakresem widma światła widzialnego może zwiększyć użyteczność UAV podczas inwentaryzacji przyrody [26]. Misje UAV mogą być skuteczne pod warunkiem, że są przeprowadzane w sposób odpowiedzialny - naukowcy właściwie dobrali rozmiar, kształt, konfigurację samolotu oraz zwrócili uwagę na wysokość, prędkość, kierunek oraz granice lotu w taki sposób, aby zminimalizować stres dla dziko żyjących zwierząt [38, 54, 68, 79, 95, 112, 138]. Czasami nie jesteśmy w stanie określić poziomu stresu zwierząt jaki wywołaliśmy używając UAV, dlatego powinniśmy być w tym zakresie szczególnie ostrożni. Jak wykazali Ditmer i inni [37] niedźwiedzie czarne (*Ursus americanus*) reagują podwyższonym tętnem na dźwięk UAV przy jednoczesnym braku widocznych reakcji behawioralnych. Podczas planowania misji istotne są również ograniczenia prawne, które komplikują badania pod względem logistycznym [139].

Integracja platformy nośnej ze stabilizowanymi kamerami multi-spektralną i termowizyjną i badania eksperymentalne przy diagnozowaniu wybranego leśnego ekosystemu umożliwią tanią, zautomatyzowaną i bezpieczną diagnostykę zagrożeń. Umożliwiają również identyfikację ognisk wymagających natychmiastowej interwencji przeciw owadom - szkodnikom zagrażającym równowadze biologicznej (tu ważne jest wykorzystanie kamery multispektralnej) oraz pozwalają na bezinwazyjne oszacowanie stanu populacji zwierząt

bytujących w terenie leśnym (tu ważne jest wykorzystanie kamery termowizyjnej) przy minimalnym zagrożeniu hałasem i z pominięciem innych negatywnych zjawisk towarzyszących monitorowaniu środowiska leśnego.

Analizy działalności naukowej na rzecz rozwoju innowacyjności i gospodarki wskazują jednoznacznie, że temat rozprawy doktorskiej należy do priorytetowych kierunków badań podejmowanych obecnie w Unii Europejskiej i jest zgodny z dokumentem Flightpath 2050 w zakresie (1) Competitiveness; (2) Environment & Energy oraz (3) Resources.

Wykorzystanie kamer szczególnie w lasach liściastych jest obecnie bardzo ograniczone z uwagi na wysokie tłumienie listowia. Dlatego dobór kamer jest zagadnieniem wymagającym szczegółowych badań. Wysokość lotu i prędkość przemieszczenia się kamer nad koronami drzew oraz typ statku powietrznego (stałopłat lub multi-kopter) nie mogą być wybrane losowo. Zależą od warunków pogodowych, pory roku, temperatur, podmuchów, hałasu generowanego przez samolot bezzałogowy i wielu innych parametrów. Podobnie, zastosowany typ zespołu napędowego (silnik tłokowy, elektryczny, czy zespół ogni w paliwowych) musi uwzględniać charakter badanego ekosystemu, obecność rzadkich gatunków ptaków i ssaków oraz wymogi bezpieczeństwa lotu. Nie bez znaczenia są również możliwości bezpiecznego sterowania takim statkiem w warunkach ograniczonej widoczności i ograniczonego zasięgu systemu łączności. Tylko dobrze zaplanowane, przeprowadzone i podsumowane badania naukowe są w stanie wskazać najbardziej optymalne warunki do użytkowania bezzałogowych statków powietrznych. Bardzo istotnym aspektem takich badań jest także niski lub umiarkowany koszt, ich niezawodność i korzyści w odniesieniu do pracy tradycyjnej, prowadzonej przez obserwatorów pieszych.

Rozprawa skupiła się głównie na testach praktycznych zespołu latającej platformy nośnej i podwieszonych kamer (1) multi-spektralnej w celu jej optymalnego wykorzystania do monitorowania stanu drzewostanów, zarówno iglastych, jak i liściastych, zagrożonych przez szkodniki, ograniczoną wilgotność podłoża i warunki atmosferyczne oraz (2) termowizyjnej w celu jej optymalnego wykorzystania do szacowania stanu zagęszczenia zwierzyny grubej.

1.2 Miejsce badań



Rysunek 1 Siedziba Nadleśnictwa Czarna Białostocka [128]

Testy terenowe sprzętu prowadzone były na obszarze Nadleśnictwa Czarna Białostocka. Nadleśnictwo Czarna Białostocka znajduje się na terenie województwa podlaskiego. Położone jest na terenie następujących powiatów: białostockim (gminy: Czarna Białostocka, Wasilków) i sokólskim (gminy: Dąbrowa Białostocka, Janów, Korycin, Kuźnica, Nowy Dwór, Sidra, Sokółka i Suchowola). Nadleśnictwo podzielone jest na obręby leśne: Czarna Białostocka, Kumiałka i Złota Wieś, które podzielone są na 18 leśnictw. Siedziba Nadleśnictwa znajduje się w Czarnej Białostockiej [97].

Łączna powierzchnia Nadleśnictwa Czarna Białostocka równa się 26 041,00 ha. Jest ona większa niż przeciętna powierzchnia nadleśnictwa w Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Białymstoku (19,1 tys. ha) oraz większa od przeciętnej powierzchni nadleśnictw w kraju (15,9 tys. ha). Zasięg terytorialny, na którym działa Nadleśnictwo Czarna Białostocka wynosi około 159,6 km² [97]. Mapę zasięgu administracyjnego Nadleśnictwa Czarna Białostocka przedstawia Rysunek 2.

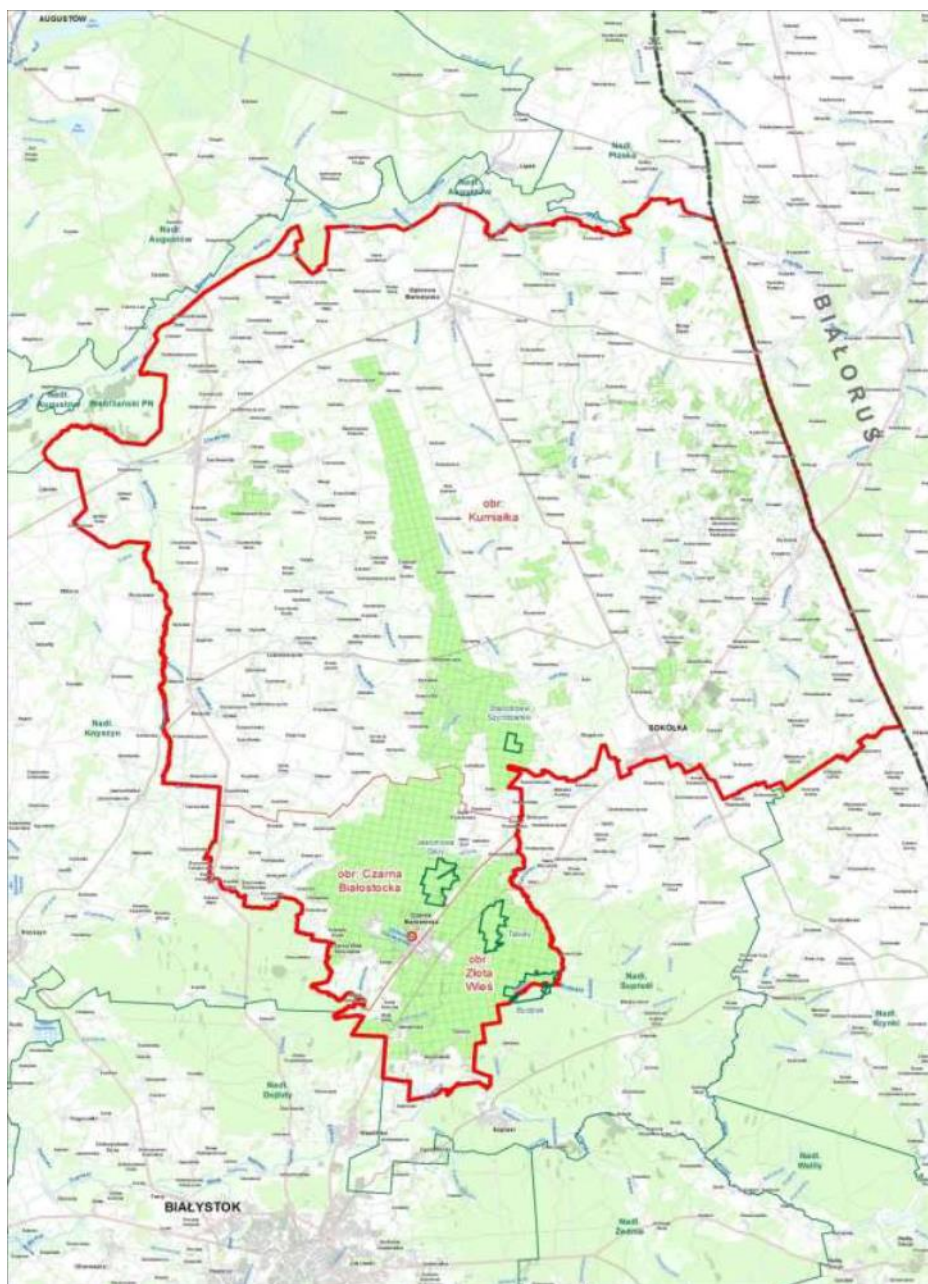
Nadleśnictwo Czarna Białostocka charakteryzuje się nieco mniejszą lesistością (około 26%) w porównaniu do ogólnej lesistości RDLP Białystok (ok. 28%) [97].

1.2.1 Położenie geograficzne i wysokościowe

Nadleśnictwo Czarna Białostocka znajduje się między $22^{\circ}58'$ a $23^{\circ}43'$ długości geograficznej wschodniej oraz między $53^{\circ}13'a$ $53^{\circ}42'$ szerokości geograficznej północnej.

Najwyższej położone miejsca w nadleśnictwie występują w oddziale 416 obrębu Kumiałka i osiągają one 241 m n.p.m. Różnice wysokości względnej dochodzą tu do 122 m, co jest charakterystyczne dla terenów nizinnych. Najniżej położone tereny znajdują się również w tym obrębie w oddziale 475, którego położenie obniża się do 119 m n.p.m..

Średnia wysokość w nadleśnictwie kształtuje się na poziomie ok. 160 m n.p.m [97].



Rysunek 2 Mapa zasięgu administracyjnego Nadleśnictwa Czarna Białostocka [97]

1.2.2 Wybrane cechy klimatu mające wpływ na bezpieczeństwo lotu UAV

Nad teren Puszczy Knyszyńskiej napływa kilka mas powietrza, które w połączeniu z warunkami naturalnymi, jakie panują na tym terenie, kształtują różne typy pogody. Zwykle dociera tutaj powietrze polarno-morskie (przez około 145 dni w roku). Wywołuje ono w zimie ocieplenie, co powoduje gwałtowne odwilże. Z drugiej strony w lecie przynosi pogodę chłodniejszą, wywołując ulewne opady połączone z burzami. W ciągu około 10% dni w roku dociera tutaj chłodne powietrze arktyczne, które powoduje zimą silne mrozy, wiosną i jesienią – przymrozki [97].

W ciepłych porach roku powietrze arktyczne w dzień nagrzewa się od dołu, co powoduje tworzenie się chmur kłębiastych. Natomiast powietrze zwrotnikowe pojawia się bardzo rzadko (5% dni w roku) - zwykle powodując w lecie pogodę gorącą z ulewnymi opadami. Klimat Nadleśnictwa Czarna Białostocka charakteryzuje się znacznymi cechami klimatu kontynentalnego, co uwidaczniają długości pór roku – długa zima (110 dni), oraz długie lato (90 dni) [97].

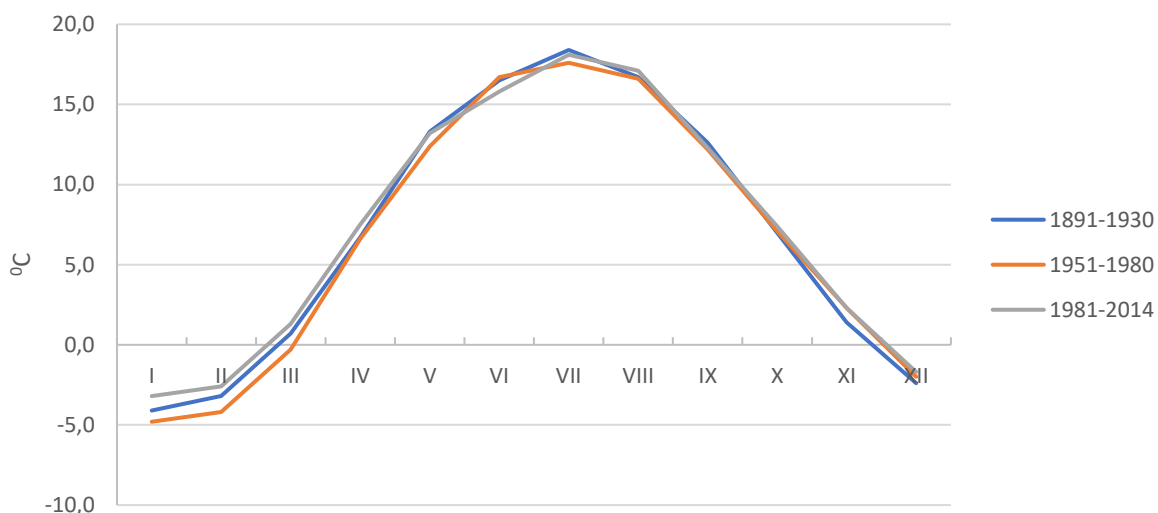
Temperatura powietrza

Średnia roczna temperatura w latach 1981-2014 wyniosła dla stacji w Białymstoku 7,3°C. W okresie letnim średnia temperatura lipca-sierpnia wynosi 17,1 - 18,1°C, podczas gdy w okresie zimowym średnia temperatura stycznia-lutego wynosi -2,6 do -3,2°C. Liczba dni mroźnych wynosi średnio 33, a dni z przymrozkami 78. Na omawianym obszarze dominuje pogoda ciepła, która trwa ponad 4 miesiące w roku. W Polsce północno-wschodniej okres ze średnią dobową temperaturą poniżej zera jest najdłuższy w ciągu roku w odniesieniu do nizinnej części kraju [97].

Tabela 1 Temperatura powietrza (°C) w Białymstoku [97]

Miesiąc (okres)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	w okresie wegetacyjnym V-IX	średnio rocznie
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Białystok (1891-1930)	-4.1	-3.2	0.7	6.7	13.3	16.5	18.4	16.7	12.6	7.0	1.4	-2.4	15.5	7.0
Białystok (1951-1980)	-4.8	-4.2	-0.3	6.6	12.4	16.7	17.6	16.6	12.2	7.1	2.3	-2.0	15.1	6.7
Białystok (1981-2014)	-3.2	-2.6	1.3	7.5	13.2	15.8	18.1	17.1	12.3	7.4	2.3	-1.7	15.3	7.3

Rysunek 3 przedstawia średnią miesięczną temperaturę powietrza w stacji meteorologicznej w Białymstoku w wybranych przedziałach czasowych.



Rysunek 3 Średnia miesięczna temperatura powietrza w stacji meteorologicznej w Białymstoku w wybranych przedziałach czasowych (na podstawie [97])

Należy również dodać, że w ciągu ostatnich kilku lat zaobserwowano wiele gwałtownych zjawisk atmosferycznych, powszechnie uważanych za konsekwencje ocieplenia klimatu, którego powodem jest wzrost stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze (np. dwutlenku węgla) spowodowany działalnością człowieka. Z uwagi na brak uznanych badań naukowych ten temat nie będzie dalej rozwijany.

Zachmurzenie i dni słoneczne

Okres słoneczny jest tutaj krótszy niż przeciętny w Polsce. Średnia roczna liczba godzin o pełnym nasłonecznieniu wynosi 4 godziny 24 minuty dziennie. Największe nasłonecznienie występuje w lipcu (ok. 8 godzin 24 minut dziennie), najniższe natomiast w grudniu (54 minuty). Liczba dni słonecznych równa się około 40 w ciągu roku. Liczba dni pochmurnych wynosi zaś około 130 [97].

Wiatry

Wiatry są istotnym elementem klimatu, wpływającym na bezpieczeństwo lotu UAV. Wiatr opisywany jest głównie ze względu na przeważający kierunek oraz prędkość. Średnia prędkość wiatru na stacji w Białymstoku to 2,8 m/s. Jest to najniższa średnia prędkość na terenie województwa podlaskiego.

Maksymalna rzeczywista prędkość wiatru w porywach, jaka odnotowana została na stacji synoptycznej w Białymstoku wynosiła 30 m/s. Najniższa średnia miesięczna przypada na sierpień, a maksymalna na styczeń. Na obszarze Puszczy Knyszyńskiej przeważają wiatry

sektora zachodniego (SW, NW – do 55%). Są to również wiatry, które osiągają największe prędkości. Udział wiatrów sektora wschodniego stanowi około 27%. Średnia prędkość wiatru wynosi od około 2,1 m/s w okresie letnim do 3,2 m/s w zimie [97].

Tabela 2 Średnia prędkość wiatru w km/h w układzie miesięcznym dla stacji w Białymstoku (na podstawie [97])

Miesiąc (okres)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	średnio rocznie
Białystok (1981-2014)	10.8	10.4	10.2	9.2	8.2	7.9	7.1	6.6	7.4	8.7	10.2	10.1	8.9

1.2.3 Gatunki drzew występujące na terenie Nadleśnictwa Czarna Białostocka

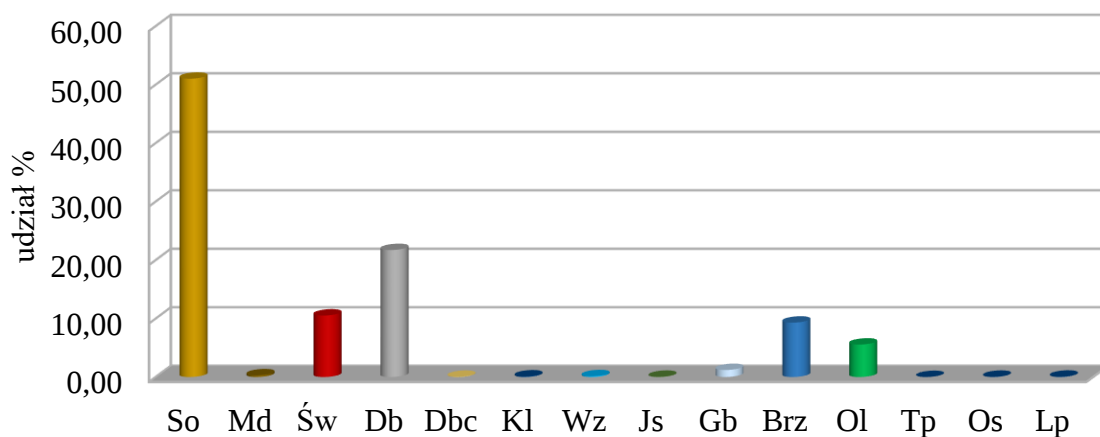
Najważniejszym gatunkiem tworzącym drzewostany w nadleśnictwie jest sosna stanowiąca 51,01% powierzchni. Świerk zajmuje 10,52%. Z gatunków liściastych dominuje dąb (21,71%), brzoza zajmuje 9,30%, natomiast olcha 5,55% powierzchni [97].

Należy zwrócić uwagę, że korony różnych gatunków drzew w różnym stopniu przepuszczają promieniowanie. Zależy to nie tylko oczywiście od konkretnego gatunku, ale również od jego wieku, stanu zdrowotnego, stopnia zadrzewienia drzewostanu oraz pory roku. Wszystkie powyższe cechy mają wpływ na skuteczność wykrywania zwierzyny, przy pomocy kamery termowizyjnej, przemieszczającej się pod okapem drzew.

W Tabeli 3 i na Rysunku 4 zastosowano następujące oznaczenia: So – sosna, Md – modrzew, Św - świerk, Db – dąb, Dbc- dąb czerwony, Kl – klon, Wz – Wiąz, Js – jesion, Gb – grab, Brz – brzoza, Ol – olcha, Tb – topola, Os – osika, Lp – lipa.

Tabela 3 Udział powierzchniowy gatunków panujących w drzewostanach w Nadleśnictwie Czarna Białostocka (grunty zalesione) [97]

Gatunek	Obręb						Nadleśnictwo	
	Czarna Białostocka		Kumiałka		Złota Wieś			
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
So	2919.75	44.73	5276.67	45.71	4388.86	66.56	12585.28	51.01
Md	2.78	0.04	69.71	0.60	-	-	72.49	0.29
Św	855.79	13.10	1034.00	8.96	704.45	10.68	2594.24	10.52
Db	1150.70	17.62	3702.18	32.06	503.26	7.63	5356.14	21.71
Dbc	-	-	9.35	0.08	-	-	9.35	0.04
Kl	21.88	0.34	-	-	3.23	0.05	25.11	0.10
Wz	33.57	0.51	-	-	-	-	33.57	0.14
Js	6.04	0.09	4.28	0.04	-	-	10.32	0.04
Gb	117.83	1.80	148.82	1.29	29.26	0.44	295.91	1.20
Brz	1056.83	16.18	850.17	7.36	387.98	5.88	2294.98	9.30
Ol	363.85	5.57	442.53	3.83	564.10	8.55	1370.48	5.55
Tp			0.51	0.00	-	-	0.51	0.00
Os	1.48	0.02	7.84	0.07	-	-	9.32	0.04
Lp	-	-	-	-	13.96	0.21	13.96	0.06
Razem	6530.50	100.00	11546.06	100.00	6595.10	100.00	24671.66	100.00



Rysunek 4 Procentowy udział powierzchni gatunków panujących w Nadleśnictwie Czarna Białostocka (na podstawie [97])

1.3 Cel, teza i zakres pracy

Niniejsza rozprawa skupi się na testach praktycznych zespołu latającej platformy nośnej z kamerą termowizyjną oraz multi-spektralną w celu optymalnego wykorzystania w leśnictwie - wykrywania zwierzyny grubej oraz monitorowania stanu drzewostanów zagrożonych przez szkodniki.

O znaczeniu doboru wysokości i prędkości lotu, typy statku powietrznego, typu napędu oraz systemu sterowania w warunkach ograniczonej widoczności wspomniano już w punkcie 1.1 rozprawy. Zagadnienia te będą rozwijane w dalszej części pracy.

1.3.1 Zadanie naukowe

Głównym zadaniem naukowym do rozwiązania jest zbadanie i zoptymalizowanie struktury nośnej zespołu platforma nośna – sensor w zawieszeniu typu gimbal, zdefiniowanie i eksperymentalne potwierdzenie możliwości wykorzystania specjalistycznych kamer w ekosystemach leśnych do takich celów jak wykrywanie zwierzyny (za pomocą kamery termowizyjnej) oraz badanie stanu zdrowotnego lasu (przy użyciu kamery multispektralnej). Ważne jest również zapewnienie wymaganej przepisami EASA wytrzymałości, stateczności i sterowności całego zespołu platformy nośnej.

1.3.2 Cele szczegółowe

Na cele szczegółowe składają się następujące punkty:

- Zbadanie wpływu zmian konfiguracji platformy (inaczej – badanie wrażliwości) na stateczność statyczną, dynamiczną, zasięg łączności i hałas w wybranym ekosystemie leśnym. Wytypowanie konfiguracji platformy nośnej i zespołu napędowego oraz specjalistycznych kamer;
- Wyznaczenie obciążeń aerodynamicznych platformy nośnej oraz wybór przepisów według zaleceń EASA, które bezzałogowa platforma będzie musiała spełnić;
- Wyznaczenie parametrów lotu zapewniających możliwie optymalne wykorzystanie specjalistycznych kamer przy jednoczesnym bezpiecznym prowadzeniu lotu nad drzewostanami w warunkach ograniczonej widoczności oraz przestrzeganiu obecnie obowiązujących przepisów dotyczących użytkowania bezzałogowych statków powietrznych;
- Wybór i zakup kamer oraz ich integracja z platformą nośną;

- Wykonanie testów działania platformy i kamery w wytypowanym ekosystemie. Badanie wpływu wysokości lotu i prędkości przemieszczania się platformy nad koronami drzew, warunków pogodowych, pory roku i temperatur na użyteczność pozyskanych materiałów;
- Rejestracja hałasu generowanego przez statek bezzałogowy za pomocą mikrofonów rozstawionych na ziemi.

1.3.3 Teza

W pracy postawione zostały dwie tezy badawcze:

1. Wykorzystanie nowoczesnego podejścia do analizy stanu zdrowotnego drzewostanów oraz integracji kamery multispektralnej z kadłubem dadzą podstawę do przeprowadzania skutecznych zabiegów pielęgnacyjnych w lasach (cięć o charakterze sanitarnym), opartych na wiedzy i nowoczesnej, bezinwazyjnej technologii;
2. Wykorzystanie kamer termowizyjnych zagregowanych z UAV daje podstawę do skutecznej analizy stanu zagęszczenia zwierzyny grubej, do której należą: łoś euroazjatycki (*Alces alces*), jeleń szlachetny (*Cervus elaphus*), sarna europejska (*Capreolus capreolus*) oraz dzik euroazjatycki (*Sus scrofa*).

1.4 Przegląd literatury

1.4.1 Charakterystyka zadań, które Bezzałogowy Statek Powietrzny (BSP) może realizować w leśnictwie

Szacowanie liczebności zwierzyny grubej występującej na terenach leśnych

Bezzałogowy Statek Powietrzny wraz z odpowiednio dobraną kamerą może posłużyć do szacowania stanu liczebnego zwierzyny w lesie oraz na terenach przyległych. Potencjalnie wykorzystanie BSP z odpowiednią kamerą termowizyjną może zastąpić tradycyjną metodę liczenia zwierzyny zwaną metodą pędzeń próbnych, do której potrzeba zaangażowania zdecydowanie większej liczby osób (50-70 osób) w porównaniu do wykonania nalotu nad określonym obszarem (jeden operator oraz ewentualnie jeden lub dwóch obserwatorów). W trakcie inwentaryzacji zwierzyny z lotu ptaka należy zwrócić uwagę na pewne problemy, które z tego wynikają, w tym na ryzyko podwójnego liczenia, błędy percepcji oraz błędne identyfikacje [22].

Czytelność termogramów

W przypadku wykrywania zwierzyny przy użyciu kamery termowizyjnej bardzo ważną rzeczą, na którą należy zwrócić uwagę jest czytelność rejestrowanych termogramów. Na jakość pozyskiwanych termogramów wpływ ma zarówno pora roku, jak i pora dnia wykonania nalotu. Zgodnie z badaniami prowadzonymi przez Konsorcjum badawcze, którego Liderem była Firma Taxus SI [101] pod względem czytelności i kontrastu termalnego sygnatury cieplne zwierząt zarejestrowane latem nie odbiegają istotnie od tych nagranych zimą. Podczas badań z powodzeniem rejestrowano zwierzynę nie tylko na większych otwartych obszarach, jak pola i łąki, ale również na terenach leśnych, jak niewielkie polany i zręby oraz częściowo również pod okapem drzewostanu. Może to być spowodowane tym, że zwierzyna latem posiada szatę o mniejszych właściwościach termoizolacyjnych, co ma pozytywny wpływ na wykrywalność. Zimą szata natomiast skutecznie ogranicza promieniowanie widoczne w oku kamery. Dodatkowo w ciepłych porach roku zwierzyna częściej przebywa na terenach otwartych, przylegających do lasu, co może skutkować jej większą wykrywalnością. Z drugiej strony w okresie letnim występujące listowie drzewostanu oraz podszytu mogą ograniczyć możliwość detekcji zwierzyny [100]. Na czytelność termogramów ma również wpływ silny wiatr, który nie tylko znacznie utrudnia wykonanie lotów, ale również obniża temperaturę ciała zwierząt obniżając kontrast termalny, co utrudnia wykrycie sygnatur na zdjęciach i filmach termowizyjnych [91]. Trzeba zwrócić uwagę, że do wykrywania zwierzyny rozkład

temperatury całego ciała zwierzęcia nie musi być mierzony bardzo dokładnie. Wystarczy, jeżeli zwierzęta będą widoczne jako gorące plamy na tle chłodniejszego otoczenia [31].

Wpływ na kontrast termalny pomiędzy zwierzyną a otoczeniem ma także pora doby wykonania nalotu. Okrama [88] zaobserwował, że nawet w przypadku występowania ujemnych temperatur przy dnie lasu, podczas słonecznej pogody może wystąpić efekt maskujący rozgrzanych koron, który znacznie utrudnia możliwość identyfikacji oraz rozpoznania zwierząt. Dahlen i inni [32] zauważyli natomiast, że prawdopodobieństwo wykrycia dużych zwierząt na obszarach leśnych (np. orangutanów) przed wschodem słońca jest większe. Powodem jest większa różnica pomiędzy temperaturą otoczenia a temperaturą emitowaną przez zwierzęta, co skutkuje większym kontrastem termalnym. Natomiast podczas wczesnych wieczorów, 3 – 4 godziny po zachodzie słońca, korony drzew były jeszcze wystarczająco nagrzane, aby emitować sygnały ciepłe, co powodowało trudności w obserwacji zwierząt. Były one jednak w tym wypadku stosunkowo łatwe do zidentyfikowania. Israel i Reinhard [64], zaobserwowali problem związany z rejestrowaniem fałszywych źródeł ciepła takich jak skały lub szybko nagrzewający się grunt, mogący utrudnić wykrywanie jaj ptaków w ciągu dnia.

Przewaga kamer termowizyjnych nad kamerami wizyjnymi RGB

Wykrywanie (liczenie) zwierzyny przy użyciu kamer wizyjnych (RGB) przymocowanych do UAV może być efektywne podczas wykrywania zwierząt żyjących na otwartych, jednorodnych terenach, gdzie zwierzęta nie są ukryte pod pokrywającą teren roślinnością [24].

Chretien, Theau i Menard [29] testowali szereg automatycznych systemów do wykrywania zwierząt (jeleni, łosi, żubrów i wilków) za pomocą kamery dualnej (RGB oraz TIR). Podobnie jak Israel i Reinhard [64] zauważyli, że kamera termowizyjna wykrywa zwierzęta znacznie dokładniej niż kamera RGB.

Wykorzystanie kamery termowizyjnej (TIR) zwiększa potencjał dronów w badaniach związanych z wykrywaniem zwierzyny, dzięki rejestrowaniu przez kamerę światła, które emitowane jest bezpośrednio przez zwierzęta (źródła ciepła), a nie jak w przypadku rejestracji światła widzialnego, które jest odbijane od obiektów. Warunkiem wykorzystania kamery termowizyjnej jest to, aby temperatura powierzchni zwierzęcia była cieplejsza niż otoczenie (występowanie kontrastu termalnego) [78]. Kamery termowizyjne mogą być używane zarówno za dnia, jak i w nocy, w przeciwieństwie do kamer RGB, które nocą są nieużyteczne.

Optymalizacja wysokości lotu

Burke i inni [24] opracowali narzędzie, które może okazać się pomocne podczas szacowania wymaganej wysokości lotu, która zależy od zastosowanego kąta widzenia kamery, zastosowanego odchylenia kamery, długości ciała inwentaryzowanego gatunku oraz wymaganej liczby pikseli, na których chcemy zarejestrować długość zwierzęcia. Narzędzie jest dostępne w Internecie [86].

Burke i inni [24] uważają, że wystarczająca liczba pikseli, która powinna rejestrować średnicę obiektu (np. długość) powinna wynosić przynajmniej 10 pikseli. Natomiast Brunton i inni [23] polecają, aby wielkość ta wynosiła nawet od 10 do 20 pikseli. Trzeba pamiętać przy tym, że zbyt niska wysokość lotu może utrudniać wiarygodną inwentaryzację zwierząt (ryzyko płoszenia zwierzyny). Niższa wysokość lotu sprawia również, że czas misji się wydłuża. Nie należy zatem za wszelką cenę dążyć do tego, aby pozyskany materiał był jak największej jakości. Jakość pozyskanego materiału powinna być wystarczająca do wykrycia oraz oznaczenia gatunku.

Problem z analizą dużej liczby danych

Pewnym problemem związanym z inwentaryzacją zwierząt przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej przymocowanej do UAV, który wskazują badacze zajmujący się tym zagadnieniem [25, 84, 140] jest duża liczba pozyskanych danych. W związku z tym identyfikacja zwierząt przez osobę ręcznie analizującą pozyskany materiał jest metodą bardzo czasochłonną. Cały czas jednak samodzielna analiza pod względem wiarygodności przewyższa zwykle opracowywane algorytmy automatyzujące tę pracę [74]. Do czynników utrudniających automatyczną detekcję zwierząt z wykorzystaniem kamer termowizyjnych należą m.in. brak jednolitej jasności sylwetek rejestrowanych zwierząt oraz występowanie niekiedy zwierząt w zwartej grupie co prowadzi do tego, że sylwetki zwierząt mogą się nawzajem pokrywać [98].

Próby automatycznego wykrywania zwierząt były podejmowane wielokrotnie [29, 30, 52, 63, 64, 75, 122]. Badania te stanęły przed poważnymi wyzwaniami związanymi z wykrywaniem obiektów emitujących ciepło oraz odróżnianiem zwierząt od tzw. fałszywej detekcji (cieplejszych obiektów niebędących zwierzętami). Pewne sukcesy w zautomatyzowanym wykrywaniu zwierząt przy użyciu kamer termowizyjnych zagregowanych z UAV odnotowali m.in. Seymour i inni [122]. Dość duży sukces badaczy wynikał z tego, że inwentaryzowana powierzchnia nie posiadała bujnej roślinności jak w przypadku badań prowadzonych w ramach

tej pracy. Drugim powodem było kolonijne występowanie gatunku – badacze wykonując nalot nad kolonią fok mieli świadomość, że inwentaryzują prawie całą populację występującą na danym terytorium.

Istnieją inne metody wykrywania zwierząt wykorzystujące kamery lub aparaty fotograficzne, jak na przykład fotopułapki [58, 67, 76]. Nie ma jednej uniwersalnej techniki do inwentaryzacji wszystkich większych zwierząt w tym samym ekosystemie. Poszczególne gatunki różnią się chociażby zwyczajami, które powinno się uwzględnić w trakcie prowadzenia prac [51].

Tradycyjny sposób szacowania zwierzyny, tzw. pędzenia próbne

Metoda pędzeń próbnych polega na policzeniu zwierząt przepędzonych z otoczonych obserwatorami fragmentów lasu. Jej teoretyczna koncepcja opiera się na zasadzie wyłowu całkowitego poprzez wypędzenie zwierząt z powierzchni. Schemat rozstawienia obserwatorów uczestniczących w pędzeniu na powierzchni próbnej przedstawia Rysunek 5.

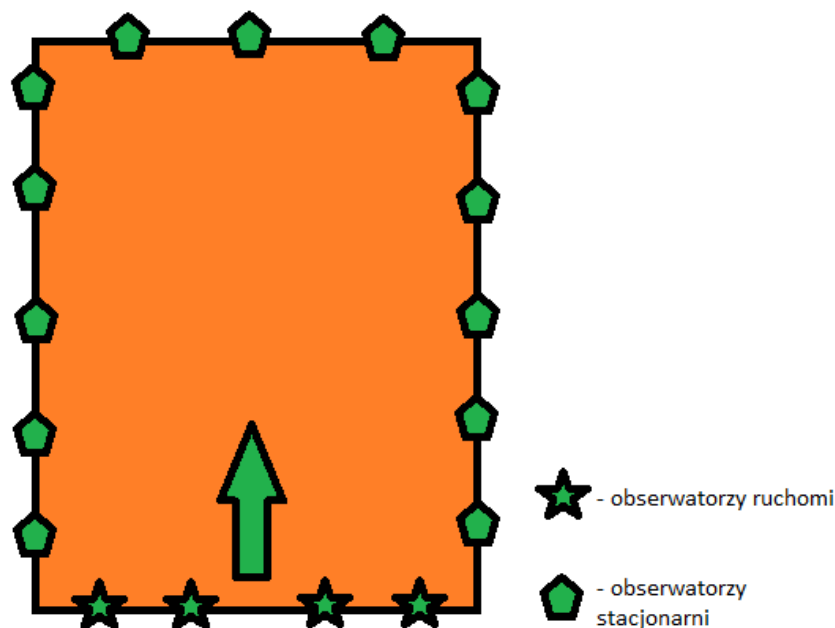
Metoda polega na systematycznym lub losowym wyborze powierzchni próbnych. Zgodnie z zaleceniami, aby osiągnąć wynik o wystarczającej dokładności ogólna powierzchnia obszaru objętego pędzeniami powinna wynosić nie mniej niż 10 % obszaru objętego szacowaniem [89]. Metoda ta należy do bezpośredniego (gdyż liczymy zwierzęta bezpośrednio) i bezwzględnego (gdyż otrzymany wynik możemy odnieść do jednostki powierzchni) sposobu liczenia zwierzyny. Metoda ta oprócz korzyści wynikającej z tego, że mamy dużą pewność, że policzone zostały wszystkie osobniki na inwentaryzowanej powierzchni posiada również wady.

Główne wady związane z pędzeniami próbnymi to:

- a) trudności organizacyjne – do tego rodzaju pracy należy zaangażować od 50 do 70 osób;
- b) duże odchylenia od średniej i niska dokładność w przypadku populacji o skupiskowym rozmieszczeniu osobników – co może prowadzić zarówno do prób z wysokim zagęszczeniem osobników, jak i pojawiania się prób „pustych” – bez żadnych osobników.

Największą korzyścią przemawiającą za wykorzystaniem do inwentaryzacji zwierzyny nowoczesnych rozwiązań, do których należy BSP z odpowiednią kamerą jest to, że pozbywamy się problemów natury organizacyjnej. Pracę można wykonać w zespole 1-2 osobowym – operator UAV oraz ewentualnie obserwator. Pewnym problemem, który za to się pojawia jest konieczność przemyślanego zaplanowania miejsc startu oraz tras nalogu, w taki sposób, aby

zapewnić stałą transmisję danych pomiędzy bezzałogowym statkiem powietrznym, a aparaturą sterującą znajdującą się na ziemi.



Rysunek 5 Schemat rozmieszczenia obserwatorów uczestniczących w pędzeniu na powierzchni próbnej (opracowanie własne na podstawie [89])

Opracowanie materiału do aktualizacji Leśnej Mapy Numerycznej – Ortofotomapy

BSP wraz z kamerą z powodzeniem może być wykorzystywany do dostarczania informacji o zmianach powstałych na skutek prowadzenia gospodarki leśnej. Źródłem takiej informacji jest zwykle ortofotomapa powstała w wyniku złożenia zdjęć wykonanych podczas nalotu nad obszarem zrębowych, czy też większą powierzchnią, na przykład całym oddziałem. Powstały obraz jest kartometryczny (możliwe jest na jego podstawie przeprowadzenie pomiarów), co daje możliwość do wykorzystania go podczas aktualizacji warstw leśnej mapy numerycznej (LMN). Przy użyciu widoku z wysokości 100 – 150 metrów AGL można z łatwością zainwentaryzować powierzchnie nie stanowiące wydzielenia (PNSW) takie jak kępy, bagna, luki, jak również zmierzyć ich powierzchnie czy skontrolować powierzchnie zrębu lub powierzchnie przeznaczoną do odnowienia [66].

Opracowaną ortofotomapę można wykorzystać również do weryfikacji przebiegu granic wydzieleń taksacyjnych (różnica wieku sąsiadujących drzewostanów, wysokości, odmienna struktura gatunkowa lub inny sposób użytkowania gruntu), lokalizację oraz przebieg w terenie infrastruktury liniowej lub kubaturowej [66].

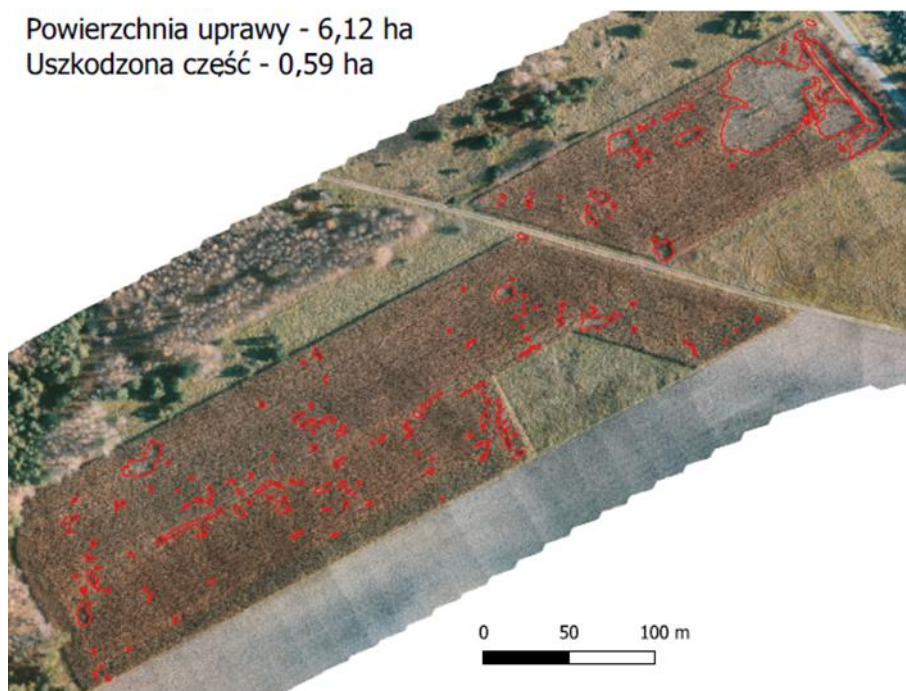
Wykorzystanie ortofotomapy wykonanej na podstawie zdjęć uzyskanych dzięki BSP daje gwarancję zinwentaryzowania wszystkich elementów występujących na powierzchni bez możliwości ich przeoczenia. Wszystko to sprawia, że ortofotomapa wykorzystywana jako podkład do aktualizacji warstw wektorowych LMN jest bardzo dobrym materiałem, który przyspiesza cały proces oraz poprawia dokładność aktualizacji [66]. Dodatkowo, jak wynika z badań przeprowadzonych przez Brach i inni [21] wykorzystanie relatywnie tanich BSP wraz z odpowiednim oprogramowaniem do generowania ortofotomap gwarantuje wystarczająco dokładne opracowanie. Co ważne, ortofotomapa może być wykorzystana nie tylko do ewidencjonowania planowanych zadań gospodarczych, ale również do inwentaryzacji zjawisk klęskowych, jak np. huragany. Rysunek 6 przedstawia ortofotomapę, na której pokazane są miejsca z intensywnie wydzielającym się posuszem sosnowym. Celem misji fotogrametrycznej jest uzyskanie jak najwyższej jakości materiału fotograficznego gwarantującego wysokiej jakości ortofotomapę, o czym decyduje stabilność lotu statku powietrznego oraz jego zdolność do utrzymania zaplanowanej wysokości i trasy lotu. Dlatego istotne jest, aby nie występowały odchylenia trajektorii lotu od zaplanowanej wcześniej trasy [111, 144].



Rysunek 6 Fragment ortofotomapy przedstawiającej miejsca intensywnie wydzielającego się posuszu sosnowego (uszkodzenia oznaczone szrafem koloru pomarańczowego)

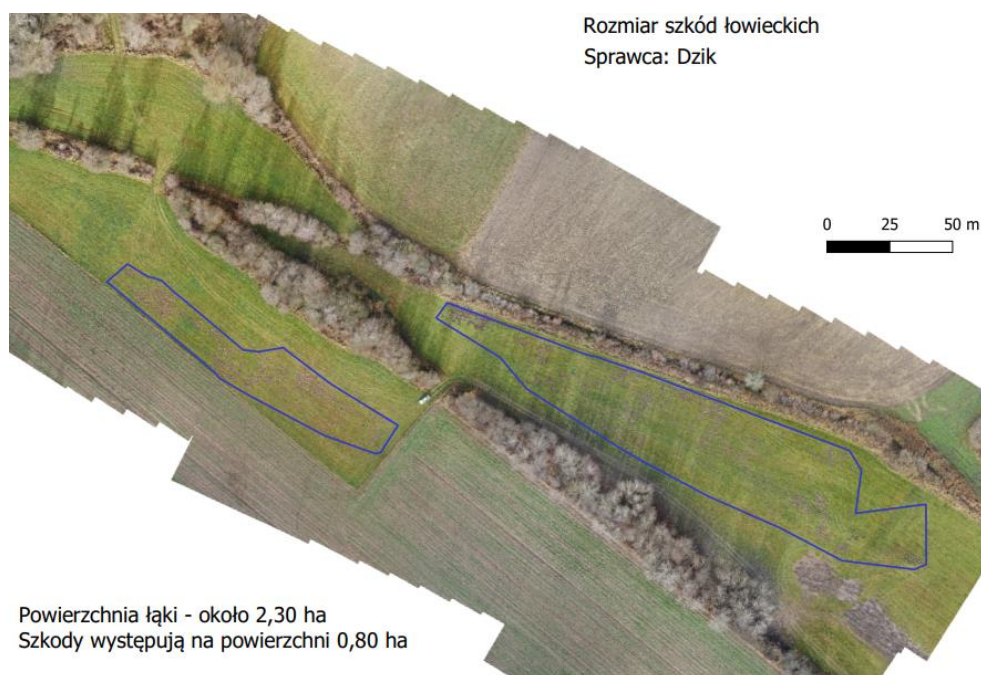
Szacowanie szkód łowieckich powodowanych przez zwierzynę

Powierzchnia uprawy - 6,12 ha
Uszkodzona część - 0,59 ha



Rysunek 7 Ortofotomapa, wykonana dzięki zdjęciom pozyskanym z UAV, przedstawiająca uprawę kukurydzy, na której pomierzono uszkodzoną powierzchnię (uszkodzenia są oznaczone jako czerwone plamy – ślady przejścia zwierzyny)

Kolejnym możliwym wykorzystaniem dronów w Lasach Państwowych jest szacowanie szkód powodowanych przez zwierzynę łowną. Wykorzystanie UAV daje możliwość wykonania szybkiego pomiaru zniszczonej powierzchni. Rysunek 7 przedstawia uprawę kukurydzy zniszczoną przez jelenie szlachetne. Na Rysunku 8 można zobaczyć wyniki pomiaru buchtowiska, którego sprawcą jest dzik euroazjatycki.



Rysunek 8 Ortofotomapa, wykonana dzięki zdjęciom pozyskany z UAV, przedstawiająca łąkę, na której pomierzono uszkodzoną powierzchnię (uszkodzona powierzchnia została oznaczona niebieską obwódką)

Uzyskany materiał stanowi również niepodważalny dowód przedstawiający wielkość powstałych szkód. Jest to szczególnie istotne biorąc pod uwagę rolę Lasów Państwowych jako instytucji odwoławczej rozstrzygającej spory pomiędzy rolnikami a kołami łowieckimi.



Rysunek 9 Zdjęcie przedstawiające uprawę kukurydzy, która w dużym stopniu została uszkodzona przez zwierzynę – można zobaczyć, że część uprawy została wydeptana – obszar sprawiający wrażenie mgły oznacza, że widzimy ziemię (uszkodzona powierzchnia zaznaczona została czerwony okręgiem)

Inwentaryzacja zjawisk kłęskowych – ochrona lasu

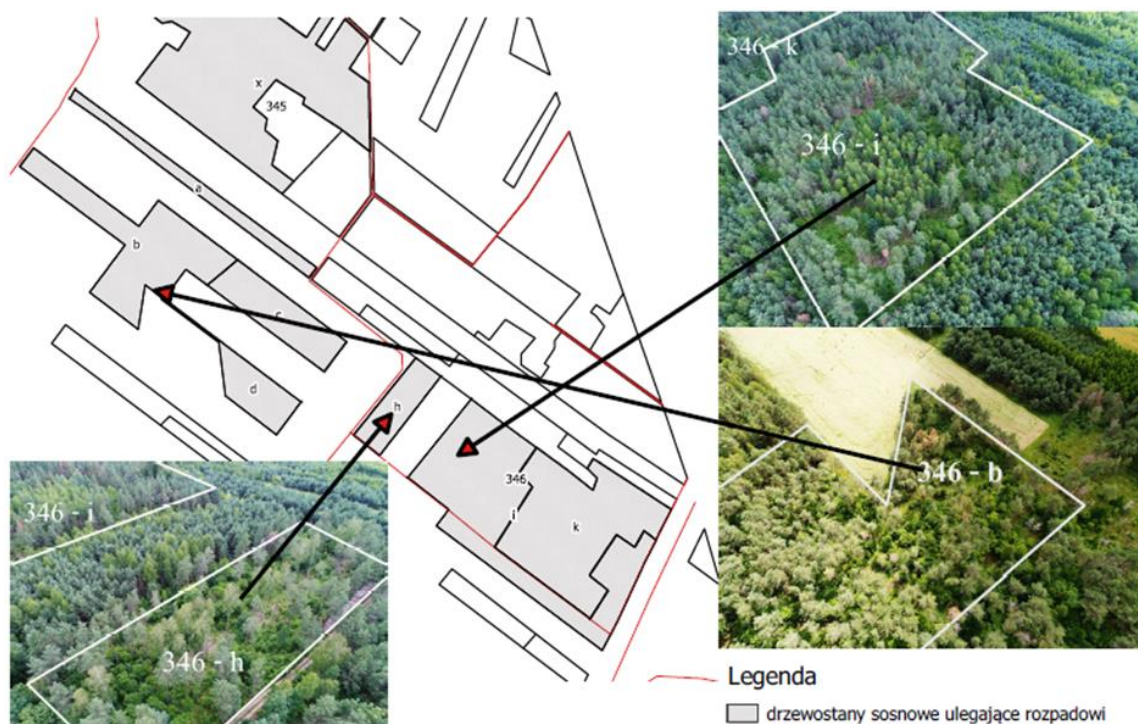
Kolejnym zadaniem do jakiego może zostać użyty Bezzałogowy Statek Powietrzny jest określenie miejsc, które zostały dotknięte szkodami abiotycznymi (czyli spowodowanymi przez nieożywione elementy środowiska[43]) i/lub biotycznymi (czyli spowodowanymi przez żywe organizmy[43]), a także wytypowanie powierzchni o obniżonej kondycji zdrowotnej. Drzewa uschnięte są wyraźnie widoczne na zdjęciach RGB i dość łatwo je zidentyfikować. Przykład martwych drzew dobrze widocznych na zdjęciu RGB przedstawia Rysunek 10. Natomiast przeszukiwanie drzewostanów, które atakowane są przez szkodniki owadzie, posiadających zieloną koronę wymagają zakupu kamery rejestrującej podczerwień. Stwarza to szansę na znalezienie miejsc z obniżoną kondycją zdrowotną [66].



