



MUZEUM I INSTYTUT ZOOLOGII
POLSKA AKADEMIA NAUK

ul. Twarda 51/55
00-818 Warszawa

dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Katarzyny Fudali

Recenzowana rozprawa doktorska pt.

„Teledetekcja obrazowa jako narzędzie do monitorowania wielkości populacji wybranych gatunków zwierząt morskich w obrębie Antarktycznych Obszarów Szczególnie Chronionych i Zarządzanych oraz Ostoi Ptaków”

została przygotowana przez **mgr