Rysunek 10 Fragment zdjęcia, na którym wyraźnie widać uschnięte drzewa (czerwonym okręgiem zaznaczono przykładowe martwe drzewa widoczne na fotografii)

Pewien potencjał w określaniu stanu zdrowotnego roślinności istnienie również w wykorzystaniu kamer termowizyjnych. Sagan i inni [119] prowadzili badania związane z testowaniem oraz ocenieniem potencjału kamer termowizyjnych w zakresie monitorowania stresu roślinnego, określania fenotypów (soja, sorgo) oraz wykrywania roślin cierpiących na niedobór wody. Podczas gdy zapewniona jest wystarczająca ilość wody, rosnące temperatury powodują zwiększone przewodzenie aparatu szparkowego (struktury roślinnej, która ma za zadanie prowadzenie wymiany gazowej pomiędzy tkankami wewnątrz rośliny a atmosferą

[43]), wzmagając parowanie wody, co powoduje zwiększone chłodzenie transpirujących liści [134]. Stres wodny zmniejsza transpirację liści, co w konsekwencji podwyższa temperaturę listowia [45, 118, 135] – zamknięcie aparatu szparkowego powoduje zmniejszenie parowania wody z liści, co ogranicza rozpraszanie ciepła.



Rysunek 11 Materiał opracowany na potrzeby inwentaryzacji drzewostanów sosnowych ulegających rozpadowi na gruntach porolnych. W tym konkretnym przypadku głównym powodem rozpadu była huba korzeniowa

Badania związane z wykorzystaniem kamer termowizyjnych do określania stanu wody w uprawach rolnych prowadzili również Park i inni [93]. Stwierdzili oni, że obrazowania TIR w połączeniu z niewielką liczbą danych naziemnych mogą być wykorzystane do szacowania stanu wody w skali całego pola.

Maimaitijiang i inni [77] wykazali na przykładzie soi, że jednocześnie wykorzystanie danych termicznych oraz wielospektralnych zapewnia najlepsze wyniki podczas szacowania stężenia azotu i zawartości Chlorofilu A, podczas gdy zdjęcia termiczne wraz z danymi pochodzącymi z kamery RGB uznano za najlepszy sposób do określenia ilości biomasy oraz wskaźnika pokrycia liściowego (LAI).

Roślinność może być badana zdalnie poprzez obliczanie indeksów wegetacyjnych przy użyciu zdjęć satelitarnych lub lotniczych. Przykładem indeksu wegetacyjnego jest Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Jest to najpowszechniej wykorzystywany indeks

wegetacyjny [36, 72, 83, 96, 125, 137]. Wskaźniki kondycji roślinności są to równania matematyczne, które składają się na sumy, różnice, ilorazy lub iloczyny wielkości odbitego promieniowania zarejestrowanego w poszczególnych kanałach spektralnych.

Aby uzyskać wydajniejsze rozróżnianie w porównaniu do pierwotnie wykorzystywanego NDVI, Enhanced Normalized Difference Vegetation Index (ENDVI) opracowany przez Firmę Llewellyn Data Processing [44] wykorzystuje trzy kanały spektralne (NIR, B i G). Używając zarówno NIR jak i kanału zielonego G, indeks uwypukla wartość odbicia chlorofilu przez zsumowanie wartości odbicia w kanale NIR oraz kanale zielonym [44]. Gitelson i inni [50] wykazali, że zielony kanał wykazuje większą wrażliwość na stężenia chlorofilu niż kanał czerwony. Dodatkowo ze względu na zwiększoną amplitudę absorpcji promieniowania w zakresie niebieskim (zdrowa a chora roślinność) wykorzystanie tego kanału w równaniu ma potencjał do wzmocnienia wartości zarejestrowanej absorpcji chlorofilu [130]. Tabela 4 przedstawia przykłady wskaźników wegetacyjnych.

Do sprawnego zorientowania się w stanie zdrowotnym lasu posłużyć mogą również kompozycje barwne. Kompozycje barwne mogą być wykorzystywane w celu wyeksponowania określonych cech krajobrazu. Bardzo dobrym przykładem jest zastosowanie kompozycji barwnej CIR, która składa się z następujących kanałów spektralnych [82]:

- zakres bliskiej podczerwieni (wyświetlany jako kolor czerwony);
- zakres czerwony (wyświetlany jako kolor zielony);
- zakres zielony (wyświetlany jako kolor niebieski).

W kompozycji CIR zdrowa roślinność widoczna jest w czerwonej lub różowej barwie. Natomiast drzewa martwe oraz silnie osłabione w odcieniach niebieskiego oraz turkusowego. Oprócz tego, zastosowanie kanału rejestrującego odbicie promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni w kompozycji barwnej CIR umożliwia rozróżnienie lasów liściastych od iglastych [6]. Roślinność liściasta obrazowana jest w jaskrawych odcieniach czerwieni, natomiast iglasta – w odcieniach ciemnoczerwonych. Kompozycja barwna CIR należy do tzw. kompozycji w barwach umownych.

Kompozycja RGB, gdzie poszczególne zakresy spektralne wyświetlane są zgodnie z tym jak obraz rejestrowany jest przez ludzkie oko nazywana jest z kompozycją w barwach naturalnych [4].

Tabela 4 Przykłady indeksów wegetacyjnych.

Lp.	Indeks wegetacyjny	Równanie	Źródło
1	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	[83]
2	Enhanced Normalized Difference Vegetation Index (ENDVI)	$\frac{((NIR + G) - (2 * B))}{((NIR + G) + 2 * B)}$	[44]
3	Normalized difference red edge index (NDRE)	$\frac{(NIR - RE)}{(NIR + RE)}$	[7]
4	Leaf chlorophyll index (LCI)	$\frac{(NIR - RE)}{(NIR + R)}$	[33]

W przypadku szkód, które powodowane są przez okiść lub wiatr szacowanie strat bez pomocy UAV może być obarczone dużym błędem. Wykorzystanie bezzałogowego statku powietrznego sprawia, że w szybki, wiarygodny, a co najważniejsze bezpieczny sposób możemy pozyskać zdjęcia, które następnie po złożeniu w ortofotomapę dają informację o powierzchni szkód. Opierając się o określone granice oraz wykorzystując informację z opisów taksacyjnych możemy uzyskać informację o miąższości drewna, jaka uległa zniszczeniu [66]. Nie zawsze konieczne jest wykorzystanie ortofotomapy. Czasami wystarczy odpowiednio wykonane zdjęcie pokazujące skalę problemu (patrz Rysunki 10 oraz 11).

Inwentaryzacja miejsc niedostępnych oraz monitoring przyrodniczy



Rysunek 12 Rozlewisko utworzone na wiosnę po roztopach

W leśnictwie wielokrotnie pojawia się potrzeba inwentaryzacji miejsc, które są ogólnie niedostępne. Wykonanie cyklicznych nalogów nad terenami, które posiadają cenne walory przyrodnicze, ale ze względu na swoją specyfikę są niedostępne (miejscza objęte małą retencją, rozlewiska) daje możliwość uchwycenia zmian, jakie zachodzą na inwentaryzowanym terenie. Podczas powtarzania tej samej trasy lotu oraz użyciu tych samych ustawień kamery w trakcie np. rocznego monitoringu mamy możliwość uzyskania pełnej wiedzy na temat zmian jakie zachodzą w ekosystemie (zasiedlanie gniazd, wahania wód gruntowych) [66].

Ochrona przed kłusownictwem

UAV w ochronie przed kłusownictwem mogą spełniać dwie role – zapobiegać oraz działać jako środek odstraszający. Mullero-Pázmány [85] wykazali, że kamery termowizyjne zamocowane do UAV są skuteczne w wykrywaniu ludzi nawet na terenie pokrytym roślinnością. Innymi badaczami, którzy zajęli się tym tematem są Bondi i inni [10]. Próbowali oni oszacować dokładność wykrywania ludzi (potencjalnych kłusowników) przez zautomatyzowany system wykorzystujący kamery TIR zamocowane do UAV. Należy jednak pamiętać o pewnych trudnościach takich jak, tłumiąca roślinność [85] oraz zapewnienie wysokości lotu, która umożliwi osiągnięcie wystarczającej rozdzielczości piksela terenowego pozwalającej na dokładną wykrywalność [22].

Dokumentacja inwestycji oraz zdjęcia i filmy edukacyjno-promocyjne

Nadleśnictwa w ciągu roku prowadzą inwestycje, które związane są m.in. z budową/modernizacją ciągów komunikacyjnych, wodnych lub też inwestycji kubaturowych. Do prowadzenia nadzoru zdjęcia wykonane z powietrza mogą okazać się szybkim i łatwym sposobem na uzyskanie stałej wiedzy na temat postępu prac. Kartometryczność uzyskanej z nalogu dronem ortofotomapy sprawia, że mamy możliwość weryfikacji lokalizacji inwestycji na gruncie. Zdjęcia uzyskane z perspektywy lotu ptaka można wykorzystać też do monitoringu prac związanych z eksploatacją kruszyw kopalnianych na terenach, które bezpośrednio sąsiadują z gruntami zarządzanymi przez Lasy Państwowe [66].

Warto też na koniec wspomnieć o możliwości nagrywania filmów oraz wykonywaniu zdjęć, których celem jest promocja walorów przyrodniczo-kulturowych nadleśnictwa. Takie materiały jak ujęcia z perspektywy lotu ptaka wykonane na potrzeby reportaży, materiałów promocyjnych z uroczystości lub imprez mogą zostać wykorzystane na stronie internetowej nadleśnictwa, Facebooka Nadleśnictwa, lub też w publikacjach o nadleśnictwie i jego działalności [66].

Planowanie przebiegu szlaków turystycznych

Materiały pozyskane z UAV mogą być przydatne w zarządzaniu szlakami dla turystów w celu zmniejszenia ich wpływu na stres dziko żyjących zwierząt, np. ptaków drapieżnych. Zebrane informacje pozwalają na identyfikację miejsc gniazdowania, co umożliwia właściwe zaplanowanie szlaków turystycznych lub podjęcie decyzji o czasowym zamknięciu danego szlaku [39].

1.4.2 Istotne parametry kamery

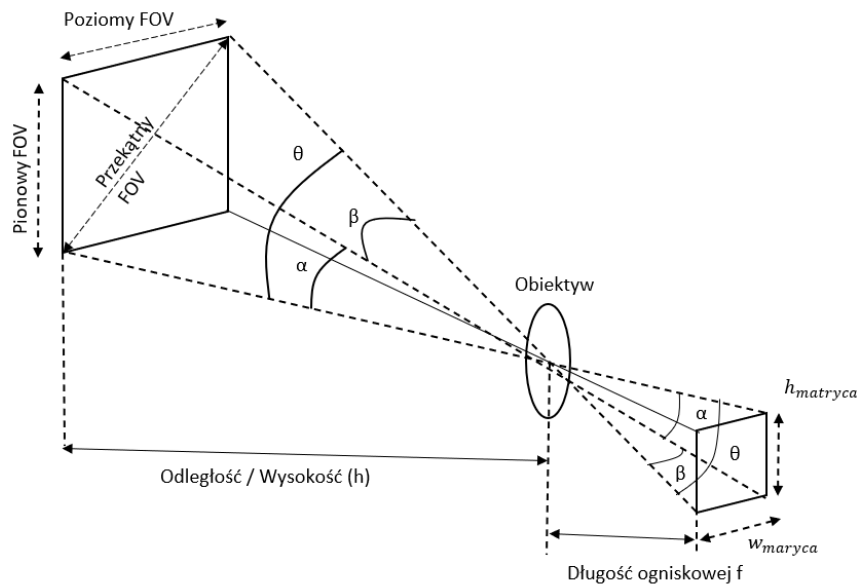
Kamera używana do wykonywania zdjęć lub nagrywania materiału video posiada następujące parametry [35]:

- kąt widzenia kamery (AOV);
- rozdzielczość (I_x , I_y) wyrażana w pikselach dla obu boków zdjęcia (oznaczona na Rysunku 15);
- stosunek boków rejestrowanego obrazu $p=I_x/I_y$ pomiędzy szerokością a wysokością zdjęcia;
- minimalny okres pomiędzy kolejnymi zdjęciami;
- czas ekspozycji (lub czas otwarcia migawki) - przedział czasu, w którym migawka jest otwarta i czujnik aparatu jest odsłonięty.

Jak pokazuje Rysunek 13 kąt widzenia kamery może być wyrażany na trzy sposoby:

- poziomy kąt widzenia (HAOV; β);
- pionowy kąt widzenia (VAOV; α)
- kąt widzenia po przekątnej (DAOV; θ).

Pole widzenia (FOV) odnosi się do zakresu obserwowalnego przez kamerę. Wraz ze spadkiem odległości (h) od obiektu/rejestrowanego obszaru maleje pole widzenia [65].



Rysunek 13 Rodzaje kątów oraz pól widzenia

Parametry takie jak kąt widzenia kamery (AOV) oraz rozdzielczość rejestrowanego obrazu (I_x, I_y) wraz z wysokością pozyskiwania zdjęć (h , oznaczone na Rysunku 13 oraz 14) mają wpływ na rozdzielczość piksela terenowego (rozdzielczość terenowa, ang. GSD - Ground sample distance), czyli długość boku w terenie, jaka rejestrowana jest przez jeden piksel obrazu.

Obliczanie rozdzielczości terenowej piksela na podstawie informacji o poziomym kącie widzenia oraz wysokości lotu (odległości od rejestrowanego terenu)

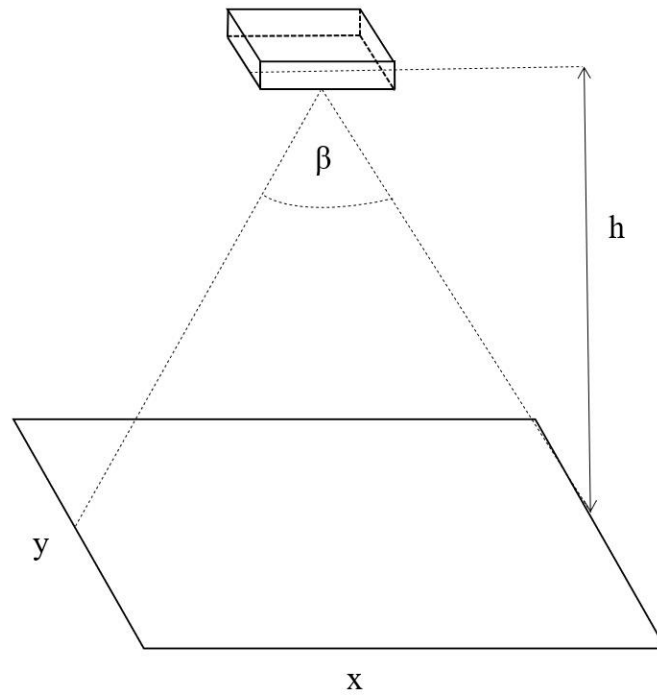
Przy założeniu, że kamera skierowana jest równolegle do podłoża (Rysunek 14) wielkość (x, y , oznaczone na Rysunku 14) rzutowanej powierzchni można obliczyć jako [35]:

$$x = 2h * \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad [1]$$

$$y = x/p \quad [2]$$

Rozdzielczość terenową piksela (ang. Ground sample distance) otrzymaną poprzez wykonywanie zdjęć na danej wysokości h można obliczyć używając wzoru:

$$GSD = \frac{x}{lx} = \frac{2h * \tan(\frac{\beta}{2})}{lx} \quad [3]$$



Rysunek 14 Rejestrowany obszar przez kamerę z określonym HAOV na danej wysokości

Obliczanie rozdzielczości terenowej piksela na podstawie informacji o przekątnym kącie widzenia oraz wysokości lotu (odległości od rejestrowanego terenu)

$$x = \frac{2 * h * (\frac{lx}{ly}) * \tan(\frac{\theta}{2})}{\sqrt{1 + (\frac{lx}{ly})^2}} \quad [4]$$

$$y = \frac{2 * h * \tan(\frac{\theta}{2})}{\sqrt{1 + (\frac{lx}{ly})^2}} \quad [5]$$

Rozdzielczość terenową (GSD) oblicza się analogicznie jak w przypadku wzoru nr 3

$$GSD = \frac{x}{lx} \quad [6]$$

1.4.3 Fizyka obserwacji termicznej w podczerwieni

Wszystkie obiekty emitują energię w postaci promieniowania elektromagnetycznego (światło). Intensywność światła emitowanego przez obiekt na danej długości fali zależy od temperatury obiektu. Przy typowych temperaturach powierzchni ciała 20-30 °C ludzie i zwierzęta homeotermiczne emitują najsilniej w zakresie długości fal od 8 - 14 μm (8×10^{-6} – 14×10^{-6} m). Sprawia to, że ten region widma elektromagnetycznego, znanego jako podczerwień termiczna może być wykorzystana do wykrywania zwierząt [24]. Jasność (L) tego światła zmienia się w funkcji temperatury (T) przez:

$$L = A\sigma T^4 \quad [7]$$

gdzie: σ -stała Stefan-Boltzman, A – powierzchnia emisji (m^2).

Wraz ze wzrostem temperatury rośnie jasność obiektu. Jasność rejestrowana przez kamery TIR może różnić się w zależności od kilku czynników, takich jak właściwości samego aparatu oraz właściwości środowiska, w którym dokonywane są obserwacje.

Promieniowanie termiczne emitowane przez zwierzęta musi przejść przez pewną warstwę atmosfery ziemskiej, zanim zostanie zarejestrowane przez kamerę. Cząsteczki znajdujące się w atmosferze absorbują oraz emitują promieniowanie. Na przykład para wodna jest szczególnie silnym pochłaniaczem promieniowania w termicznych długości fal [56]. Wielkość pochłaniania i emisji promieniowania przez cząsteczki w atmosferze zależy od ciśnienia, temperatury i względnej obfitości cząsteczek [81].

Główne składniki atmosfery w dolnej troposferze to azot, tlen oraz woda. Liczba tych cząsteczek jest w bardzo dużym stopniu zależna od wilgotności. W związku z tym ilość pochłanianego promieniowania termicznego jaka jest absorbowana przez atmosferę jest zależna od temperatury, ciśnienia oraz wilgotności.

Gdy temperatura powietrza jest niższa niż rejestrowany obiekt, obserwowana temperatura obiektu będzie niższa od jej rzeczywistej wartości. Jeśli temperatura powietrza jest wyższa niż temperatura obiektu, źródło ciepła będzie rejestrowane jako cieplejsze niż jest w rzeczywistości [24].

Zniekształcenia radiometryczne wywołane przez atmosferę można uznać za nieistotne w przypadku niskich wysokości lotu [2, 9, 48]. Jest to bardzo ważna informacja z punktu widzenia wykorzystania UAV z kamerami termowizyjnymi.

Wyższość kamer termowizyjnych (TIR) nad kamerami wizyjnymi (RGB) – rozpraszanie promieniowania przez mgłę

Mgła jest jednym z głównych problemów mogących wystąpić podczas obserwacji przy zastosowaniu UAV. Mgła pojawia się, gdy powietrze jest już nasycone parą wodną (wilgotność 100%), ale parowanie wciąż występuje. Krople wody, które są zawieszone we mgle posiadają głównie średnice mieszczące się w przedziale pomiędzy 1 – 10 μm [5]. Gdy światło widzialne przechodzi przez mgłę jest ono rozpraszane przez krople pary wodnej [61]. Natomiast w przypadku promieniowania termicznego, które posiada dłuższą długość fali, fale rozpraszane są w mniejszym stopniu. W wyniku tego światło to może być widoczne z większej odległości [24]. W przypadku światła widzialnego 50% emitowanego promieniowania przez obiekt jest przekazywane na odległość około 1 metra, reszta ulega rozproszeniu. W przypadku światła termalnego (8 – 14 μm) 50% światła jest rozpraszane w odległości 10 000 metrów [24]. Bez względu na to należy pamiętać, że w przypadku ogólnodostępnych kamer większość producentów nie zaleca korzystania z kamer termowizyjnych podczas mgły. Używanie kamer w trakcie mgły może wiązać się z utratą gwarancji od producenta (na przykład kamera Flir Vue Pro; Flir User Guide [129]). W przypadku gdy kamera jest zamontowana pod kątem, istnieje większe ryzyko kondensacji pary wodnej na soczewce. Kondensacja wody może obniżyć jakość rejestrowanych danych [24].

Zasłanianie rejestrowanych obiektów przez roślinność

Każdy z pikseli w detektorze kamery termowizyjnej rejestruje temperaturę znajdujących się w nim obiektów. Jeśli w przestrzeni rejestrowanej przez jeden piksel znajduje się więcej niż jeden obiekt, wówczas zarejestrowana temperatura będzie mieszanką temperatur zarejestrowanych obiektów. Aby być pewnym zarejestrowania dokładnej temperatury obiektu wymagane jest rejestrowanie obiektu przy użyciu większej liczby pikseli.

Trudność w obserwacji zwierząt z lotu ptaka polega na tym, że zwierzęta często chowają się pod występującą roślinnością [53, 84, 87]. Może to powodować blokowanie emitowanego promieniowania. W związku z tym temperatura rejestrowana przez detektor nie będzie równa

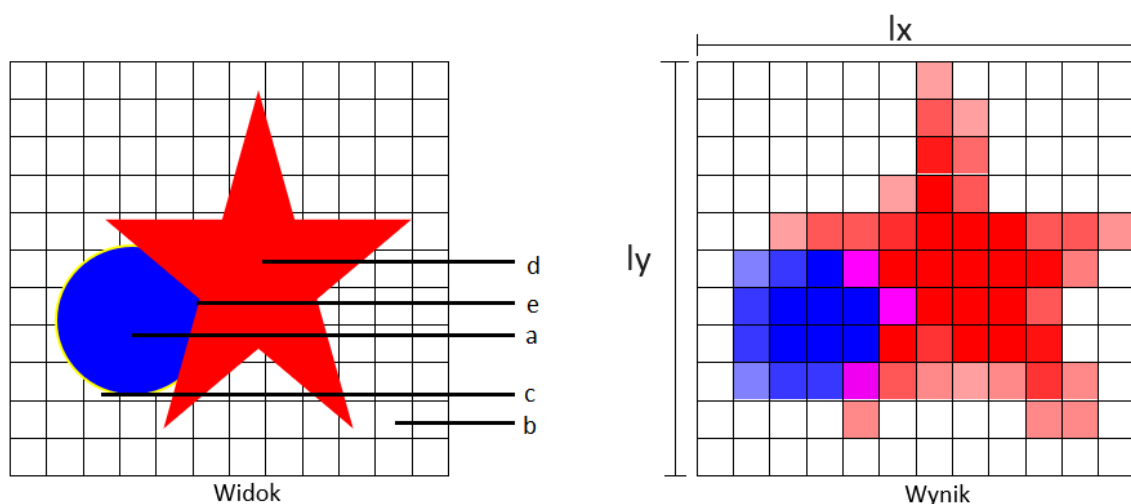
temperaturze wykrytego zwierzęcia. Zarejestrowana temperatura będzie zależna od temperatury zwierzęcia oraz obiektu, który zasłania zwierzę (Rysunek 15).

Temperatura zarejestrowana, T_{obs} może być mieszkanką kilku zarejestrowanych obiektów:

$$T_{obs} = \frac{T_A A_A + T_B A_B + T_C A_C + \dots}{A_{total}} \quad [8]$$

gdzie:

- $A_A, A_B, (A_C, \dots)$ oraz A_{total} – powierzchnia obiektu A, B oraz całkowita powierzchnia zapisana przez piksel;
- $T_A, T_B, (T_C, \dots)$ – temperatura obiektu A, B oraz C.

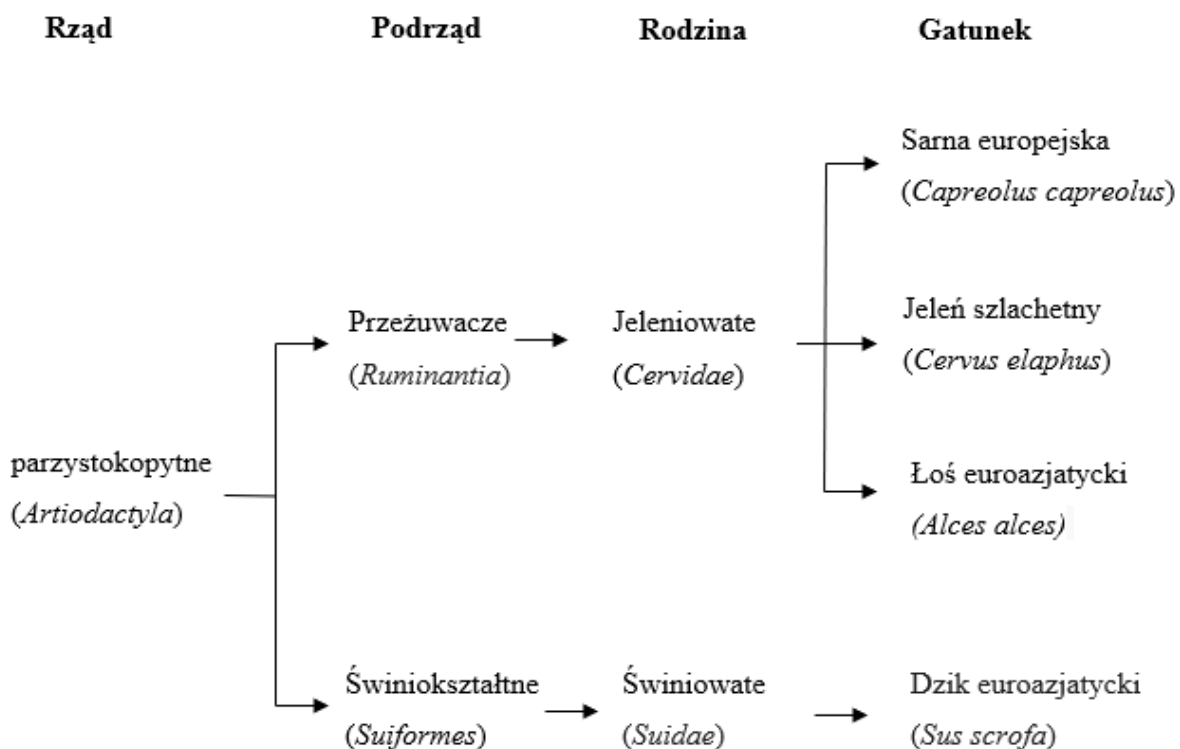


Rysunek 15 Widok obszaru jaki rejestrowany jest przez kamerę (rejestrowany obszar, rezultat – obraz rejestrowany przez kamerę). *Legenda:* - interesujący cel (niebieskie kółko), obiekt przesłaniający (czerwona gwiazda) i tło (białe), piksel oznaczony a zawiera jasność tylko ze źródła docelowego, piksel b zawiera tylko jasność tła, piksel c zawiera zarówno cel, jak i tło, natomiast jasność piksel d ma jasność tylko z obiektu przesłaniającego, piksel e zawiera jasność zarówno celu, jak i obiektu przesłaniającego (na podstawie [24])

1.4.4 Przegląd inwentaryzowanych gatunków zwierząt

W trakcie pracy postanowiono, że inwentaryzacji podlegać będą cztery gatunki należące do zwierzyny grubej – sarna europejska, jelen szlachetny, łos euroazjatycki oraz dzik euroazjatycki.

Wszystkie badane gatunki należą do gatunków jednego rzędu Parzystokopytnych (Artiodactyla) (The Integrated Taxonomic Information System (ITIS) [132]). Wycinek systematyki pokazujący umiejscowienie tych gatunków przedstawia Rysunek 16.



Rysunek 16 Fragment kladogramu przedstawiający umiejscowienie w systematyce gatunków będących w zainteresowaniu badawczym doktoranta (opracowanie własne na podstawie ITIS [132])

Istotnymi cechami dotyczącymi badanych gatunków mającymi wpływ na ich wykrywalność przy użyciu kamery termowizyjnej są:

- rozmiar inwentaryzowanych zwierząt;
- aktywność dobową (dzienna / nocna);
- aktywność roczną (siedlisko, stadny / samotny tryb życia);
- środowisko, w którym występują inwentaryzowane gatunki/ inwentaryzowany obszar (powierzchnia otwarta, dojrzały drzewostan o wysokim stopniu zadrzewienia, halizna, płazowina itd.).

Sarna europejska (*Capreolus capreolus*)



**Rysunek 17 Sarna europejska (zdjęcie wykonał
Szczepan Klejbuk) [47]**

Tabela 5 Dane dotyczące sarny europejskiej

Rozmiar oraz waga [109]	
Długość ciała	95-140 cm
Masa ciała	15-30 kg
Inne [49]	
Dojrzałość płciowa	2 lata
Liczba młodych w miocie	1-3

Sarna europejska jest gatunkiem pospolitym w całym kraju. Liczba osobników tego gatunku w Polsce według stanu na 10 marca 2021 roku wynosiła 916,9 tys. szt. [110]. Występuje do wysokości 2 400 m.n.p.m. [109]. Jej głównym siedliskiem są rzadkie lasy liściaste oraz mieszane, a także pola. Przystosowanie do życia poza terenem leśnym spowodowało, że istnieje ekotypowa forma tego gatunku, która żyje wyłącznie na terenie polnym [109]. Od późnej jesieni do wiosny żyją w stadach złożonych z kilku do kilkudziesięciu osobników. Następnie rundle rozbijają się na mniejsze grupy [49]. Największa aktywność gatunek ten wykazuje we wczesnych godzinach rannych oraz wieczornych.

Jeleń szlachetny (*Cervus elaphus*)



Rysunek 18 Jeleń szlachetny (zdjęcie wykonał Szczepan Klejbuk) [47]

Tabela 6 Dane dotyczące jelenia szlachetnego

Rozmiar oraz waga	
Długość ciała	175-265 cm
Masa ciała [49]	70-140 kg
Inne	
Dojrzałość płciowa [121]	2-3 lata
Długość ciąży [49]	235 dni
Liczba młodych w miocie [121]	jedno (rzadziej dwa)

Jeleń szlachetny (*Cervus epaphus elaphus*) nazywany jest również jeleniem skandynawskim [69]. W Polsce wyróżniamy kilka ekotypów: jelen bieszczadzki (największy i najsilniejszy), jelen wielkopolski, jelen mazurski i jelen pomorski [126]. Na terenie Polski występuje we wszystkich większych kompleksach leśnych. Chętnie zasiedla kompleksy leśne o powierzchni powyżej 1 000 hektarów, ale spotyka się go również w mniej zadrzewionych terenach [49]. Liczba osobników tego gatunku w Polsce według stanu na 10 marca 2021 roku wynosiła 281,9 tys. szt. [110].

Jelenie zwykle dzień spędzają ukryte w gęstwinie, natomiast na żerowanie wyruszają wieczorem [109]. W ciągu dnia żeruje w miejscach, gdzie nie wyczuwa żadnego zagrożenia. Na wolności żyje do 20 lat [121].

Łoś euroazjatycki (*Alces alces*)



Rysunek 19 Łoś euroazjatycki (zdjęcie wykonał Adam Żak) [47]

Tabela 7 Dane dotyczące Łosia euroazjatyckiego

Rozmiar oraz waga	
Długość ciała	2,4-3,1 m
Masa ciała	250-500 kg
Inne [121]	
Dojrzałość płciowa	samica po 1,5 roku, samiec po 2,5 roku
Ciąża	32,5 – 34 tygodni
Liczba młodych w miocie	1-2

Łoś euroazjatycki jest największym współcześnie żyjącym ssakiem kopytnym należącym do rodziny jeleniowatych. Żyje w podmokłych lasach. W Polsce jest to gatunek łowny, który objęty jest całorocznym okresem ochronnym [109]. Jego liczebność zgodnie z danymi GUS w roku 2021 wynosiła 31,6 tys. szt. (według stanu na 10 marca) [110].

Łoś euroazjatycki żyje w podmokłych terenach leśnych oraz zakrzewionych, bagnach, mokradłach, torfowiskach, trzęsawiskach, terenach zalewowych, nad jeziorami oraz rzekami [49].

Żeruje zarówno w dzień, jak i w nocy [121]. Najbardziej aktywny jest wczesnym rankiem oraz wieczorem. Dorosłe byki łosia są samotnikami – nie tworzą stad. W czasie zimy samice wraz z młodymi skupiają się w niewielkie stada, które prowadzone są przez klempe. Poza tym okresem samice same wiodą potomstwo [109].

Dzik euroazjatycki (*Sus scrofa*)



Rysunek 20 Dzik euroazjatycki (zdjęcie wykonał Adam Żak) [47]

Tabela 8 Dane dotyczące Dzika euroazjatyckiego

Rozmiar oraz waga	
Długość ciała [69]	90-200 cm
Masa ciała [60]	50-250 kg
Inne [49]	
Dojrzałość płciowa	8-20 miesięcy
Ciąża	112-140 dni
Liczba młodych w miocie	zwykle 3-8 sztuk

Dzik euroazjatycki (*Sus scrofa*) jest ssakiem z rodziny świniowatych (*Suidae*). Występuje bardzo licznie w całej Polsce. Obszar występowania dzika euroazjatyckiego dochodzi do górnej granicy lasu, powyżej 1400 m n.p.m [94]. Liczebność dzika euroazjatyckiego na terenie Polski zgodnie z danymi GUS w roku 2021 wynosiła 67,9 tys. szt. (według stanu na 10 marca) [110].

Jest gatunkiem eurytopowym. Unika jednak terenów otwartych oraz górskich. Najlepszym siedliskiem dla dzika są lasy liściaste oraz mieszane, gdzie znajdują największe ilości pokarmu [109]. Obecnie obserwuje się pojawianie dzików na terenach podmiejskich, gdzie przychodzą, aby żerować w śmietnikach oraz wysypiskach.

Jest zwierzem stadnym. Żyje w grupach rodzinnych, które nazywane są watahami. W skład stada wchodzi od kilku do około dwudziestu osobników: stara locha (przewodniczka), a także lochy z warchlakami. Inne osobniki są mniej związane ze stadem. Odyńce zwykle żyją samotnie. Dzik w ciągu dnia odpoczywają w barłogach lub tarzają się w błocie. Żerują w nocy, w trakcie której wychodzą z lasu na pola [49].

2. Potrzeby funkcjonalne, ograniczenia technologiczne i wymagania dla połączenia struktury nośnej z kamerami multispektralną i termowizyjną

Część z lotów (zwłaszcza loty nocne) wykonywana była z wykorzystaniem Krajowego scenariusza standardowego NSTS – 05. Scenariusz ten pozwala na loty w zasięgu widoczności wzrokowej (VLOS) lub poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS). W uproszczeniu można przyjąć, że NSTS-05 pozwala na lot na wysokości do 120 m AGL, nie dalej niż 2 km od operatora.

Prezes Urzędu Lotnictwa Cywilnego postawił konkretne wymagania, jakie platforma latająca powinna spełniać. Do wymagań tego scenariusza należy m. in. [141]:

- a) masa startowa statku powietrznego nie przekracza 4 kg;
- b) stała możliwość monitorowania przez pilota parametrów lotu: - toru lotu; - prędkości lotu; - wysokości lotu; - stopnia zużycia źródła zasilania; - jakości i mocy sygnału sterowania i kontroli (ciągła łączność telemetryczna pomiędzy aparaturą na ziemi a statkiem powietrznym).

Do innych wymagań zgodnie z wytycznymi Prezesa ULC należy m.in.:

- a) oznaczenie BSP przez umieszczenie na jego powierzchni numeru rejestracyjnego operatora systemu bezzałogowego statku powietrznego;
- b) w przypadku wykonywania lotów wcześniej niż 30 minut przed wschodem słońca i później niż 30 minut po zachodzie słońca, wyposażenie BSP w migające, zielone światło pozwalające na określenie orientacji bezzałogowego statku powietrznego względem pilota, obserwatora lub osób;
- c) wyposażenie bezzałogowego statku powietrznego w dodatkowy, zasilany niezależnie lokalizator GPS/GNSS, podający pilotowi lokalizację bezzałogowego statku powietrznego.

Inne minimalne potrzeby funkcjonalne:

- a) odpowiedni czas lotu – baterie LiPo lub LiOn, które pozwolą na około 20 minut nieprzerwanego lotu;
- b) możliwość wykonania zawisu;
- c) procedury awaryjne

- możliwość zastosowania automatycznych procedur awaryjnych w przypadku wystąpienia zdarzenia zagrażającego bezpieczeństwu wykonywania lotu (utrata łączności pomiędzy aparaturą a BSP, wysokie rozładowanie baterii itp.). Wytypowany sprzęt powinien zapewnić następujące procedury awaryjne:
- w razie utraty łączności – automatyczne rozpoczęcie trybu awaryjnego polegającego na powrocie BSP do miejsca startu i wylądowaniu, chyba że w międzyczasie łączność pomiędzy BSP a aparaturą sterującą zostanie ponownie nawiązana.
- w trakcie lotu na zbyt wysokim rozładowaniu baterii (ustalonym wcześniej przez użytkownika) rozpoczęcie wybranej procedury awaryjnej – powrót BSP do miejsca startu lub lądowanie w miejscu uzyskania wysokiego rozładowania;
- e) możliwość planowania i wykonywania misji autonomicznych;
- f) możliwość wykonywania zdjęć we wcześniej określonym interwale – czasowym lub przestrzennym (dotyczy zarówno kamery termowizyjnej jak i multispektralnej);
- g) pozyskiwanie danych telemetrycznych na temat wykonanych zdjęć – zapis lokalizacji pozyskania zdjęć (dotyczy zarówno kamery termowizyjnej jak i multispektralnej);
- h) możliwość rejestracji filmu (dotyczy kamery termowizyjnej);
- i) możliwość stosowania różnych trybów lotu – tryb utrzymywania pozycji dzięki wykorzystaniu danych pochodzących z satelitów oraz tryb manualny umożliwiający stabilny lot;
- j) automatyczne zgłaszanie informacji o niskim poziomie napięcia baterii – możliwość samodzielnego ustalenia poziomu napięcia baterii, w którym użytkownik powinien otrzymać informację z systemu.

Wymagania dla połączenia struktury nośnej z specjalistycznymi kamerami:

- a) w przypadku połączenia kamery termowizyjnej z platformą nośną, kamera termowizyjna powinna być zamocowana na gimbalu, co umożliwi uzyskiwanie stabilnego obrazu;
- b) w przypadku połączenia kamery multispektralnej z platformą nośną w czasie lotu powinien być zapewniony warunek, aby obiektyw kamery skierowany był w czasie lotu możliwie najbardziej prostopadle do podłoża. Związane jest to z tym, że materiał pochodzący z kamery multispektralnej był przede wszystkim wykorzystany do składania ortofotomap. Niemniej jednak ze względu na stabilizację obrazu najbardziej pożądaną jest mocowanie kamery na gimbalu.

Zgodnie z przepisami europejskimi z krajowych scenariuszy standardowych (NSTS) ustalonych przez Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego będzie można korzystać do końca 2025 roku. Warto dodać, że od 1 stycznia 2024 roku zaczęły obowiązywać europejskie scenariusze standardowe (STS) [136]. W związku z tym, lata 2024-2025 są okresem, kiedy będzie można korzystać zarówno ze scenariuszy ustalonych przez Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego, jak i przepisów ustalonych przez EASA.

Od początku 2026 roku loty BSP będą musiały być obligatoryjnie prowadzone zgodnie ze scenariuszami standardowymi ustalonymi przez przepisy unijne. Najważniejszymi (z punktu widzenia praktyki) aktami normatywnymi UE w zakresie użytkowania BSP są Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 roku w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzecich [114], a także Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 roku w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych [116]. Do powyższych dokumentów napisano rozporządzenia zmieniające – Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2020/1058 z dnia 27 kwietnia 2020 roku zmieniające rozporządzenie delegowane (UE) 2019/945 w odniesieniu do wprowadzenia dwóch nowych klas systemów bezzałogowych statków powietrznych [115] oraz Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2020/639 z dnia 12 maja 2020 roku zmieniające rozporządzenie wykonawcze (UE) 2019/947 w odniesieniu do scenariuszy standardowych dla operacji wykonywanych w zasięgu widoczności wzrokowej oraz poza zasięgiem widoczności wzrokowej [117].

W myśl powyższych przepisów od 1 stycznia 2026 roku loty realizowane poza zasięgiem widoczności wzrokowej (większość z lotów zrealizowanych w tej pracy) będą musiały być przeprowadzane zgodnie ze scenariuszem STS-02 przy użyciu bezzałogowego statku powietrznego oznaczonego klasą C6.

3. Ewolucja koncepcji typu platformy nośnej i zespołu napędowego

W niniejszej pracy zdecydowano się na zastosowanie wielowirnikowców (Quadrocopter – 4 silniki oraz hexacopter- 6 silników), pomimo że, stałopłaty bezzałogowe są w stanie pokonać większy dystans, a co za tym idzie pokryć (zinventoryzować) większą powierzchnię przy wykorzystaniu tej samej pojemności baterii (zużyciu tej samej ilości energii). Główną korzyścią wynikającą z zastosowania wielowirnikowców jest fakt, że stałopłaty bezzałogowe muszą przemieszczać się szybciej, aby zapewnić wystarczającą siłę nośną [32], co ma negatywny wpływ na jakość pozyskiwanych materiałów, co za tym idzie pewność w określaniu gatunków na podstawie zarejestrowanych sygnatur cieplnych (kamery termowizyjne) oraz jakość opracowanych ortofotomap (kamery multispektralne). Dodatkową korzyścią przemawiającą za wykorzystaniem wielowirnikowca jest możliwość zatrzymania misji autonomicznej (wykonanie zawisu), obniżenie wysokości lotu, a następnie powrót to pierwotnej wysokości i kontynuowanie misji. Wspomniana cecha może być wykorzystana w przypadku rejestracji niejednoznacznej sygnatury cieplnej. Kolejną istotną w warunkach leśnych przewagą wielowirnikowca jest pionowy start i lądowanie, co w trakcie pracy okazało się bardzo wygodne ze względów logistycznych – możliwość startu na skrzyżowaniu, luce położonej w drzewostanie, w porównaniu do stałopłata bezzałogowego, w przypadku którego konieczne jest zapewnienie miejsca do startu i lądowania na wolnej przestrzeni. Zarówno w przypadku lotów związanych z inwentaryzacją zwierzyny, jaki i lotów, których celem jest inwentaryzacja stanu sanitarnego lasu, urządzenie umożliwiające pionowy start i lądowanie zdecydowanie ułatwia prowadzenie prac pod względem logistycznym oraz umożliwia wygodną inwentaryzację konkretnych niewielkich obszarów będących przedmiotem zainteresowania. Użycie wielowirnikowca zdecydowanie zwiększa sterowność oraz umożliwia operowanie w ciasnej przestrzeni w porównaniu do zastosowania stałopłatu [71].

Jako zespół napędowy zastosowano silniki elektryczne - bezszczotkowe silniki prądu stałego, które mają mniejszą wagę, są cichsze i posiadają większą żywotność niż silniki szczotkowe. Silniki bezszczotkowe mogą pracować w sposób ciągły przy maksymalnym momencie obrotowym, podczas gdy silniki szczotkowe uzyskują maksymalny moment obrotowy tylko przy obrotach nominalnych. Silnik szczotkowy może zapewnić taki sam moment obrotowy jak model bezszczotkowy, tylko gdy posiada znacznie większe magnesy. W związku z tym nawet małe silniki BLDC mogą zapewnić znacznie większą moc niż silniki szczotkowe. W badaniach prowadzonych przez Korczak-Abshire i innych [70] elektryczne stałopłaty były prawie

niewidoczne dla pingwinów. Z kolei UAV z silnikiem tłokowym były słyszalne, ponieważ zmiana zachowania ptaków podczas badań była zauważalna.

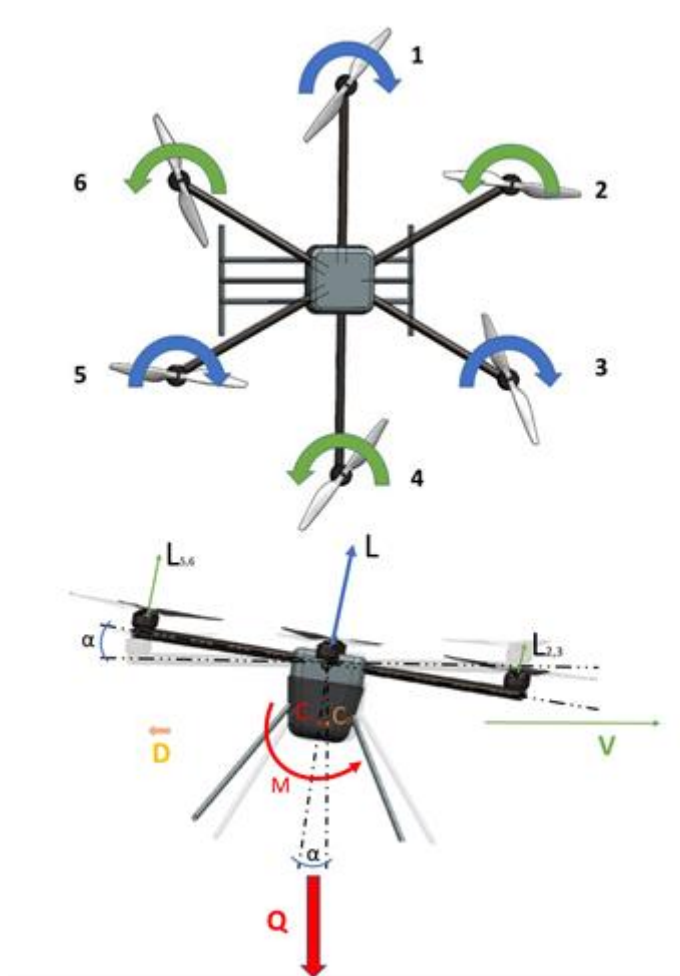
Dodatkowo silnik bezszczotkowy BLDC zapewnia większą sterowalność przy użyciu mechanizmów sprzężenia zwrotnego, żeby w sposób precyzyjny przesyłać żądany moment obrotowy i prędkość obrotową. Sterowanie precyzyjne zmniejsza zużycie energii, co wydłuża żywotność baterii.

Wytypowano baterie litowo-jonowe (LiOn) lub litowo-polimerowe (LiPo). Baterie litowo-polimerowe (LiPo) należą do najpopularniejszych typów baterii stosowanych w wielowirnikowcach, ponieważ oferują istotną zaletę wysokiej gęstości energii w stosunku do ich rozmiaru i wagi [80].

Silniki spalinowe są bardzo popularne do dostarczania mocy dla większości wojskowych i komercyjnych UAV, jednak elektryczne systemy oferują wyższą skuteczność i wydają się być bardziej niezawodne. Dodatkową korzyścią jest niska lub zerowa emisja gazów cieplarnianych oraz generowanie niskiego hałasu [92], co jest bardzo istotne podczas inwentaryzacji przyrody. Silniki spalinowe są solidne, ale znacznie cięższe, dlatego mają ograniczone zastosowanie - głównie w stałopłatach [133].

4. Wyznaczenie obciążeń kluczowych elementów platformy nośnej i zespołu napędowego

Obciążenia aerodynamiczne hexacoptera w stanie ustalonym wyznaczono z analizy sił i momentów przedstawionych na Rysunku 21. Zauważmy, że aby wyeliminować obroty bryły hexacoptera możliwe pod wpływem kręcących się wirników założono, że wszystkie sześć wirników obraca się naprzemiennie – co drugi zgodnie z kierunkiem obrotu zegara i co drugi przeciwnie do zegara. Założono również, że wirniki obracające się zgodnie z zegarem mają łopaty ustawione tak, aby generowały siłę nośną dodatnią (czyli, że krawędź łopaty nacierającej ma dodatni kąt natarcia), zaś łopaty obracające się przeciwnie do kierunku zegara generują ujemną siłę nośną, gdyż krawędź łopaty nacierającej ma ujemny kąt natarcia. Z Rysunku 21 widać, że ponieważ łopaty 2,3 wytwarzają mniejszą siłę nośną niż łopaty 5,6, więc płaszczyzna wirnika przechyla się o kąt α zgodnie z kierunkiem obrotu zegara. Całkowita siła nośna odchyła się od pionu w kierunku prędkości V . Na Rysunku widać też siłę oporu aerodynamicznego D oraz moment pochylający M dodatni, czyli skierowany przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Wartość siły oporu D jest rzutem siły nośnej na kierunek prędkości V , zaś rzut siły nośnej L na kierunek pionowy jest równy ciężarowi drona o wartości Q . Wartość momentu pochylającego M jest równa iloczynowi ciężaru Q pomnożonemu przez ramie ciężaru Q względem środka ciężkości C_0 przed pochyleniem drona. Na zakończenie stwierdzamy, że przeprowadzona powyżej analiza sił i momentów wynika z warunku równowagi płaskiego układu sił, który sprowadza się do żądania, aby w stanie ustalonym spełnione były warunki równowagi 2 sił i jednego równania równowagi momentów pochylających.



Rysunek 21 Analiza sił i momentów hexacoptera

W kolejnym kroku przeprowadzimy analizę nieustalonych obciążeń aerodynamicznych charakterystyczną dla manewrów.

Obciążenia aerodynamiczne w manewrach są bardzo ważne dla wysokomanewrowych samolotów bojowych [55] i zdecydowanie mniej ważne dla quadro czy hexacopterów. Dzieje się tak dlatego, że manewry quadro czy hexacopterów są stosunkowo powolne i zwykle ustalone analizy aerodynamiczne sił i momentów są wystarczające. Tym niemniej w dalszym ciągu rozważymy wybrane zjawiska fizyczne związane ze zmianami obciążeń manewrowych.

Omówimy warunki konieczne uzyskania równowagi i podtrzymania siły nośnej w zakresie nadkrytycznych kątów natarcia. Dynamiczne wejście w zakres nadkrytycznych kątów natarcia będzie zasymulowane numerycznie. Charakterystyki statyczne i dynamiczne (w szczególności pochodne stateczności względem prędkości kątowej pochylenia oraz względem przyspieszenia przepadania) zostaną oszacowane na podstawie badań tunelowych dla konfiguracji geometrycznie podobnych. W obliczeniach nie będą uwzględnione histerezy współczynników

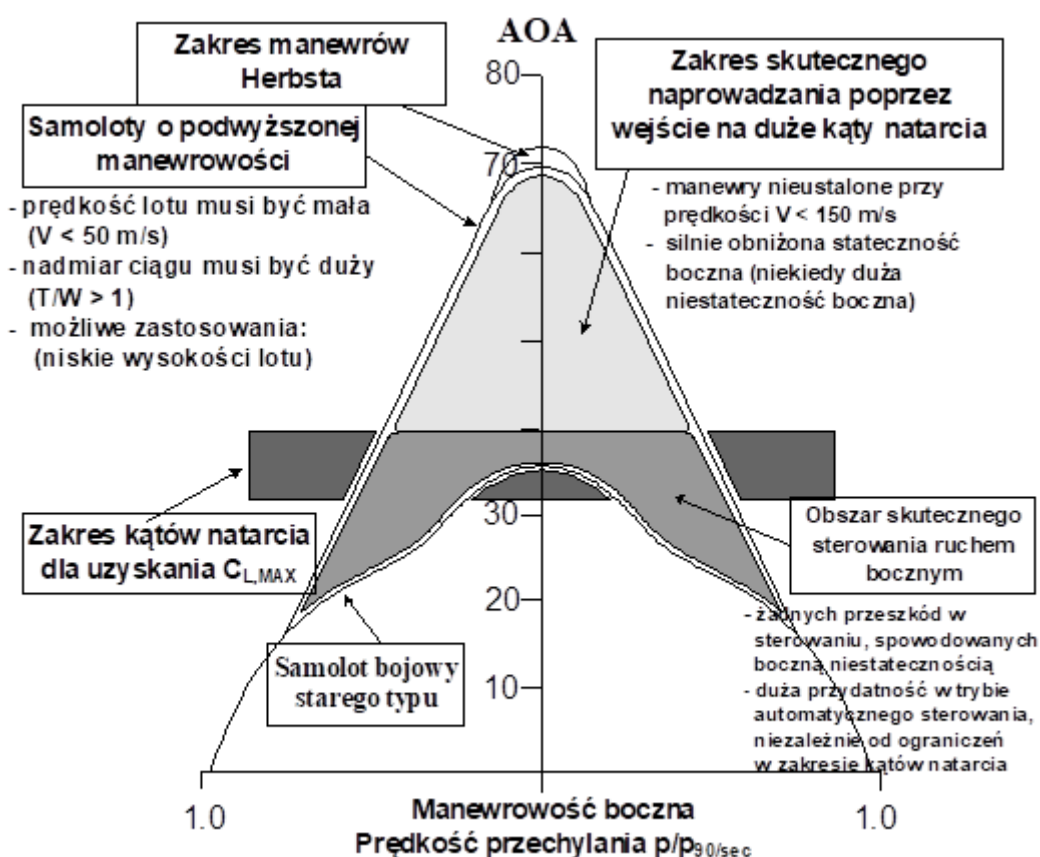
aerodynamicznych, przesunięć fazowych (opóźnień) sił względem prędkości liniowych i kątowych oraz zależności pochodnych od częstości oscylacji. Odpowiedzi dynamiczne samolotu (coptera) na założone wymuszenia, w zależności od położenia środka masy samolotu, usytuowania dodatkowego trzeciego (przedniego) płata oraz postaci funkcji wymuszającej, zostały obliczone numerycznie. Parametry równowagi, również w locie na nadkrytycznych kątach natarcia, zostaną obliczone numerycznie. Parametry równowagi (kąt natarcia, wychylenie steru wysokości, ciąg zespołu napędowego, wychylenie powierzchni sterowej przedniej) będą znalezione z ogólnych nieliniowych równań równowagi, albo z dwóch różnych zbiorów równań liniowych. Obliczenia szczegółowe wykonano dla poddźwiękowego samolotu bojowego, przeznaczonego do atakowania celi naziemnych.

W dalszym ciągu omówiono wybrane zagadnienia dynamiki dużych kątów natarcia, rozważane z punktu widzenia relacji pomiędzy dynamiką, sterowaniem, aerodynamiką i konfiguracją samolotu. Uwzględniono zagadnienia tzw. super i hiper – manewrowości. Kształt momentu pochylającego w funkcji kąta natarcia może wskazywać na stateczność statyczną samolotu (przyrost momentu pochylającego po zaburzeniu kąta natarcia będzie ograniczał dalszy wzrost kąta), na niestateczność (przyrost momentu pochylającego po zaburzeniu kąta natarcia będzie wzmacniał dalszy wzrost kąta) lub na tzw. stateczność obojętną (przyrost momentu pochylającego po zaburzeniu kąta natarcia będzie obojętny dla dalszego wzrostu lub spadku kąta natarcia). Samolot stateczny statycznie (przy założeniu, że kąt wychylenia steru wysokości jest stały) ma tylko jeden punkt położenia równowagi (czyli równowaga jest możliwa tylko dla jednego kąta natarcia). Oznacza to, że tzw. samolot supermanewrowy musi być niestateczny statycznie w zakresie małych kątów natarcia i stateczny statycznie w zakresie dużych kątów natarcia. Oznacza to również, że krzywa współczynnika momentu pochylającego w funkcji kąta natarcia musi być nieliniowa. Coraz większe zagęszczenie krzywych momentu pochylającego (dla kilku różnych wychyleń steru wysokości) wraz ze wzrostem kąta natarcia świadczy o braku wrażliwości momentu pochylającego na wychylenie steru, a więc o utracie skuteczności steru w zakresie większych kątów natarcia. Samoloty supermanewrowe powinny móc powrócić do lotu na mniejszych kątach natarcia niezależnie od skuteczności steru wysokości. Nadmierna niestateczność (czyli duże dodatnie nachylenie krzywej) na małych kątach natarcia (tzn. niestateczność powyżej niezbędnego poziomu minimalnego) skutkuje w zmniejszeniu kąta natarcia równowagi i przybliżeniu punktu równowagi do krytycznego kąta natarcia. Może to oznaczać również nadmierny moment pochylający (“nos do góry”) i brak momentu do “opuszczania nosa”

w zakresie umiarkowanych kątów natarcia. Dodatkowo taki samolot miałby trudności z wejściem na duże kąty natarcia, gdyż byłby zbyt stateczny (a więc trudny “do ruszenia”) w zakresie umiarkowanych kątów natarcia. Aby latać bezpiecznie na dużych kątach natarcia bez skomplikowanego układu automatycznego sterowania lotem (AFCS) jest wymagane, aby współczynnik momentu pochylającego (odpowiadający maksymalnemu wychyleniu steru wysokości do nurkowania, czyli krawędź steru w dół w układzie klasycznym i krawędź steru do góry w układzie ze sterem wysokości przed płatem głównym) miał zapas równy co najmniej $= 0.05$. Dla większych kątów natarcia struktury wirowe nad płatem pękają i charakterystyki nośne samolotu pogarszają się. Pękanie wirów można opóźnić poprzez umieszczenie tzw. pasm (strake lub LEX - Leading Edge Extension). Jednakże LEXy narzucają dodatkowe wymagania na usterzenia poziome. Kąty odchylenia strug w obszarze usterzenia wysokości w zakresie dużych kątów natarcia są silnie zróżnicowane. Powyżej płaszczyzny cięciw płata głównego wartości kątów odchylenia są największe, co jest rezultatem przemieszczenia (ugięcia się) wiru od nasady LEXa - wiry te pękają już poza płatem głównym i dlatego mają duży wpływ na zmniejszenie lokalnych kątów natarcia na płacie usterzenia. Poniżej płaszczyzny cięciw płata głównego w obszarze usterzenia wysokości pole przepływu jest bardziej jednorodne. Usterzenie przed płatem głównym (albo jako Canard albo jako jedna z powierzchni układu trójpłata) pełni rolę LEXa i zwiększa siłę nośną na większych kątach natarcia. Jednakże klasyczny LEX jest bardziej skuteczny (ze względu na generowanie i stabilność struktur wirowych, a więc w konsekwencji poprawia nośność płata głównego) niż dodatkowa powierzchnia przed płatem głównym. Spowodowane jest to przede wszystkim dużym skosem krawędzi natarcia LEXów i w konsekwencji silniejszym układem wirów. Dlatego też maksymalny współczynnik niestacjonarnej siły nośnej konfiguracji z układem LEXów jest wyższy od odpowiadającego współczynnika konfiguracji z Canardem lub płatem przedniego usterzenia. Jednakże w locie ustalonym konfiguracja z płatem przedniego usterzenia może wytworzyć odpowiednio wysoką siłę nośną i być jednocześnie bardzo skuteczna ze względu na sterowanie. Ponadto, ponieważ rozpiętość płata przedniego usterzenia jest zwykle większa niż rozpiętość LEXów, dlatego wiry schodzące z przedniego płata zwiększają nośność zewnętrznej części płata głównego i poprawiają charakterystyki stateczności bocznej całej konfiguracji.

Wiele prac poświęcono analizie, syntezie i optymalizacji manewrów. Ostatnio nawet podręczniki akademickie zawierają opisy klasycznych i nowoczesnych manewrów na zakrytych kątach natarcia. Sporo prac poświęcono zarówno dynamice i aerodynamice dużych kątów natarcia, inne odnoszą się tylko do zagadnień aerodynamiki, gdyż to w dużej

mierze aerodynamika decyduje o manewrowaniu na zakrytych kątach natarcia. Innym ważnym elementem efektywności manewrowej w zakresie nadkrytycznych kątów natarcia jest układ konstrukcyjny samolotu. Wpływ układu rozmieszczenia płatów (dwie lub trzy powierzchnie nośne) oraz szczegółowe parametry geometryczne, opór indukowany oraz wybrane charakterystyki dynamiczne były analizowane w licznych pracach. Część sygnalizowanych powyżej zagadnień, znanych z badań tunelowych oraz z badań przeprowadzonych w locie, była symulowana numerycznie w monografii prof. Z.Goraja. Zagadnienia supermanewrowości dla samolotów bojowych najnowszej generacji i tzw. zwykłej manewrowości z przepływami nieustalonymi mogą być analizowane aerodynamicznie na podstawie Rysunku 22, szczegółowo wyjaśnionego w monografii prof. Z.Goraja [55].

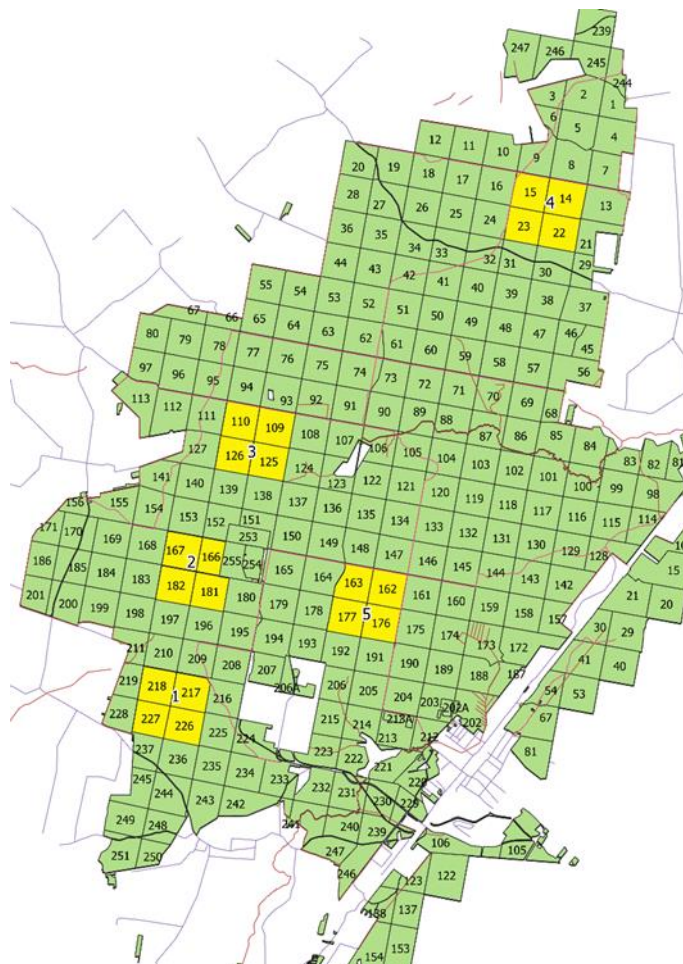


Rysunek 22 Manewrowość (agility) boczna współczesnych samolotów bojowych i supermanewrowych jako funkcja kąta natarcia (AoA) [55]

5. Proces projektowania i testowania systemu platformy i kamer

5.1 Testowanie kamery termowizyjnej

5.1.1 Inwentaryzowany obszar



Rysunek 23 Wytypowane w 2021 roku odziały leśne (oznaczone kolorem żółtym) obrębu Czarna Białostocka w Nadleśnictwie Czarna Białostocka, w których zaplanowano naloty w celu przeprowadzenia inwentaryzacji zwierzyny [47]

Ze względu na bardzo duży rozmiar pracy, jaki należało poświęcić na badania związane z określaniem możliwości wykrywania zwierzyny przy pomocy kamery termowizyjnej zintegrowanej z UAV, jako obszar badawczy wyodrębniono obręb Czarna Białostocka. Obręb ten po stronie wschodniej graniczy z obrębem Żłota. Granicą jest w tym przypadku Droga krajowa nr 19. Od strony północnej obręb Czarna Białostocka graniczy z obrębem Kumiałka. W tym przypadku granicą jest droga leśna znajdująca się w okolicach Wsi Starzyna. Powierzchnia obrębu Czarna Białostocka wynosi 6 981,18 ha (w tym: grunty leśne zalesione i niezalesione stanowią 6 566,86 ha, grunty leśne związane z gospodarką leśną stanowią 225,35

ha, grunty nieleśne 188,97 hektarów). Obszar obrębu Czarna Białostocka zaprezentowany został na Rysunku 23.

5.1.2 Metodyka badań

Wybór kamery do realizacji badań oraz obliczenie rozdzielczości terenowej (GSD) w zależności od wysokości lotu

Do badań wytypowana została kamera termowizyjna E20Tvx, Rysunek 24. Specyfikację techniczną kamery można zobaczyć w Tabeli 9.



Rysunek 24 Kamera termowizyjna E20Tvx

Wytypowano tę kamerę ze względu na wąski kąt widzenia ($33^\circ \times 26,6^\circ$), który umożliwia pozyskanie zdjęć wysokiej jakości (niska rozdzielczość piksela terenowego w porównaniu do kamer o szerszym kącie widzenia). Na uwagę zasługują również wysoka czułość kamery oraz wysoka rozdzielczość matrycy sensora termowizyjnego (640 x 512) jak na ogólną dostępność kamer termowizyjnych przeznaczonych do użytku komercyjnego.

Tabela 9 Specyfikacja techniczna kamery E20Tvx (wybrane cechy na podstawie [124])

Waga	358g
Gimbal	
Zakres ruchu	TILT: -110° - 30°; PAN: ± 165°
Maksymalna prędkość kątowna	TILT:30°/s; PAN:120°/s
Temperatura użytkowania	-10 do 40°C
Część termowizyjna	
Pole widzenia - przekątna	przekątna 41,4°
Pole widzenia - szerokość/wysokość	33° / 26,6° ±5%
Czułość	<50mk
Rozstaw pikseli	12µm
Zakres długości światła IR	8-14µm
Częstotliwość (pełna klatka)	25Hz
Format fotograficzny	JPEG
Format wideo	MP4
Kompensacja temperatury	automatyczna
Rozdzielczość	640x512px
Zakres pomiaru temperatury	High Gain -20 do 150°C; Low Gain 100 do 500°C
Część optyczna	
Rozmiar matrycy	1/2,8" 2.13M
Jasność	F2,8
Pole widzenia	przekątna 90°
Czułość (ISO)	100-3200
Migawka	1/30-1/8000s
Rozdzielczość wideo	1920*1080p 60fps
Format fotograficzny	JPEG
Format wideo	MP4

W przypadku kamery E20Tvx użytkownik ma możliwość wyboru tylko jednego obiektywu. W związku z tym, aby mieć możliwość porównania kilku obiektywów (kątowność widzenia kamery) w pracy rozważana była także kamera FLIR Vue Pro R, w przypadku której kupując kamerę możliwe jest dokonanie wyboru interesującego nas najbardziej obiektywu.

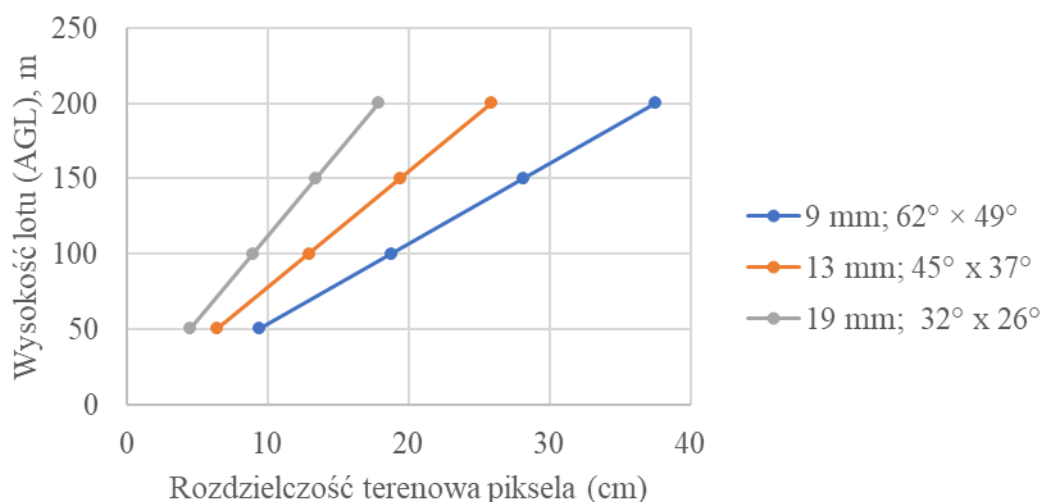
Na podstawie danych podanych w specyfikacji dla kamery FLIR Vue Pro R oraz kamery E20Tvx oszacowano rozdzielczość terenową zdjęć oraz szacowany obszar pokryty jednym

kadrem na wysokościach 50, 100, 150, 200 dla różnych obiektywów. Obliczenia wykonano na podstawie wzorów znajdujących się w przeglądzie literatury w Rozdziale 1.4.2 Istotne parametry kamery.

Wyniki obliczeń przedstawia Tabela 10 oraz Rysunek 25.

Tabela 10 Szacowany obszar pokryty kadrem w zależności od kąta widzenia kamery

Wysokość lotu (m)	Parametry kamery			
	9 mm; 62° x 49°	13 mm; 45° x 37°	19 mm; 32° x 26	E20Tvx 33° x 26,6°
	Obszar pokryty jednym kadrem (m)			
50	60	41	29	30
	48	33	23	24
100	120	83	57	59
	96	66	46	47
150	180	124	86	89
	144	99	69	71
200	240	166	115	118
	192	133	92	95



Rysunek 25 Wpływ wysokości pozyskiwanego zdjęcia na rozdzielczość terenową piksela (dla kamery Flir Vue Pro R)

Jak wynika z Tabeli 10, wraz ze wzrostem wysokości pozyskiwania zdjęć oraz wzrostem kąta widzenia kamery wzrasta powierzchnia obszaru, jaka pokryta jest jednym kadrem, co zwiększa inwentaryzowany obszar. Z drugiej strony zastosowanie kamery o węższym kącie widzenia ma

korzystny wpływ na wyszukiwanie zwierzyny, ponieważ na większej wysokości otrzymujemy lepszej jakości materiał (mniejszy rozmiar piksela terenowego) w porównaniu do kamer o szerszym kącie widzenia. Hałas generowany przez wielowirnikowca na większej wysokości jest mniej słyszalny przez zwierzynę. Dzięki temu istnieje większe prawdopodobieństwo, że zwierzyna będzie zachowywała się naturalnie i wyniki obserwacji będą bardziej wiarygodne.

Warto zauważyć, że kamera termowizyjna o węższym kącie widzenia została wykorzystana podczas realizacji usługi badawczej pt. „Weryfikacja innowacyjnej metody inwentaryzacji zwierzyny grubej z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych (BSP)...” realizowanej przez Konsorcjum badawcze, którego Liderem była Firma TAXUS SI. Podczas nalotów wykorzystano kamerę termowizyjną IRMOD v640 (640 x 480 pikseli, rozdzielczość spektralna 8–14 μm , obiektyw 25 mm, f/1.2). Na wysokości 150 metrów AGL podczas lotu inwentaryzowano obszar o szerokości około 65 metrów [100] uzyskując rozdzielczość piksela terenowego około 10 centymetrów. Rozdzielczość ta w niniejszej pracy została potraktowana jako pewien punkt odniesienia, na podstawie którego została podjęta próba znalezienia optymalnych warunków lotu, które pozwolą na prawidłowe oznaczenie gatunków na podstawie zarejestrowanych sygnatur cieplnych.

Wstępne oszacowanie niezbędnego czasu lotu z kamerą termowizyjną skierowaną prostopadle do podłoża

Założenia:

- inwentaryzowany obszar: około 120 hektarów;
- szerokość inwentaryzowanej powierzchni: 1400 m;
- długość inwentaryzowanej powierzchni: 860 m;
- prędkość misji: 8 m/s;
- pokrycie boczne zdjęć/filmu pomiędzy sąsiadującymi transektami: 10%;
- dodatkowy czas operacyjny: 10% szacunkowego czasu misji.

Inwentaryzowany obszar

Początkowo jako obszar do wykonania inwentaryzacji zwierzyny, w trakcie jednego nalotu, wytypowano około 120 hektarów. Jest to powierzchnia, która często odpowiada jednej powierzchni próbnej wyznaczonej podczas pędzeń próbnych (4 oddziały leśne).

Tabela 11 przedstawia szacunkowy czas niezbędny do realizacji nalotu w zależności od wysokości prowadzenia lotu oraz zastosowanego obiektywu. Były to szacunkowe obliczenia, które potraktowano jako podstawę do wytypowania odpowiedniego wielowirnikowca. W zestawieniu świadomie nie umieszczono wytypowanej w badaniach kamery - E20Tvx. Miało to na celu zachowanie większej czytelności Tabeli. Można przyjąć, że kamera E20Tvx odpowiada kątowni widzenia jaki występuje w przypadku obiektywu 19 mm kamery FLIR Vue Pro R.

Założono, że najmniejsza wysokość lotu na jakiej może być testowany wielowirnikowiec z kamerą termowizyjną to 70 metrów AGL. Było to uwarunkowane tym, że loty w zdecydowanej większości odbywały się nad drzewostanami. Istotny był również inwentaryzowany obszar mieszczący się w jednym kadrze, który w przypadku obiektywu kamery E20tvx dla 70 metrów wysokości wynosi 41 na 33 metry. Czas lotu po doliczeniu 10% czasu dodatkowego oszacowano na 80 minut. Natomiast rozdzielczość piksela terenowego wynosiła około 6 centymetrów. 80-minutowy czas lotu jest bardzo długi jak na wielowirnikowca. W związku z tym, w trakcie pracy stwierdzono, iż należy wytypować mniejszy sprzęt, który będzie wymagał 2 krotnej wymiany baterii (3 loty po około 20 minut). Miało to korzystny wpływ nie tylko na względny logistyczne – wygodniejszy transport oraz większe możliwości związane z wytypowaniem bezpiecznych miejsc startu i lądowania. W trakcie pracy należało również zwrócić uwagę na hałas, generowany przez UAV, który jest zdecydowanie mniejszy w przypadku zastosowania lżejszej maszyny.

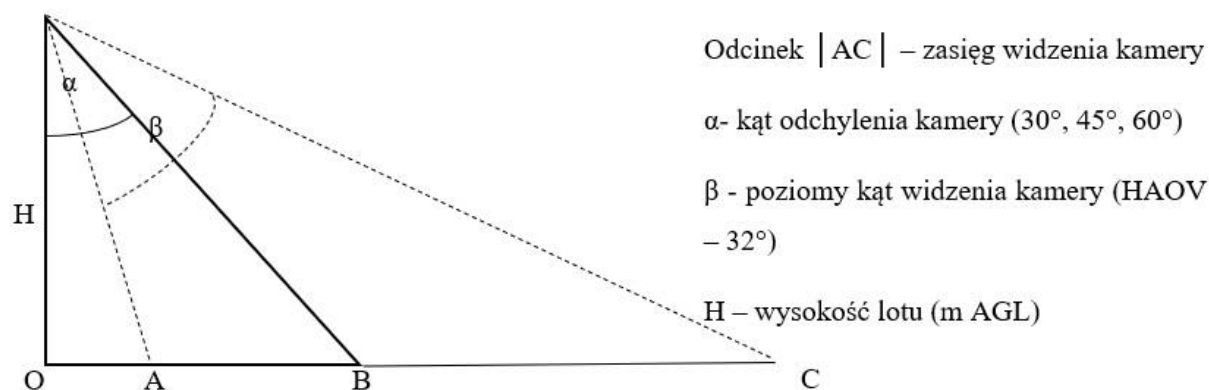
Tabela 11 Zestawienie przedstawiające wyniki dotyczące niezbędnego czasu pracy wielowirnikowca w trakcie inwentaryzacji zwierzyny, w zależności od zastosowanego obiektywu kamery FLIR Vue Pro R oraz wysokości lotu

		Obszar pokryty jednym kadrem (m)			Pokrycie boczne zdjęć (m)			Odległość pomiędzy sąsiadującymi transektami (m)			Liczba transektów			Szacowana długość misji (m)			Szacunkowy czas misji (minuty)			Szacunkowy czas misji (minuty), po uwzględnieniu dodatkowego 10% czasu operacyjnego*		
Wysokość (m)	boki	Obiektów(mm)			Obiektów (mm)			Obiektów(mm)			Obiektów(mm)			Obiektów(mm)			Obiektów(mm)			Obiektów(mm)		
		9	13	19	9	13	19	9	13	19	9	13	19	9	13	19	9	13	19	9	13	19
50	A	60	41	29	6	4	3	54	37	26	26	38	54	23,710	34,045	47,823	49	71	100	54	78	110
	B	48	33	23																		
100	A	120	83	57	12	8	6	108	75	51	13	19	28	12,476	17,685	25,465	26	37	53	29	41	58
	B	96	66	46																		
150	A	180	124	86	18	12	9	162	112	77	9	13	19	9,036	12,519	17,733	19	26	37	21	29	41
	B	144	99	69																		
200	A	240	166	115	24	17	12	216	149	104	7	10	14	7,316	9,945	13,386	15	21	28	17	23	31
	B	192	133	92																		

Oszacowanie czasu lotu z kamerą termowizyjną oraz wielkości piksela terenowego (GSD) w zależności od zastosowanego odchylenia kamery (Kamera termowizyjna FLIR Vue Pro R, Model: Vue Pro R 640, 32° FOV, 19mm, 30Hz)

Założenia:

- inwentaryzowany obszar: około 120 hektarów;
- szerokość inwentaryzowanej powierzchni: 1400 m;
- długość inwentaryzowanej powierzchni: 860 m;
- prędkość misji: 8 m/s;
- pokrycie boczne zdjęć/filmu między transektami: 10%;
- dodatkowy czas operacyjny: 10% szacunkowego czasu misji;
- kąt pochylenia kamery rozpatrywany w trzech wariantach (30°, 45°, 60°).



Rysunek 26 Szkic przedstawiający obszar widzenia kamery (odcinek $|AC|$) przy zastosowaniu odchylenia kamery w bok

Obliczenie długości inwentaryzowanego obszaru (poziom kamery) w jednym kadrze (odcinek $|AC|$)

$$|OA| = \tan\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) * H \quad [9]$$

$$|OB| = \tan(\alpha) * H \quad [10]$$

$$|OC| = \tan\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) * H \quad [11]$$

$$|AC| = |OC| - |OA| \quad [12]$$

Wzór na długość inwentaryzowanej powierzchni – odcinek $|AC|$

$$|AC| = \tan\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) * H - \tan\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) * H \quad [13]$$

Oszacowanie rozdzielczości piksela GSD

Szacunkowy GSD po stronie kadru prezentujący obszar znajdujący się bliżej kamery

$$GSD_1 = \frac{|OA|}{\sin\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right)} * \frac{1}{I_x} \quad [14]$$

Szacunkowy GSD po stronie kadru prezentujący obszar znajdujący się dalej kamery

$$GSD_2 = \frac{|OC|}{\sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right)} * \frac{1}{I_x} \quad [15]$$

gdzie:

I_x - rozdzielczość wyrażana w pikselach (poziomy bok kadru) – w tym przypadku 640 pikseli (uwaga - punkt 1.4.2 rozprawy opisuje obliczanie GSD w przypadku skierowania kamery prostopadle do podłoża).

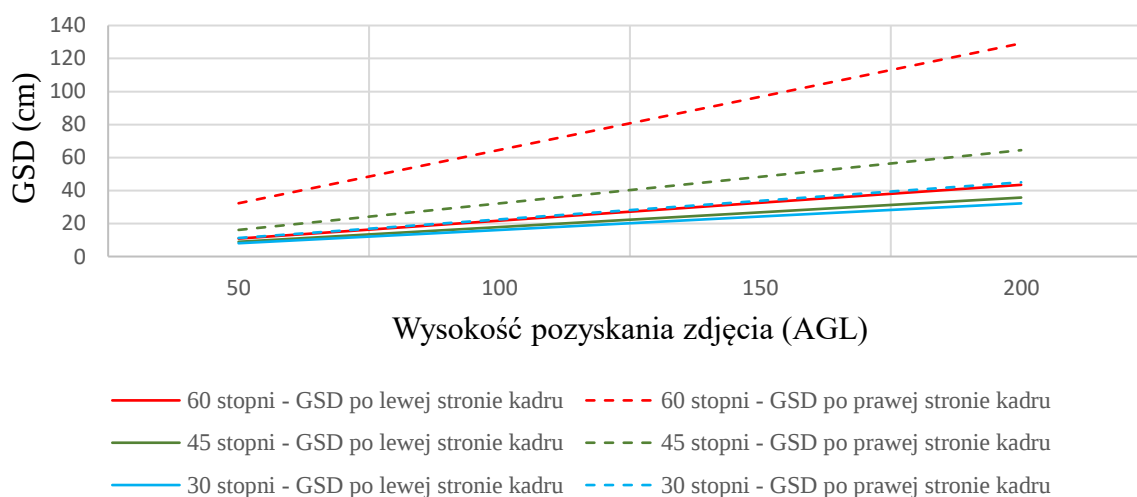
Lot ze skierowaną kamerą w dół (prostopadle do podłoża) nie jest jedynym rozwiązaniem, jaki można zastosować podczas inwentaryzacji zwierzyny z lotu ptaka. Należy również rozważyć możliwość odchylenia kamery w bok. Korzyści przemawiające za zastosowaniem takiego rozwiązania to m.in. zwiększenie obszaru, jaki mieści się w jest jednym kadrze filmu/zdjęcia, a co za tym idzie skrócenie czasu oblotu. Przy zastosowaniu stosunkowo niskich odchylen kamery, cały czas utrzymujemy dobrej jakości rozdzielczość terenową (GSD) po obydwu stronach kadru. Kolejną korzyścią, która związana jest ze zwiększonym inwentaryzowanym obszarem, jest większa szansa na wystrzyżenie się od błędu podwójnego liczenia zwierzyny.

Stosunkowo korzystnym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie odchylenia kamery 30° oraz lot na wysokości 100 metrów AGL. W tym przypadku niezbędny czas lotu wynosi około 42 minuty (Tabela 12) Na uwagę zasługuje jednak fakt, że zgodnie z szacunkami na jednym z boków otrzymujemy dość niskiej jakości rozdzielczość terenową (GSD – 22 cm), co może spowodować, że część kadru prawdopodobnie okaże się nieużyteczna (brak możliwości określenia gatunku na podstawie zarejestrowanego termogramu).

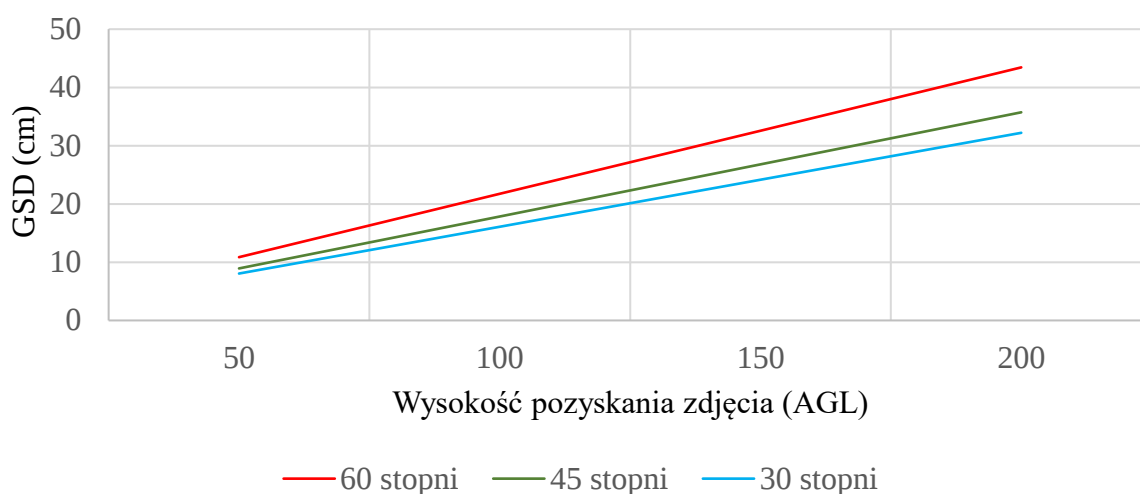
Lecąc na wysokości 70 metrów AGL przy zastosowaniu odchylenia 30° potrzebujemy około 60 minut lotu. Natomiast rozdzielczość terenowa wynosi odpowiednio 11 oraz 16 centymetrów. Dla porównania przy zastosowaniu tej samej wysokości lotu, tego samego pokrycia bocznego (10%), tej samej prędkości (8 m/s), ale skierowaniu kamery w dół wymagany czas lotu został oszacowany na około 80 minut. Trzeba pamiętać jednak o tym, że rozdzielczość terenowa piksela w tym przypadku wynosi około 6 cm, więc jest bardzo dobrej jakości.

Utrzymanie tej samej wysokości lotu (70 metrów AGL), ale zmiana odchylenia kamery na 45° nie wydaje się już dobrym rozwiązaniem, gdyż co prawda czas lotu skraca się do około 39 minut, ale rozdzielczości terenowe wynoszą odpowiednio 13 cm oraz 23 cm. Ze względu na mniejszej jakości rozdzielczość terenową po jednej stronie kadru może okazać się, że to rozwiązanie nie będzie optymalne – część kadru okaże się nie użyteczna - zwłaszcza, że w zdecydowanej większości przypadków loty odbywały się nad roślinnością, która zasłaniała zwierzęta występujące w kadrze.

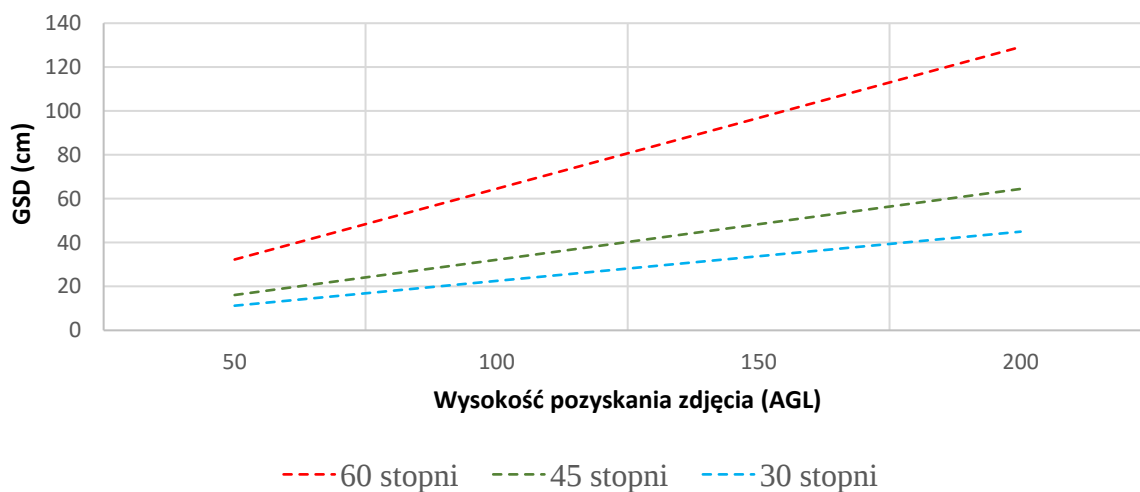
Inwentaryzacja z lotu ptaka w większości przypadków odbywała się nad drzewostanami. W związku z tym, należało unikać lotu na niskich wysokościach (poniżej 70 metrów AGL), ponieważ ze względu na zmiany wysokości terenu n.p.m. autonomiczny lot na niższej wysokości mógł okazać się niebezpieczny. Zbyt niski lot mógłby też mieć wpływ na problemy z łącznością pomiędzy wielowirnikowcem, a aparaturą – ze względu na przeszkody dla propagacji fal.



Rysunek 27 Szacunkowa rozdzielczość terenowa (GSD) w zależności od wysokości lotu oraz pochylenia kamery - 30°, 45°, 60° (Kamera termowizyjna FLIR Vue Pro R, Model: Vue Pro R 640, 32° FOV, 19mm, 30Hz)



Rysunek 28 Szacunkowa rozdzielczość terenowa (GSD) w zależności od wysokości oraz pochylenia kamery - 30°, 45°, 60° (Kamera termowizyjna FLIR Vue Pro R, Model: Vue Pro R 640, 32° FOV, 19mm, 30Hz) – strona kadru prezentująca obszar znajdujący się bliżej kamery



Rysunek 29 Szacunkowa rozdzielczość terenowa (GSD) w zależności od wysokości oraz pochylenia kamery - 30°, 45°, 60° (Kamera termowizyjna FLIR Vue Pro R, Model: Vue Pro R 640, 32° FOV, 19mm, 30Hz) – strona kadru prezentująca obszar znajdujący się dalej kamery

Szacunkowe rozdzielczości terenowe (GSD) w zależności od wysokości lotu oraz pochylenia kamery przedstawiają Rysunki 27, 28 oraz 29.

Tabela 12 Zestawienie przedstawiające wyniki dotyczące niezbędnego czasu pracy wielowirnikowca oraz szacunkowe GSD w trakcie inwentaryzacji zwierzyny, w zależności od kąta odchylenia kamery oraz wysokości lotu (Kamera termowizyjna FLIR Vue Pro R, Model: Vue Pro R 640, 32° FOV, 19mm, 30Hz)

Odchylenie kamery (°)	Wysokość (m)	OA (m)	OB (m)	OC (m)	Szerokość inwentaryzowanego obszaru	Pokrycie 10 % (m)	Odległość transektu od transektu (m)	Liczba transektów (sztuki)	Szacunkowa długość misji (m)	Szacunkowy czas misji (min)	Szacunkowy czas łącznie z dodatkowym czasem operacyjnym (10%)	GSD ₁ na jednym boku kadru (cm)	GSD ₂ na drugim boku kadru (cm)
30	50	12	29	52	39	4	35	40	35 780	75	82	8	11
	100	25	58	104	79	8	71	20	18 544	39	42	16	22
	150	37	87	155	118	12	106	14	13 420	28	31	24	34
	200	50	115	207	157	16	142	10	9 874	21	23	32	45
45	50	28	50	90	62	6	56	25	22 850	48	52	9	16
	100	55	100	180	125	12	112	13	12 530	26	29	18	32
	150	83	150	271	187	19	169	9	9 090	19	21	27	48
	200	111	200	361	250	25	225	7	7 370	15	17	36	64
60	50	48	87	201	152	15	137	11	10 830	23	25	11	32
	100	97	173	401	305	30	274	6	6 530	14	15	22	65
	150	145	260	602	457	46	411	4	4 673	10	11	33	97
	200	193	346	802	609	61	548	3	3 676	8	8	43	129

Wytypowanie UAV

Biorąc po uwagę założone wymagania, takie jak zapewnienie około godziny lotu podczas jednej misji przy jednoczesnym ograniczeniu hałasu, zdecydowano się na mniejszą konstrukcję, która pozwoli na godzinny czas lotu z wytypowaną kamerą przy 2-krotnej wymianie baterii (lot z wykorzystaniem trzech baterii). Biorąc pod uwagę powyższe założenia oraz względy praktyczne – m.in. pełna kompatybilność pomiędzy wielowirnikowcem a kamerą termowizyjną wytypowano **Hexacopter Yuneec H520E**. Na Rysunku 30 można zobaczyć wytypowaną maszynę.



Rysunek 30 Wytypowany wielowirnikowiec Yuneec H520E

Tabela 13 przedstawia podstawowe parametry wielowirnikowca.

Tabela 13 Podstawowe parametry wytypowanego wielowirnikowca (wybrane cechy na podstawie [105])

Waga	1 856g (bez kamery)	Akumulator	LiHv 4s 6 200 mAh
Rozstaw wirników	520 mm	Ładowarka	SC4000-4E
Liczba wirników	6	Czas ładowania	2 godziny
Maks. prędkość kątowa	120°/s	Dokładność pozycjonowania	poziom:±1.5m; pion:±0.5m
Maks. prędkość wznoszenia	4 m/s	Temperatura pracy	0°C - 40°C
Maks. prędkość opadania	2.5 m/s	Maksymalna masa startowa	2 500 g
Maks. prędkość pozioma	13.5 m/s	Maksymalna masa ładunku	518g
Maks. czas lotu	30 min (z E90x)	Sterownik RC	ST16E
Średnica wirnika	248 mm	Maksymalny poziom hałasu	90dB
Typ silnika	BL3210		
Prędkość obrotowa wału silnika	730 obr./min		

Oszacowanie optymalnej wysokości lotu na podstawie wiedzy o rozmiarach zwierząt

Każda kamera ma wewnętrzną skalę kątową pikseli (ang. *intrusitic angular pixel scale*), która jest zdefiniowana jako kątowy rozmiar w stopniach pokryty przez każdy piksel. Jest to wyrażone wzorem [24]:

$$p_a = \frac{\theta}{N_{pixels}} \quad [16]$$

gdzie:

p_a - wewnętrzna skala kątowa pikseli; θ - kąt widzenia (FOV) wyrażony w stopniach;

N_{pixels} - liczba pikseli.

Jeśli kamera jest skierowana prostopadle w dół w kierunku ziemi wielkość piksela terenowego (GSD) obliczyć można w następujący sposób [24]:

$$GSD = h * \tan(p_a) \quad [17]$$

W związku z tym wymagana wysokość lotu może być obliczona jak niżej:

$$h = \frac{\tan(p_a)}{GSD} \quad [18]$$

Ze wzoru 18 określono wymaganą wysokość lotu w zależności od rozmiaru inwentaryzowanego gatunku. W trakcie obliczeń przyjęto dwa założenia:

- zakładana wystarczająca liczba pikseli, na której powinna zostać zarejestrowana długość zwierzęcia wynosi 10;
- zakładana wystarczająca liczba pikseli, na której powinna zostać zarejestrowana długość zwierzęcia wynosi 20.

Tabela 14 Wymagana wysokość lotu przy założeniu, że długość zwierzęcia jest rejestrowana przez 10 (Wariant I) lub 20 (Wariant II) pikseli (kamera EzoTvX, kąt widzenia horyzontalny – 33°)

Gatunek	Długość ciała* (m)	Wariant I		Wariant II	
		Wymagane GSD (cm)	Wymagana wysokość (m)	Wymagane GSD (cm)	Wymagana wysokość (m)
Sarna europejska	0.95 – 1.40	9.5	106	4.75	53
Jeleń szlachetny	1.75 – 2.65	17.5	195	8.75	97
Łoś euroazjatycki	2.4 – 3.1	24	267	12	133
Dzik euroazjatycki	0.9 – 2.0	9	100	4.5	50

*do obliczeń wykorzystano dolne wartości z przedziału

Biorąc pod uwagę szacunki przedstawione w Tabeli 14 oraz obowiązujące prawo [141], aby zapewnić sobie jak najmniej pracy związanej z uzyskiwaniem ewentualnych zgód na loty wykraczające poza scenariusze standardowe dla lotów UAV, podjęto decyzję o tym, że testy rozpoczęte zostaną na wysokości 120 metrów AGL oraz, że w miarę potrzeb wysokość ta będzie obniżana w kolejnych lotach.

Interpretacja pozyskiwanych materiałów

Do oszacowania liczebności zwierzyny w obrębie Czarna Białostocka wzięto pod uwagę powierzchnię obrębu 6 981,18 ha, po odliczeniu części gruntów związanych z gospodarką leśną opisanych jako budynki i budowle (10.7793 ha) oraz obszar szkółki leśnej (11.0828 ha). Dodatkowo w przypadku gruntów nie zaliczonych do lasów odliczone zostały grunty zabudowane i zurbanizowane (4.9860 ha). Dało to wynik 6 954.3319 ha.

Obliczenia stanu zwierzyny wykonano posługując się następującymi wzorami:

- a) Obliczenie stanu zwierzyny na 1000 hektarów

$$L = \frac{p}{s} * 1000 \quad [19]$$

gdzie: L – stan zwierzyny obliczony na 1000 hektarów (sztuk/1 000 ha);

p – liczba osobników zainwentaryzowana podczas nalotów (sztuki);

s – łączna powierzchnia zainwentaryzowana podczas nalotów (ha).

- b) Obliczenie liczby zwierzyny dla obrębu Czarna Białostocka

$$I = \frac{L}{S} / 1000 \quad [20]$$

gdzie: I – oszacowana liczba zwierzyny dla inwentaryzowanego obszaru (sztuki);

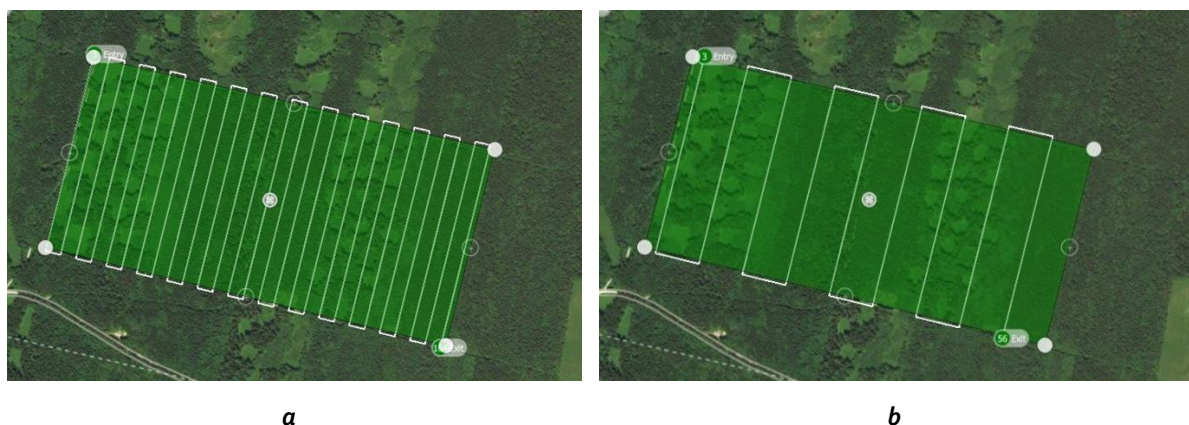
L – stan zwierzyny obliczony na 1000 hektarów (sztuk/1 000 ha);

S – powierzchnia, dla której wykonywana została inwentaryzacja (ha).

Modyfikacja parametrów lotów letnich 2022 roku z kamerą termowizyjną

W okresie letnim na podstawie zebranych wcześniej doświadczeń podjęto decyzję o modyfikacji parametrów lotu. Każdy z lotów związany z wykrywaniem zwierzyny grubej zaplanowano w taki sposób, aby wymiana baterii w trakcie jednej misji nie była konieczna. W poprzednich sezonach loty planowano w taki sposób, aby zdjęcia wykonane na przylegających do siebie traksektach pokrywały się bocznie w 10 %. W trakcie badań okazało się, że takie rozwiązanie niesie ze sobą pewne ryzyko związane z błędną identyfikacją liczby

zarejestrowanych osobników (podwójne liczenie zwierzyny lub uznanie dwóch osobników jako jednego). W związku z tym wprowadzono modyfikacje - zrezygnowano z inwentaryzacji całych oddziałów leśnych. Misje planowane były w taki sposób, aby środki sąsiednich transektów oddalone były od siebie o 120 – 150 metrów. Wprowadzoną modyfikację przedstawia Rysunek 31. Podobnie jak w poprzednich sezonach, aby zniwelować wpływ oddziaływania generowanego dźwięku oraz emitowanego światła przez UAV, miejsce startu/lądowania wielowirnikowca było oddalone od inwentaryzowanej powierzchni o przynajmniej 200 – 300 metrów. Powierzchnia badawcza zawsze była inwentaryzowana rozpoczynając od najbliższego rogu znajdującego się pomiędzy operatorem a inwentaryzowaną powierzchnią. Loty prowadzone były na wysokości 80 metrów AGL, prędkość lotu poziomego wynosiła 10 m/s, natomiast następujące po sobie zdjęcia pozyskiwane były w interwale 1 - sekundowym.



Rysunek 31 Zobrazowanie modyfikacji lotu wprowadzonej w okresie letnim (a – przykładowa trasa nalogu, dla której zaplanowano pokrycie boczne zdjęć na sąsiadujących transektach w wielkości 10%, b – wprowadzona latem 2022 roku modyfikacja – zwiększenie odległości pomiędzy transektami)

5.2 Testowanie kamery multispektralnej

Wytypowany sprzęt



Rysunek 32 Phantom 4 Multispectral

Jak można zobaczyć na specyfikacji (Tabela 15) Phantom 4 Multispectral (Rysunek 32) gromadzi zdjęcia w pięciu kanałach spektralnych (B/G/R/RedEdge/NIR). Dane te umożliwiają opracowanie wszystkich wytypowanych w niniejszej rozprawie doktorskiej materiałów – kompozycji barwnych RGB, CIR oraz wybranych wskaźników wegetacyjnych.

Tabela 15 Wybrane cechy Phantom 4 Multispectral (na podstawie [106])

Informacje ogólne	
Masa startowa	1487 g
Wymiary (przekątna)	350 mm
Czas lotu	do 27 minut
Zasięg lotu	do 5 km
Aparat	
Zakres kanałów	Blue (B): 450 nm $\pm$ 16 nm; Green (G): 560 nm $\pm$ 16 nm; Red (R): 650 nm $\pm$ 16 nm; Red edge (RE): 730 nm $\pm$ 16 nm; Near-infrared (NIR): 840 nm $\pm$ 26 nm
Obiektyw	FOV (pole widzenia): 62.7°, Długość ogniskowa: 5.74 mm (35 mm ekwiwalent: 40 mm) , autofocus ∞ przysłona: f/2.2
Format zdjęć	JPEG (fotografia zwykła) + TIFF (fotografia multispektralna)
Gimbal	Tak
Czujnik natężenia światła	Tak
Bateria	
Pojemność	5870 mAh
Napięcie	15,2 V
Typ baterii	LiPo 4S
Energia	89,2 Wh
Masa netto	468 g
Zakres temperatury ładowania	14 ° do 104 °F (-10 ° do 40 °C)
Maksymalne ładowanie Moc	160 W
Pilot zdalnego sterowania	
Częstotliwość robocza	2.400 GHz-2.483 GHz (Europa, Japonia, Korea) 5.725 GHz-5.850 GHz (Stany Zjednoczone, Chiny)
Moc nadawania (EIRP)	2,4 GHz CE / MIC / KCC: 5,8 GHz SRRC / FCC:

Wykorzystane oprogramowanie

1. Agisoft Metashape Professional Edition

Do opracowania ortofotomap oraz obliczania indeksów wegetacyjnych wykorzystano oprogramowanie Agisoft Metashape Professional Edition. Jest to program do tworzenia modeli 3D na podstawie zdjęć. Umożliwia także m.in. generowanie chmury punktów, generowanie modeli wielokątów, cyfrowego modelu terenu (DEM) oraz ortofotomap [1].

2. QGIS (wersja 3.16 Hannover)

Program QGIS jest to wolne i otwarte oprogramowania geomatyczne (ang. free and open source software for geospatial), które udostępniane jest na licencji GNU GPL (General Public License). Programu QGIS może być używany bezpłatnie [131].

Metodyka

1. Wykonanie lotu.

Na parametry lotu składało się:

- a) prędkość pozioma ≈ 8 m/s;
- b) wysokość - 120 m AGL;
- c) pokrycie zdjęć:
 - 80 % poprzeczne;
 - 70 % boczne.

Powyższe parametry pozwoliły na uzyskanie wielkości piksela terenowego (GSD) około 6 cm.

Kamera zamocowana do UAV rejestrowała obraz w następujących kanałach spektralnych:

- a) niebieskim ($450 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$);
- b) zielonym ($560 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$);
- c) czerwonym ($650 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$);
- d) krawędzi czerwieni ($730 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$);
- e) bliskiej podczerwieni ($840 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$).

2. Opracowanie ortofotomap (kompozycji barwnych RGB oraz CIR) oraz map indeksów wegetacyjnych

Ortofotomapy zostały sporządzone zgodnie z instrukcją udostępnioną przez producenta oprogramowania Agisoft Metashape Professional Edition [62].

Proces tworzenia ortofotomap składał się z następujących etapów:

- a) dodanie zdjęć;
- b) kalibracja współczynnika odbicia;
- c) wyrównywanie zdjęć;
- d) budowa chmury punktów;
- e) budowa cyfrowego modelu terenu ((ang. Digital Elevation Model (DEM)));
- f) budowa ortomozaiki;
- g) eksport ortomozaiki.

Oprogramowanie AGISOFT dzięki funkcji Raster Transform umożliwiała również obliczenie wybranych w pracy indeksów wegetacyjnych.

Materiały były generowane jako obrazy w formacie TIFF. Jako układ współrzędnych wybierano WGS84 (EPSG:4326).

Pozyskane zdjęcia pozwoliły na opracowanie materiałów, które posłużyły do wykrycia miejsc, gdzie znajdują się drzewa osłabione (zasiedlone przez szkodniki), martwe (posusz jałowy), czy też będące złomami lub wywrotami.

Do opracowanych materiałów należą:

a) ortofotomapy:

- wykonane w barwach naturalnych (wykorzystanie kanałów czerwonego, zielonego, niebieskiego);
- wykonane w kompozycji barwnej CIR (wykorzystanie kanałów bliskiej podczerwieni, czerwonego oraz zielonego).

b) mapy indeksów wegetacyjnych:

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI);
- Normalized Difference Red Edge Index (NDRE);
- Enhanced Normalized Difference Vegetation Index (ENDVI);
- Leaf Chlorophyll Index (LCI).

3. Analiza pozyskanych materiałów

Materiał podany został analizie w oprogramowaniu QGIS dającym min. możliwość wykonywania analiz przestrzennych.

W trakcie pracy, aby ułatwić analizę przestrzenną wykorzystane zostały warstwy Leśnej Mapy Numerycznej Nadleśnictwa Czarna Białostocka. Dało to możliwość ustalenia konkretnego wydzielenia dla danego miejsca oraz ułatwiło interpretację wyników poprzez dostęp do właściwych opisów taksacyjnych analizowanych wydzieleni leśnych.

Podczas analizy opisów taksacyjnych szczególnie zwracano uwagę na takie cechy znajdujące się w opisie taksacyjnych jak wiek drzewostanu, skład gatunkowy oraz wskaźnik zadrzewienia.

Analiza danych w oprogramowaniu QGIS składała się na następujące etapy:

- a) wczytanie wszystkich warstw;
- b) budowa kompozycji barwnej RGB poprzez ustawianie sposobu wyświetlania kanałów spektralnych;
- c) budowa kompozycji barwnej CIR;
- d) ustawienie sposobu wyświetlania dla map indeksów wegetacyjnych;
- e) utworzenie nowej warstwy wektorowej (punktowej);
- f) fotointerpretacja kameralna (analiza materiałów) poprzez odszukiwanie miejsc, gdzie opracowane materiały wskazywały na potencjalne występowanie drzew osłabionych, martwych, czy też złomów lub wywrotów;
- g) zapis wytypowanych lokalizacji, gdzie potencjalnie występują drzewa osłabione, martwe czy też złomy i wywroty, w nowo utworzonej warstwie punktowej.

W trakcie foto-interpretacji najbardziej pomocna była kompozycja barwna CIR, która drzewa martwe lub silnie osłabione obrazuje w kolorze zielonkawym. Dodatkowo opierano się także o opracowane mapy indeksów wegetacyjnych.

4. Weryfikacja danych w terenie

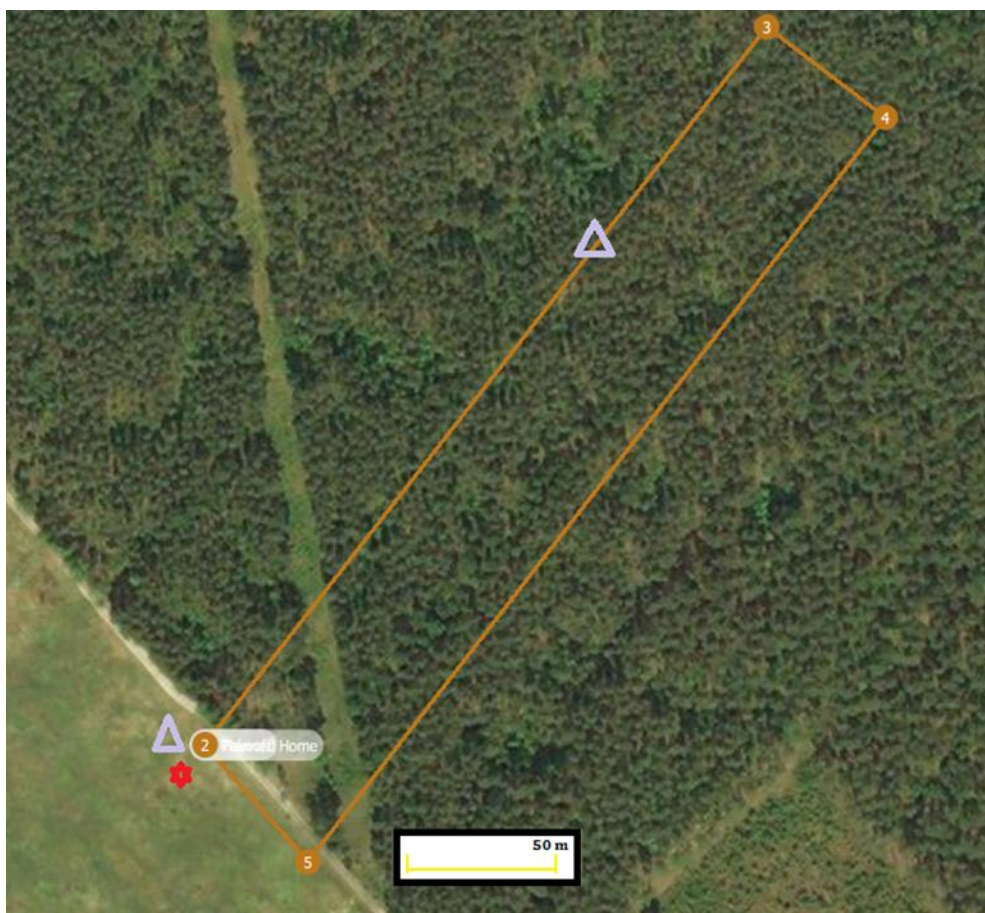
Weryfikacja wyników w terenie miała na celu ustalenie przydatności opracowanych materiałów.

Praca ta składała się z następujących etapów:

- a) przerzucenie opracowanej podczas pracy kameralnej warstwy wektorowej (punktowej) na sprzęt Topcon GRS-1;
- b) wyjście w teren i weryfikacja wytypowanych podczas pracy kameralnej lokalizacji.

Oprócz weryfikacji wytypowanych miejsc obserwator pieszy przy użyciu sprzętu Topcon GRS -1 odnotowywał miejsca, gdzie znajdowały się drzewa wykazujące cechy wyraźnego osłabienia, drzewa martwe, złomy lub wywroty.

5.3 Pomiary natężenia dźwięku (dB) generowanego przez wielowirnikowiec



Rysunek 33 Plan nalotów, jakie wykonane były w celu pomiaru natężenia dźwięku (Δ - orientacyjna lokalizacja mikrofonu, ⚙ - miejsce startu/lądowania)

Dnia 28 listopada 2021 roku wykonane zostały pomiary natężenia dźwięku generowanego przez wielowirnikowiec w trakcie lotu. Prace przeprowadzono na terenie województwa warmińsko-mazurskiego w okolicach miejscowości Rekownica (gmina Jedwabno, powiat szczycieński).

Tabela 16 przedstawia warunki atmosferyczne zarejestrowane tego dnia. Jak podaje literatura, optymalne warunki atmosferyczne do pomiaru natężenia dźwięku to m.in. a) prędkość wiatru 0 – 4 m/s; b) temperatura powietrza od 15 do 25 °C; c) wilgotność względna w granicach 40 – 90% [108]. Ze względu na porę roku zdecydowano się nie odkładać pomiarów w celu wykonania badań w bardziej odpowiednich warunkach.

Czas jednego nalotu wynosił około 3 minuty. UAV w trakcie lotu poziomego przemieszczał się z prędkością 8 m/s. Największa odległość pomiędzy miejscem startu a wielowirnikowcem wynosiła około 310 metrów.

Przebieg nalotu zawierał następujące etapy:

- a) pionowy start UAV;
- b) wznoszenie się do założonej wysokości AGL (80 lub 120 metrów AGL);
- c) lot poziomy zgodnie z zaplanowaną trasą (patrz Rysunek 33);
- d) powrót do miejsca startu;
- e) opadanie;
- f) lądowanie;
- g) wyłączenie silników.

Tabela 16 Warunki atmosferyczne zarejestrowane dnia 28 listopada 2021 roku

Wiatr (km/h)	8
Porywy wiatru (km/h)	19
Temperatura (°C)	0
Zachmurzenie (%)	100

Natężenie dźwięku mierzone było w dB. Pomiar hałasu rejestrowano przez cały czas trwania lotu (od startu do wyłączenia silników). Wykonanych zostało 8 lotów. Tabela 17 przedstawia zbiorczo warianty nalotów.

Poziom natężenia dźwięku mierzony był przy użyciu jednego mikrofonu. Rysunek 33 przedstawia orientacyjnie lokalizację mikrofonu. Zgodnie z Tabelą 17 w przypadku czterech lotów pomiary dokonano w odległości 4 metrów od miejsca startu (mikrofon znajdował się na

przestrzeni otwartej). Natomiast podczas drugiej części badania natężenie dźwięku rejestrowano w odległości 200 metrów od miejsca startu/ładowania UAV. W drugiej części badania mikrofon znajdował się pod okapem drzewostanu.

Tabela 17 *Warianty lotów*

Lp.	Wysokość m AGL	Lokalizacja mikrofonu	Liczba prób
1	80	4 metry od miejsca startu	2
2	120	4 metry od miejsca startu	2
3	80	200 metrów od miejsca startu	2
4	120	200 metrów od miejsca startu	2

Sprzęt jakim dokonano pomiarów to Miernik natężenia dźwięku DT-8852 (patrz Rysunek 34).



Rysunek 34 *Miernik natężenia dźwięku DT-8852*

5.4 Badanie zasięgu łączności platformy

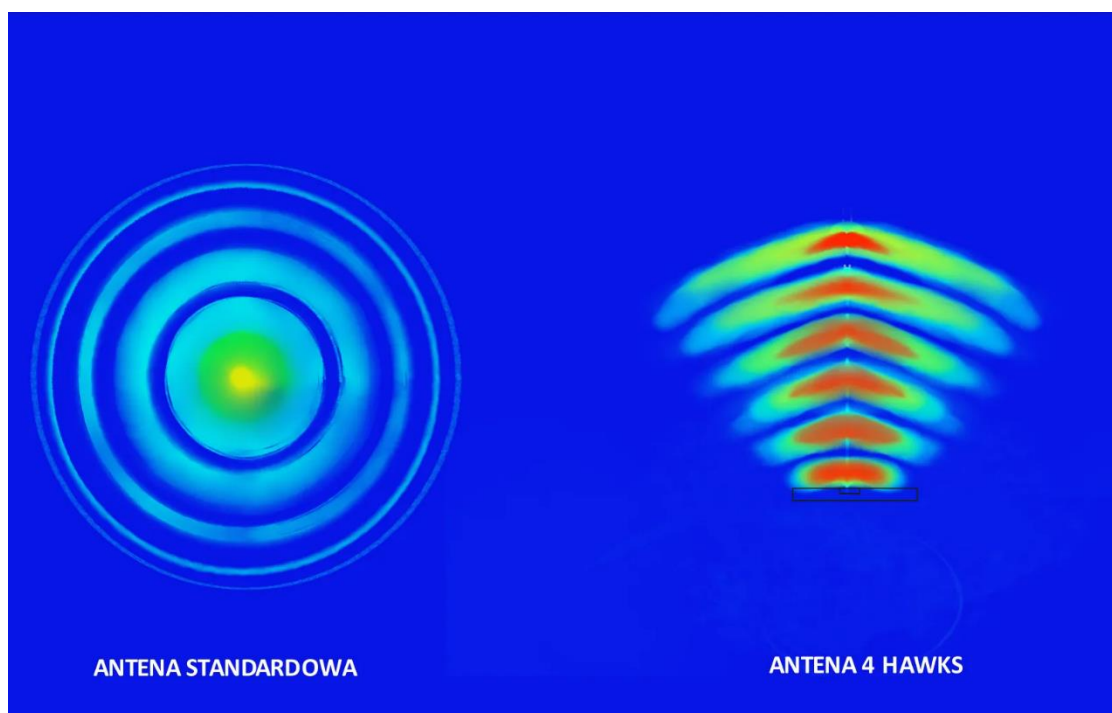
Celem zwiększenia łączności platformy do aparatury sterującej zamiast anten dookólnych zastosowano kierunkową Antenę panelową Raptor SR (Rysunek 35). Zasadę działania anteny kierunkowej w porównaniu do standardowej anteny dookólnej przedstawia Rysunek 36. Antena kierunkowa poprzez propagowanie fal w jednym kierunku może zwiększać zasięg łączności pomiędzy UAV a aparaturą sterującą.



Rysunek 35 Antena panelowa 4Hawks Raptor SR

Pasmo transmisji telemetrycznej oraz obrazu w przypadku zespołu bezzałogowego wykorzystanego w badaniach wynosi 2,4 GHz OFDM [145].

Badanie łączności platformy odbywało się w dwóch różnych warunkach - leśnych oraz na przestrzeni otwartej.

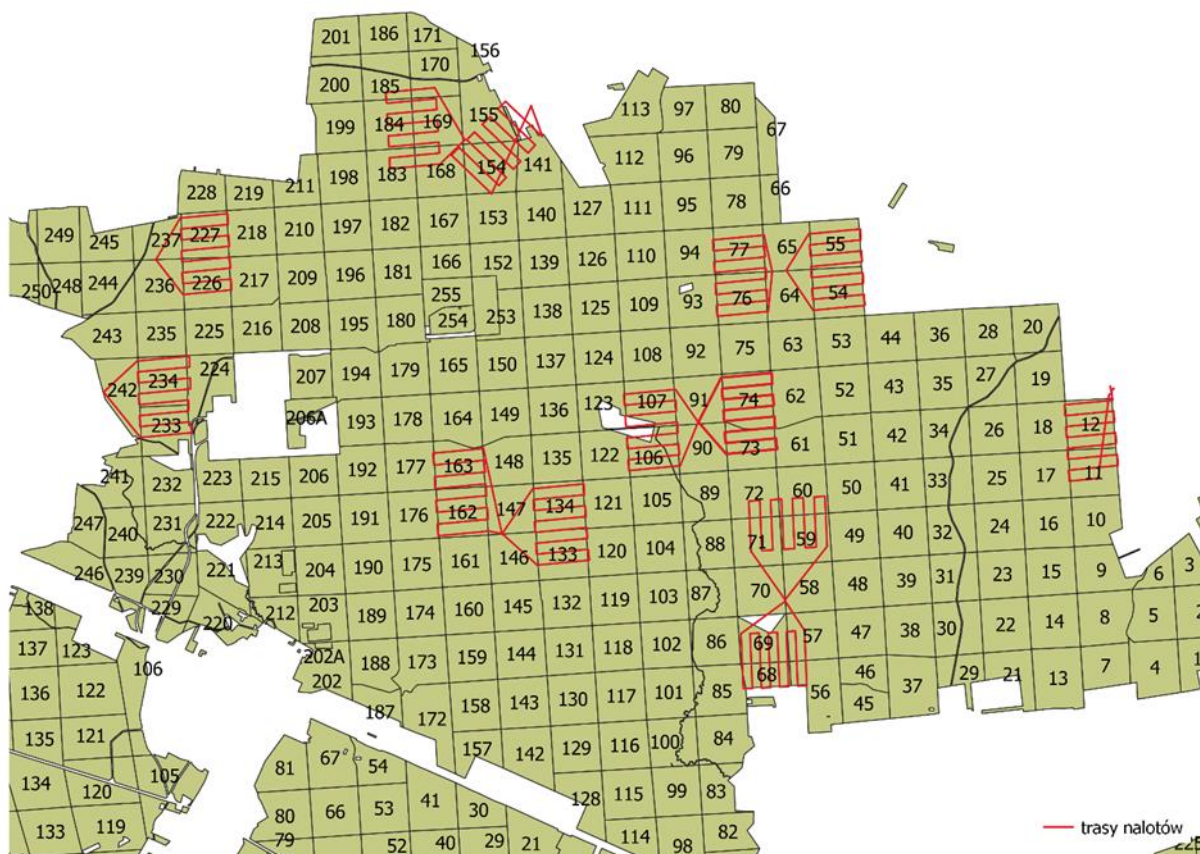


Rysunek 36 Z optymalizowaną propagacją fal (opracowanie własne na podstawie [3])

5.4.1 Testowanie zasięgu łączności platformy w terenie leśnym

Na prace nad testowaniem zasięgu łączności platformy w terenie leśnym składały się następujące etapy:

- a) wykonanie lotów w warunkach leśnych (w różnych wytypowanych lokalizacjach na terenie obrębu Czarna Białostocka) w dniach od 13 września do 26 września 2022 roku (łącznie przeprowadzono 13 nalołów). Lokalizację oraz trasy przeprowadzonych lotów przedstawia Rysunek 37. Przeprowadzone naloły miały charakter lotów autonomicznych (80 m wysokości AGL, prędkość pozioma wielowirnikowca 10 m/s);
- b) analiza logów z lotów w celu określenia lokalizacji UAV w momencie utraty wymiany danych telemetrycznych pomiędzy UAV a GCS;
- c) określenie odległości pomiędzy UAV a GCS w momencie chwilowej utraty łączności telemetrycznej. Pracę wykonano przy użyciu oprogramowania QGIS oraz warstwy KML przedstawiającej trasę nalołu.



Rysunek 37 Lokalizacje oraz trasy wykonanych nalołów przeprowadzonych w warunkach leśnych obrębu Czarna Białostocka związane z badaniem zasięgu łączności platformy

5.4.2 Testowanie zasięgu łączności platformy w terenie otwartym

Na prace nad testowaniem zasięgu łączności platformy w terenie otwartym składały się następujące etapy:

- a) Wykonanie lotów w terenie otwartym. Loty przeprowadzone zostały 22 marca 2022 roku na powierzchni otwartej na obrzeżach miejscowości Czarna Wieś Kościelna (gmina Czarna Białostocka; powiat białostocki). Łącznie wykonano 3 naloły na wysokości 80, 100 oraz 120 m AGL. Lot odbył się zgodnie ze scenariuszem standardowym NSTS-02. W trakcie operacji, aby zwiększyć dopuszczalną maksymalną odległość pomiędzy aparaturą a UAV wyznaczony został obserwator, który śledził położenie UAV. UAV w trakcie lotu wykonywał zdjęcia w interwale 1-sekundowym. Lot odbywał się w trybie Angle (w tym trybie wielowirnikowiec sterowany jest stale przez operatora, natomiast pozycjonowany jest sygnałem GNSS). UAV wzniósł się na docelową wysokość, a następnie maksymalnie oddalił się od aparatury. Warunkiem, w którym podejmowana była decyzja o zakończeniu lotu i powrocie do miejsca startu było:

- utrata łączności telemetrycznej pomiędzy GCS a UAV lub;
 - utrata UAV z pola widzenia obserwatora lub;
 - decyzja pilota o konieczności powrotu ze względów bezpieczeństwa, takich jak np. spadek napięcia baterii.
- b) Określenie maksymalnej uzyskanej odległości pomiędzy GCS a UAV dokonano na podstawie lokalizacji wykonanych zdjęć. Odległość pomiędzy lokalizacją pierwszego zdjęcia (czyli miejscem startu wielowirnikowca), a lokalizacją zdjęcia, które zostało wykonane najdalej od GCS. Ta część pracy została przeprowadzona w oprogramowaniu QGIS.

6. Wyniki

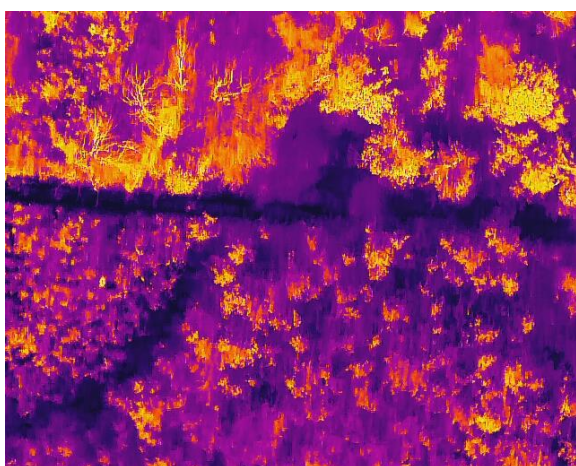
6.1 Weryfikacja użyteczności kamery termowizyjnej

6.1.1 Podsumowanie lotów jesiennych 2021 roku

Loty na 120 metrach AGL

Dnia 10 oraz 14 października 2021 roku wykonano loty na wysokości 120 metrów AGL. W przypadku obydwu lotów zinwentaryzowana została ta sama powierzchnia (oddziały 14, 15, 22, 23 Leśnictwa Kwasówka) o wielkości 118.91 hektarów. Lot 10 października wykonano w okolicach południa. Był to słoneczny, bezchmurny dzień. W związku z tym na zdjęciach termowizyjnych można było zaobserwować tzw. efekt rozgrzanych koron (Rysunek 38a). Tego dnia w czasie lotu pozyskano około 850 zdjęć termowizyjnych oraz 850 zdjęć wykonanych przy użyciu kamery RGB. Zarówno zdjęcia termowizyjne, jak i zdjęcia wykonane przy użyciu kamery rejestrującej obraz w świetle widzialnym nie pozwoliły na wykrycie żadnego zwierzęcia. Loty w celu inwentaryzacji zwierzyny podczas słonecznych dni w warunkach leśnych należy uznać za bezskuteczne. Dotyczy to zarówno wykorzystania zdjęć pochodzących z kamery termowizyjnej, jak i kamery RGB.

Rysunek 39 przedstawia zdjęcie pozyskane przy użyciu kamery RGB wykonane w tym samym momencie, w którym wykonane zostało zdjęcie termowizyjne umieszczone na Rysunku 38a. Porównując obydwa zdjęcia można zauważyć, że kamera RGB posiada zdecydowanie większy kąt widzenia niż kamera termowizyjna (pole widzenia po przekątnej to 90° dla kamery RGB oraz $41,4^\circ$ dla kamery termowizyjnej).



a



b

Rysunek 38 Zdjęcia termowizyjne wykonane w tej samej lokalizacji (a – wykonane 10 października w okolicach południa; b – wykonane 14 października po zachodzie słońca; kąt widzenia kamery termowizyjnej: $33^\circ / 26,6^\circ \pm 5\%$)

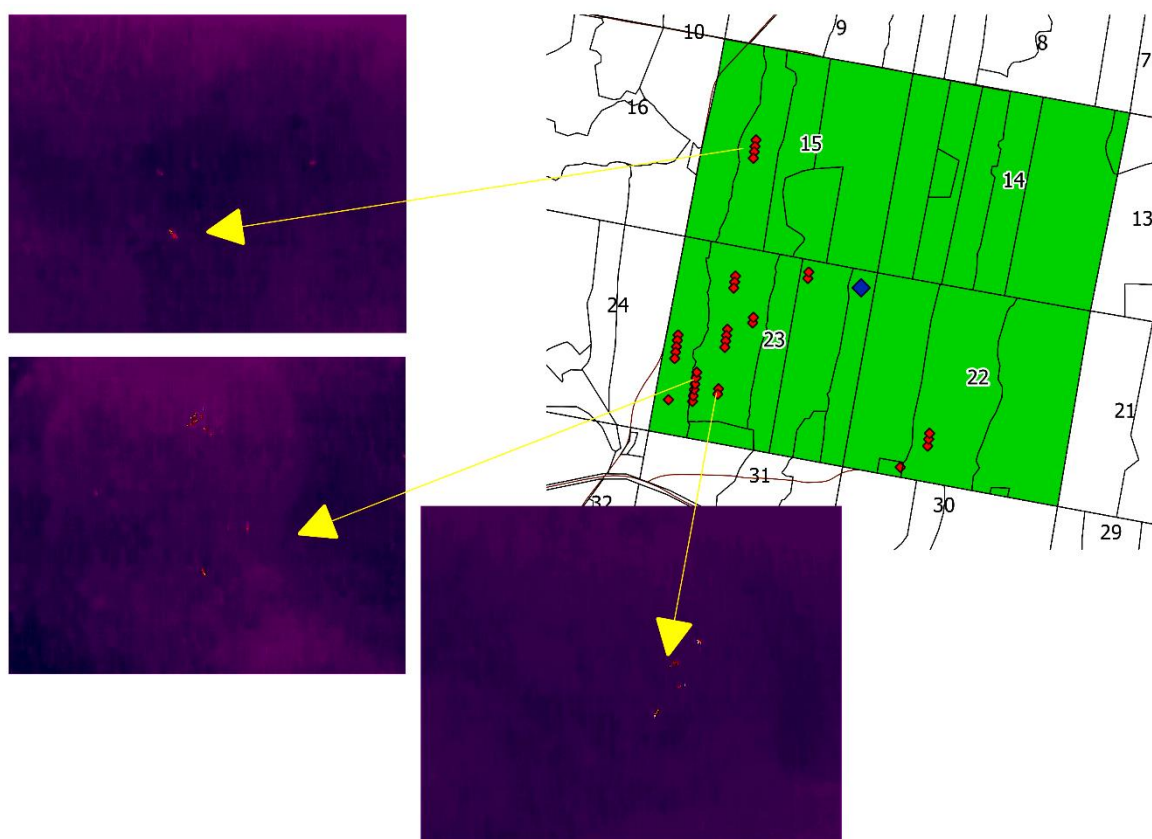


Rysunek 39 Zdjęcie skrzyżowania wykonane dnia 10 października w okolicach południa (przekątny kąt widzenia (DAOV) kamery RGB - 90°). Wyjaśnienie pojęcia DAOV znajduje się w pkt 1.4.2 rozprawy

14 października w godzinach wieczornych (szczegółowe warunki lotu przedstawia Tabela 18) zarejestrowano 33 zdjęcia w 11 seriach, na których zarejestrowano sygnatury ciepłe będące potencjalnie zwierzętami. Rysunek 40 przedstawia lokalizację wykonania zdjęć, na których zainwentaryzowana została zwierzyna. Rozmiar piksela terenowego (11 cm GSD) oraz fakt, że zdjęcia, na których występowała zwierzyna zostały wykonane najprawdopodobniej, gdy znajdowała się ona pod okapem drzewostanu nie pozwoliły na oznaczenie gatunków. Z tego powodu w bieżącym etapie badań zrezygnowano z lotów na wysokości 120 metrów AGL. Podjęto decyzję, aby kolejne loty wykonywane były na wysokości 80 metrów AGL (co odpowiada 7 cm GSD). Analizując Rysunek 40 przedstawiający lokalizację pozyskania zdjęć, na których zarejestrowano termogramy w czasie nocnego lotu z dnia 14 października, można zauważyć, że większość sygnatur ciepłych zarejestrowanych zostało jedynie w pierwszej części lotu. Potencjalnie mogło być to spowodowane tym, że w pierwszej fazie lotu zwierzyna nie zdążyła jeszcze uciec z badanej powierzchni. Trzeba zauważyć, że operator znajdował się w samym środku inwentaryzowanej powierzchni (patrz Rysunek 40). W trakcie trwania misji należało dokonać dwukrotnej wymiany baterii, co wiązało się nie tylko z dodatkowym hałasem związanym z procedurą lądowania, która jest bardziej stresująca dla zwierząt niż start. Większy stres dla zwierząt wynika z tego, że procedura lądowania (opadanie, następnie wylądowanie w bezpiecznym miejscu) trwa dłużej niż procedura startu (oderwanie się od ziemi, następnie uzyskanie docelowej wysokości). Potwierdzeniem tej tezy są wyniki badań pomiaru natężenia dźwięku generowanego przez wielowirnikowiec przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej (pkt 6.3 rozprawy). Warto zwrócić uwagę, że wielowirnikowiec jest oświetlony, co w trakcie lądowania mogło dodatkowo odstraszać zwierzynę.

Tabela 18 Warunki lotów z dnia 14 października (lot po zachodzie słońca)

Data	-	14.10
Godzina rozpoczęcia	czas UTC	16:15
Godzina zakończenia		17:07
Czas trwania misji	min.	52
Wysokość	m AGL	120
Prędkość lotu	I	8
	II	10
	III	10
Odległość pomiędzy wykonywaniem zdjęć	m	64
Liczba zdjęć termowizyjnych	szt.	847
Zainwentaryzowane oddziały leśne	nr	14
		15
		22
		23
Powierzchnia	ha	118.91
Wschód słońca	czas UTC	4:51
Zachód słońca		15:33
Prędkość wiatru	m/s	6
Zachmurzenie	%	85
Opady	-	brak
Temperatura	C	7



Rysunek 40 Lokalizacje rejestracji termogramów (czerwone punkty to lokalizacje zdjęć, na których zarejestrowano termogramy, niebieski punkt to lokalizacja operatora). Lot wykonany 14 października 2021 roku [47]

Loty na 80 metrach AGL

W dniach od 15 października do 17 listopada wykonano 10 lotów na wysokości 80 metrów AGL. Loty wykonywano zwykle w czasie około godziny po zachodzie słońca. Jeden lot z dnia 24 października został wykonany przed wschodem słońca. Naloty wykonywane były o tych porach z dwóch istotnych powodów. Pierwszym z nich jest to, że zwierzyna wykazuje w tym okresie największą aktywność. Zwiększona aktywność zwierzyny sprawia, że istnieje większe prawdopodobieństwo jej wykrycia – istnieje mniejsze ryzyko, że zwierzę będzie znajdować się pod okapem drzew.

Pewnym wyjątkiem jest dzik, którego największa aktywność (w okresie listopad – grudzień) przypada na późne godziny nocne. Potwierdzają to wyniki badań wykonane przez Taxus SI, Uniwersytet Warszawski, Muzeum i Instytut Zoologii PAN, w trakcie których analizowano dobową aktywność zwierząt [103].

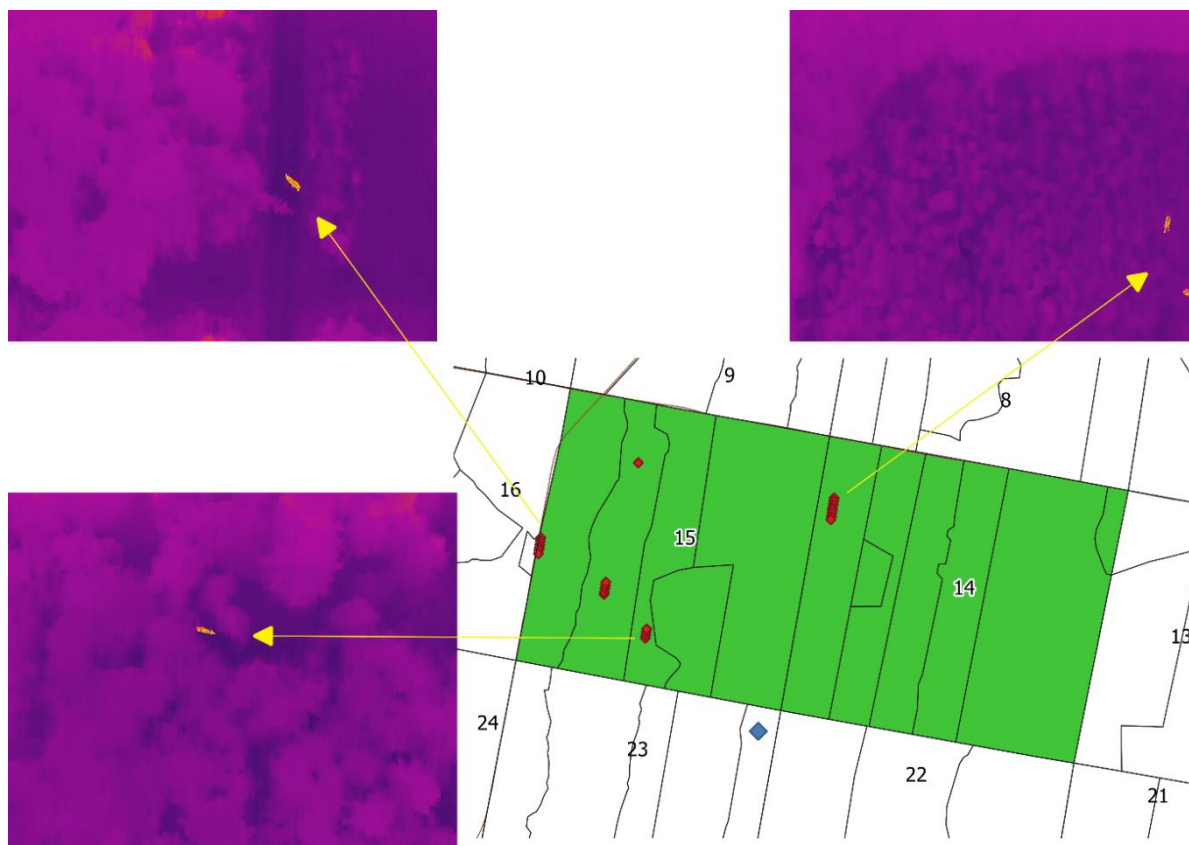
Drugą korzyścią przemawiającą za wykonaniem lotów po zmierzchu lub przed wschodem słońca jest zwiększony kontrast termalny pomiędzy zwierzyną a jej otoczeniem. Sprawia to, że zwierzyna jest zdecydowanie bardziej widoczna na zdjęciach termowizyjnych. Niestety ze względu na porę lotów (godziny nocne) nie była możliwa dodatkowa identyfikacja zwierzyny przy użyciu kamery RGB.

Na parametry lotu składały się:

- a) wysokość lotu: 80 metrów AGL;
- b) odległość pomiędzy kolejnymi transektami: 42 metry (pokrycie boczne zdjęć na sąsiadujących transektach to 10 %);
- c) prędkość pozioma MR wynosiła od 6 do 10 m/s.

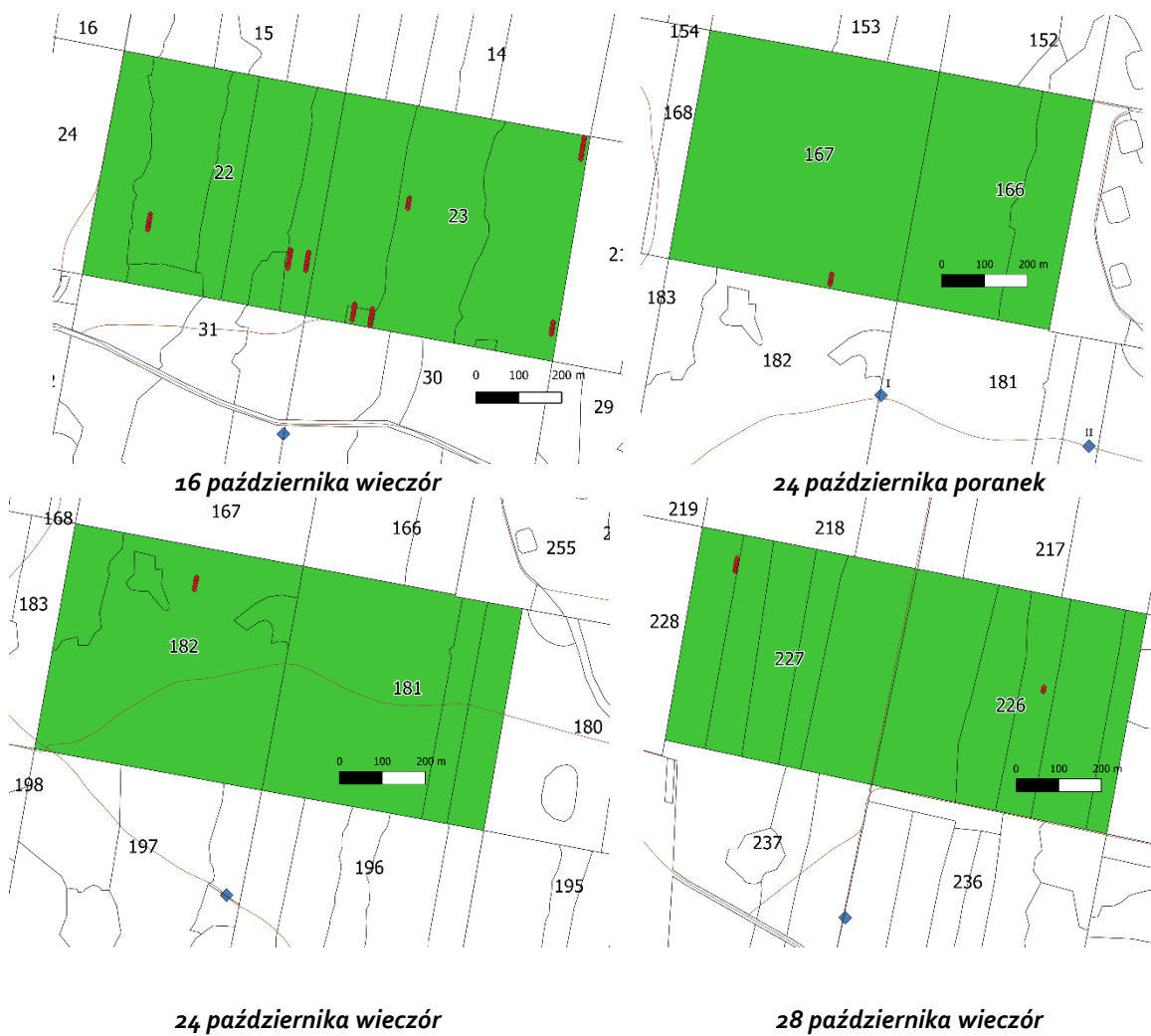
Tezę, że dźwięk oraz oświetlenie emitowane przez wielowirnikowiec podczas lądowania odstrasza zwierzynę potwierdza lot z 15 października. Tego dnia wykonano nalot na wysokości 80 m AGL. Wiązało się to z tym, że należało zmniejszyć rozmiar inwentaryzowanej powierzchni (w porównaniu do lotu na wysokości 120 m AGL) do około 60 hektarów (szczegółowe warunki lotu przedstawia Tabela 19). Rysunek 41 obrazuje lokalizację zarejestrowanych termogramów w czasie lotu z 15 października. Widać tutaj, że zwierzęta zarejestrowane zostały jedynie w pierwszej fazie lotu. Warto zauważyć, że obniżenie wysokości lotu do 80 metrów AGL spowodowało, że zarejestrowane termogramy były zdecydowanie bardziej czytelne. Możliwe było jednoznaczne oznaczenie gatunków znajdujących się na większości zdjęć termowizyjnych. Szczegóły dotyczące zainwentaryzowanych gatunków w trakcie wszystkich lotów wykonanych na wysokości 80 m AGL jesienią 2021 roku przedstawia Tabela 20.

Na podstawie wielkości oraz kształtu rejestrowanych sygnatur cieplnych zidentyfikowano łosia w dwóch lokalizacjach oddalonych od siebie o około 250 metrów. W trakcie liczenia uznano, że były to dwa różne osobniki. Nie wykluczone jednak, że doszło do podwójnego liczenia zwierzyny (zwierzę w trakcie lotu UAV mogło zmienić swoją lokalizację). W trakcie tego lotu zarejestrowano jeszcze dwa jelenie. W tym przypadku z pewnością nie doszło to podwójnego liczenia zwierzyny, ponieważ jelenie zostały zarejestrowane na tych samych zdjęciach pozyskanych w jednej serii (patrz Rysunek 41).



Rysunek 41 Lokalizacje zdjęć, na których zarejestrowano termogramy (czerwone punkty to lokalizacje zdjęć, na których zarejestrowano termogramy, niebieski punkt to lokalizacja operatora). Lot wykonany 15 października 2021 roku. Dwa zdjęcia po lewej stronie pokazują łośia; zdjęcie w prawym górnym rogu pokazuje 2 jelenie [47]

Aby zniwelować wpływ oddziaływania generowanego dźwięku oraz emitowanego światła na inwentaryzowaną zwierzynę przez UAV, podjęto decyzję, że w przypadku kolejnych lotów miejsce startu/ładowania wielowirnikowca będzie oddalone od inwentaryzowanej powierzchni. Starano się, o ile było to możliwe, aby miejsce startu/ładowania oddalone było 200 - 300 metrów od badanej powierzchni. Jak pokazują wyniki kolejnych lotów, prawdopodobnie miało to pozytywny wpływ na ich wiarygodność. Wskazuje na to fakt, że w przypadku następnych lotów zwierzęta były rejestrowane nie tylko w pierwszej części lotu, ale także w następnych. Rysunek 42 przedstawia lokalizację zarejestrowanych sygnatur oraz miejsca startu/ładowania UAV z czterech przykładowych lotów jesiennych. Loty planowane były w taki sposób, aby powierzchnia badawcza inwentaryzowania była zawsze rozpoczynana od najbliższego rogu znajdującego się pomiędzy operatorem a inwentaryzowaną powierzchnią.



Rysunek 42 Lokalizacja wykonania zdjęć (zaznaczono jako czerwone punkty), na których zarejestrowano sygnatury cieplne w dniach od 16, 24 oraz 28 października 2021 roku. Lokalizację operatora zaznaczono jako niebieski punkt



Rysunek 43 Porównanie zdjęcia wykonanego kamerą termowizyjną ze zdjęciem RGB (24 października, godzina wykonania zdjęcia - 4⁴⁸; godzina wschodu słońca UTC - 4²⁴)

24 października podczas porannego lotu, w związku ze zbliżającym się wschodem słońca wyraźny obraz rejestrowała również kamera RGB. Rysunek 43 przedstawia zdjęcia pochodzące z kamery RGB oraz kamery termowizyjnej wykonane w tym samym momencie. Można zobaczyć, że kamera termowizyjna pozwoliła na wykrycie zwierzęcia, które zostało oznaczone jako sarna. Jednocześnie kamera RGB okazała się w tym przypadku nie użyteczna – nie było możliwe zaobserwowanie zwierzęcia, pomimo, że dzięki kamerze termowizyjnej można było stwierdzić, że zwierzę tam występuje. Trzeba jednak wspomnieć, że ta sygnatura cieplna ze względu na jej mały rozmiar została oznaczona z niewielką pewnością. W trakcie pracy zaobserwowano, że wytypowana kamera termowizyjna pozwala na wiarygodne oznaczanie raczej większych gatunków zwierząt, do których należy jeleni oraz łosi.

Tabela 19 Warunki lotów wykonanych w dniach od 15 października do 17 listopada

Data	Godzina rozpoczęcia		Godzina zakończenia	Czas trwania misji	Prędkość lotu *			Odległość pomiędzy wykonywaniem kolejnych zdjęć	Liczba zdjęć termowizyjnych	Inwentaryzowane oddziały		Powierzchnia	Wschód słońca	Zachód słońca	Prędkość wiatru	Zachmurzenie	Opady	Temperatura
					I	II	III											
-	czas UTC		min.	m/s			m	szt.	nr		ha	czas UTC		m/s	%	-	C	
15.10	16:54	17:44	50	6	6	10	6	1808	14	15	60.02	4:53	15:30	14	100	brak	11	
16.10	16:41	17:34	53	6	10	10	6	2357	22	23	58.89	4:56	15:29	8	30		13	
24.10	4:24	5:27	63	7	10	10	7	1750	166	167	49.37	5:10	15:11	10	88		2	
24.10	15:36	16:21	45	7	10	x	7	1891	181	182	56.49	5:10	15:11	7	15		3	
28.10	16:11	17:13	63	6	10	10	6	2113	226	227	54.3	5:17	15:02	4	51		10	
2.11	16:58	17:53	55	6	10	10	6	2125	217	218	55.88	5:27	14:53	9	97		6	
11.11	15:40	16:37	57	7	10	10	7	1957	125	126	57.12	5:44	14:37	8	99		4	
13.11	15:09	16:10	61	7	10	10	7	1988	109	110	58.52	5:47	14:33	10	100		5	
16.11	15:04	15:55	51	7	10	10	7	1950	162	163	55.46	5:53	14:29	9	89		3	
17.11	14:47	15:42	55	7	10	10	7	1930	176	177	57.28	5:55	14:28	8	97		3	

*I, II, III – oznaczają numery baterii.

Loty w większości przypadków wykonano z wykorzystaniem trzech baterii. Czas trwania misji przedstawiony w Tabeli 19 uwzględnia również czas jaki poświęcono na niezbędne wymiany baterii. Najdłuższy czas na wykonanie nalotu poświęcono 24 października w godzinach porannych oraz 28 października (63 minuty). Warto podkreślić, że nie były to przypadki kiedy zinwentaryzowano największą powierzchnię. Na ogólny czas misji miała wpływ nie tylko wielkość powierzchni, ale także inne okoliczności. Należały do nich m.in. odległość miejsca startu (lokalizacja operatora) od powierzchni próbnej, miejsce startu/ładowania oraz wielkość wolnej przestrzeni (czy umożliwiała komfortowe lądowanie). Na przykład 24 października w godzinach porannych wystąpiły problemy z połączeniem pomiędzy UAV a aparaturą sterującą, które zmusiły operatora do zmiany jego lokalizacji w trakcie trwania misji (patrz Rysunek 42). Sprawilo to, że pomimo zinwentaryzowania wtedy najmniejszej powierzchni (49.37 ha), czas jaki należało poświęcić na nalot wyniósł ponad godzinę.

Z drugiej strony 24 października w godzinach wieczornych warunki lotu, a także bardzo komfortowe miejsce do lądowania sprawiło, że nalot wykonano w ciągu 45 minut wykorzystując przy tym 2 baterie (jedno lądowanie w trakcie misji). Powierzchnia, jaką w tym

czasie zinwentaryzowano wynosiła 54,3 hektary. Jest to szósta pod względem wielkości obszaru powierzchnia badawcza (patrz Tabela 19).

Tabela 20 przedstawia szczegóły dotyczące zinwentaryzowanych zwierząt w czasie lotów na wysokości 80 m AGL.

Tabela 20 Liczba zarejestrowanych osobników. Podsumowanie lotów jesiennych 2021 roku

Data	Sarna	Jeleń	Dzik	łoś	Nie oznaczono	Suma	Inwentaryzowana powierzchnia (ha)
15 października		2		2	2	6	60.02
16 października	6	10		1		17	58.89
24 października rano	1					1	49.37
24 października wieczór	1					1	56.49
28 października	1	2				3	54.3
2 listopada	1		1		3	5	55.88
11 listopada	3					3	57.12
13 listopada	3					3	58.52
16 listopada					3	3	55.46
17 listopada		6				6	57.28
Suma	16	20	1	3	8	48	563.33

Tabela 21 Szacowana liczba osobników występujących na terenie obrębu Czarna Białostocka

	Sarna	Jeleń	Dzik	łoś
Zagęszczenie na 1000 hektarów*	28	36	2	5
Szacowana liczba osobników na obrębie Czarna Białostocka	198	247	12	37

Dane dotyczące szacowanej liczby zwierząt bytujących na obszarze obrębu Czarna Białostocka przedstawia Tabela 21. Wyniki inwentaryzacji jesiennej przy użyciu kamery termowizyjnej zostały skonfrontowane z opinią myśliwego odpowiedzialnego za obszar łowiecki. Trzeba zdawać sobie sprawę, że ze względu na subiektywizm w ocenie nie jest to metoda doskonała. Nie wolno jednak zapominać, że istnieje powszechny problem zdobycia w pełni obiektywnych danych referencyjnych, które pozwoliłyby na statystyczne uwiarygodnienie lub odrzucenie wyników inwentaryzacji przeprowadzonych w ramach tej pracy. Wszystkie wykorzystywane

do tej pory metody szacowania zwierzyny nie są doskonałe i nie jest rozstrzygnięte, która z metod szacowania liczebności zwierzyny jest najdokładniejsza.

Na podstawie rozmowy ankietowej z myśliwym odpowiedzialnym za obszar łowiecki można było dojść do następujących wniosków:

1. Szacowana liczebność łosia euroazjatyckiego w porównaniu do opinii myśliwego okazała się zawyżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV stwierdzono, że na terenie obrębu Czarna Białostocka występuje 37 osobników (według myśliwego to ≈ 20 osobników). Liczebność tego gatunku określona na podstawie zdjęć termowizyjnych jest o 85 % większa w stosunku do szacunku przeprowadzonego przez myśliwego;
2. Szacowana liczba osobników jelenia szlachetnego wydaje się zawyżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczba ta wynosi 247 osobników (typ myśliwego to ≈ 200 sztuk). Liczebność jelenia szlachetnego określona na podstawie zdjęć termowizyjnych jest o 24% większa w stosunku do opinii myśliwego;
3. Szacowana liczebność sarny europejskiej wydaje się wiarygodna. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczba ta wynosi 198 osobników (typ myśliwego to 200 osobników);
4. Szacowana liczebność osobników dzika euroazjatyckiego jest wiarygodna. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczebność tego gatunku wynosi 12 osobników. Zgodnie z opinią myśliwego wartość tą podczas rozpatrywanego okresu (od 15 października do 17 listopada 2021 roku) można uznać za wiarygodną.

W przypadku dwóch największych inwentaryzowanych gatunków – łosia euroazjatyckiego oraz jelenia szlachetnego, liczebność określona na podstawie zdjęć termowizyjnych okazała się większa w porównaniu do opinii myśliwego odpowiedzialnego za obszar łowiecki. Wpływ na taki stan rzeczy może mieć błąd związany z podwójnym liczeniem zwierzyny (policzenie tego samego osobnika dwa lub więcej razy). W przypadku jelenia szlachetnego ten rodzaj pomyłki mógł wystąpić 16 października, kiedy zgodnie z analizą zdjęć zarejestrowano 10 osobników tego gatunku (patrz Tabela 20). Tego dnia zdjęcia, na których zarejestrowano jelenie wystąpiły w 4 seriach (łącznie 30 zdjęć). W związku z tym, że zwierzęta zarejestrowano w kilku seriach, nie można wykluczyć, że nie doszło do podwójnego liczenia zwierzyny. Mogło to mieć miejsce, tym bardziej, że cztery serie zdjęć zostały wykonane w sąsiadujących transektach, w podobnych lokalizacjach (dwie lokalizacje po dwa transekty, patrz Rysunek 42). W przypadku łosia euroazjatyckiego podwójne liczenie zwierzyny mogło wystąpić 15 października, kiedy w trakcie nalotu łos z zarejestrowany został w dwóch lokalizacjach (patrz Rysunek 41). Aby

zniwelować ryzyko podwójnego liczenia zwierzyny należy rozważyć zwiększenie odstępu pomiędzy sąsiadującymi transektami (np. nie co ≈ 40 metrów, a zwiększyć odstęp pomiędzy transektami do 120-150 metrów). Takie rozwiązanie zostało wprowadzone latem 2022 roku.

Trzeba zauważyć, że w trakcie analizy zdjęć nie spotykano się raczej z trudnościami podczas oznaczania do gatunku większych sygnatur należących do jelenia szlachetnego oraz łosia euroazjatyckiego. Związane jest to z wystarczająco dużym rozmiarem tych zwierząt (od 1.75 do 2.65 metra – jelen szlachetny, od 2.40 do 3.10 metra – łось euroazjatycki), który pozwala na wykrycie oraz wiarygodne oznaczenie sygnatury cieplnej do konkretnego gatunku. Liczba pikseli, na której rejestrowana jest długość zwierzęcia (lot 80 m AGL, rozmiar matrycy 640x512 pikseli, kąt widzenia kamery termowizyjnej: $33^\circ / 26,6^\circ$) wynosi średnio około 31 dla jelenia szlachetnego oraz średnio około 39 w przypadku łosia euroazjatyckiego.

Liczebność dzika euroazjatyckiego (12 sztuk) określona przy użyciu materiałów pochodzących z kamery termowizyjnej zagregowanej z UAV zgodnie z opinią myśliwego można uznać za wiarygodną. Jednak należy zwrócić uwagę na pewne trudności, które wystąpiły w trakcie oznaczania sygnatur należących do tego gatunku. Dzik euroazjatycki posiada szeroki rozstęp rozmiarów. Może mieć rozmiar niecałego metra, ale też może osiągnąć aż dwa metry długości. Pokrywa się on w istotnym stopniu z wielkością jelenia szlachetnego. Dlatego istnieje realne ryzyko błędnego oznaczenia gatunku. Z pewnością wykorzystanie lepszej jakości kamer (np. o większej rozdzielczości) pozwoliłoby na uzyskanie bardziej jednoznacznych w oznaczaniu sygnatur cieplnych.

Liczebność sarny europejskiej okazała się wiarygodna. Jednak nie wolno pominąć faktu, że w czasie oznaczania sygnatur cieplnych należących potencjalnie do tego gatunku osoba przeglądająca zdjęcia wykazywała się najmnieszą pewnością. Oznaczenie sarny europejskiej na podstawie zarejestrowanej sygnatury cieplnej w momencie, gdy znajdowała się pod okapem drzewostanu, jest bardzo trudne i do wyników tej pracy należy podchodzić bardzo ostrożnie. Można przyjąć, że kamery termowizyjne dostępne do użytku komercyjnego nie są wystarczające do inwentaryzacji gatunków o niewielkich rozmiarach, jak na przykład sarna.

Porównanie jakości pozyskanych zdjęć ze względu na prędkość z jaką przemieszczał się UAV

Jak wynika z Tabeli 19, loty wykonywano w trzech 3 różnych prędkościach – 6, 7 oraz 10 m/s. Zmiana prędkości lotu miała na celu sprawdzenie, jak zmienia się ostrość pozyskiwanych zdjęć oraz czy ma ona wpływ na czytelność rejestrowanych sygnatur termalnych, a tym samym możliwości oznaczania gatunków.

Zgodnie z obserwacjami w sytuacji, gdy zwierzyna znajdowała się na otwartej przestrzeni, prędkość przemieszczania się UAV nie miała istotnego wpływu na możliwości związane z jednoznacznym oznaczeniem gatunku. Okazało się jednak, że prędkość przemieszczania się wielowirnikowca miała już istotny wpływ w sytuacji, gdy wykrywane zwierzęta znajdowały się pod okapem drzewostanu. Zmniejszenie prędkości do 7 m/s powodowało, że sygnatury ciepłe były bardziej czytelne (mniejsze rozmycie zdjęć). Efekt ten nie jest widoczny jedynie w przypadku zwierzyny – wraz ze zwiększającą się prędkością lotu wielowirnikowca, zwiększa się także rozmycie koron (patrz załączniki od 1 do 5).

W załącznikach od 1 do 5 do niniejszej pracy znajdują się wybrane serie zdjęć, które pozyskano w różnych prędkościach lotu.

6.1.2 Podsumowanie lotów zimowych 2022 roku

Zimą 2022 roku podobnie jak jesienią 2021 roku, obszarem badawczym był obręb Czarna Białostocka. Loty zostały wykonane nad tymi samymi oddziałami leśnymi co jesienią 2021 roku.

W dniach od 4 marca do 19 marca wykonanych zostało 10 lotów na wysokości 80 metrów AGL. Odległość pomiędzy kolejnymi transektami wynosiła 42 metry (pokrycie boczne zdjęć na sąsiadujących transektach – 10%). Podobnie jak jesienią 2021 roku, loty starano rozpoczynać się zwykle w czasie godziny po zachodzie słońca. Jeden lot z dnia 13 marca został wykonany przed wschodem słońca. Warunki lotów przeprowadzonych zimą 2022 roku zostały przedstawione w Tabeli 22.

Rysunek 44 prezentuje lokalizację zarejestrowanych sygnatur oraz miejsca startu/lądowania UAV przykładowych lotów zimowych. Podobnie jak w przypadku lotów jesiennych z 2021 roku, loty planowano w taki sposób, aby powierzchnia badawcza inwentaryzowana była zawsze rozpoczynając od najbliższego rogu znajdującego się pomiędzy operatorem a inwentaryzowaną powierzchnią.

Tabela 22 Warunki lotów wykonanych w dniach od 4 do 19 marca 2022 roku

Data	Godzina rozpoczęcia		Godzina zakończenia	Czas trwania misji	Prędkość lotu			Odległość pomiędzy wykonywaniem kolejnych zdjęć	Liczba pozyskanych zdjęć termowizyjnych	Oddziały			Powierzchnia	Wschód słońca	Zachód słońca	Prędkość wiatru	Zachmurzenie	Opady	Temperatura
					I	II	III												
-	czas UTC		min.	m/s			m	szt.	nr			ha	czas UTC		m/s	%	-	C	
04.03	16:36	17:30	54	7	10	10	7	2019	109	110	58.52	5:07	16:10	10	75	brak	0		
05.03	17:52	18:37	45	8	10	10	8	1885	182	181	56.49	5:05	16:12	4	66		-2		
06.03	16:44	17:24	40	8	10	10	8	1658	166	167	49.37	5:03	16:14	7	74		0		
07.03	16:42	17:32	50	8	10	x	8	1863	217	218	55.88	5:00	16:16	7	39		0		
08.03	16:11	17:32	63	8	10	10	7	2038	14	15	60.02	4:58	16:18	8	95		0		
09.03	16:50	17:33	43	8	10	10	7	1925	22	23	58.89	4:55	16:19	8	9		-1		
13.03	3:44	4:26	42	8	10	10	8	1605	226	227	54.3	4:46	16:28	4	0		-3		
13.03	16:58	17:49	51	8	10	10	8	1701	125	126	57.12	4:46	16:28	8	0		0		
18.03	17:07	17:53	47	8	10	10	8	1651	176	177	57.28	4:34	16:36	3	0		3		
19.03	17:01	17:53	53	7	10	10	7	1912	162	163	55.46	4:32	16:38	3	0		3		

Wszystkie loty wykonano z wykorzystaniem trzech baterii. Czas trwania misji przedstawiony w Tabeli 22 uwzględnia również czas jaki poświęcono na niezbędne wymiany baterii (dwa lądowania). Najdłuższy czas na wykonanie nalotu poświęcono 8 marca (63 minuty). Był to przypadek kiedy zinwentaryzowano największą powierzchnię (60.02 ha). Na ogólny czas misji miała wpływ nie tylko wielkość powierzchni, ale także inne okoliczności, takie jak m.in. odległość miejsca startu (lokalizacja operatora) od powierzchni próbnej, miejsce startu/lądowania – wielkość wolnej przestrzeni (czy pozwalała na komfortowe wylądowanie). Najkrótszy czas na wykonanie nalotu poświęcono 6 marca. Była to najmniejsza z inwentaryzowanych powierzchni (49.37 ha).

Tabela 23 Liczba zarejestrowanych osobników. Podsumowanie lotów zimowych 2022 rok

Data	Sarna	Jeleń	Dzik	łoś	Nie oznaczono	Suma	Inwentaryzowana powierzchnia (ha)
4 marca	2	11				13	58.52
5 marca					9	9	56.49
6 marca			6		6	12	49.37
7 marca		17			2	19	55.88
8 marca		8			5	13	60.02
9 marca		14	3		5	22	58.89
13 marca poranek						0	54.3
13 marca wieczór	1	7				8	57.12
18 marca						0	57.28
19 marca	1					1	55.46
Suma	4	57	9	0	27	97	563.33

Tabela 24 Szacowana liczba osobników występujących na terenie obrębu Czarna Białostocka (na podstawie naliczeń zimowych 2022 roku)

	Sarna	Jeleń	Dzik	łoś
Zagęszczenie na 1000 hektarów*	7	101	16	0
Szacowana liczba osobników na obrębie Czarna Białostocka	49	705	111	0

Dane dotyczące szacowanej liczby zwierząt bytujących na obszarze obrębu Czarna Białostocka przedstawia Tabela 24. Uzyskane wyniki zostały skonfrontowane z wynikami szacunków przeprowadzonych metodą całorocznej obserwacji zwierzyny. Liczebność zwierzyny metodą całorocznej obserwacji została określona na 10 marca 2022 roku. Bardzo istotną informacją jest to, że metoda całorocznej obserwacji zwierzyny jest to oficjalna metoda określania liczebności zwierzyny grubej stosowana na terenie Nadleśnictwa Czarna Białostocka.

Poniżej znajduje się porównanie wyników uzyskanych na podstawie inwentaryzacji z użyciem UAV a oficjalnymi szacunkami wykonanymi metodą całorocznej obserwacji:

1. Na podstawie inwentaryzacji z UAV należałoby stwierdzić, że na terenie obrębu Czarna Białostocka nie występuje łoś euroazjatycki. Przy użyciu UAV z kamerą termowizyjną

nie został wykryty żaden osobnik należący do tego gatunku. Według stanu określonego metodą całorocznej obserwacji na dzień 10 marca 2022 roku liczebność tego gatunku wynosiła 10 osobników;

2. Szacowana liczba osobników jelenia szlachetnego określona na podstawie UAV wydaje się zdecydowanie zawyżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczba ta wynosiła 705 osobników. Natomiast w szacunku metodą całorocznej obserwacji wykazano 122 sztuki. Liczebność jelenia szlachetnego określona na podstawie analizy zdjęć termowizyjnych jest prawie 5 razy zawyżona w stosunku do liczebności tego gatunku określonej na podstawie całorocznej obserwacji przeprowadzonej przez myśliwych;
3. Szacowana liczebność sarny europejskiej określona na podstawie materiałów z UAV względem oszacowanej liczby określonej metodą całorocznej obserwacji jest zaniżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczba osobników tego gatunku wynosi 49 osobników. Szacunek metodą całorocznej obserwacji wykazał, że liczba osobników sarny wynosi 88 sztuk. Liczebność sarny europejskiej określona na podstawie analizy zdjęć termowizyjnych jest o 44% mniejsza w stosunku do szacunku określonego na podstawie całorocznej obserwacji;
4. Szacowana liczebność osobników dzika euroazjatyckiego określona na podstawie inwentaryzacji z UAV jest większa od szacunku określonego metodą całorocznej obserwacji. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczebność tego gatunku wynosi 111 osobników. Zgodnie z szacunkiem metodą całorocznej obserwacji liczba ta na dzień 10 marca 2022 roku wyniosła 45 osobników. Liczebność dzika euroazjatyckiego określona na podstawie zdjęć termowizyjnych jest o 146% większa w stosunku do liczebności tego gatunku określonej na podstawie metody całorocznej obserwacji.

W porównaniu do lotów przeprowadzonych jesienią w 2021 roku w większej liczbie przypadków mogło dojść do podwójnego liczenia zwierzyny lub uznania dwóch osobników za jeden. Sytuacja ta występowała zwłaszcza w przypadku jeleni szlachetnych. Na przykład, 4 marca na trzech sąsiadujących transektach zarejestrowano jelenie. Na podstawie analizy zdjęć uznano, że część z zarejestrowanych sygnatur cieplnych na sąsiadujących transektach to te same osobniki, choć nie ma co do tego całkowitej pewności. Jak już wspomniano, problem ten nie był tak uciążliwy podczas analizy materiału z jesieni 2021 roku. Związane jest to z typem występowania zwierzyny w okresie zimowym. Na przykład jelenie w okresie zimowym wykazują skupiskowy typ występowania. Oznacza to, że gromadzą się w większe chmary (stada). Prowadzi to do tego, że w przypadku ich wykrycia trudniejsza staje się dokładna

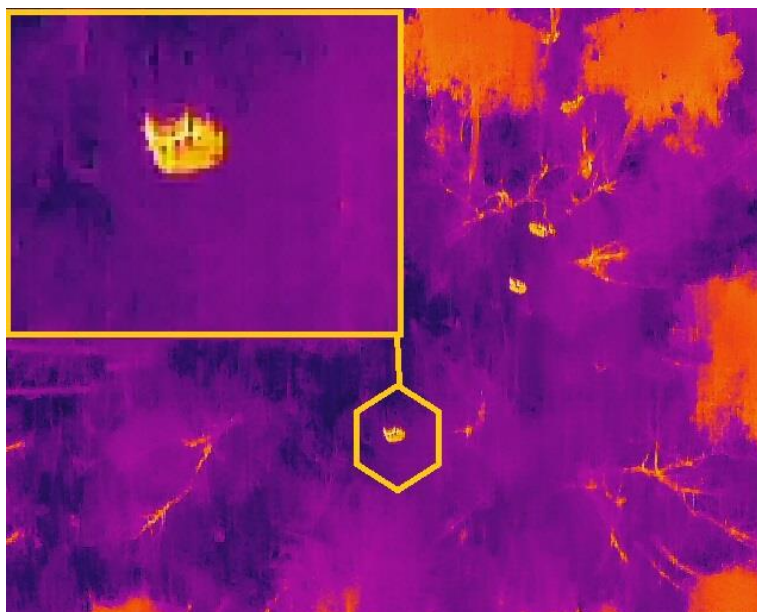
interpretacja liczby zarejestrowanych osobników. Prowadzenie inwentaryzacji w okresie zimowym niesie ze sobą jeszcze jedną wadę. W związku z tym, że zwierzyna wykazuje w tym czasie skupiskowy typ występowania istnieje większe ryzyko uzyskania niewiarygodnych wyników. Powodem jest większe ryzyko na napotkanie dużych chmar, które zawyżą liczbę szacowanych osobników lub pojawienie się sytuacji zupełnie odwrotnej – nienapotkanie na zwierzynę, co spowoduje, że liczba osobników zostanie zaniżona. W okresie jesiennym zwierzyna występuje w mniejszych stadach, co zwiększa szanse na otrzymanie wiarygodnych wyników.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że w dwóch przypadkach możliwe było oznaczenie płci jelenia szlachetnego. Miało to miejsce 7 oraz 13 marca. W tych dniach zarejestrowano byki z wyraźnie widocznym porożem. Rysunki 45 oraz 46 przedstawiają byki zarejestrowane odpowiednio w dniach 7 oraz 13 marca.

W porównaniu do lotów przeprowadzonych jesienią 2021 roku zarejestrowanych zostało więcej sygnałów cieplnych będących potencjalnie zwierzyną, ale których nie udało się oznaczyć do konkretnego gatunku. Jesienią 2021 roku liczba ta wyniosła 8 z spośród 48 sztuk ($\approx 17\%$). Zimą 2022 roku liczba ta wyniosła 27 spośród 97 sztuk ($\approx 25\%$).



Rysunek 45 Byk jelenia szlachetnego zarejestrowany 7 marca 2022 roku [47]



Rysunek 46 Byk jelenia szlachetnego zarejestrowany 13 marca 2022 roku w godzinach wieczornych

Podobnie jak w przypadku analizy materiałów z lotów jesiennych 2021 roku, nie spotkano się z istotnym problem w oznaczaniu sygnatur większych zwierząt – np. jelenia szlachetnego.

Analogicznie jak podczas analizy materiałów pochodzących z jesieni 2021 roku, oznaczenie mniejszych gatunków należących do zwierzyny grubej – dzika euroazjatyckiego oraz sarny europejskiej okazało się bardzo trudne.

Porównanie jakości pozyskanych zdjęć ze względu na prędkość z jaką przemieszczał się UAV

Jak wynika z Tabeli 22, loty wykonywano w trzech różnych prędkościach – 7, 8 oraz 10 m/s. Zmiana prędkości lotu miała na celu sprawdzenie, jak zmienia się ostrość pozyskiwanych zdjęć oraz czy ma ona realny wpływ na czytelność rejestrowanych sygnatur termalnych, a tym samym możliwości oznaczania gatunków.

Analiza ostrości zdjęć pozyskanych zimą 2022 roku nie wykazała, że zmiana prędkości lotu pomiędzy 7 a 10 m/s ma istotny wpływ na czytelność rejestrowanych sygnatur cieplnych. Wnioski te nie są zgodne z wnioskami opracowanymi w oparciu o materiały z jesieni 2021 roku, kiedy stwierdzono, że prędkość przemieszczania się wielowirnikowca miała wpływ na czytelność termogramów w sytuacji, gdy wykrywane zwierzęta znajdowały się pod okapem drzewostanu.

6.1.3 Podsumowanie lotów letnich 2022 roku

Loty na 80 metrach AGL

W dniach od 4 czerwca 26 września 2022 roku wykonano loty na wysokości 80 metrów AGL (łącznie 21 lotów). W ich trakcie zinwentaryzowano odcinek o długości około 110 km (patrz Tabela 25). Szerokość inwentaryzowanego pasa, oszacowana na podstawie wzoru nr 1 znajdującego się w z pkt 1.4.2 rozprawy, wyniosła ≈ 45 metrów. Biorąc pod uwagę ogólną długość zarejestrowanego odcinka, obszar jaki podlegał inwentaryzacji wyniósł około 495 hektarów. Wielkość ta stanowi około 7 % powierzchni leśnej obrębu Czarna Białostocka (6 954,3319 ha). Zgodnie z zaleceniami, powierzchnia objęta inwentaryzacją w trakcie tradycyjnej metody liczenia zwierzyny, tzw. pędzeń próbnych wynosić powinna około 10% powierzchni leśnej. Jeżeli chodzi o jakość pozyskanych zdjęć, rozmiar GSD wyniósł 7 cm. Podsumowanie lotów przeprowadzonych w okresie letnim 2022 roku przedstawia Tabela 25.

Tabela 25 Podsumowanie lotów przeprowadzonych w okresie letnim 2022 roku

Data	Godzina rozpoczęcia	Godzina zakończenia	Czas trwania misji	Prędkość lotu	Orientacyjna lokalizacja nalotów - numery oddziałów		Długość zainwentaryzowanego odcinka	Liczba zdjęć termowizyjnych	Wschód słońca	Zachód słońca	Prędkość wiatru	Zachmurzenie	Opady	Temperatura	
-	czas UTC		min.	m/s	-		m	sztuk	czas UTC		m/s	%		C	
04.06	20:06	20:18	12	10	22	23	5 240	736	02:02	18:48	5	100	brak	16	
	20:30	20:44	14		38	39	5 661	793							
05.06	19:15	19:25	10		176	177	4 006	549	02:02	18:49	3	3		15	
	20:04	20:18	14		181	182	5 321	728							
	20:48	21:01	13		217	218	5 411	743							
06.06	19:14	19:29	15		149	150	5 386	726	02:01	18:50	5	100		18	
	19:43	19:56	13		178	179	4 469	602							
	21:06	21:22	16		92	93	5 349	737							
13.09	15:08	15:23	15		162	163	5 379	653	03:56	16:48	4	3		13	
	15:26	15:41	15		133	134	5 386	656							
	16:23	16:37	14		233	234	5 355	689							
14.09	17:18	17:31	13		54	55	5 389	692	03:58	16:45	5	70		12	
	17:40	17:54	14		76	77	5 362	715							
	18:54	19:08	14		154	155	5 554	736							
16.09	17:48	18:00	12		68	69	5 539	741	04:01	16:41	9	42		11	
	18:05	18:18	13		59	71	5 231	690							
	19:15	19:29	14		226	227	5 085	669							
17.09	16:43	16:56	13		73	74	5 307	681	04:03	16:38	8	64		12	
	16:58	17:11	13		106	107	5 383	662							
	18:00	18:13	13		11	12	4 936	639							
26.09	16:44	16:57	13		169	184	5 256	732	04:19	16:16	3	32			13
Razem							110 005	14 569							

W trakcie badanego okresu najdłuższy czas lotu uzyskano podczas jednego z nalotów przeprowadzonych 6 czerwca (czas trwania całej procedury od startu do lądowania wyniósł 16 minut). Najkrótsza misja trwała 10 minut (jeden z lotów wykonanych 5 czerwca), w trakcie której zinwentaryzowana została najmniejsza powierzchnia (długość zinwentaryzowanego odcinka wyniosła 4 006 metrów). Podobnie jak w poprzednich sezonach, liczba zarejestrowanych osobników poszczególnych gatunków określana była na podstawie wielkości oraz kształtu sygnatur cieplnych. Szczegóły dotyczące wyników inwentaryzacji przedstawia Tabela 26.

Tabela 26 Liczba zarejestrowanych osobników. Podsumowanie lotów letnich 2022 roku

Data	Sarna	Jeleń	Dzik	łoś	Nie oznaczono	Suma	Orientacyjna lokalizacja nalotów -		Zinwentaryzowany obszar
	sztuk						numery oddziałów		ha
04.cze						0	22	23	23,58
					1	1	38	39	25,47
05.cze			2		1	3	176	177	18,03
						0	181	182	23,94
			1		2	3	217	218	24,35
06.cze					2	2	149	150	24,24
						0	178	179	20,11
						0	92	93	24,07
13.wrz					3	3	162	163	24,21
					1	1	133	134	24,24
			1			1	233	234	24,10
14.wrz	2					2	54	55	24,25
	4	1			1	6	76	77	24,13
					4	4	154	155	24,99
16.wrz					0	0	68	69	24,93
					1	1	59	71	23,54
					2	2	226	227	22,88
17.wrz						0	73	74	23,88
			2		3	5	106	107	24,22
						0	11	12	22,21
26.wrz			1			1	169	184	23,65
Suma	6	1	7	0	21	35			495,02

Tabela 27 Szacowana liczba osobników występujących na terenie obrębu Czarna Białostocka (na podstawie lotów letnich 2022 roku)

	Sarna	Jeleń	Dzik	łoś
Zagęszczenie na 1000 hektarów*	12	2	14	0
Szacowana liczba osobników w obrębie Czarna Białostocka	84	14	98	0
Stan zwierzyny oszacowany na 10 marca 2022 roku metodą całorocznej obserwacji	88	122	45	10

Dane dotyczące szacowanej liczby zwierząt bytujących na obszarze obrębu Czarna Białostocka opracowane na podstawie materiałów pozyskanych w ramach lotów letnich 2022 roku przedstawia Tabela 27. Wyniki inwentaryzacji przy użyciu kamery termowizyjnej zostały skonfrontowane z oficjalnymi szacunkami według stanu na dzień 10 marca 2022 roku. Jak już wspomniano, nie jest to metoda, która dostarcza w pełni wiarygodnych danych referencyjnych umożliwiających w sposób statystyczny uwiarygodnić lub też poddać w wątpliwość wyniki inwentaryzacji przeprowadzonej w ramach tej pracy. Wszystkie wykorzystywane metody szacowania zwierzyny, do których należą m.in. pędzenia próbne, jaki i całoroczna obserwacja posiadają tę wadę.

Na podstawie porównania wyników dwóch metod można dojść do następujących wniosków:

1. Szacowana liczebność łosia euroazjatyckiego w porównaniu do wyników całorocznej obserwacji została zaniżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV stwierdzono, że na terenie obrębu Czarna Białostocka nie występuje łoś euroazjatycki (szacunek metodą całorocznej obserwacji – 10 sztuk);
2. Szacowana liczba osobników jelenia szlachetnego jest zdecydowanie zaniżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczba ta wynosi 14 osobników (szacunek metodą całorocznej obserwacji 122 sztuki). Liczebność jelenia szlachetnego określona na podstawie zdjęć termowizyjnych jest ponad 8 krotnie zaniżona w stosunku do metody całorocznej obserwacji;

3. Szacowana liczebność sarny europejskiej wydaje się wiarygodna. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczba ta wynosi 88 osobników (szacunek metodą całorocznej obserwacji to 88 osobników);
4. Szacowana liczebność osobników dzika euroazjatyckiego jest zawyżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczebność tego gatunku wynosi 98 osobników. Metoda całorocznej obserwacji wskazuje na 45 osobników.

Wadą odnoszenia wyników uzyskanych w ramach lotów letnich do oficjalnych wyników jest istotna różnica w czasie inwentaryzacji – oficjalna metoda określa stan zwierzyny na 10 marca 2022 roku, natomiast loty letnie trwały w okresie od czerwca do września 2022 roku. Niemniej jednak ze względu na to, że w analizowanym okresie wyniki inwentaryzacji okazały się zdecydowanie najmniej wiarygodne postanowiono odstąpić od badania ankietowego, jakie wykonano, np. jesienią 2021 roku.

Na podstawie porównania wyników inwentaryzacji z szacunkami określonymi metodą całorocznej obserwacji można stwierdzić, że loty związane z inwentaryzacją zwierząt nie powinny być wykonywane w porze letniej. W przypadku zwierzyny grubej należącej do większych gatunków widać wyraźnie, że liczba rejestrowanych osobników została zaniżona. Najprawdopodobniej na taki stan rzeczy miało wpływ występujące listowie. Mogło to mieć szczególne znaczenie w przypadku drzewostanów rosnących na żyznych siedliskach, gdzie oprócz warstwy drzewiastej występowały również podszyty, podrosty lub w ogóle drzewostan charakteryzował się budową wielopiętrową. Niewykluczone, że na terenach mniej żyznych, gdzie nie występuje warstwa bujnego podszytu, a warstwę drzewiastą zajmują drzewa iglaste, które posiadają listowie przez okres całego roku, pora roku ma mniejszy wpływ na wiarygodność uzyskiwanych wyników.

Na podstawie zebranych doświadczeń należy stwierdzić, że loty związane z inwentaryzacją zwierzyny na obszarach leśnych podobnych do obrębu Czarna Białostocka powinny odbywać się jesienią. Dodatkowo sąsiadujące transekty powinny być od siebie znacząco oddalone. Modyfikacja parametrów lotu związana z oddaleniem od siebie sąsiadujących transektów pozwoliła na wyeliminowanie ryzyka związanego z podwójnym liczeniem zwierzyny lub uznawania dwóch osobników jako jeden. Niemniej jednak, aby potwierdzić zasadność tej modyfikacji warto byłoby wykonać podobne loty w okresie jesiennym lub zimowym, które w trakcie realizowanej pracy uznane zostały jako właściwsze.

Pewnym atutem mogłoby okazać się nagrywanie filmu zamiast wykonywania zdjęć. Takie rozwiązanie utrudniłoby identyfikację lokalizacji, w której znajdował się BSP w trakcie

wykrycia zwierzęcia. Z drugiej jednak strony materiał filmowy mógłby ułatwić oznaczenie zarejestrowanych zwierząt do konkretnego gatunku. Ten wniosek pozwolono sobie wynieść na podstawie doświadczeń zebranych w ramach pracy w terenie (doświadczeń zebranych w trakcie wszystkich lotów związanych z inwentaryzacją zwierzyny). W trakcie obserwacji widoku z kamery podczas lotu, niekiedy w sposób bardzo prosty można było oznaczyć zarejestrowaną sygnaturę do gatunku, np. w przypadku łośa eurazjatyckiego widać było, że zarejestrowany osobnik przemieszczał się powoli oraz ociężałe w charakterystyczny dla siebie sposób.

W sezonie letnim, odwrotnie jak w poprzednich sezonach, najbardziej zbliżone wyniki do oficjalnych szacunków uzyskano dla mniejszych zwierząt należących do zwierzyny grubej – sarny europejskiej oraz dzika euroazjatyckiego. Jednak jak już podkreślano, oznaczenie mniejszych sygnatur cieplnych do konkretnego gatunku sprawiło najwięcej kłopotów oraz osoba analizująca materiał była najmniej pewna poprawności swojej interpretacji. Dodatkowo biorąc pod uwagę listowie drzewostanu, które z pewnością tłumilo rozpraszanie promieniowania IR, niewykluczone, że w okresie letnim ze względu na tłumiącą wegetację, sygnatury większych zwierząt, jak np. jelenia szlachetnego, przypisywane były do mniejszych zwierząt, jak np. sarny europejskiej.

6.2 Weryfikacja użyteczności kamery multispektralnej

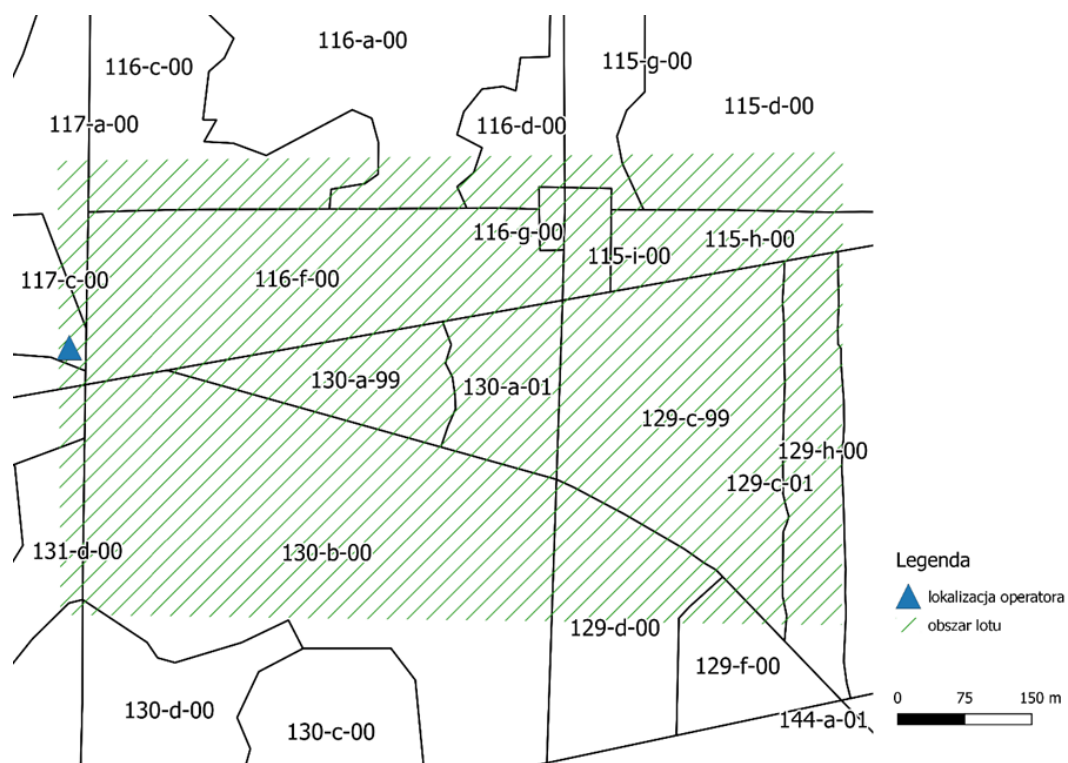
6.2.1 Podsumowanie lotów wiosennych 2022 roku

Dnia 12 kwietnia 2022 roku wykonano dwa naloty fotogrametryczne nad wybranymi wydzieleniami leśnymi znajdującymi się na terenie dwóch leśnictw – Horodnianska oraz Buksztel. Łączna zainwentaryzowana powierzchnia wyniosła około 52 hektarów. Tabela 28 przedstawia informację dotyczące czasu wykonania lotu.

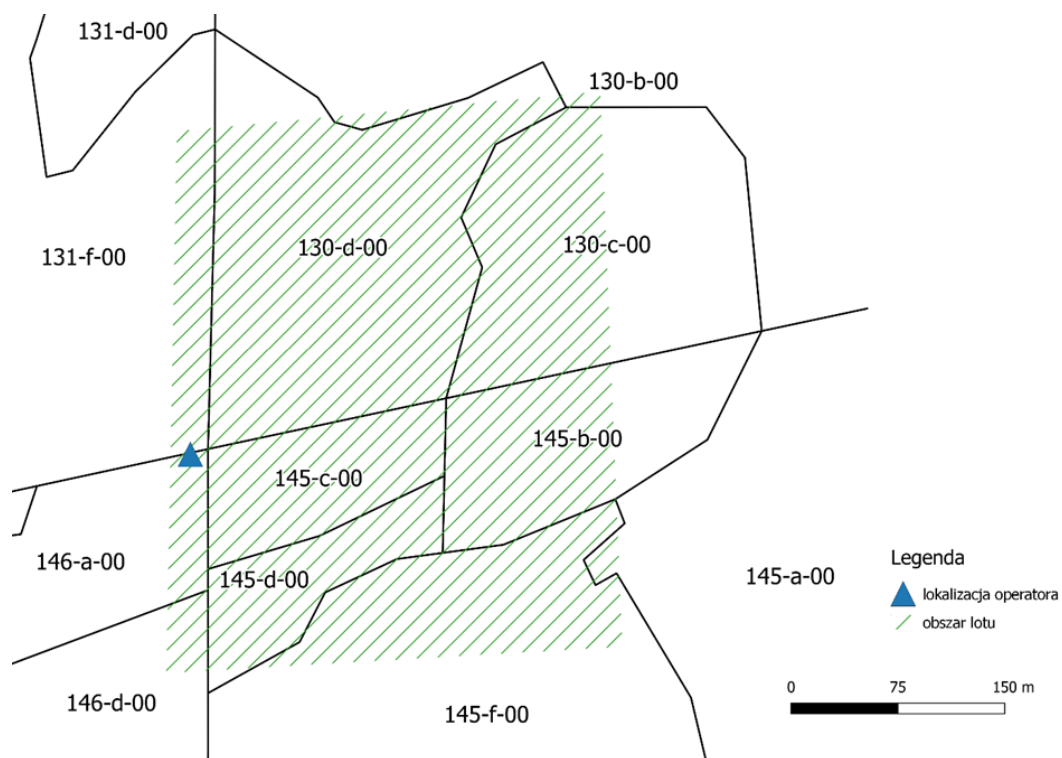
Tabela 28 Informacje dotyczące czasu wykonania lotu

Numer nalotu	Godzina rozpoczęcia	Godzina Zakończenia	Czas trwania	Prędkość pozioma lotu
	czas UTC		min.	(m/s)
1	11 ⁴⁸	12 ³³	45	8,4
2	12 ⁵⁴	13 ⁰¹	7	8,4

Tabela 29 przedstawia zestawienie powierzchni, jakie zostały objęte inwentaryzacją. Rysunki 47 oraz 48 wskazują obszar nalotu wraz z lokalizacją operatora



Rysunek 47 Orientacyjny obszar I nalotu



Rysunek 48 Orientacyjny obszar II nalotu

Tabela 29 Zestawienie powierzchni, jakie zostały objęte inwentaryzacją

Adres leśny	Powierzchnia		Skład gatunkowy	Wiek*	Typ siedliskowy lasu (TSL)	Zadrzewienie
	objęta inwentaryzacją (ha)	całego wydzielenia (ha)				
01-06-3-19-116 -c -00	2,38	6,99	8So2Św	86	LMśw	0,8
01-06-3-19-116 -a -00	0,93	12,23	8So2Św	73	BMśw	1,0
01-06-3-19-115 -g -00	0,43	2,1	9So1Św	90	BMśw	0,9
01-06-3-19-115 -d -00	1,8	12,94	8So2Św	78	BMśw	1,0
01-06-3-19-115 -h -00	1,92	1,92	9So1Św	101	LMśw	0,9
01-06-3-19-115 -i -00	0,59	0,59	9So1Św	101	LMśw	0,9
01-06-3-19-116 -g -00	0,15	0,15	6So3Db1Św	16	LMśw	1,0
01-06-3-19-116 -f -00	7,29	7,29	6So3Db1Św	16	BMśw	1,0
01-06-3-21-130 -b -00	11,8	14,73	7So2Św1Db	79	BMśw	1,0
01-06-3-21-130 -a -99	2,35	2,35	8So2Św	118	BMśw	0,6
01-06-3-21-130 -a -01	1,71	1,71	5So3Brz2Gb	5	BMśw	0,8
01-06-3-21-130 -d -00	3,91	4,37	5So2Św2Db1Gb	66	LMśw	0,9
01-06-3-21-130 -c -00	1,75	3,39	7So3Brz	158	LMśw	0,9
01-06-3-21-129 -c -99	7,34	7,34	9So1Św	118	BMśw	0,8
01-06-3-21-129 -c -01	2,54	3,02	6So3Św1Db.s	5	BMśw	1,0
01-06-3-21-145 -c -00	1,11	1,11	6So2Św2Db	64	LMśw	0,9
01-06-3-21-145 -d -00	0,97	0,97	4So3Św2Db1Św	93	LMśw	1,0
01-06-3-21-145 -f -00	1,74	11,96	6So1Db1Św2Gb	62	LMśw	1,1
01-06-3-21-145 -b -00	1,38	1,79	6So2Brz2Św	158	BB	1,0

*wiek gatunku głównego

W trakcie pracy odnotowano następujące warunki atmosferyczne:

a) temperatura – 9 °C; b) wiatr – 8 km/h; c) zachmurzenie – 72 %.

Zgodnie z założeniami opracowano następujące materiały:

a) ortofotomapy:

- wykonane w barwach naturalnych (wykorzystanie kanałów czerwonego, zielonego, niebieskiego);
- wykonane w kompozycji barwnej CIR (wykorzystanie kanałów bliskiej podczerwieni, czerwonego oraz zielonego).

b) mapy indeksów wegetacyjnych:

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI);
- Normalized Difference Red Edge Index (NDRE);
- Enhanced Normalized Difference Vegetation Index (ENDVI);

- Leaf Chlorophyll Index (LCI).

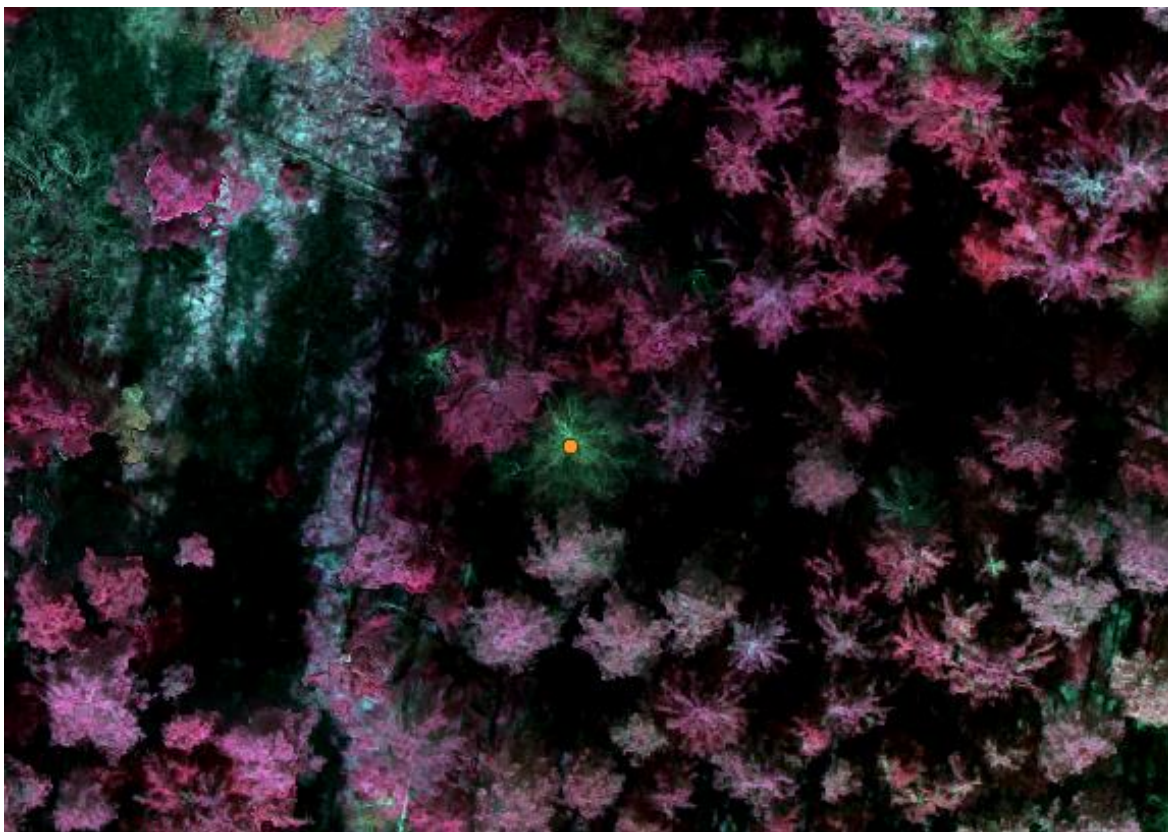
W trakcie prac kameralnych prowadzonych w biurze, materiały były analizowane przy użyciu oprogramowania QGIS. Uzyskany materiał posłużył do lokalizacji miejsc, na które obserwator pieszy powinien zwrócić szczególną uwagę (lokalizacje z potencjalnie osłabionymi, martwymi drzewami, lokalizacje wywrotów, złomów itp.). Inwentaryzacja w terenie została przeprowadzona 24 kwietnia. W trakcie weryfikacji w terenie obserwator przemieszczał się po całej powierzchni, nad którą dokonano nalotu, jednocześnie kontrolując miejsca wytypowane w trakcie pracy kameralnej.

Tabela 30 przedstawia porównanie pomiędzy wynikami inwentaryzacji w terenie a tymi przeprowadzonymi w oparciu o opracowany materiał. W przypadku świerka pospolitego opracowane materiały pozwoliły na wykrycie 31 drzew będących posuszem jałowym. W trakcie inwentaryzacji w terenie znaleziono jeszcze 7 takich drzew. Najbardziej przydatne w pracy okazały się kompozycje CIR. Rysunek 49 przedstawia wybrany fragment ortofotomapy w kompozycji CIR, na którym znajduje się świerk stanowiący posusz jałowym.

Tabela 30 Porównanie pomiędzy inwentaryzacją przeprowadzoną przy użyciu opracowanych materiałów a inwentaryzacją w terenie

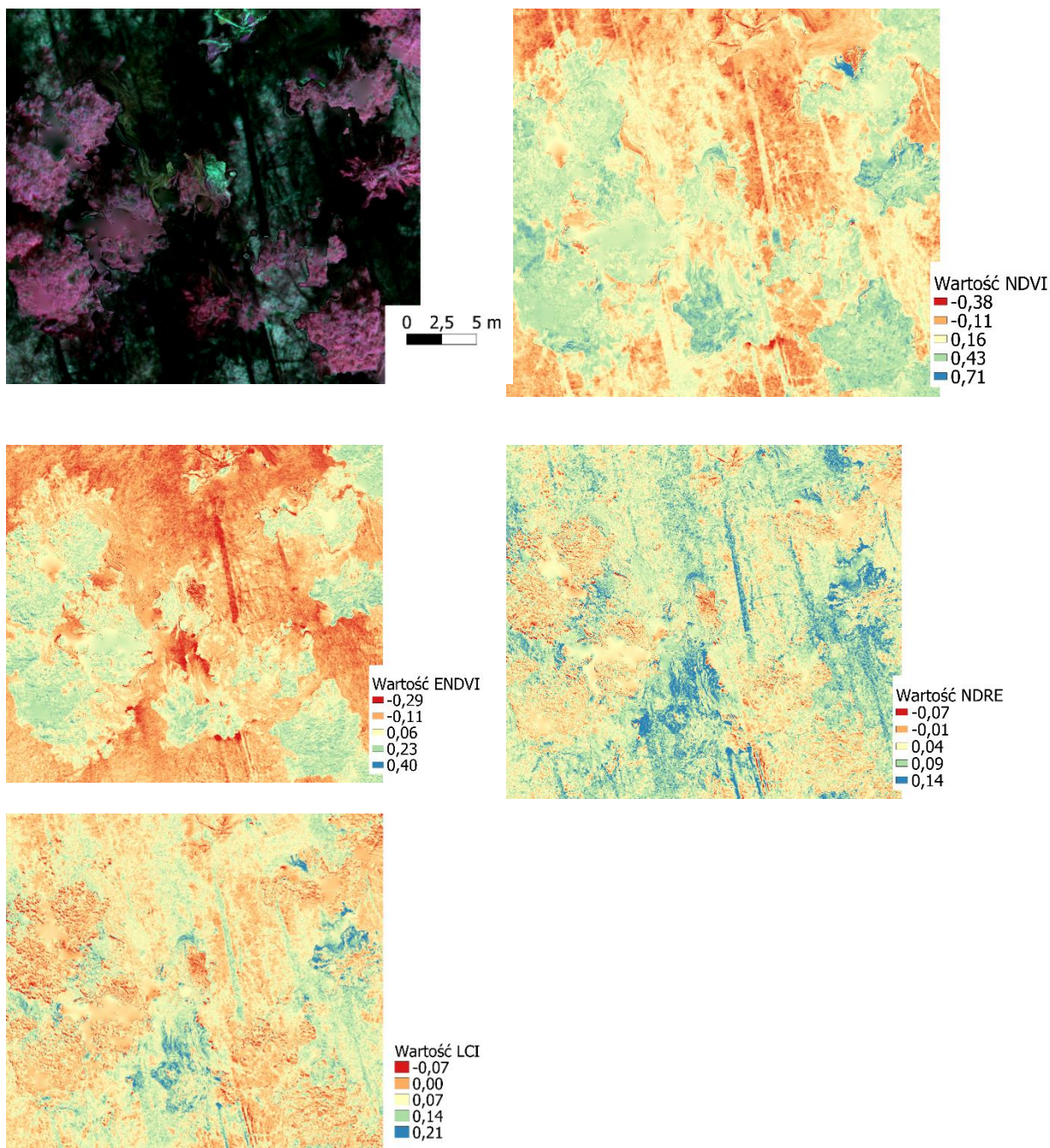
Lp.	Gatunek	Stan	Sztuki	Uwagi	Czy wykryto podczas pracy kameralnej
1	-	-	-	przerzedzony fragment	tak
2	-	-	-	przerzedzony fragment	tak
3	-	-	-	przerzedzony fragment	tak
4	-	-	-	przerzedzony fragment	tak
5	Brz	Zdrowe	1	jemioła	tak
6	Brz		1	jemioła	nie
7	Brz		1	jemioła	tak
8	Brz		1	jemioła	tak
9	So	Wywrót	1		nie
10	So	Zdrowe	1	uszkodzony wierzchołek	nie
11	So	Wywrót	1		tak
12	So	Wywrót	1		nie
13	So	Wywroty	3		nie
14	So	Wywrót	1		nie

Lp. (cd).	Gatunek (cd).	Stan (cd).	Sztuki (cd).	Uwagi (cd).	Czy wykryto podczas pracy kameralnej (cd).
15	So	Wywrót	1		nie
16	So	Posusz	1		tak
17	Św	Oślabione	1		tak
18	Św	Oślabione	1		tak
19	Św	Oślabione	1		nie
20	Św	Posusz	1		tak
21	Św	Oślabione	1		nie
22	Św	Posusz	1		tak
23	Św	Wywrót	1		nie
24	Św	Wywrót	1		nie
25	Św	Posusz	1		tak
26	Św	Wywrót	1		nie
27	Św	Posusz	1		tak
28	Św	Posusz	1		tak
29	Św	Posusz	1		tak
30	Św	Posusz	1		tak
31	Św	Posusz	1		tak
32	Św	Posusz	1		tak
33	Św	Posusz	1		tak
34	Św	Posusz	1		tak
35	Św	Posusz	1		tak
36	Św	Posusz	1		tak
37	Św	Posusz	1		tak
38	Św	Posusz	1		tak
39	Św	Posusz	1		tak
40	Św	Posusz	1		nie
41	Św	Posusz	1		tak
42	Św	Posusz	1		nie
43	Św	Posusz	1		tak
44	Św	Posusz	2		tak
45	Św	Posusz	1		nie
46	Św	Wywrót	1		nie
47	Św	Posusz	1		nie
48	Św	Posusz	1		nie
49	Św	Posusz	1		nie
50	Św	Posusz	1		nie
51	Św	Posusz	1		tak
52	Św	Posusz	1		tak
53	Św	Posusz	5		tak
54	Św	Posusz	2		tak
55	Św	Posusz	1		tak
56	Św	Posusz	1		tak



Rysunek 49 Przykłady jałowego posuszu Świerka pospolitego (widoczny na kompozycji barwnej CIR w kolorze zielonkawym)

Rysunek 50 przedstawia świerka będącego posuszem jałowym, widocznego na kompozycji barwnej CIR oraz mapach indeksów wegetacyjnych. W przypadku poszukiwania drzew osłabionych należących do świerka pospolitego materiał pozwolił na znalezienie dwóch drzew wykazujących cechy wyraźnego osłabienia (przerzedzona korona, mniej intensywnie zielone igliwie). W trakcie inwentaryzacji w terenie znaleziono jeszcze dwa takie drzewa.

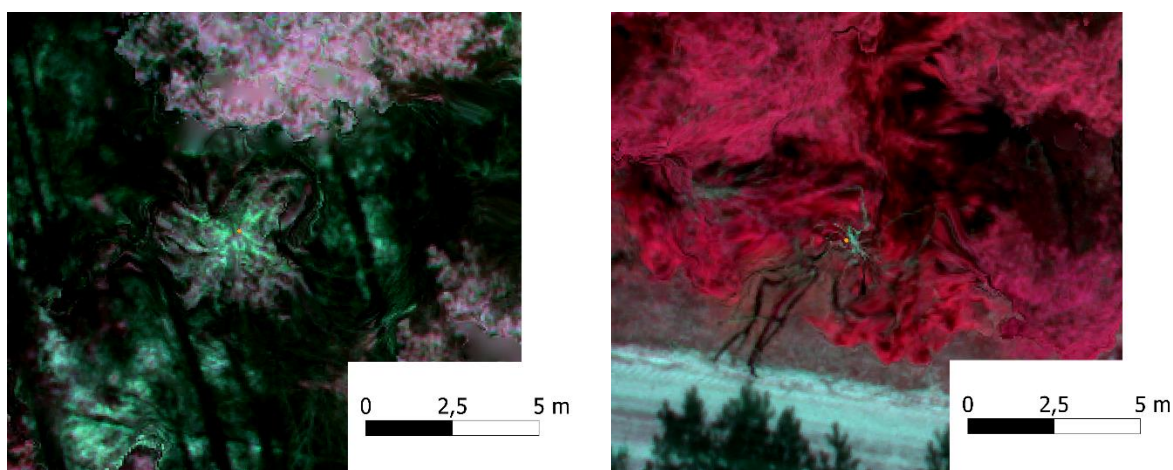


Rysunek 50 Zestawienie kompozycji CIR z mapami indeksów wegetacyjnych. Na rycinach widoczny posusz jałowy świerka pospolitego, który udało wykryć się dzięki opracowanym materiałom

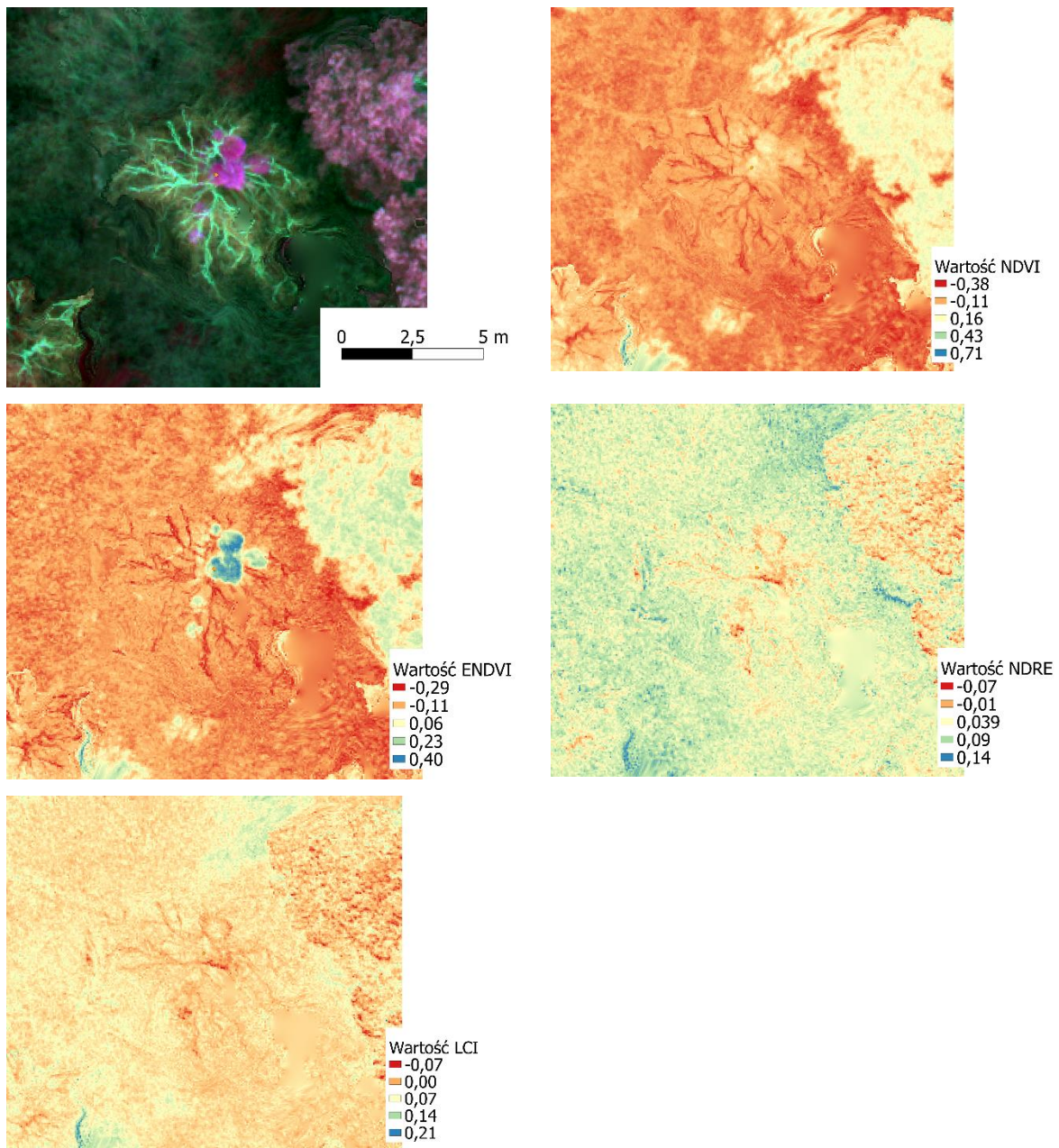
Na Rysunku 51 można zobaczyć osłabione świerki widoczne na kompozycji barwnej CIR. Na jednym zdjęciu (po lewej stronie) znajduje się drzewo, które zostało znalezione dzięki opracowanym materiałom (na osłabionych świerkach oprócz koloru czerwonego widoczny był również kolor zielonkawy, natomiast zupełnie zdrowe drzewa przedstawione były tylko w kolorze czerwonym). Na drugim zdjęciu widoczny jest świerk, który ze względu na rozmycie ortofotomapy nie został odnaleziony podczas przeglądania materiałów. Widoczne rozmycie

ortofotomapy wynika, jak się okazało ze zbyt dużej prędkości lotu (około 8 m/s). Najbardziej optymalnym rozwiązaniem z punktu widzenia jakości opracowania byłoby wykonanie zawisu UAV przed wykonaniem każdej z serii zdjęć. Niestety takie rozwiązanie kilkakrotnie wydłużyłoby czas lotu.

Opracowane materiały okazały się bardzo przydatne w inwentaryzacji jemioli pospolitej występującej na drzewach. Dzięki kompozycjom barwnym oraz mapom indeksów wegetacyjnych udało się wykryć 3 drzewa (brzozy) porażone jemiolą pospolitą. Inwentaryzacja w terenie potwierdziła występowanie tej rośliny na wcześniej wytypowanych drzewach. W trakcie pracy w terenie udało znaleźć się jeszcze jedno drzewo porażone jemiolą pospolitą. Analiza materiałów nie pozwoliła na jej wykrycie. Podobnie jak w przypadku osłabionych świerków, było to związane ze stosunkowo dużą prędkością lotu UAV, co spowodowało, że opracowane materiały były w części z miejsc niewystarczająco wyraźne. Rysunek 52 przedstawia przykład – brzozę porażoną jemiolą pospolitą na kompozycji barwnej CIR oraz mapach indeksów wegetacyjnych.



Rysunek 51 Przykładowe osłabione świerki na kompozycji CIR (po lewej stronie drzewo, znalezione na podstawie opracowanego materiału; po prawej stronie drzewo, które nie zostało znalezione na podstawie opracowanego materiału)

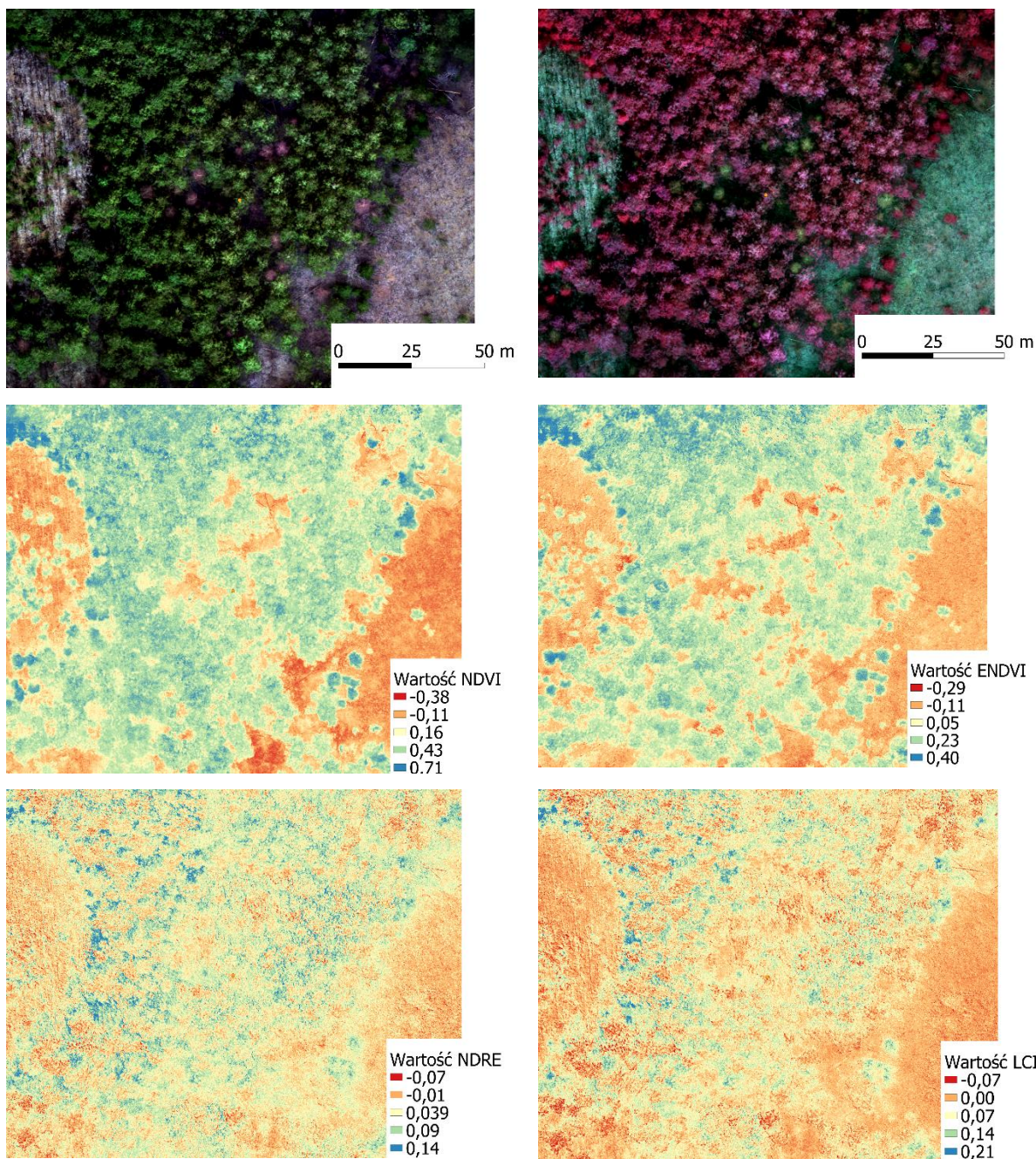


Rysunek 52 Brzoza porażona jemiolą pospolitą widoczna na kompozycji CIR, na której jemiola widoczna jest w kolorze mocno różowym oraz mapach indeksów wegetacyjnych. W przypadku map indeksów wegetacyjnych jemiola najbardziej widoczna okazała się na mapie prezentującej indeks ENDVI (kolor niebieski)

Wykorzystanie teledetekcji niskiego pułapu w wyszukiwaniu drzew zarażonych jemiolą może być szczególnie przydatne podczas wyszukiwania sosny zwyczajnej zasiedlonej przez jemiolę. Problem ten nie jest jeszcze istotny na terenie województwa podlaskiego, ale już w województwie lubuskim stanowi realne zagrożenie dla zdrowia drzewostanów sosnowych. Jemiola dla sosny zwyczajnej stanowi dużo większe zagrożenie niż dla brzozy.

Testy wykazały, że opracowane przy użyciu oprogramowania AGISOFT materiały okazały się mało pomocne podczas wyszukiwania pojedynczych wywrotów i złomów. Podczas inwentaryzacji w terenie znaleziono łącznie 12 wywrotów sosnowych. W trakcie pracy kameralnej udało znaleźć się zaledwie jeden wywrot (co stanowi 8 % spośród wszystkich wywrotów znalezionych w terenie). Z pewnością materiały miałyby zastosowanie podczas wyszukiwania kilku (grupy) wywrotów lub złomów w jednym miejscu.

Wykorzystanie kompozycji CIR oraz map indeksów wegetacyjnych może być bardzo użyteczne podczas inwentaryzacji młodników. Użycie materiałów opracowanych dzięki kamerze mulispektralnej zamocowanej do UAV do przeglądu młodników jest tym bardziej przydatne ze względu na to, że młodniki są to często drzewostany, w których przemieszczanie się obserwatora pieszego jest bardzo utrudnione. Dodatkowo panuje tam niewielka widoczność. W związku z tym inwentaryzacja drzewostanu będącego w fazie młodnika jest niezwykle pracochłonna. Dzięki opracowaniom udało się w szybki sposób określić miejsca, gdzie potencjalnie drzewostan może być w gorszej kondycji. Rysunek 53 przedstawia fragment przedstawiający młodnik sosnowy (w wieku 16 lat, adres wydzielenia:19-166-f-00), który został wytypowany jako potencjalnie osłabiony.



Rysunek 53 Fragment młodnika sosnowego w wieku 16 lat przedstawiony w kompozycji barwnej RGB, CIR oraz wybranych w pracy mapach indeksów indeksach wegetacyjnych

Inwentaryzacja w terenie wykazała, że lokalizacje wytypowane w trakcie pracy biurowej były to miejsca, gdzie powstały niewielkie przerzedzenia lub, gdzie pojawiła się brzoza brodawkowata, która nie została usunięta podczas zabiegu czyszczeń późnych wykonanych w 2020 roku.

Niemniej jednak przeprowadzona inwentaryzacja młodników z lotu ptaka zdecydowanie ułatwiła skontrolowanie stanu zdrowotnego tego fragmentu lasu. Warto dodać, że drzewostan

iglasty w fazie młodnika jest bardzo jednorodny, co sprawiło, że interpretacja materiałów dla tej części zinwentaryzowanego lasu okazała się zdecydowanie łatwiejsza niż w przypadku drzewostanów starszych.

Przeprowadzone testy wyraźnie pokazały, że do skutecznej teledetekcji niskiego pułapu niezbędna jest znajomość terenu. Do prawidłowej interpretacji materiałów niezbędna jest wiedza o gatunkach znajdujących się na danej powierzchni, rozmieszczeniu kęp oraz innych powierzchni niestanowiących wydzielenia. Na przykład w okresie, kiedy dokonano nalotu niezbędna była świadomość, że wśród drzew iglastych, które posiadają aparat asymilacyjny przez okres całego roku, znajdowały się również drzewa liściaste, które w tym czasie pozbawione były jeszcze listowia, co skutkowało tym, że np. na kompozycjach barwnych CIR mogły one wyglądać na martwe drzewa iglaste. Przeprowadzone prace wyraźnie pokazały, że zastosowanie teledetekcji niskiego pułapu jest bardzo użyteczne do odszukania miejsc, na które należy zwrócić szczególną uwagę podczas inwentaryzacji pieszej.

Wnioski

1. Do prawidłowej oraz skutecznej interpretacji materiałów teledetekcyjnych o wysokim stopniu szczegółowości (niski rozmiar GSD) niezbędna jest znajomość terenu. Wykorzystanie kompozycji barwnych CIR oraz map wskaźników wegetacyjnych zdecydowanie wspomaga inwentaryzację w terenie. Przegląd map indeksów wegetacyjnych oraz kompozycji barwnych RGB oraz CIR przed wyjściem w teren pomaga w znalezieniu miejsc, na które należy zwrócić szczególną uwagę podczas inwentaryzacji pieszej;
2. Loty wykonane wiosną 2022 roku (12 kwietnia) były wykonane zbyt szybko (około 8 m/s), co sprawiło, że opracowane fotomapy były nieco rozmyte. Wskutek czego często nie była możliwa prawidłowa interpretacja materiałów;
3. Posusz, który udało się znaleźć przy użyciu materiału z nalotu wykonanego wczesną wiosną 2022 roku (12 kwietnia) należał zawsze do gatunków iglastych. Drzewa liściaste nie wykształciły jeszcze w tamtym czasie aparatu asymilacyjnego, co uniemożliwiło określenie stanu zdrowotnego drzew liściastych;
4. Zobrazowania CIR bardzo dobrze sprawdzają się podczas wyszukiwania drzew porażonych jemiołą pospolitą. Może być to szczególnie pomocne podczas wyszukiwania sosen porażonych tym półpasożytem (pasożyt rośliny – roślina cudzożywna, pobiera wodę oraz asymilaty z żywych organizmów; półpasożyt rośliny – z innych roślin pobiera wodę oraz sole mineralne, natomiast produkty fotosyntezy

wywarza samodzielnie [43]). Dzięki pozyskanemu materiałowi wiosną 2022 roku udało znaleźć się dwie brzozy porażone jemiolą pospolitą. W trakcie inwentaryzacji pieszej znaleziono jeszcze jedno takie drzewo. Rozmycie ortofotomapy sprawiło, że nie było ono na niej zbyt widoczne. Problem z zamieraniem sosny na skutek zasiedlenia przez jemiolę nie występuje jeszcze na terenie województwa podlaskiego, ale stanowi realne zagrożenie części zachodniej Polski, na przykład województwa lubuskiego.

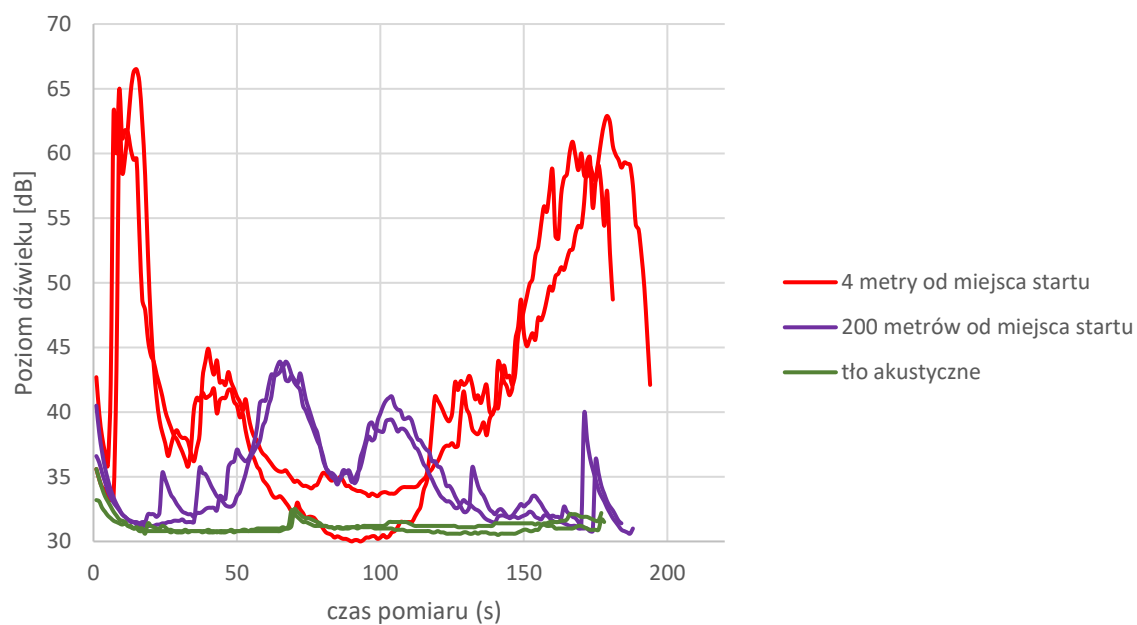
6.3 Pomiar natężenia dźwięku (dB) generowanego przez wielowirnikowiec

Wyniki pomiarów natężenia dźwięku przedstawione zostały w Tabeli 31. Jak można zauważyć, największy poziom natężenia dźwięku uzyskano w trakcie jednego z pomiarów, w którym mikrofon znajdował się 4 metry od miejsca startu (67,1 dB). Maksymalne natężenie dźwięku zostało odnotowane w trakcie startu MR. Zgodnie z Rysunkami 54 oraz 55 w przypadku, gdy pomiaru dokonywano 4 metry od miejsca startu/ładowania UAV natężenie dźwięku zawsze było najwyższe w momencie startu. Procedura lądowania MR trwa dłużej niż procedura startu. Dlatego na tych samych wykresach możemy zaobserwować, że czas podwyższonego poziomu hałasu (powyżej 45 dB) jest kilkakrotnie dłuższy podczas lądowania. Warto w tym miejscu zauważyć, że gdy mikrofon znajdował się 200 metrów od lokalizacji operatora, poziom natężenia dźwięku zarejestrowany przez mikrofon nigdy nie przekroczył 45 dB (patrz Rysunek 57). Najwyższy poziom natężenia dźwięku w odległości 200 metrów od miejsca startu został zarejestrowany w trakcie jednego z lotów na wysokości 120 metrów AGL (44.1 dB). Jest to wartość o ≈ 13 dB większa od średniego natężenia dźwięku dla tła akustycznego, które zostało zarejestrowane tego dnia.

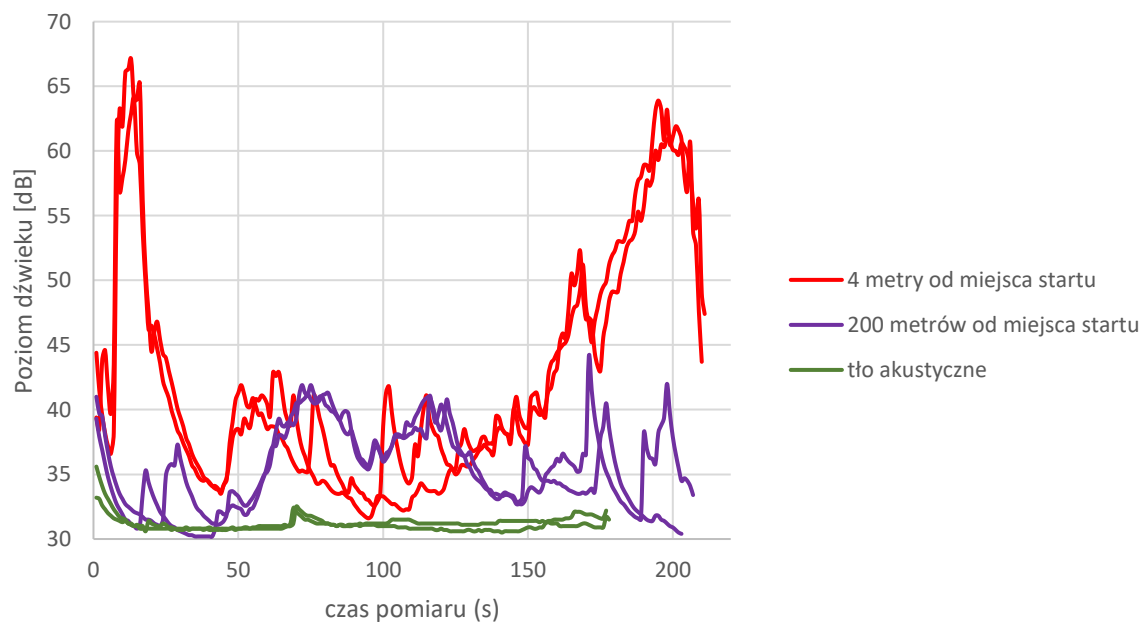
Tabela 31 Wyniki pomiaru natężenia dźwięku (dB) z dnia 28 listopada 2021 roku w zależności od lokalizacji mikrofonu oraz wysokości lotu

Warunki pomiaru	Odległość 4 metry				Odległość 200 metrów				Tło akustyczne	
Wysokość (m)	80	80	120	120	80	80	120	120		
MAX (dB)	65	66,5	67,1	64	43,5	43,9	44,1	41,3	35,6	33,2
MIN (dB)	30	33,2	31,6	32,2	30,8	30,6	31	30,2	30,5	30,6
Rozpiętość (dB)	35	33,3	35,5	31,8	12,7	13,3	13,1	11,1	5,1	2,6
Mediana (dB)	39,85	39,9	39,4	39,15	34,1	33,45	35,6	34,4	30,9	31,2
Średnia (dB)	41,69	42,46	42,60	42,34	35,05	34,68	35,79	35,06	31,07	31,25
Odchylenie średnie (dB)	7,93	7,31	7,17	7,40	2,93	2,77	2,47	2,83	0,36	0,30
Wariancja (dB ²)	95,02	83,59	78,24	81,03	12,02	11,31	8,71	10,64	0,44	0,18
Odchylenie standardowe (dB)	9,75	9,14	8,85	9,00	3,47	3,36	2,95	3,26	0,66	0,42

Warta uwagi jest rozpiętość poziomu natężenia dźwięku (dB) jaką zarejestrowano w trakcie pomiarów. Poziom natężenia dźwięku tła akustycznego (w trakcie gdy UAV był wyłączony) zmierzony został dwukrotnie. Rozpiętość natężenia dźwięku w przypadku tła akustycznego wyniosła 5,1 oraz 2,6 dB. Gdy pomiaru natężenia dźwięku dokonano w trakcie pracy UAV w odległości 200 metrów od miejsca startu rozpiętość wyniosła już 12,7 oraz 13,3 dB (dla lotów na 80 metrach AGL) oraz 13,1 i 11,1 dB (dla lotów na wysokości 120 m AGL). Gdy pomiar natężenia dźwięku przeprowadzono w odległości 4 metrów od miejsca startu, wielkość ta była jeszcze większa – 35,0 i 33,3 dB (lot na 80 metrach AGL) oraz 35,5 i 31,8 dB (lot na wysokości 120 metrów AGL). Można to zaobserwować nie tylko dzięki Tabeli 31, ale również opierając się na Rysunkach 56 oraz 57.

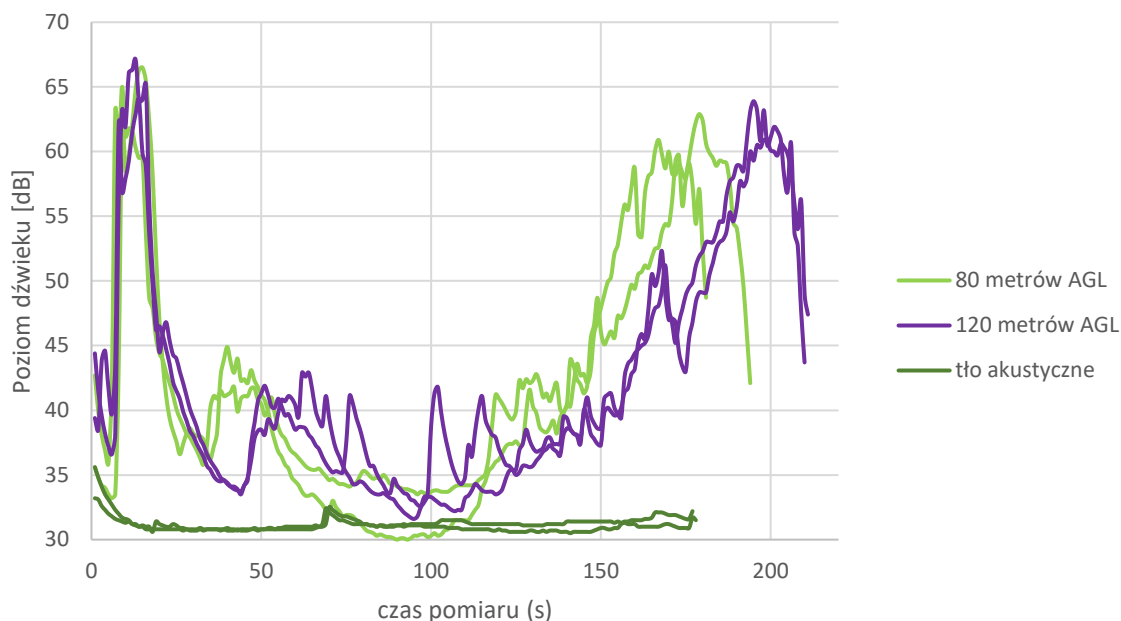


Rysunek 54 Natężenie dźwięku zarejestrowane w trakcie lotów, gdy UAV wzniósł się na 80 m AGL



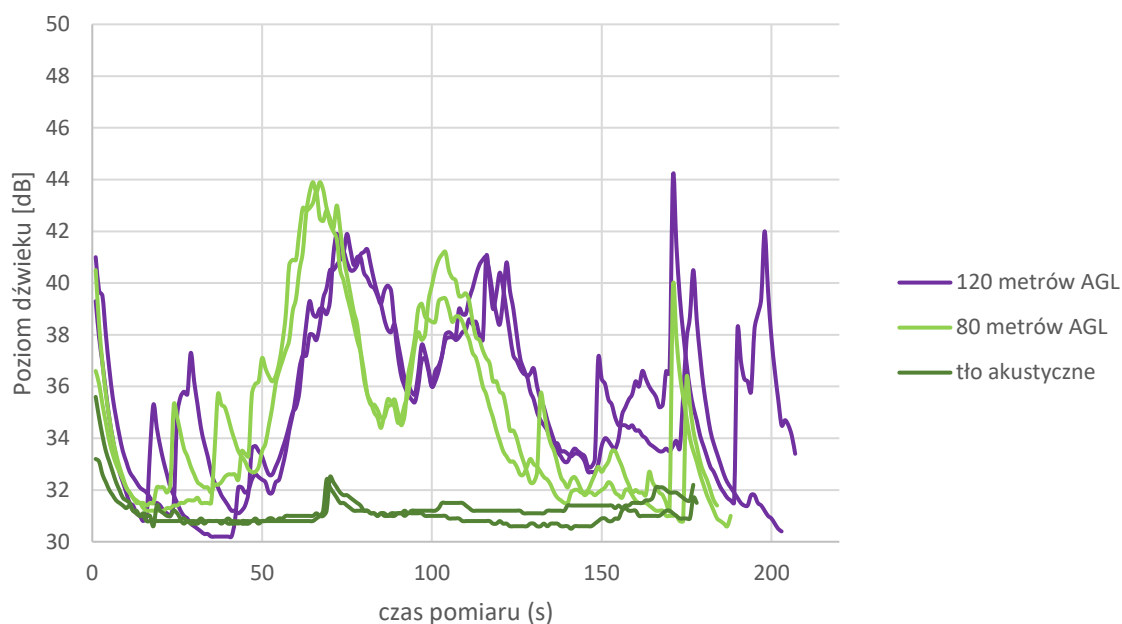
Rysunek 55 Natężenie dźwięku zarejestrowane w trakcie lotów, gdy UAV wzniósł się na 120 m AGL

Na tej podstawie można stwierdzić, że planowanie nalogów związanych z inwentaryzacją zwierzyny w taki sposób, aby lokalizacja startu była oddalona o 200 – 300 metrów od badanej powierzchni jest jak najbardziej słuszne. Dzięki temu ryzyko związane z płoszeniem zwierzyny ograniczone zostaje do możliwego minimum.

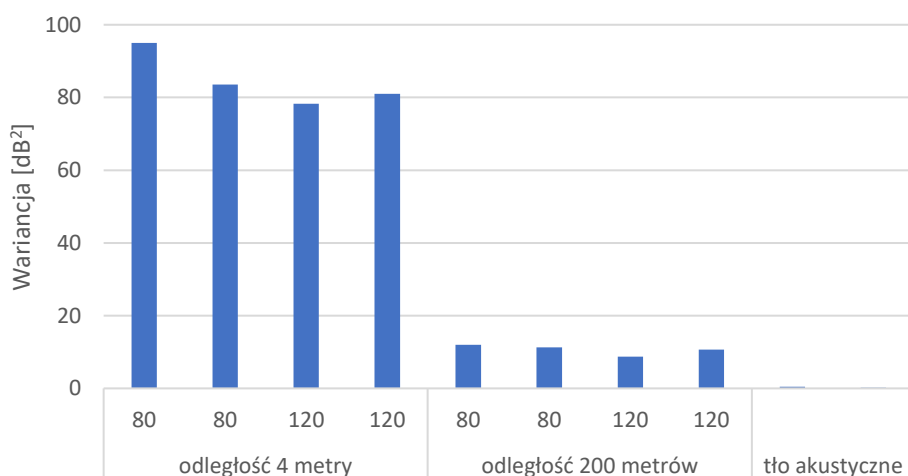


Rysunek 56 Porównanie emitowanego natężenia dźwięku przez UAV dla przypadku, gdy UAV wzniósł się do 80 oraz 120 metrów AGL. Lokalizacja mikrofonu – 4 metry od miejsca startu/lądowania

Obniżenie wysokości lotu z 120 metrów do 80 metrów AGL nie miało istotnego wpływu na poziom rejestrowanego natężenia dźwięku. Potwierdza to informacje zawarte w Tabeli 31 oraz Rysunki 54 (Natężenie dźwięku zarejestrowane w trakcie lotów, gdy UAV wzniósł się na 80 m AGL) oraz 55 (Natężenie dźwięku zarejestrowane w trakcie lotów, gdy UAV wzniósł się na 120 m AGL). Analizując wykresy można zobaczyć, że mają one bardzo podobny kształt i nie różnią się w istotnym stopniu. Na szczególną uwagę zasługuje również poziom natężenia dźwięku zarejestrowany pomiędzy 50 a 150 sekundą pomiaru przedstawiony na Rysunku 57. Jest to okres kiedy lecący wielowirnikowiec znajdował się najbliżej mikrofonu mierzącego poziom hałasu, podczas gdy mikrofon znajdował się 200 metrów od miejsca startu. Zarejestrowany poziom natężenia dźwięku nie przekroczył w tym czasie 45 dB.

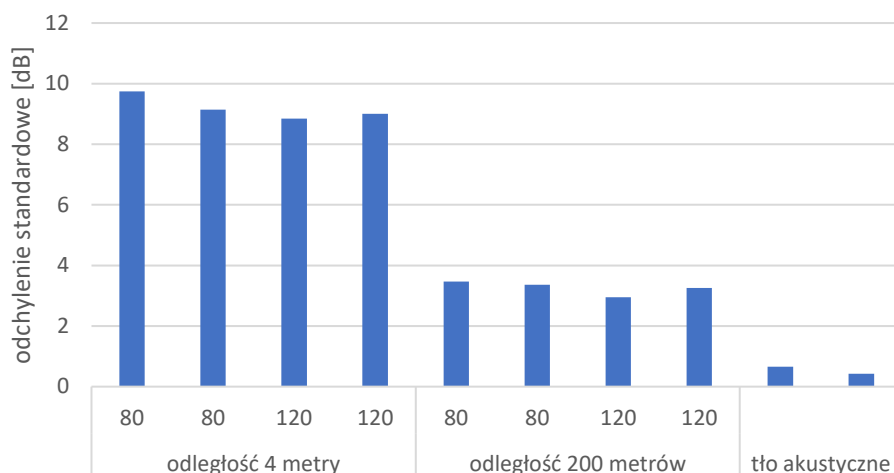


Rysunek 57 Porównanie emitowanego natężenia dźwięku przez UAV dla przypadku, gdy UAV wzniósł się do 80 oraz 120 metrów AGL. Lokalizacja mikrofonu – 200 metrów od miejsca startu/ładowania



Rysunek 58 Porównanie wariancji emitowanego natężenia dźwięku przez UAV w zależności od odległości mikrofonu od miejsca startu

Wartości wariancji (patrz Rysunek 58) obliczone dla każdej próby podzielono na 3 zakresy: - pomiar bezpośrednio obok miejsca startu UAV; - pomiar w odległości 200 metrów od miejsca startu UAV; - oraz pomiar tła akustycznego. Wartości wariancji były zdecydowanie wyższe podczas pomiaru poziomu natężenia dźwięku generowanego przez wielowirnikowiec bezpośrednio w miejscu startu (wartości wariancji dla tych pomiarów wynosiły: 95,02; 83,59; 78,24 oraz 81,03 dB^2), w porównaniu z pomiarem w odległości 200 m od startu UAV, gdzie uzyskane wariancje wyniosły 12,02; 11,31; 8,71 oraz 10,64 dB^2 .



Rysunek 59 Porównanie odchyleń standardowych wyników emitowanego natężenia dźwięku przez UAV w zależności od odległości mikrofonu od miejsca startu

Opisywaną zależność można również zaobserwować analizując odchylenie standardowe (Rysunek 59). Odchylenie standardowe dotyczące natężenia dźwięku docierającego do mikrofonu jest ponad 3 razy mniejsze dla pomiarów wykonanych w odległości 200 metrów od miejsca startu UAV w porównaniu do pomiarów wykonanych bezpośrednio w miejscu startu.

Na podstawie wyników przedstawiających miary zmienności natężenia dźwięku można stwierdzić, że oddalenie miejsca startu UAV od powierzchni objętej inwentaryzacją powoduje zmniejszenie zmienności poziomu hałasu docierającego do inwentaryzowanej części dna lasu. Jest to szczególnie istotne w przypadku inwentaryzowania gatunków, które nie wykazują znacznej wrażliwości na monotony hałas nawet o dużym jego natężeniu, ale sygnał ucieczki wyzwała u nich dopiero wyraźna zmiana poziomu natężenia dźwięku. Dobrym przykładem mogą być tutaj gatunki synantropijne, takie jak dziki, które w przypadku żerowania w miastach są niewrażliwe na jednostajny szum ruchu drogowego lub też inne źródła dźwięku (np. praca zakładów produkcyjnych). Natomiast sygnałem do ucieczki jest dla nich nagła zmiana natężenia dźwięku – wystrzał, krzyk, klakson.

6.4 Wyniki zasięgu łączności platformy

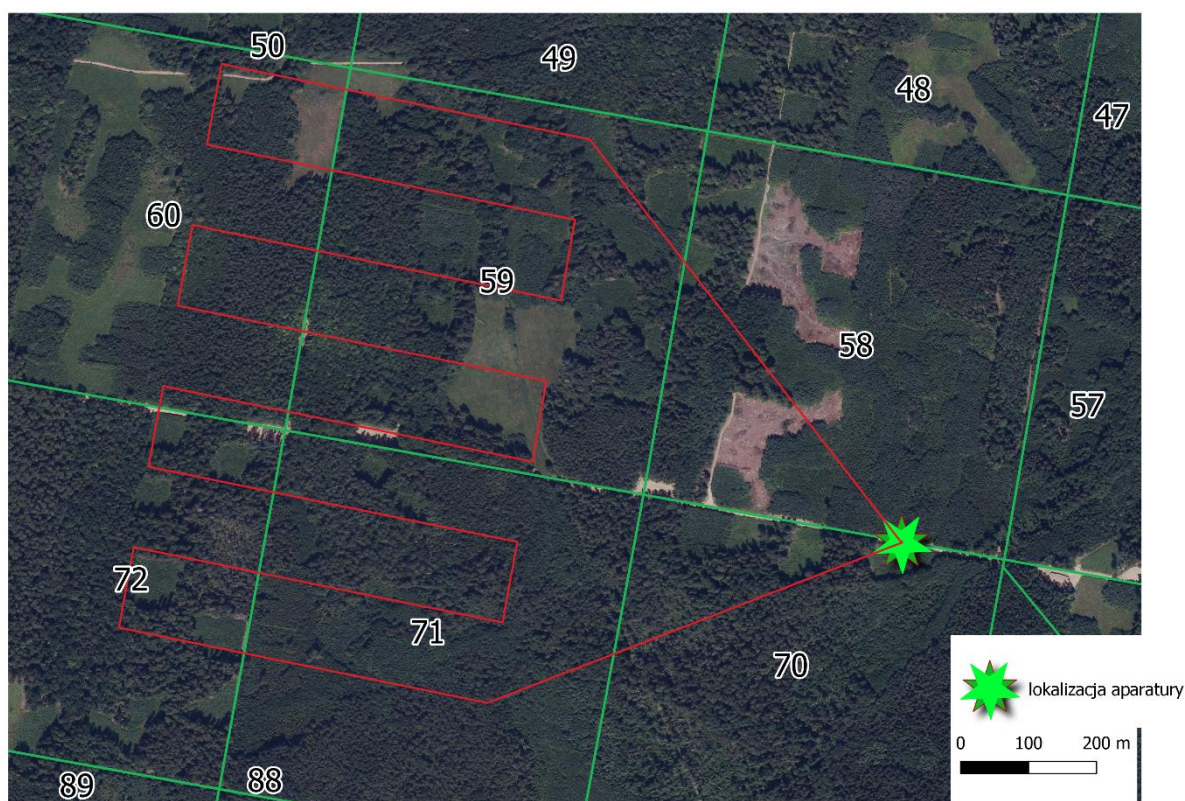
6.4.1 Teren leśny

Tabela 32 Podsumowanie lotów związanych z badaniem zasięgu łączności platformy w terenie leśnym

Data		Godzina rozpoczęcia		Godzina zakończenia	Czas trwania misji	Prędkość lotu	Maksymalna odległość pozioma pomiędzy GCS a UAV	Czy utracono połączenie telemetryczne	Jeżeli utracono połączenie – kiedy oraz w jakiej odległości poziomej pomiędzy UAV od GCS		Prędkość wiatru	Zachmurzenie	Temperatura	Orientacyjna lokalizacja nalotów - numery oddziałów	
-	czas UTC			min.	m/s	m	-	czas (minuty: sekundy)	odległość (m)	m/s	%	C	-		
13.09.2022	15:08	15:21	13	10	1168	nie	-	-	4	3	13	162	163		
	15:26	15:39	13		1060		-	-				133	134		
	16:23	16:36	13		1073	tak	07:35	1050				233	234		
14.09.2022	17:18	17:31	13		949	nie	-	-	5	70	12	54	55		
	17:40	17:54	14		783		-	-				76	77		
	18:54	19:08	14		1061	tak	12:19	1035				154	155		
16.09.2022	17:48	18:01	13		1070	nie	-	-	9	42	11	68	69		
	18:05	18:18	13		1223		-	-				59	71		
	19:15	19:29	14		940		-	-				226	227		
17.09.2022	16:43	16:56	13		971		-	-	8	64	12	73	74		
	16:58	17:11	13		934		-	-				106	107		
	18:00	18:13	13		1130	tak	09:07	897				11	12		
					09:18		915								
					11:25		1044								
26.09.2022	16:44	16:56	12			1019	nie	-	-	3	32	13	169	184	

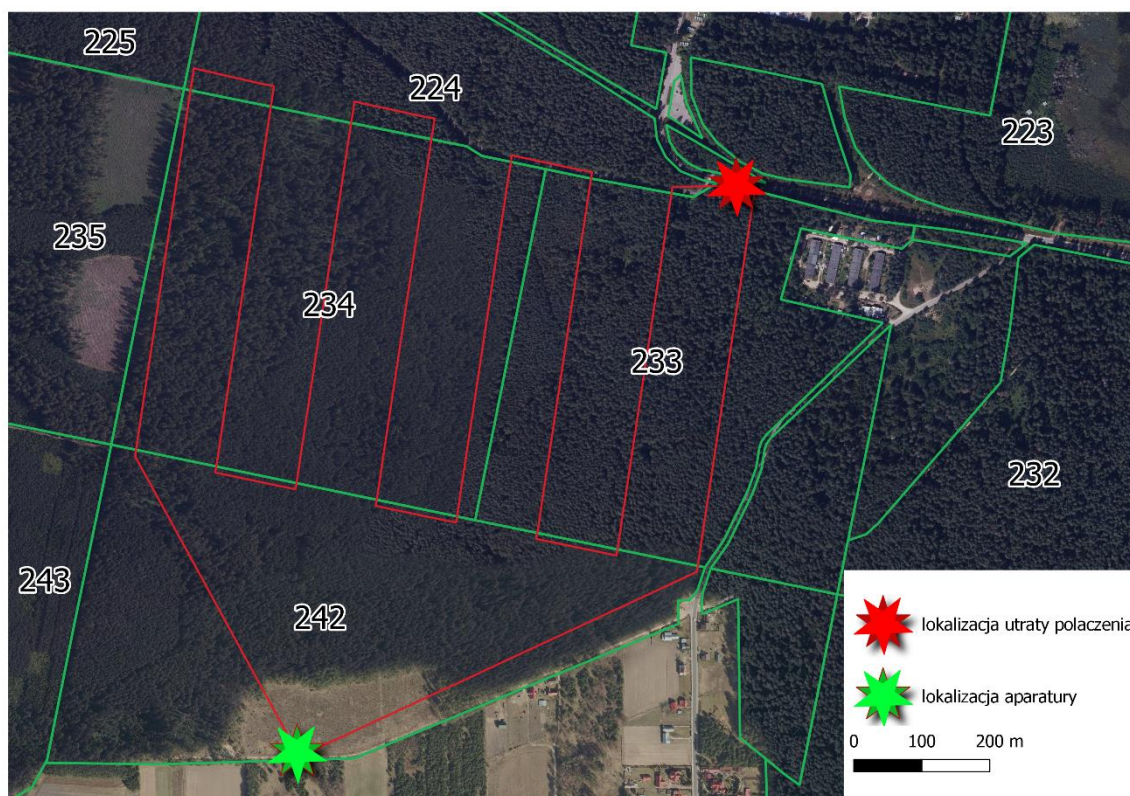
W trakcie badań zasięgu łączności platformy największą odległość poziomą pomiędzy aparaturą a wielowirnikowcem uzyskano w trakcie jednego z nalotów przeprowadzonych 16 września 2022 roku (1223 metry, patrz Tabela 32). Pomimo, że w trakcie tego lotu uzyskano największą odległość pomiędzy aparaturą a wielowirnikowcem, w tym czasie nie napotkano na

problemy związane z utratą łączności telemetrycznej pomiędzy GCS a UAV. Trasę nalotu oraz lokalizację aparatury przedstawia Rysunek 60.



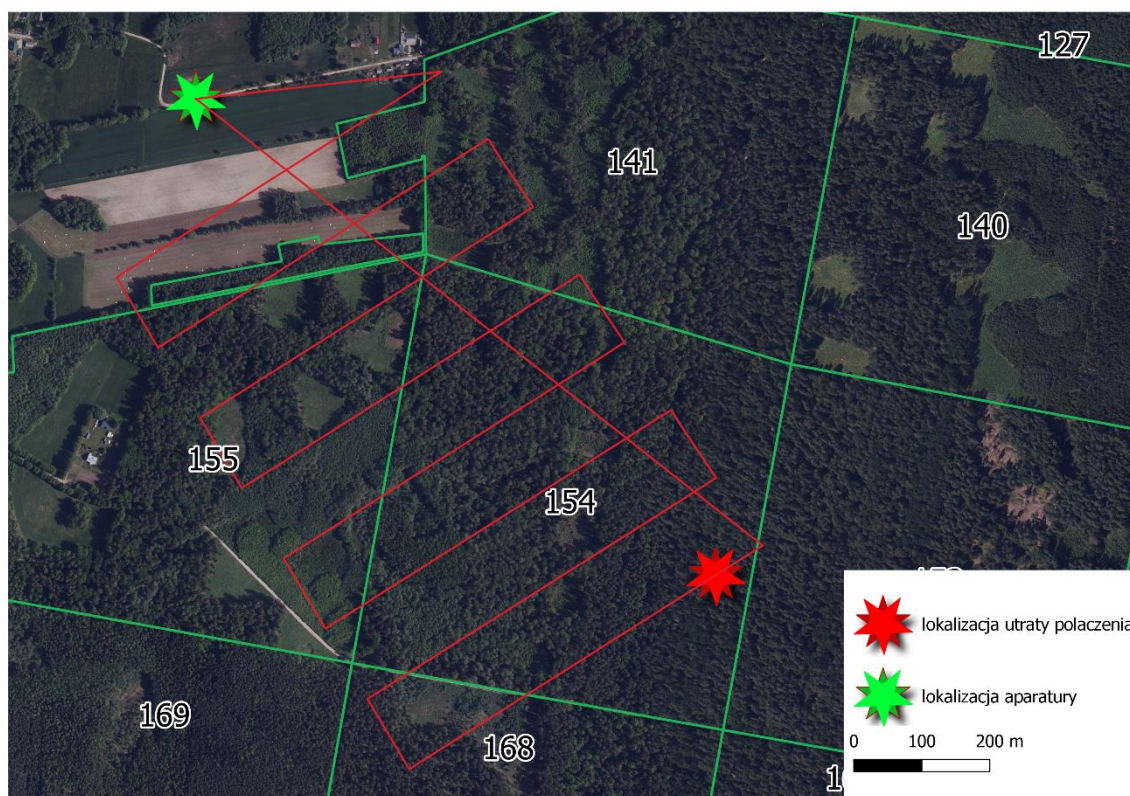
Rysunek 60 Trasa nalotu (zaznaczona kolorem czerwonym) z dnia 16 września 2022 roku - kiedy odnotowano największą odległość pomiędzy aparaturą a wielowirnikowcem

Problemy z łącznością wystąpiły natomiast w czasie jednego z lotów przeprowadzonych 13 września, jednego lotu z 14 września oraz jednej misji z 17 września. Przy czym największe problemy z łącznością wystąpiły 17 września, co poskutkowało decyzją o wcześniejszym zakończeniu misji i rozpoczęciu procedury RTL. W przypadku nalotów z 13 oraz 14 września problemy występowały bardzo blisko maksymalnej planowanej dla tych lotów odległości pomiędzy GCS a UAV. W związku z tym było możliwe bezpieczne zakończenie zaplanowanej misji. Trasy nalotu, lokalizacje położenia aparatury oraz lokalizację chwilowego zerwania łączności telemetrycznej pomiędzy aparaturą a UAV przedstawione zostały na Rysunkach 61, 62, 63.



Rysunek 61 Trasa nalogu (zaznaczona kolorem czerwonym) z dnia 13 września 2022 roku, kiedy odnotowano problemy z łącznością

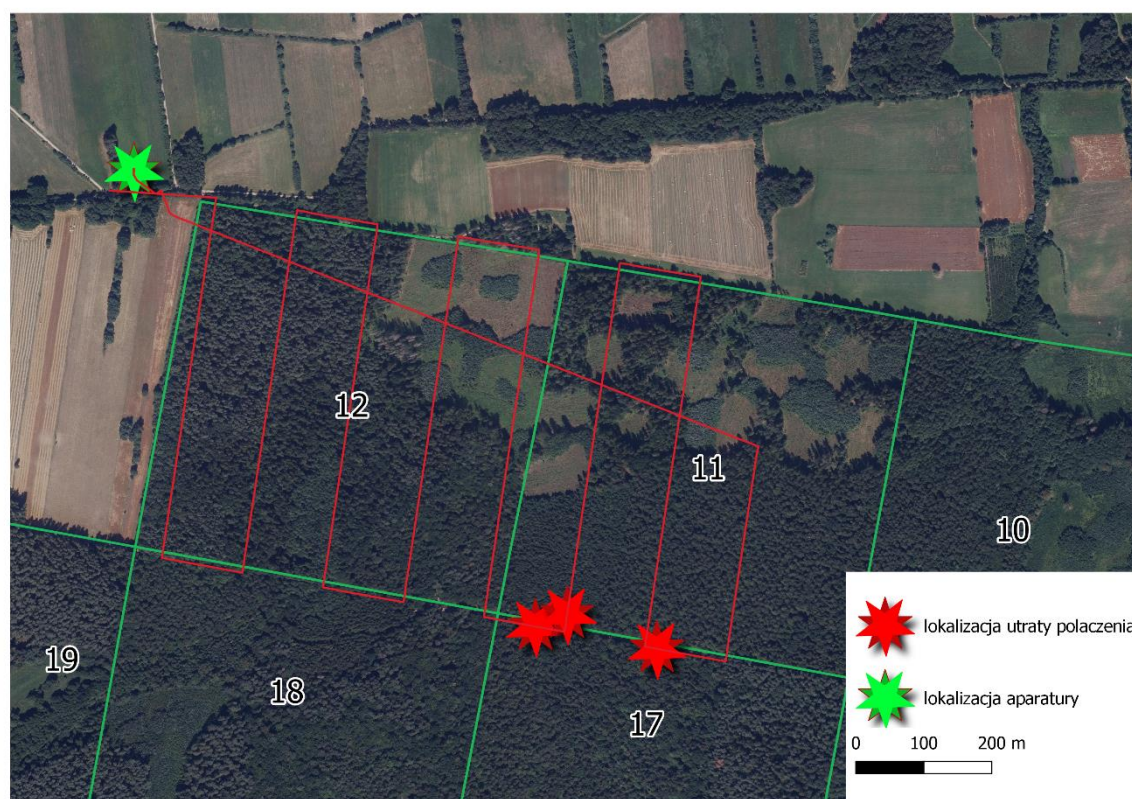
Odległości pomiędzy aparaturą a UAV, w jakich wystąpiły problemy związane z łącznością widoczne są w Tabeli 32.



Rysunek 62 Trasa nalogu (zaznaczona kolorem czerwonym) z dnia 14 września 2022 roku, kiedy odnotowano problemy z łącznością

W podsumowaniu stwierdzam, że w trakcie badania łączności platformy, trasy nalogów, lokalizacje miejsca startu oraz lądowania i wysokość lotu (80 m AGL) były zaplanowane w taki sposób, że nie napotkano na istotne problemy związane z łącznością pomiędzy GCS a UAV. Tylko w jednym przypadku z dnia 17 września problemy były na tyle istotne (3 zdarzenia utraty łączności), że prewencyjnie postanowiono zakończyć misję przed całkowitym wykonaniem zaplanowanej trasy misji autonomicznej. Na podstawie przeprowadzonych testów ogólnie można przyjąć, że w trakcie lotu na wysokości 80 m AGL w warunkach leśnych wytypowany sprzęt może być użytkowany zapewniając połączenie pomiędzy aparaturą a UAV do odległości poziomej $1\,200 \div 1\,300$ metrów. Oczywiście mogą zdarzyć się sytuacje, że zasięg łączności platformy będzie większy, np. 1 600 metrów. Takie osiągi można uznać jako w pełni zadowalające, tym bardziej, że zgodnie ze zasadami lotu BVLOS w kategorii szczególnej NSTS-05, maksymalna odległość pomiędzy operatorem a UAV nie powinna przekraczać 2 kilometrów. Trzeba również dodatkowo wspomnieć o scenariuszu standardowym STS-02, w przypadku którego, jeżeli lot odbywa się bez obserwatora, odległość pozioma pomiędzy GCS a UAV nie powinna przekraczać 1 kilometra. Natomiast w przypadku wykorzystania

obserwatora dla tego scenariusza odległość pozioma pomiędzy UAV a aparaturą nie powinna być większa od 2 kilometrów.



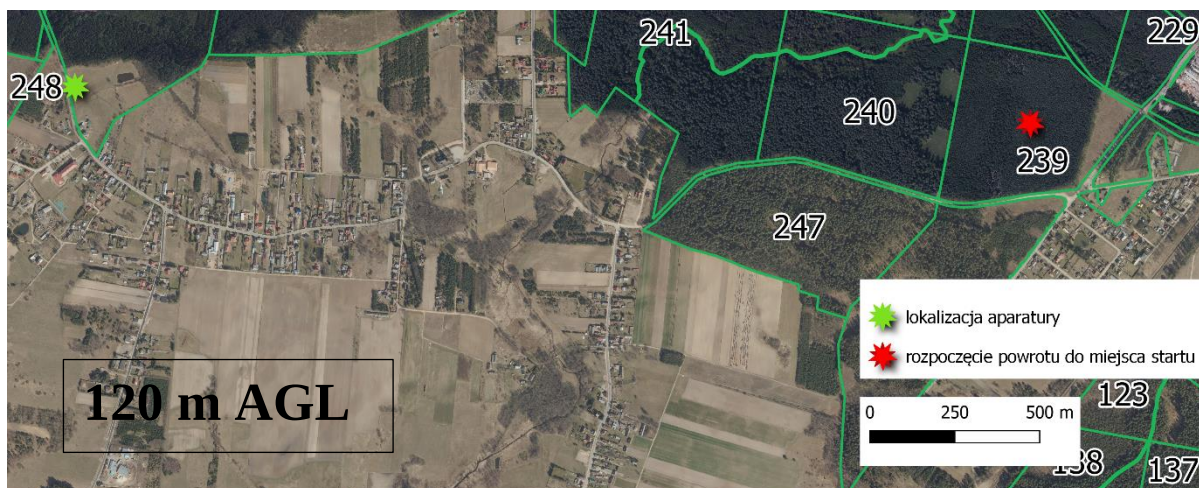
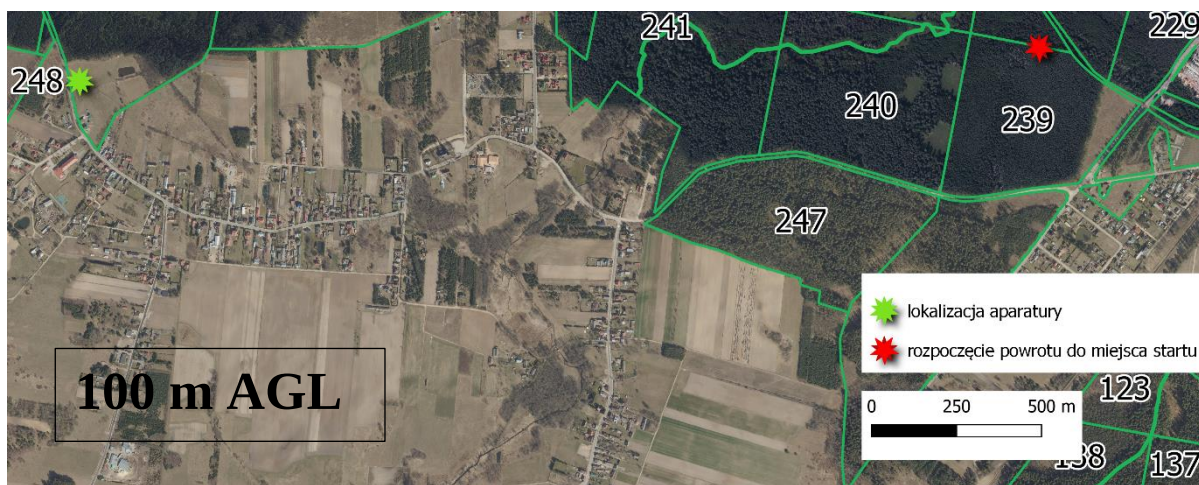
Rysunek 63 Trasa nalogu (zaznaczona kolorem czerwonym) z dnia 17 września 2022 roku, kiedy odnotowano problemy z łącznością

6.4.2 Teren otwarty

Tabela 33 Podsumowanie lotów związanych z badaniem zasięgu łączności platformy w terenie otwartym

Wysokość AGL (m)	Uzyskana maksymalna odległość (m)	Prędkość wiatru (m/s)	Porywy wiatru (m/s)	Temperatura (°C)	Zachmurzenie (%)
120	2828	6	17	14	0
100	2825				
80	2812				

W trakcie badania zasięgu łączności platformy w terenie otwartym we wszystkich przypadkach (wysokość AGL – 80, 100 oraz 120 m) uzyskano maksymalną odległość pomiędzy aparaturą a wielowirnikowcem wynoszącą $\approx 2\,800$ metrów. W czasie pracy w żadnym z przypadków nie utracono łączności telemetrycznej pomiędzy GCS a UAV. Jednakże ze względów bezpieczeństwa oraz z uwagi na obowiązujące przepisy dotyczące użytkowania UAV, w momencie utraty przez obserwatora kontaktu wzrokowego z UAV podejmowana była decyzja o powrocie do miejsca startu. W związku z tym, należy przyjąć, że zasięg łączności wytypowanego UAV w terenie otwartym jest w zupełności satysfakcjonujący. Ze względu na obowiązujące przepisy nie było możliwe zbadanie maksymalnego zasięgu łączności, jaki może osiągnąć wytypowany UAV. Rysunek 64 przedstawia lokalizacje aparatury oraz lokalizacje, w której znajdował się UAV, kiedy podejmowana była decyzja o rozpoczęciu powrotu do miejsca startu (dla trzech wysokości lotu AGL – 80, 100 oraz 120 metrów). Podsumowanie lotów związanych z badaniem zasięgu łączności przedstawia Tabela 33.



Rysunek 64 Lokalizacje aparatury oraz UAV w momencie, kiedy była podejmowana decyzja o rozpoczęciu procedury powrotu do miejsca startu (dla trzech wysokości lotu AGL – 80, 100 oraz 120 metrów)

7. Narzędzie „xcopterCalc” jako pomoc przy szacowaniu parametrów lotu wielowirnikowca

W trakcie pracy testowano narzędzie do szacowania parametrów lotu wielowirnikowców – „xcopterCalc” [142]. Jest to program należący do jednego z arkuszy eCalc [143]. Umożliwia na podstawie danych takich jak liczba wirników, masa wielowirnikowca, cechy baterii, cechy silników itp., oszacowanie parametrów lotu, do których należą m.in. zasięg lub czas lotu. Zgodnie z informacjami zamieszczonymi na stronie internetowej dokładność obliczeń wynosi +/- 15 %. Więcej informacji na temat założeń stosowanych podczas obliczeń znajduje się w literaturze [143].

W oparciu o cechy Hexacoptera Yuneec H520E (specyfikację techniczną BSP przedstawia Tabela 13) wprowadzone zostały dane wejściowe do zastosowanego programu. Trzeba zaznaczyć, że część parametrów uzupełniono przybliżonymi wartościami. Dotyczy to na przykład silników bezszczotkowych. Wynika to z tego, że narzędzie „xcopterCalc” nie posiada na dostępnej do wyboru liście silników dokładnie tego, który został zastosowany w Hexacopterze Yuneec H520E. Dlatego w trakcie pracy z programem wybrano silnik możliwie podobny do silników znajdujących się w używanym BSP. Podczas uzupełnienia arkusza uwzględniono również ładunek – kamerę E20Tvx (specyfikację przedstawia Tabela 9), która była stosowana w czasie lotów związanych z wykrywaniem zwierzyny grubej. Parametry wejściowe, jakie wprowadzono do programu zostały przedstawione na Rysunku 65.

Podstawowe	Waga modelu:		ilość wirników:		Rozmiar ramy:	
	1860 g	z silnikami	6	płasko	520 mm	20.47 inch
	65.6 oz					
	Limit wychylenia FC:		wysokość terenu	Temperatura powietrza	Ciśnienie (QNH):	
	bez limitu		100 m ASL	20 °C	1013 hPa	
			328 ft ASL	68 °F	29.91 inHg	
Pakiet	Typ (Pojemność / max. C) - stopień naładowania:			Konfiguracja:	Pojemność celi:	
	LiPo 6000mAh - 20/30C			4 S 1 R	6000 mAh	
	- pełne				6000 mAh (całkowite)	
	max. rozładowanie:	Rezystancja:	Napięcie:	C:	Waga:	
	70%	0.0038 Ohm	3.7 V	20 C - ciągły	142 g	
				30 C max	5 oz	
ESC	Typ:		Prąd:		Rezystancja:	
	max 20A		20 A ciągły		0.01 Ohm	
			20 A max			
	Waga:	Akcesoria		Pobór prądu:	Waga:	
	25 g			1.5 A	358 g	
	0.9 oz				12.6 oz	
Silnik	Producent - Typ (Kv) - chłodzenie: (P = przerwany)			KV (bez momentu):	Prąd bez obciążenia:	
	FHEM - C28-36/12 (750)			750 rpm/V	0.26 A @ 10 V	
	dobre			Kreator Śmigła i KV		
	Limit (do 15s):	Rezystancja:	Długość obudowy:	# magnesów:	Waga:	
	240 W	0.143 Ohm	36 mm	14	67 g	
			1.42 inch		2.4 oz	
Śmigło	Typ - jarmzo:		Średnica:		Skok:	
	Generic - normal		9.76 inch		3.1 inch	
			248 mm		78.7 mm	
	# łopatek:	StałaP/StałaT:	Przełożenie:		oblicz	
	2	1.06 / 1.0	1 : 1			

Rysunek 65 Parametry wejściowe, jakie wprowadzono do programu „xcopterCalc”

Maksymalne rozładowanie baterii przyjęto na poziomie 70%. Ustalono tak duży zapas pojemności baterii ze względu na to, że loty odbywały się w terenie leśnym. Wielowirnikowiec przez większość misji znajdował się poza zasięgiem wzroku operatora. Dlatego pozostawiono pewien zapas pojemności baterii na nieprzewidziane okoliczności, które mogłyby spowodować wydłużenie czasu lotu. Warto też pamiętać, że wielowirnikowiec w pewnych częściach misji musiał lecieć pod wiatr, co powodowało szybsze rozładowywanie akumulatora.

Zgodnie z wynikami programu „xcopterCalc” mieszany czas lotu dla wprowadzonych parametrów wynosi 10 minut 6 sekund (przy deklarowanym poziomie rozładowania baterii 70%). Wyniki zostały przedstawione na Rysunku 66.

Pakiet		Silnik @ Optymalna efektywność		Silnik @ Maksimum	
Obciążenie:	9.35 C	Prąd:	5.84 A	Prąd:	9.10 A
Napięcie:	14.84 V	Napięcie:	15.10 V	Napięcie:	14.74 V
Napięcie znamionowe:	14.80 V	Obroty*:	10657 rpm	Obroty*:	10020 rpm
Energia:	88.8 Wh	Moc elektryczna:	88.1 W	Moc elektryczna:	134.1 W
Całkowita pojemność:	6000 mAh	Moc mechaniczna:	78.1 W	Moc mechaniczna:	117.3 W
Używane pojemność:	4200 mAh	Efektywność:	88.7 %	Moc do wagi:	362.8 W/kg
Min. czas lotu:	4.5 min				164.6 W/lb
Czas lotu mieszanego:	10.1 min			Efektywność:	87.4 %
Czas zawisu:	13.4 min			Szacowana temperatura:	26 °C
Waga:	568 g				79 °F
	20 oz				
				Odczyty watomierza	
				Prąd:	54.6 A
				Napięcie:	14.84 V
				Moc:	810.3 W
Silnik @ Zawis		Całość napędu		Wielowirnikowiec	
Prąd:	2.89 A	Waga napędu:	1232 g	Waga całości modelu:	2218 g
Napięcie:	15.37 V		43.5 oz		78.2 oz
Obroty*:	6182 rpm	Ciąg d wagi:	2.1 : 1	Dodatkowe obciążenie:	1726 g
Przepustnica (log):	45 %	Prąd @ Zawis:	17.33 A		60.9 oz
Przepustnica (liniowa):	59 %	P(we) @ Zawis:	271.9 W	max. pochylenie:	56 °
Moc elektryczna:	44.4 W	P(wy) @ Zawis:	232.4 W	max. prędkość:	51 km/h
Moc mechaniczna:	38.7 W	Efektywność @ Zawis:	85.5 %		31.7 mph
Moc do wagi:	122.6 W/kg	Prąd @ max:	54.58 A	Szacunkowy zakres:	2798 m
	55.6 W/lb	P(we) @ max:	856.3 W		1.74 mil
Efektywność:	87.2 %	P(wy) @ max:	703.6 W	Prędkość wznoszenia:	5.2 m/s
Szacowana temperatura:	22 °C	Efektywność @ max:	82.2 %		1024 ft/min
	72 °F			Całkowita powierzchnia śmigieł:	28.96 dm²
Ciąg specyficzny:	8.33 g/W				448.88 in²
	0.29 oz/W			Awaria silnika:	

Rysunek 66 Wyniki obliczeń przeprowadzonych przy użyciu arkusza xcopterCalc (objaśnienia: - P -moc, Ciąg d wagi – stosunek ciągu do wagi)

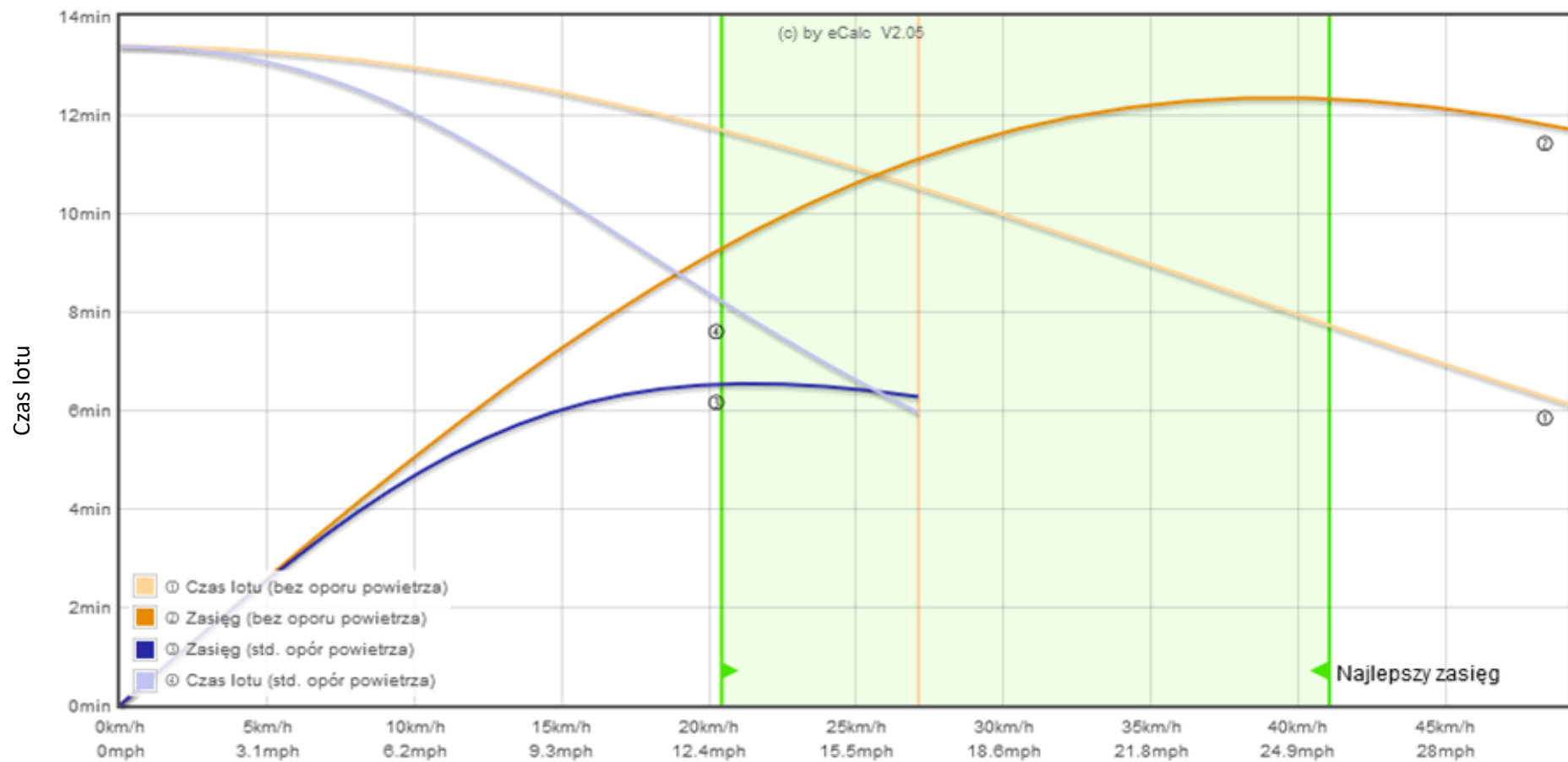
W celu sprawdzenia wiarygodności obliczeń, uzyskanych dzięki programowi „xcopterCalc”, wyniki porównano z zapisami log z lotów przeprowadzonych w dniach od 13 do 26 września 2022 roku kiedy testowano zasięg łączności platformy. Zapisy log były analizowane przy użyciu darmowego narzędzia PX4 [90].

Z analizy wynika, że program dla wprowadzonych parametrów Hexacoptera zaniża możliwy czas lotu. Tabela 34 przedstawia wyniki symulacji względem pozostałej pojemności baterii po faktycznie przeprowadzonych naloach (inne parametry dotyczące lotów wykonanych w dniach 13 – 26 września 2022 roku zostały przedstawione w Tabeli 32). Można zobaczyć, że przy średnim czasie misji wynoszącym 13 minut po wykonaniu nalołu pozostawało około 4,35 (wielkość niemianowana, skala od 1 do 10, gdzie: 10 – bateria w pełni naładowana, 0 – brak

mocy) pojemności baterii. Natomiast zgodnie z wynikami programu przy wykorzystaniu 70 % pojemności baterii czas lotu mieszanego wynosi 10 minut 6 sekund, a czas zawisu - 13 minut 24 sekundy. Można więc stwierdzić, że program „xcopterCalc” pozwala raczej na bardzo pobieżne szacowanie czasu lotu. Taki program może być pomocny w nadawaniu właściwego kierunku podczas projektowania BSP własnej konstrukcji – weryfikacja czy wprowadzona modyfikacja wydłuży lub obniży osiągi BSP. Prawdopodobnie wyniki byłyby dokładniejsze gdyby program „xcopterCalc” umożliwiał wybranie dokładnie tych komponentów, które wykorzystano w wielowirnikowcu zastosowanym w pracy. Rysunek 67 przedstawia wyniki symulacji szacowanego czasu lotu wielowirnikowca przeprowadzone przy użyciu programu „xcopterCalc”.

Tabela 34 Podsumowanie pozostałej pojemności baterii po lotach przeprowadzonych w dniach od 13 do 26 września 2023 roku

Data	Godzina rozpoczęcia	Godzina zakończenia	Czas lotu	Przebyty dystans	Pozostała pojemność baterii
-	czas UTC		(min:s)	km	wielkość niemianowana (10 - w pełni załadowana; 0- pusta)
symulacja			10:06 (lot mieszany)	4,86	3
			13:24 (czas zawisu)		
13.09	15:08	15:21	12:50	5,05	4,5
	15:26	15:39	12:45	5,07	4,8
	16:23	16:36	12:55	5,06	4,6
14.09	17:18	17:31	13:09	4,96	4,4
	17:40	17:54	14:28	4,81	3,9
	18:54	19:08	13:49	5,54	3,8
16.09	17:48	18:01	13:04	5,10	4,3
	18:05	18:18	12:57	5,22	4,4
	19:15	19:29	13:51	4,76	3,4
17.09	16:43	16:56	12:32	4,88	4,7
	16:58	17:11	12:35	4,90	4,7
	18:00	18:13	12:44	4,68	4,0
26.09	16:44	16:56	12:20	4,85	5,0



Prędkość wielowirnikowca

Rysunek 67 Wyniki symulacji szacowanego czasu lotu wielowirnikowca

8. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych prac można sformułować następujące wnioski:

1. Obecnie dostępne na rynku kamery termowizyjne pozwalają na wykrycie oraz oznaczenie raczej większych zwierząt, do których należą łoś euroazjatycki (rozmiar od 2,40 do 3,10 metra) oraz jeleń szlachetny (rozmiar od 1,75 do 2,65 metra). Pewne problemy w oznaczaniu gatunków występują w przypadku sarny europejskiej, która ma niewielkie rozmiary (od 0,95 do 1,4 metra) oraz dzika euroazjatyckiego, którego rozmiary wynoszą od 0,9 do 2,0 metra. W trakcie pracy pojawiły się istotne trudności w inwentaryzacji dwóch ostatnich gatunków. Lot z wykorzystaniem kamery E20Tvx (kąt widzenia kamery: $33^\circ \times 26,6^\circ$, rozdzielczość: 640 x 512 pikseli) na 80 m AGL nie pozwolił na jednoznaczne wykrywanie i oznaczanie mniejszych gatunków, takich jak sarna europejska oraz dzik euroazjatycki. Rozmiar GSD podczas lotów na wysokości 80 m AGL wynosił 7 cm;
2. Porównanie wyników inwentaryzacji przy użyciu kamery termowizyjnej zagregowanej z UAV z opinią myśliwych odpowiedzialnych za obręb Czarna Białostocka wskazuje na to, że istnieje duży potencjał w wykorzystaniu kamer termowizyjnych podczas szacowania liczebności zwierzyny grubej, a najbardziej optymalną porą roku do wykonywania takich badań jest jesień. Jesienią 2021 roku w przypadku łośa euroazjatyckiego szacowana liczebność tego gatunku w porównaniu do opinii myśliwych została zawyżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV stwierdzono, że na terenie obrębu Czarna Białostocka występuje 37 osobników (szacunek myśliwych ≈ 20 osobników). W przypadku jelenia szlachetnego liczba osobników również wydaje się trochę zawyżona. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczba ta wynosi 247 osobników (typ myśliwych ≈ 200 sztuk). Szacowaną liczebność sarny europejskiej na podstawie zdjęć termowizyjnych można uznać za wiarygodną. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczba ta wyniosła 198 osobników (szacunek myśliwych ≈ 200 osobników). Oszacowana liczebność dzika euroazjatyckiego również okazała się wiarygodna. Na podstawie inwentaryzacji z UAV liczebność tego gatunku wynosi 12 osobników. Zgodnie z opinią myśliwych liczbę tą można uznać za wiarygodną;
3. W przypadku inwentaryzacji zwierzyny z UAV występuje problem zdobycia obiektywnych danych referencyjnych, które pozwoliłyby na statystyczne uwiarygodnienie uzyskanych wyników. Wszystkie do tej pory wykorzystywane metody szacowania zwierzyny nie są doskonałe pod tym względem i ich wyniki nie mogą służyć

jako pewne dane referencyjne, które można wykorzystać do statystycznej analizy wiarygodności uzyskanych wyników (zarówno tzw. pędzenia próbne, jak i całoroczna obserwacja);

4. Na podstawie wyników pracy należy stwierdzić, że loty związane z inwentaryzacją zwierzyny nie powinny być wykonywane zimą. Związane jest to z tym, że zwierzyna wykazuje w tym czasie skupiskowy typ występowania, co prowadzi do zwiększonego ryzyka pojawienia się niewiarygodnych wyników. Zimą 2022 roku taka sytuacja miała miejsce w przypadku jelenia szlachetnego, którego liczebność oszacowana przy użyciu kamery termowizyjnej okazała się o 478% większa względem oficjalnych wyników sporządzonych według stanu na 10 marca 2022 roku (liczebność oszacowana na podstawie materiałów z kamery termowizyjnej – 705 sztuk, oficjalny szacunek sporządzony według stanu na 10 marca 2022 roku – 122 sztuki);
5. Loty związane z inwentaryzacją zwierzyny występującej na terenach leśnych nie powinny być prowadzone latem. Powodem jest występujące listowie, które tłumi rozpraszanie promieniowania cieplnego emitowanego przez zwierzynę. Wskazują na to wyniki prac przeprowadzonych latem 2022 roku. Liczebność jelenia szlachetnego oraz łosia europejskiego oszacowana przy zastosowaniu kamery termowizyjnej została zaniżona względem oficjalnych wyników (liczebność jelenia szlachetnego oszacowana na podstawie materiałów z kamery termowizyjnej – 14 sztuk, oficjalny szacunek według stanu na 10 marca 2022 roku – 122 sztuki; liczebność łosia europejskiego oszacowana na podstawie materiałów z kamery termowizyjnej – 0 sztuk, oficjalny szacunek według stanu na 10 marca 2022 roku – 10 sztuk). Nie można wykluczyć, że w przypadku drzewostanów iglastych rosnących na słabych siedliskach (bez warstwy podszytu lub podrostu) loty wykonywane latem miałyby podobną skuteczność do tych wykonywanych jesienią. Obręb Czarna białostocka charakteryzuje się dość żyznymi siedliskami, co skutkuje występowaniem bujnej roślinności w dolnych warstwach lasu;
6. W trakcie inwentaryzacji zwierzyny przy pomocy kamery termowizyjnej zagregowanej z UAV istnieje ryzyko pojawienia się błędu związanego z podwójnym liczeniem zwierzyny (dwukrotne lub wielokrotne policzenie tego samego osobnika) lub odwrotnie - uznanie dwóch osobników jako jeden. Aby ograniczyć ryzyko pojawiania się tego błędu należy rozważyć zwiększenie odstępu pomiędzy sąsiednimi transektami (np. do ≈ 120 metrów); W trakcie pracy takie rozwiązanie wprowadzono latem 2022 roku. Aby potwierdzić przedstawiony wniosek należałoby podobne prace zrealizować w innych sezonach;

7. W przyszłości kamery termowizyjne mogą służyć nie tylko do określania liczebności zwierząt występujących na terenach leśnych, ale również w pewnym stopniu mogą być użyteczne w ustalaniu płci osobników należących do niektórych gatunków. W czasie lotów zimowych w dwóch przypadkach możliwe było oznaczenie płci jelenia szlachetnego. Miało to miejsce 7 oraz 13 marca 2022 roku. W tych dniach zarejestrowano byki z wyraźnie widocznym porożem;
8. Loty związane z wykrywaniem zwierzyny przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej zdecydowanie nie powinny być wykonywane w trakcie słonecznych dni. Związane jest to z występowaniem w tym czasie efektu maskującego rozgrzanych koron. Jako przykład można podać lot wykonany w godzinach południowych dnia 10 października 2021 roku. Materiały pozyskane w tym czasie nie pozwoliły na wykrycie ani jednego osobnika zwierzyny grubej. Nie wykryto zwierząt zarówno na zdjęciach pochodzących z kamery termowizyjnej, jak i kamery RGB;
9. W trakcie wykrywania zwierzyny przy użyciu kamery termowizyjnej bardziej właściwym rozwiązaniem w stosunku do wykonywania zdjęć mogłoby okazać się nagrywanie filmu. Rozwiązanie to utrudniłoby identyfikację lokalizacji, w której znajdował się BSP w trakcie wykrycia danego zwierzęcia. Z drugiej jednak strony materiał filmowy mógłby ułatwić oznaczenie zarejestrowanych zwierząt do konkretnych gatunków. Materiał filmowy umożliwiłby analizę zarejestrowanych sygnatur cieplnych nie tylko na podstawie ich rozmiaru oraz kształtu, ale również na podstawie sposobu przemieszczania się nagranych zwierząt. Przykładem gatunku przemieszczającego się w charakterystyczny sposób jest łось, który porusza się ociężale w porównaniu do innych gatunków objętych badaniami w tej pracy;
10. W przypadku wykorzystania kamery termowizyjnej zagregowanej z MR do wykrywania zwierzyny w lesie, aby zniwelować stres u zwierzyny, jaki powoduje hałas oraz światło generowane przez MR podczas startu/lądowania należy lokalizację operatora zaplanować w pewnej odległości od inwentaryzowanej powierzchni. W trakcie pomiaru natężenia dźwięku, oddalenie mikrofonu o 200 metrów od miejsca startu sprawiło, że generowany hałas był znacznie mniej odczuwalny. Świadczy o tym m.in. wartość wariancji, która była zdecydowanie wyższa podczas pomiarów natężenia dźwięku bezpośrednio obok miejsca startu (wartości wariancji wyniosła: 95,02; 83,59; 78,24 oraz 81,03 dB²), w porównaniu do pomiarów wykonanych w odległości 200 m od miejsca startu UAV, gdzie wartości wariancji wynosiły jedynie 12,02; 11,31; 8,71 oraz 10,64 dB². Zmniejszenie zmienności poziomu hałasu docierającego do

inwentaryzowanej części dna lasu jest szczególnie istotne w przypadku inwentaryzacji gatunków, które nie wykazują znacznej wrażliwości na monotonny hałas nawet o dużym jego natężeniu, ale sygnał ucieczki wyzwała u nich dopiero wyraźna zmiana poziomu natężenia dźwięku. Dobrym przykładem jest dzik, który w przypadku żerowania w mieście jest niewrażliwy na jednostajny szum ruchu drogowego lub też inne źródła dźwięku (np. praca zakładów produkcyjnych). Natomiast sygnałem do ucieczki jest nagła zmiana natężenia dźwięku – wystrzał, klakson, krzyk;

11. Badania związane z emisją hałasu pokazały, że obniżenie wysokości lotu z 120 do 80 m AGL nie spowodowało istotnej zmiany poziomu natężenia dźwięku docierającego do mikrofonu. W trakcie pomiarów średnie natężenie dźwięku, gdy mikrofon znajdował się 200 metrów od miejsca startu wyniosło: a) 35.05 dB oraz 34.68 dB (wysokość lotu 80 metrów AGL); b) 35,79 dB oraz 35,06 dB (wysokość lotu 120 m AGL);
12. Hałas oraz światło emitowane przez MR potencjalnie może odstraszać zwierzynę z objętej inwentaryzacją powierzchni. Należy jednak zwrócić uwagę, że wiele dotychczasowych metod liczenia zwierzyny, np. pędzenia próbne, również nie są pod tym względem bez wad. Wspomniana metoda pędzeń próbnych na obszarze wytypowanym do badań w niniejszej pracy (obręb Czarna Białostocka – powierzchnia leśna 6 954 ha) wymaga zaangażowania 50 – 70 osób oraz kilku samochodów na okres 1-2 dni;
13. Ładowanie MR jest procedurą dłuższą niż start. W związku z tym, ze względu na możliwość spłoszenia zwierzyny jest to najbardziej niebezpieczny etap podczas inwentaryzacji. Dlatego w celu możliwie największego ograniczenia ryzyka spłoszenia zwierzyny należy szczególnie zadbać o komfortowe miejsce ładowania MR;
14. Podczas badań stanu zdrowotnego lasu zastosowanie teledetekcji niskiego pułapu jest bardzo użyteczne do odszukania miejsc, na które należy zwrócić szczególną uwagę podczas inwentaryzacji pieszej. Niemniej jednak do właściwej interpretacji wyników niezbędna jest znajomość terenu (wiedza o gatunkach znajdujących się na danej powierzchni, rozmieszczeniu kęp oraz innych powierzchni niestanowiących wydzielenia). W okresie kiedy, dokonano nalotu niezbędna była świadomość, że wśród drzew iglastych, które posiadają aparat asymilacyjny przez okres całego roku, znajdowały się również drzewa liściaste, które w tym czasie pozbawione były jeszcze listowia, co skutkowało tym, że np. na kompozycjach barwnych CIR mogły one wyglądać na martwe drzewa iglaste. Pewnym źródłem danych o składzie gatunkowym,

rozmieszczeniu powierzchni niestanowiących wydzielenia itp. jest Leśna Mapa Numeryczna;

15. Zobrazowania CIR oraz mapy indeksów wegetacyjnych mogą być wykorzystywane do wyszukiwania drzew porażonych jemiolą pospolitą. Może być to szczególnie pomocne w przypadku wyszukiwania sosen porażonych tym półpasożytem;
16. Wykorzystanie kompozycji barwnej CIR oraz map indeksów wegetacyjnych może być szczególnie przydatne podczas inwentaryzacji młodników. Młodniki są to często drzewostany, po których przemieszczanie się obserwatora pieszego jest bardzo utrudnione oraz, gdzie panuje niewielka widoczność. W związku z tym inwentaryzacja drzewostanu będącego w fazie młodnika jest niezwykle pracochłonna. Inwentaryzacja przy użyciu kompozycji barwnej CIR oraz map indeksów wegetacyjnych zdecydowanie ułatwią tą pracę. Jako przykład można podać młodnik w wydzieleniu 166-f-00 (Leśnictwo Buksztel) zainwentaryzowany 12 kwietnia 2022 roku, gdzie dzięki opracowaniom udało się w szybki sposób ustalić miejsca, gdzie drzewostan może być w gorszej kondycji zdrowotnej i konieczne może być tam przeprowadzenie zabiegu ochronnego;
17. Na podstawie przeprowadzonych testów łączności platformy można przyjąć, że w trakcie lotu na wysokości 80 m AGL w warunkach leśnych sprzęt wytypowany do badań związanych z inwentaryzacją zwierzyny może być użytkowany zapewniając stałe połączenie telemetryczne pomiędzy aparaturą a UAV do odległości poziomej około 1 200 – 1 300 metrów. Biorąc pod uwagę opracowane w niniejszej pracy zalecenia wykonywania lotów związanych z inwentaryzacją zwierzyny oraz obowiązujące przepisy takie osiągi można uznać jako w pełni zadawalające.

9. BIBLIOGRAFIA

- ¹Agisoft, <https://www.agisoft.com/> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).
- ²Albertz J., „Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft-und Satellitenbildern”, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, Germany, 2001, ISBN: 103534146247.
- ³Antena panelowa 4Hawks Raptor SR, <https://aeromind.pl/product-pol-1452-Antena-panelowa-4Hawks-Raptor-SR-dla-Typhoon-H.html> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).
- ⁴Arivazhagan S., Anbazhagan, S., „ASTER Data Analyses for Lithological Discrimination of Sittampundi Anorthositic Complex, Southern India”, *Geosciences Research*, Vol. 2, No. 3, August 2017, DOI:10.22606/gr.2017.23005.
- ⁵Arnott WP., Schmitt C., Liu Y. i in., „Droplet size spectra and water-vapor concentration of laboratory water clouds: inversion of Fourier transform infrared 500-5000 cm⁻¹ optical-depth measurement”, *Applied Optics*, Vol. 36, August 1997, DOI:10.1364/AO.36.005205.
- ⁶Bałazy R., Brach M., Bruchwald A. i in., „Geomatyka w Lasach Państwowych. Część II. Poradnik praktyczny”, CILP, Warszawa, 2013, ISBN 978-83-61633-81-5.
- ⁷Barnes EM., Clarke TR., Richards SE. i in., „Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data”, *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, Minnesota, USA, 2000.
- ⁸Bergenas J., Stohl R., Georgieff, A., „The other side of drones: Saving wildlife in Africa and managing global crime”, *Conflict Trends magazine*, Vol. 2013, pp. 3–9, 2013.
- ⁹Berni JA., Zarco-Tejada PJ., Suárez Barranco MD. i in., „Thermal and Narrow-Band Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, No. 3, pp. 722-738, March 2009, DOI:10.1109/TGRS.2008.2010457.
- ¹⁰Bondi E., Fei F., Hamilton M. i in., „SPOT Poachers in Action: Augmenting Conservation Drones With Automatic Detection in Near Real Time”, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 32, No. 1, 2018, DOI:10.1609/aaai.v32i1.11414.
- Borowski Z., Raport z tematu badawczego „Określenie optymalnych zagęszczeń jeleniowatych w kontekście czynników środowiskowych i celów gospodarki leśnej”, Instytut Badawczy Leśnictwa, Nr tematu 500430, Dostęp online: https://tbr.lasy.gov.pl/apex/f?p=102:3:::::P3_TEMAT:3922 (z dnia 01.10.2023 r.):
- ¹¹Sprawozdanie częściowe za 2015 rok, 2016,
- ¹²Sprawozdanie częściowe z II etapu, 2016,
- ¹³Sprawozdanie częściowe z III etapu, 2016,
- ¹⁴Sprawozdanie częściowe z IV etapu, 2017,
- ¹⁵Sprawozdanie częściowe z V etapu, 2017,
- ¹⁶Sprawozdanie częściowe z VI etapu, 2017,
- ¹⁷Sprawozdanie częściowe z VII etapu, 2018,
- ¹⁸Sprawozdanie częściowe z VIII etapu, 2018,
- ¹⁹Sprawozdanie częściowe z IX etapu, 2019,
- ²⁰Sprawozdanie końcowe z tematu, 2020.
- ²¹Brach M., Cheung-Wai JC., Szymański, P., „Accuracy assessment of different photogrammetric software for processing data from low-cost UAV platforms in forest conditions”, *iForest Biogeosciences and Forestry*, Vol. 12, No. 5, pp. 435-441, 2019, DOI:10.3832/for2986-012.
- ²²Brack IV., Kindel A., Oliveira LFB., „Detection errors in wildlife abundance estimates from Unmanned Aerial Systems (UAS) surveys: Synthesis, solutions, and challenges”, *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 9, pp. 1864 – 1873, May 2018, DOI:10.1111/2041-210X.13026.

²³Brunton EA., Leon JX., Burnett SE., „Evaluating the Efficacy and Optimal Deployment of Thermal Infrared and True-Colour Imaging When Using Drones for Monitoring Kangaroos”, *Drones*, Vol. 4, No. 2, 2020, DOI:10.3390/drones4020020.

²⁴Burke C., Rashman M., Wich S. i in., „Optimizing observing strategies for monitoring animals using drone-mounted thermal infrared cameras”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 40, No. 2, pp. 439-467, 2019, DOI: 10.1080/01431161.2018.1558372.

²⁵Burn DM., Udevitz MS., Speckman SG. i in., „A improved procedure for detection and enumeration of walrus signatures in airborne thermal imagery”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 11, No. 5, pp. 324-333, October 2009, DOI:10.1016/j.jag.2009.05.004.

²⁶Bushaw JD., Ringelman KM., Rohwer F., „Applications of Unmanned Aerial Vehicles to Survey Mesocarnivores”, *Drones*, Vol. 3, No. 1, 2019, DOI:10.3390/drones3010028.

²⁷Chabot D., Bird DM., „Evaluation of an off-the-shelf unmanned aircraft system for surveying flocks of geese”, *Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology*, Vol. 35, No.1, pp. 170–174, March 2012, DOI:10.1675/063.035.0119.

²⁸Chabot D., Bird DM., „Wildlife research and management methods in the 21st century: Where do unmanned aircraft fit in?”, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, Vol. 3, No. 4, 2015, DOI:10.1139/juvs-2015-0021.

²⁹Chretien LP., Theau J., Menard P., „Wildlife multispecies remote sensing using visible and thermal infrared imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV)”, *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-1/W4, 2015, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-241-2015.

³⁰Christiansen P., Steen KA., Jorgensen RN. i in., „Automated Detection and Recognition of Wildlife Using Thermal Cameras”, *Sensors*, Vol. 14, No. 8, pp. 13778-13793, 2014, DOI:10.3390/s140813778.

³¹Cilulko J., Janiszewski P., Bogdaszewski M. i in., „Infrared thermal imaging in studies of wild animals”, *European Journal of Wildlife Research*, Vol. 59, pp. 17-23, 2012, DOI:10.1007/s10344-012-0688-1.

³²Dahlen B., Traeholt C., „Successful aerial survey using thermal camera to detect wild orangutans in a fragmented landscape”, *Journal of Indonesian Natural*, Vol. 6, No. 2, pp. 12-23, 2018.

³³Datt B., „A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using Eucalyptus Leaves”, *Journal of Plant Physiology*, Vol. 154, No.1, pp. 30–36, 1999, DOI:10.1016/S0176-1617(99)80314-9.

³⁴Dewey, T. & J. Hruby: *Sus scrofa* (ang.). (On-line), *Animal Diversity Web*, 2002., https://animaldiversity.org/site/accounts/information/Sus_scrofa.html (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

³⁵Di Franco C., Buttazzo G., „Coverage Path Planning for UAVs Photogrammetry with Energy and Resolution Constraints”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 83, September 2016, DOI:10.1007/s10846-016-0348-x.

³⁶Ding M., Zhang Y., Liu L. i in., „The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau”, *Journal of Geographical Sciences*, Vol. 17, No. 3, pp. 259-268, 2007, DOI:10.1007/s11442-007-0259-7.

³⁷Ditmer MA., Vincent JB., Werden LK. i in., „Bears Show a Physiological but Limited Behavioral Response to Unmanned Aerial Vehicles”, *Current Biology*, Vol. 25, No. 17, pp. 2278-2283, 2015, DOI:10.1016/j.cub.2015.07.024.

³⁸Drever MC., Chabot D., O'Hara PD. i in., „Evaluation of an unmanned rotorcraft to monitor wintering waterbirds and coastal habitats in British Columbia, Canada”, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 256-267, 2015, DOI:10.1139/juvs-2015-0019

³⁹Dwyer JF., Austin DD., Beebe CK., „Unmanned aircraft systems enable three-dimensional viewshed-based assessment of potential disturbance to nesting raptors by recreational rock climbing”, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, Vol. 8, October 2019, DOI:10.1139/juvs-2019-0014.

⁴⁰Dziennik myśliwych – Łowiecki, <http://www.lowiecki.pl/index.php> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

⁴¹eCALC, <https://www.ecalc.ch/index.htm> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

⁴²Else RM., Trosclair PL., „The use of an unmanned aerial vehicle to locate alligator nests”, *Southeastern Naturalist*, Vol. 15, No. 1, pp. 76-82, 2016, DOI:10.1656/058.015.010.

⁴³Encyklopedia Popularna PWN, Wydanie dwudzieste pierwsze zmienione i uzupełnione, Wydawnictwo naukowe PWN Spółka z o.o., Warszawa, 1991, ISBN 83-01-10416-3.

⁴⁴ENDVI, <https://www.maxmax.com/maincamerapage/remote-sensing/enhanced-normalized-difference-vegetation-index> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

⁴⁵Espinoza CZ., Khot LR., Sankaran S., „High Resolution Multispectral and Thermal Remote Sensing-Based Water Stress Assessment in Subsurface Irrigated Grapevines”, *Remote Sensing*, Vol. 9, No. 9, 2017, DOI:10.3390/rs9090961.

⁴⁶Foresman KR., Pearson DE., „Comparison of proposed survey procedures for detection of forest carnivores”, *Journal of Wildlife Management*, Vol. 62, No.4, pp. 1217–1226, 1998, DOI: 10.2307/3801985.

⁴⁷Frąckowiak R., Goraj Z., „Animal detection using thermal imaging and a UAV”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol.95, 2023, DOI: 10.1108/AEAT-10-2022-0271.

⁴⁸Gago J., Fernie AR., Nikoloski Z. i in., „Integrative field scale phenotyping for investigating metabolic components of water stress within a vineyard”, *Plant Methods*, Vol. 13, 2017, DOI:10.1186/s13007-017-0241-z.

⁴⁹Gawin PL., Durbas-Nowak D., „Atlas myśliwski”, Wydawnictwo SBM Sp. z o.o., Warszawa, 2015, ISBN: 978-83-7845-893-7.

⁵⁰Gitelson AA., Kaufman YJ., Merzlyak MN., „Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS”, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58, No. 3, pp. 289–298, 1996, DOI:10.1016/S0034-4257(96)00072-7.

⁵¹Gompper ME., Kays RW., Ray JC. i in., „A comparison of noninvasive techniques to survey carnivore communities in northeastern North America”, *Wildlife Society Bulletin*, Vol. 34, No. 4, pp. 1142-1151, 2010, DOI: 10.2193/0091-7648(2006)34[1142:ACONTT]2.0.CO;2.

⁵²Gonzalez LF., Montes GA., Puig E. i in., „Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Artificial Intelligence Revolutionizing Wildlife Monitoring and Conservation”, *Sensors*, Vol. 16, 2016, DOI: 10.3390/s16010097.

⁵³Gooday OJ., Key N., Goldstien S. i in., „An assessment of thermal-image acquisition with an unmanned aerial vehicle (UAV) for direct counts of coastal marine mammals ashore”, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 100-108, 2018, DOI:10.1139/juvs-2016-0029.

⁵⁴Goraj Z., „A specialized UAV for surveillance in windy, turbulent environment of the Antarctic coast”, *Proceedings of 29th Congress of international council of the aeronautics sciences*, St. Petersburg, 2014.

⁵⁵Goraj Z., „Dynamika i Aerodynamika Samolotów Manewrowych z Elementami Obliczeń”, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2001, ISBN: 83-910906-2-0.

⁵⁶Gordon IE., Rothman LS., Gamache RR. i in., „Current updates of the water-vapor line list in HITRAN: A new Diet for air-broadened half-widths”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol. 108, No. 38, pp. 389-402, 2007, DOI:10.1016/j.jqsrt.2007.06.009.

⁵⁷Gudmundsson S., „General aviation aircraft design: applied methods and procedures”, Elsevier Science, Amsterdam, 2014, ISBN: 9780123973290.

⁵⁸Hamel S., Killengreen ST., Henden JA. i in., „Towards good practice guidance in using camera-traps in ecology: Influence of sampling design on validity of ecological inferences”, *Methods Ecology and Evolution*, Vol. 4, No. 2, pp. 105-113, 2013, DOI: 10.1111/j.2041-210x.2012.00262.x.

⁵⁹Havens KJ., Sharp EJ., „Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild: A Methodology”, Academic Press, Amsterdam, 2015, ISBN: 9780128033845.

⁶⁰Hofmann H., „Ssaki”, Wydawnictwo MUZA SA., Warszawa, 1994, ISBN: 83-7079-285-5.

⁶¹Howell JR., Siegel R., Mengü MR., „Thermal radiation heat transfer”, Taylor & Francis Group, New York, 2002.

⁶²Instrukcja przetwarzania danych pozyskanych DJI Phantom 4 Multispectral, <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000159853-dji-phantom-4-multispectral-data-processing> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

⁶³Israel M., „A UAV-based Roe Deer Fawn Detection System”, *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38, pp. 51-55, 2011, DOI:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-51-2011.

⁶⁴Israel M., Reinhard A., „Detecting nests of lapwing birds with the aid of a small unmanned aerial vehicle with thermal camera”, *Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 2017, DOI: 10.1109/ICUAS.2017.7991393.

⁶⁵Jacobson RE., Axford N. i in., „Manual of Photography: Photographic and Digital Imaging, 9th ed, Butterworth-Heinemann, USA, New York, 2001, ISBN 978-0-240-51574-8.

⁶⁶Jarczyk T., Cieślik M., Onoszko K. i in., „Podręcznik wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych oraz analizy pozyskanego materiału fotograficznego w Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Olsztynie”, RDLP Olsztyn, 2019.

⁶⁷Jordan MJ., Barrett RH., Purcell KL., „Camera trapping estimates of density and survival of fishers *Martes Pennanti*”, *Wildlife Biology*, Vol. 17, No. 3, pp. 266–276, 2011, DOI: 10.2981/09-091.

⁶⁸Junda JH., Greene E., Zazelenchuk D. i in., „Nest defense behaviour of four raptor species (osprey, bald eagle, ferruginous hawk, and red-tailed hawk) to a novel aerial intruder — A small rotary-winged drone”, *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 217-227., 2016, DOI:10.1139/juvs-2016-0004.

⁶⁹Komosińska H., Podsiadło E., „Ssaki kopytne”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002, ISBN 83-01-13806-8.

⁷⁰Korczak-Abshire M., Kidawa A., Zmarz A. i in., „Preliminary study on nesting Adélie penguins disturbance by Unmanned Aerial Vehicles”, *CCAMLR science journal of the Scientific Committee and the Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources*, Vol. 23, 2016.

⁷¹Kownacki C., Ambroziak L., Ciężkowski M. i in., „Precision Landing Tests of Tethered Multicopter and VTOL UAV on Moving Landing Pad on a Lake”, *Sensors*, Vol. 23, No. 4, 2023, DOI: 10.3390/s23042016.

⁷²Kumar P., Rani M., Pandey PC. i in., „Monitoring of deforestation and forest degradation using remote sensing and GIS: A case study of Ranchi in Jharkhand (India)”, *Science Journal, Report and Opinion*, Vol. 2, pp. 14-20, 2010.

⁷³Laliberte AS., Ripple WJ., „Range contractions of North American carnivores and ungulates”, *BioScience*, Vol. 54, No. 2, pp. 123-138, 2004, DOI:10.1641/0006-3568(2004)054[0123:RCONAC]2.0.CO;2.

⁷⁴Lhoest S., Linchant J., Quevauvillers S. i in., „How many hippos (HOMHIP): algorithm for automatic counts of animals with infra-red thermal imagery from UAV”, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-3/W3, 2015, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-355-2015.

⁷⁵Longmore SN., Collins RP., Pfeifer S. i in., „Adapting astronomical source detection software to help detect animals in thermal images obtained by unmanned aerial systems”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 38, No. 8-10, pp. 2623-2638, 2017, DOI:10.1080/01431161.2017.1280639.

⁷⁶Long RA., Donovan TM., Mackay P. i in., „Comparing scat detection dogs, cameras, and hair snares for surveying carnivores”, *The Journal of Wildlife Management*, Vol. 71, No. 6, pp. 2018-2025, 2007, DOI: 10.2193/2006-292.

⁷⁷Maimaitijiang M., Ghulam A., Sidike P. i in., „Unmanned Aerial System (UAS)-based phenotyping of soybean using multi-sensor data fusion and extreme learning machine”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 134, pp. 43–58, 2017, DOI:10.1016/j.isprsjprs.2017.10.011.

⁷⁸McCafferty DJ., Gallon S., Nord A., „Challenges of measuring body temperatures of free-ranging birds and mammals”, *Animal Biotelemetry*, Vol. 3, 2015, DOI:10.1186/s40317-015-0075-2.

⁷⁹McEvoy JF., Hall GP., McDonald PG., „Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowl surveys: Disturbance effects and species recognition”, *PeerJ*, Vol. 4, 2016, DOI:10.7717/peerj.1831.

⁸⁰Meng J., Luo G., Gao F., „Lithium polymer battery state-of-charge estimation based on adaptive unscented Kalman filter and support vector machine”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, 2015, DOI:10.1109/TPEL.2015.2439578.

⁸¹Mikhailenko SN., Babikov YuL., Golovko VF., „Information-calculating system Spectroscopy of Atmospheric Gases. The structure and main functions”, *Atmospheric and oceanic optics*, Vol. 18, No.9, pp. 685-695, 2005.

⁸²Minnesota Geospatial Information Office. (2011). Color-Infrared (CIR) Imagery. <https://www.mngeo.state.mn.us/chouse/airphoto/cir.html> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

⁸³Mkhabela MS., Bullock PR., Raj S. i in., „Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data”, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 151, pp. 385-393, 2011, DOI:10.1016/j.agrformet.2010.11.012.

⁸⁴Mullero-Pázmány M., Barasona JÁ., Acevedo P. i in., „Unmanned Aircraft Systems complement biologging in spatial ecology studies”, *Ecology and Evolution*, Vol. 5, No. 21, pp. 4808-4818, 2015, DOI: 10.1002/ece3.1744.

⁸⁵Mullero-Pázmány M., Stolper R., Van Essen LD. i in., „Remotely Piloted Aircraft Systems as a Rhinoceros Anti-Poaching Tool in Africa”, *PloS one*, Vol. 9, No. 1, 2014, DOI:10.1371/journal.pone.0083873.

⁸⁶Narzędzie do szacowania optymalnej wysokości lotu BSP, https://www.astro.ljmu.ac.uk/~aricburk/uav_calc/ (dostęp z dnia 10.01.2023 r.).

⁸⁷O'Connell AF., Talancy NW., Bailey LL. i in., „Estimating site occupancy and detection probability parameters for meso- and large mammals in a coastal ecosystem”, *Journal of Wildlife Management*, Vol. 70, No. 6, pp. 1625-1633, 2006, DOI:10.2193/0022-541X(2006)70[1625:ESOADP]2.0.CO;2.

⁸⁸Okarma H., Raport z tematu badawczego „Wykorzystanie teledetekcji do ustalania liczebności zwierzyny grubej w wybranych kompleksach leśnych”, Instytut Ochrony Przyrody PAN w Krakowie, Nr tematu 1/14, Sprawozdanie z I etapu, 2014, Dostęp online: https://tbr.lasy.gov.pl/apex/f?p=102:3:::P3_TEMAT:3622 (z dnia 01.10.2023 r.).

⁸⁹Okarma H., Tomek A., „Łowiectwo”, Wydawnictwo Edukacyjno-Naukowe H2O, Kraków, 2008, ISBN: 978-83-927737-0-2.

⁹⁰Oprogramowanie PX4, <https://review.px4.io/> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

⁹¹Pagacz S., Witczuk, J., „Wykorzystanie samolotów bezzałogowych i termowizji do nocnej inwentaryzacji kopytnych”, *Studia i materiały CEPL w Rogowie*, Vol. 18., No. 4[49A], 2016.

⁹²Pan ZF., An L., Wen CY., „Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles”, *Applied Energy*, Vol. 240, pp. 473-485, 2019, DOI:10.1016/j.apenergy.2019.02.079.

⁹³Park S., Ryu D., Fuentes S. i in., „Adaptive Estimation of Crop Water Stress in Nectarine and Peach Orchards Using High-Resolution Imagery from an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)”, *Remote Sensing*, Vol. 9, No. 8, 2017, DOI:10.3390/rs9080828.

⁹⁴Paryska Z., Paryski W., „Wielka encyklopedia tatrzańska”, Fragment dostępny online: <https://z-ne.pl/t,haslo,1054,dzik.html> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

⁹⁵Penagiotou P., Fotiadis-Karras S., Yakinshos K., „Conceptual design of blended wing body MALE UAV”, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 73, pp. 32-47, 2018, DOI: 10.1016/j.ast.2017.11.032.

⁹⁶Pettorelli N., „The normalized difference vegetation index”, Wydawnictwo Oxford University Press, Oxford, 2013, ISBN: 9780191810145 0191810142.

⁹⁷PLAN URZĄDZENIA LASU NADLEŚNICTWA CZARNA BIAŁOSTOCKA NA OKRES 01.01.2016 – 31.12.2025, Tom I; Wykonawca: Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej Oddział w Białymstoku ul. Lipowa 51, 15-424 Białystok, Wykonano na zlecenie: Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Białymstoku, 2015.

⁹⁸Popek Ł., Perz R., Galiński G., „Comparison of Different Methods of Animal Detection and Recognition on Thermal Camera Images”, *Electronics*, Vol. 12, No. 2, pp. 1-9, 2023, DOI: 10.3390/electronics12020270.

Popis B., Raport z tematu badawczego „Weryfikacja innowacyjnej metody inwentaryzacji zwierzyny grubej z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych (BSP) oraz narzędzi teledetekcyjnych, w powiązaniu z szacowaniem szkód łowieckich w wielkoobszarowych uprawach rolnych”, Taxus SI Sp. z o.o.- lider konsorcjum, Muzeum i Instytut Zoologii Polskiej Akademii Nauk, Uniwersytet Warszawski, Nr tematu 11/17, Dostęp online: https://tbr.lasy.gov.pl/apex/f?p=102:3:::P3_TEMAT:4231 (z dnia 01.10.2023 r.):

⁹⁹Sprawozdanie z etapu 1, 2018,

¹⁰⁰Sprawozdanie z etapu 2, 2018,

¹⁰¹Sprawozdanie z etapu 3, 2018,

¹⁰²Sprawozdanie z etapu 4, 2019,

¹⁰³Sprawozdanie z etapu 5, 2020,

¹⁰⁴Sprawozdanie z etapu 6, 2020.

¹⁰⁵Porównanie przez producenta serii multirotorów H520, <https://us.yuneec.com/h520-series/info/> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

¹⁰⁶P4 Multispectral, <https://www.dji.com/pl/p4-multispectral> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

¹⁰⁷QGIS, <https://qgis.org/pl/site/index.html> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

¹⁰⁸Rajpert, T., „Hałas lotniczy i sposoby jego zwalczania”, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, pp. 348, 1980, ISBN: 83-206-0088-X.

¹⁰⁹Reichholf J., „Ssaki”, Wydawnictwo GeoCenter International, Warszawa, 1983, ISBN: 83-86146-48-6.

¹¹⁰Rocznik Statystyczny Leśnictwa 2022, <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-statystyczny-lesnictwa-2022,13,5.html> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

¹¹¹Rodzewicz M., Głowacki D., Hajduk J., „Some Dynamic Aspects of Photogrammetry Missions Performed by "pW-ZOOM"-The UAV of Warsaw University of Technology”, *Archive of Mechanical Engineering*, Vol. 64, No. 1, 2017, DOI:10.1515/meceng-2017-0003.

¹¹²Rodzewicz M., Goraj Z., Tomaszewski A., „Design and testing of three tailless unmanned aerial vehicle configurations built for surveillance in Antarctic environment”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 232, No. 14, pp. 2598-2614, 2018, DOI:10.1177/0954410018797855.

- ¹¹³Rouse J., Haas RH., Schell JA. i in., „Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS”, NASA special publication, Vol. 1, Section A, pp. 309-317, 1974.
- ¹¹⁴Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0945> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).
- ¹¹⁵Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2020/1058, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX%3A32020R1058> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).
- ¹¹⁶Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/947, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX:32019R0947> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).
- ¹¹⁷Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2020/639, https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2020/639/oj/pol (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).
- ¹¹⁸Sagan V., Maimaitiyiming M., Fishman J., „Effects of Ambient Ozone on Soybean Biophysical Variables and Mineral Nutrient Accumulation”, *Remote Sensing*, Vol. 10, No. 4, 2018, DOI:10.3390/rs10040562.
- ¹¹⁹Sagan V., Maimaitijiang M., Sidike P. i in., „UAV-Based High Resolution Thermal Imaging for Vegetation Monitoring, and Plant Phenotyping Using ICI 8640 P, FLIR Vue Pro R 640, and thermoMap Cameras”, *Remote Sensing*, Vol. 11, No. 3, 2019, DOI:10.3390/rs11030330.
- ¹²⁰Sardà-Palomera F., Bota G., Vinolo C. i in., „Fine-scale bird monitoring from light unmanned aircraft systems”, *Ibis*, Vol. 154, pp. 177-183, 2012, DOI:10.1111/j.1474-919X.2011.01177.x.
- ¹²¹Serafiński, W., „Ssaki Polski”, Wydawnictwo Państwowe Zakłady Wydawnictw Szkolnych, Warszawa, 1972.
- ¹²²Seymour AC., Dale J., Hammill M. i in., „Automated detection and enumeration of marine wildlife using unmanned aircraft systems (UAS) and thermal imagery”, *Scientist Reports*, Vol. 7, 2017, DOI:10.1038/srep45127.
- ¹²³Słownik Języka Polskiego, Wydawnictwo naukowe PWN, tom drugi, Warszawa, 1988, ISBN 83-01-00283-2.
- ¹²⁴Specyfikacja kamery E20Tvx, https://www.yuneec.org/Yuneec-E20Tvx-Radiometric-640x512-Thermal-Camera-YUNE20TVX33US_p_1022.html (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).
- ¹²⁵Sruthi S., Aslam MM., „Agricultural drought analysis using the NDVI and land surface temperature data; a case study of Raichur district”, *Aquatic Procedia*, Vol. 4, pp. 1258-1264, 2015, DOI:10.1016/j.aqpro.2015.02.164.
- ¹²⁶Stacja Badawcza Rolnictwa Ekologicznego i Hodowli Zachowawczej Zwierząt PAN w Popielnie (pol.). <http://popielno.pl/jelenie/> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).
- ¹²⁷Stinton D., „The design of the aeroplane”, Oxford BSP Professional Books, London, 1983.
- ¹²⁸Strona internetowa Nadleśnictwa Czarna Białostocka, www.czarna-bialostocka.bialystok.lasy.gov.pl (dostęp z dnia 01.10.2023).
- ¹²⁹Strona internetowa producenta kamer FLIR, <https://www.flir.com> (dostęp z dnia 01.10.2023).
- ¹³⁰Strong C., Burnside NG., Llewellyn D., „The potential of small-Unmanned Aircraft Systems for the rapid detection of threatened unimproved grassland communities using an Enhanced Normalized Difference Vegetation Index”, *PLOS ONE*, Vol. 12, 2017, DOI:10.1371/journal.pone.0186193.
- ¹³¹Szczepanek R., „Systemy informacji przestrzennej z QGIS”, Wydawnictwo PK, Kraków, 2017, ISBN 978-83-7242-948-3.
- ¹³²The Integrated Taxonomic Information System (ITIS), <https://itis.gov/> (dostęp z dnia 28.03.2021 r.).

¹³³Townsend A., Jiya IN., Martinson C. i in., „A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements”, *Heliyon*, Vol. 6, No. 11, November 2020, DOI:10.1016/j.heliyon.2020.e05285.

¹³⁴Urban J., Ingwers M., McGuire MA. i in., „Stomatal conductance increases with rising temperature”, *Plant Signaling & Behavior*, Vol. 12, 2017, DOI:10.1080/15592324.2017.1356534.

¹³⁵Urban J., Ingwers MW., McGuire MA., „Increase in leaf temperature opens stomata and decouples net photosynthesis from stomatal conductance in *Pinus taeda* and *Populus deltoides* x *nigra*”, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 68, pp. 1757–1767, 2017, DOI: 10.1093/jxb/erx052.

¹³⁶Urząd Lotnictwa Cywilnego, Oświadczenie o operacji zgodnej ze scenariuszem standardowym (N)STS, <https://www.ulc.gov.pl/pl/drony/kategoria-szczegolna/5300-oswiadczenie-o-operacji-zgodnej-ze-scenariuszem-standardowym-nsts> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

¹³⁷Vicente-Serrano SM., Cuadrat-Prats JM., Romo A., „Early prediction of crop production using drought indices at different time-scales and remote sensing data: application in the Ebro Valley (north-east Spain)”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 3, pp. 511–518, 2006, DOI:10.1080/01431160500296032.

¹³⁸Wich SA., Pin Koh L., „Conservation drones: Mapping and monitoring biodiversity”, Oxford University Press, Oxford, UK, 2018, Online ISBN: 9780191829727.

¹³⁹Witczuk J., Pagacz S., „Evaluating Alternative Flight Plans in Thermal Drone Wildlife Surveys—Simulation Study”, *Remote Sensing*, Vol. 13, 2021, DOI:10.3390/rs13061102.

¹⁴⁰Witczuk J., Pagacz S., Zmarz A. i in., „Exploring the feasibility of unmanned aerial vehicles and thermal imaging for ungulate surveys in forests - preliminary results”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 39, pp. 5504–5521, 2018, DOI:10.1080/01431161.2017.1390621.

¹⁴¹WYTYCZNE NR 19 PREZESA URZĘDU LOTNICTWA CYWILNEGO z dnia 29 grudnia 2020 r. w sprawie Krajowego Scenariusza Standardowego NSTS-05 dla operacji poza zasięgiem widoczności wzrokowej (BVLOS) z użyciem bezzałogowych statków powietrznych o masie startowej mniejszej niż 4 kg, w odległości nie większej niż 2 km od pilota bezzałogowego statku powietrznego.

¹⁴²xcopterCalc, <https://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

¹⁴³xcopterCalc, pomoc, <https://www.ecalc.ch/calcinclue/help/xcoptercalchelp.htm> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

¹⁴⁴Xiao M., Liang J., Ji, L. i in., „Aerial photography trajectory-tracking controller design for quadrotor UAV”, *Measurement and Control*, Vol. 55, No. 7-8, pp.738-745, 2022, DOI:10.1177/00202940221115634.

¹⁴⁵Yuneec H520E, <https://us.yuneec.com/h520-series/> (dostęp z dnia 01.10.2023 r.).

10. AKRONIMY

AGISOFT	Firma zajmująca się technikami przetwarzania obrazu, dostarczająca oprogramowanie dezinformacyjne itp.
AFCS	Automatic Flight Control System
AOV	Angle of view
AGL	Above ground level
B	Blue
BLDC	Brushless Direct Current
Brz	Brzoza brodawkowata
BSP	Bezzałogowy Statek Powietrzny, używany zamiennie z UAV lub rzeczownikiem dron
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
CE	Europa
CIR	Color InfraRed
DAOV	Diagonal Angle Of View
Db	Dąb
Dbc	Dąb czerwony
DEM	Digital Elevation Model
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ENDVI	Enhanced Normalized Difference Vegetation Index
FCC	Stany Zjednoczone
FOV	Field Of View
G	Green
GCS	Ground Control Station
Gb	Grab zwyczajny
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GNU GPL	The GNU General Public License
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground sample distance
GUS	Główny Urząd Statystyczny
HAOV	Horizontal Angle Of View
ITIS	Integrated Taxonomic Information System
Js	Jesion wyniosły
KCC	Korea
Kl	Klon zwyczajny
KML	Keyhole Markup Language
LAI	Leaf Area Index
LCI	Leaf chlorophyll index
LEX	Leading Edge Extension
LiOn	Lithium-ion
LiPo	Lithium polymer
LMN	Leśna Mapa Numeryczna

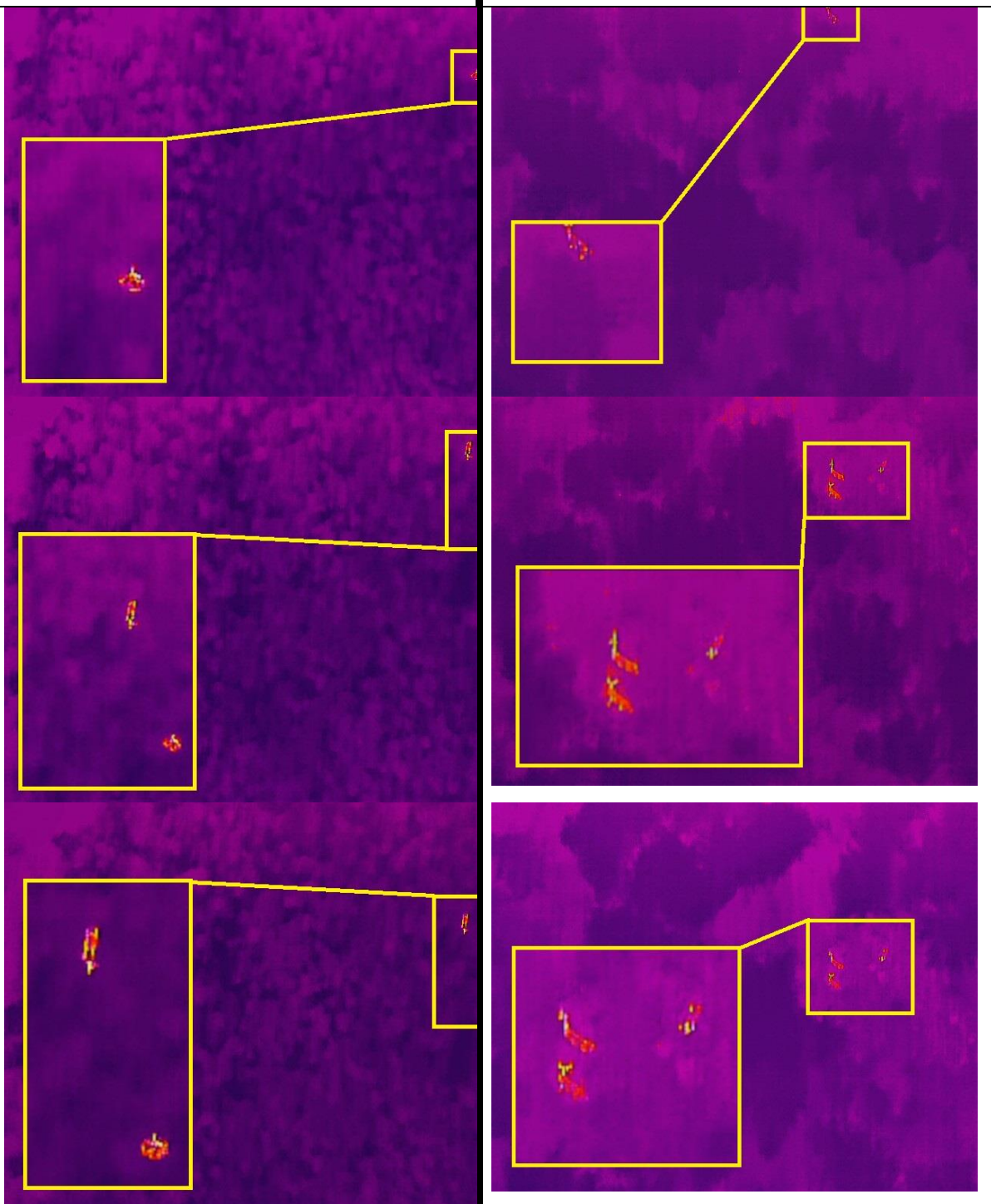
Lp	Lipa drobnolistna
lx, ly	oznaczenie rozdzielczości wyrażanej w pikselach
Md	Modrzew europejski
MIC	Japonia
mk	milikelwin
MR	Multirotor
NDRE	Normalized difference red edge index
NDVI	Normalized difference vegetation index
NIR	Near-infrared
NSTS	National Standard Scenario
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
Ol	Olsza
Os	Topola osika
PNSW	powierzchnie nie stanowiące wyłączeń
QGIS	nazwa oprogramowania geoinformacyjnego (dawniej: Quantum GIS)
R	Red
RDLP	Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych
RE	Red edge
RGB	model przestrzeni barw (Red, Green, Blue)
RTL	Return To Launch
So	Sosna zwyczajna
SRRC	Chiny
STS	Standard Scenario
Św	Świerk pospolity
TIR	Thermal infrared
T _{obs}	Temperatura zarejestrowana
Tp	Topole (oprócz Topoli osiki)
TSL	Typ siedliskowy lasu
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, używany wymiennie z BSP lub rzeczownikiem dron
UAS	Unmanned Aircraft System
UE	Unia Europejska
UTC	Universal Time Coordinated
Wz	Wiąz
VAOV	Vertical Angle Of View
VLOS	Visual Line of Sight
x, y	wielkości boków rzutowanej powierzchni
μm	Mikrometr

11. Załączniki

Załącznik nr 1. Sygnatury termalne jeleni szlachetnych

2 jelenie zarejestrowane podczas lotu z prędkością 6 m/s dnia 15 października

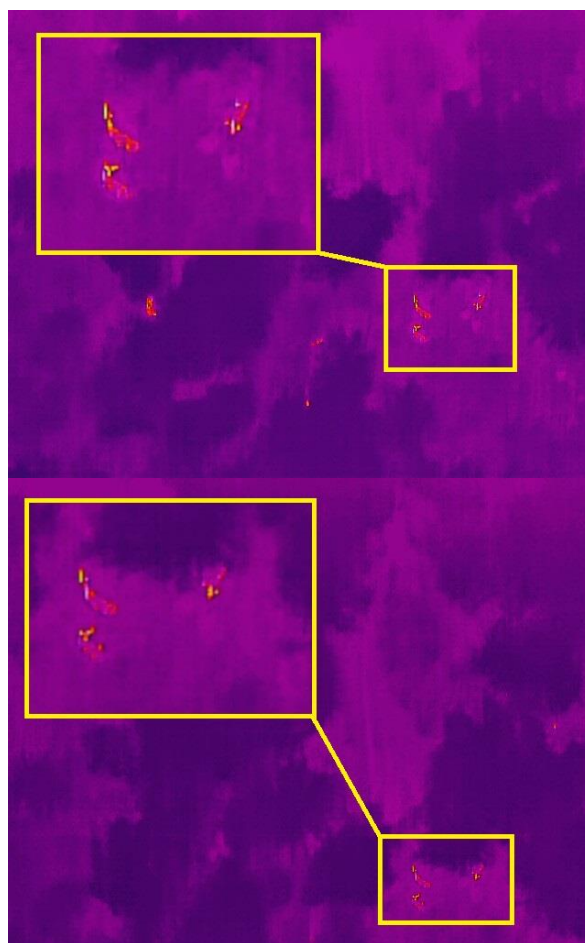
6 jeleni zarejestrowanych podczas lotu z prędkością 10 m/s z dnia 17 listopada 2021 roku



cd. 2 jelenie zarejestrowane podczas lotu
z prędkością 6 m/s dnia 15 października



cd. 6 jeleni zarejestrowanych podczas
lotu z prędkością 10 m/s z dnia 17 listopada
2021 roku

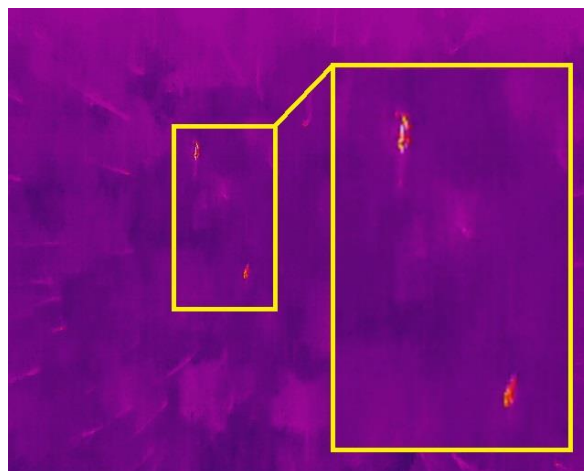


Załącznik nr 2. Sygnatury termalne jeleni szlachetnych zarejestrowane, gdy znajdowały się pod okapem drzewostanu

Jeleń szlachetny zarejestrowany podczas lotu z prędkością 6 m/s dnia 28 października



Jelenie zarejestrowane podczas lotu z prędkością 10 m/s dnia 16 października



cd. jelen szlachetny zarejestrowany
podczas lotu z prędkością 6 m/s dnia 28
października

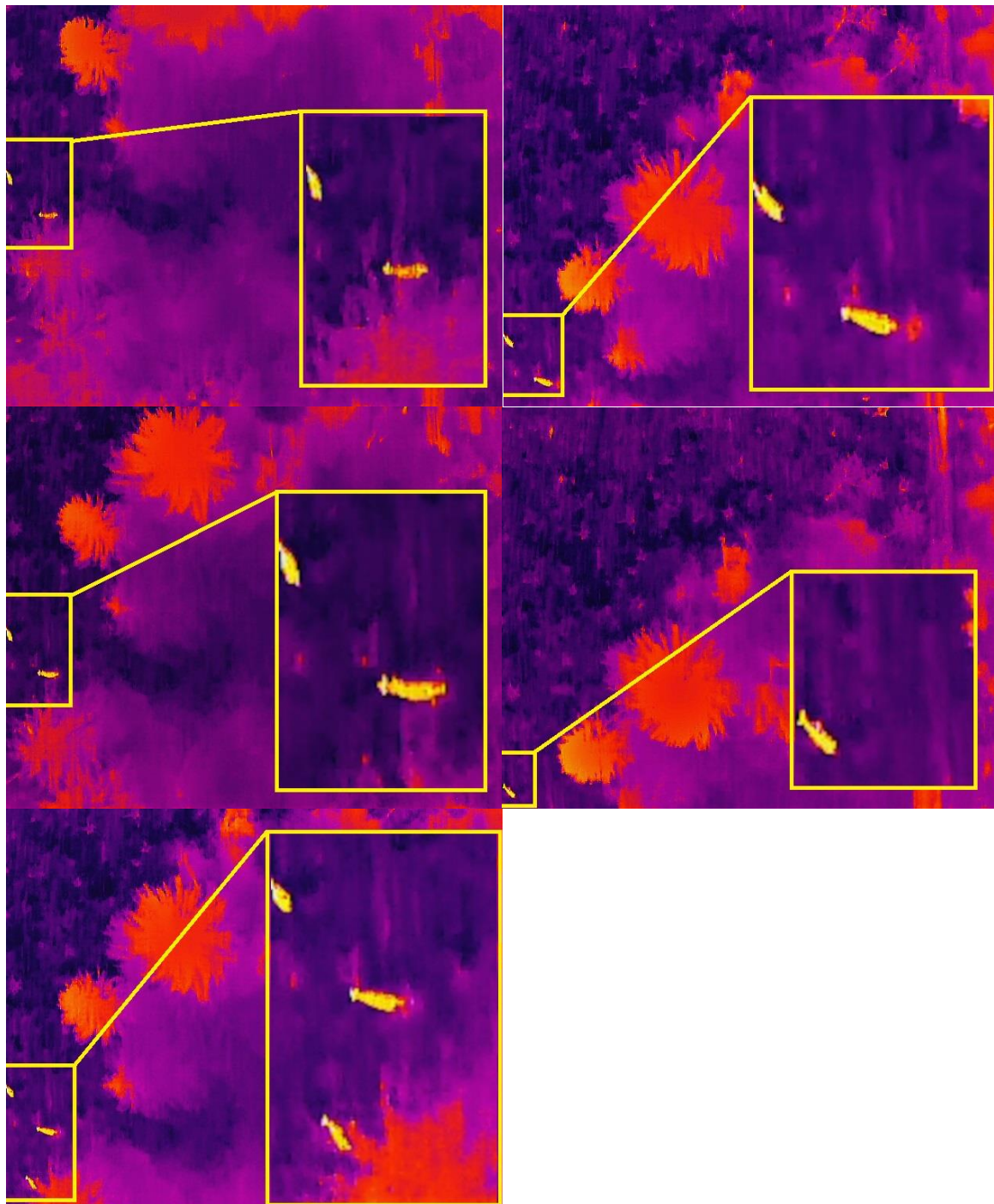


cd. jelenie zarejestrowane podczas lotu
z prędkością 10 m/s dnia 16 października



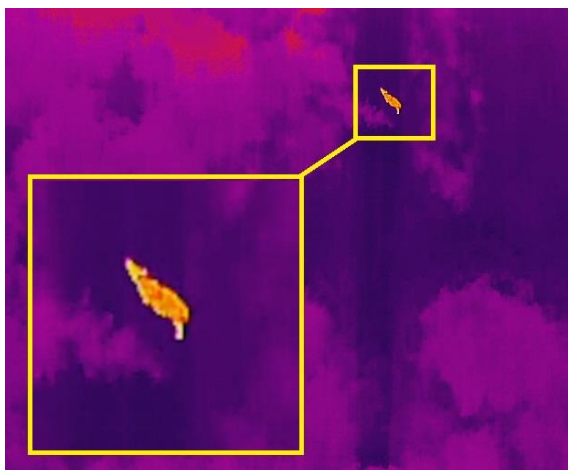
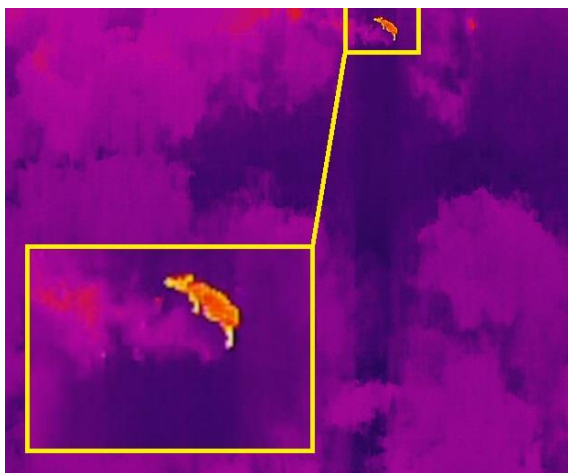
**Załącznik nr 3. Sygnatury termalne jeleni szlachetnych zarejestrowane w czasie,
gdy znajdowały na otwartej przestrzeni**

3 jelenie szlachetne zarejestrowane dnia 16 października z prędkością 10 m/s

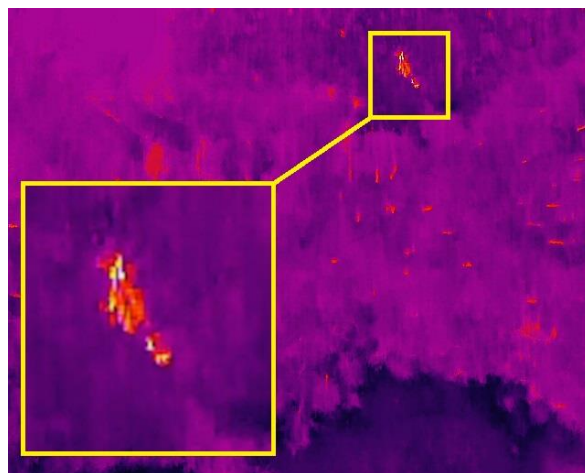


Załącznik nr 4. Sygnatury cieplne łosia euroazjatyckiego

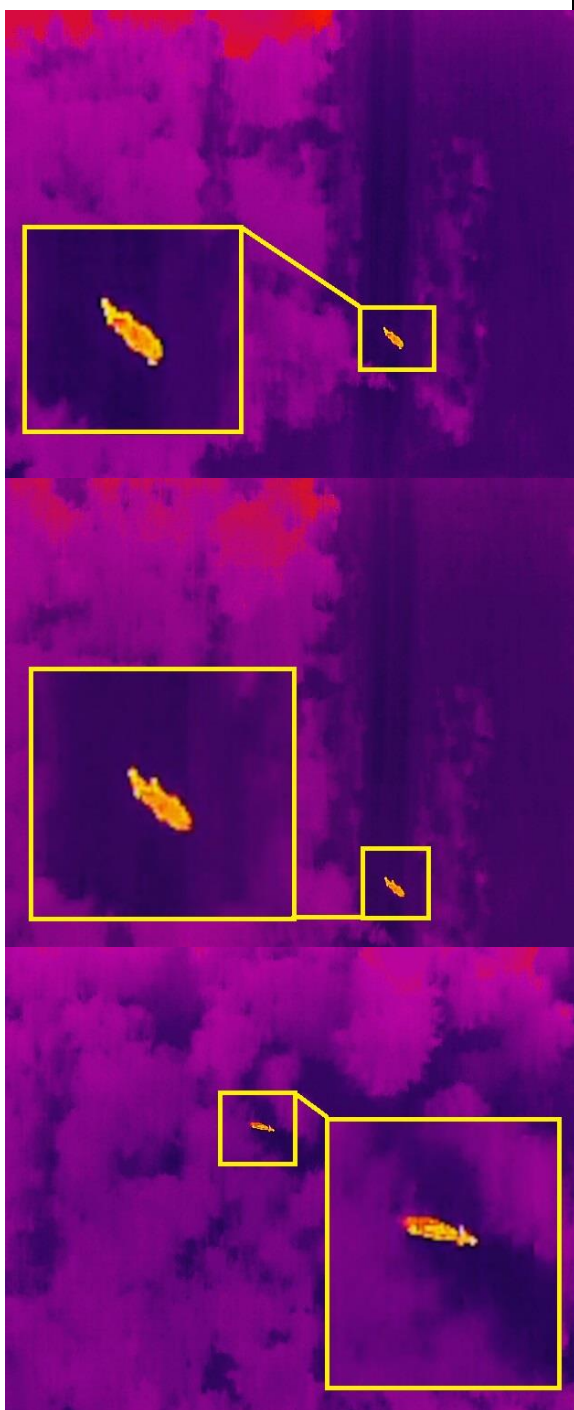
Łoś euroazjatycki zarejestrowany podczas lotu z prędkością 6 m/s dnia 15 października



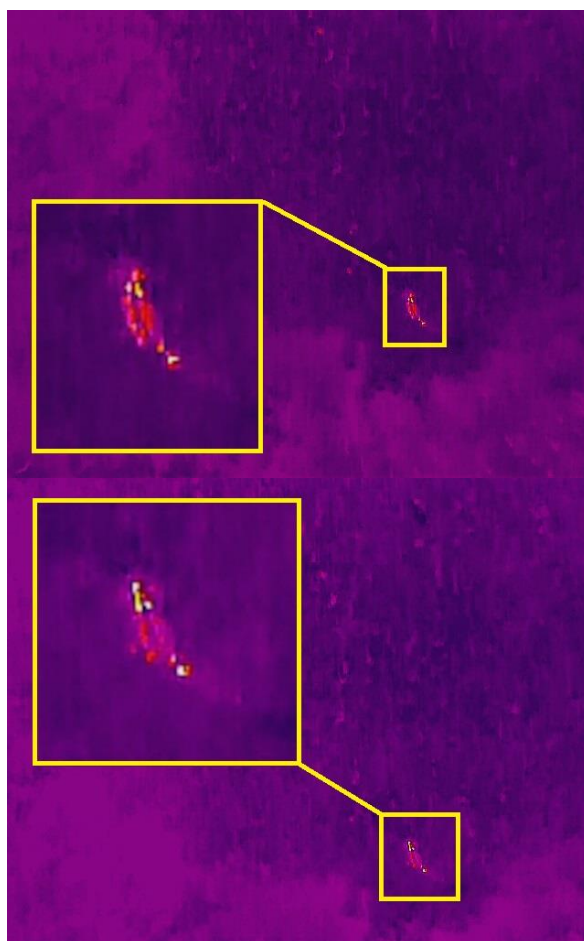
Łoś euroazjatycki zarejestrowany podczas lotu z prędkością 7 m/s dnia 16 października



cd. łódź euroazjatycki zarejestrowany
podczas lotu z prędkością 6 m/s dnia 15
października



cd. łódź euroazjatycki zarejestrowany podczas
lotu z prędkością 7 m/s dnia 16 października



Załącznik nr 5. Sygnatury cieplne sarny europejskiej

Sarna europejska zarejestrowana podczas lotu z prędkością 7 m/s dnia 24 października



Sarna europejska zarejestrowana podczas lotu z prędkością 10 m/s dnia 28 października



cd. sarna europejska zarejestrowana podczas
lotu z prędkością 7 m/s dnia 24 października

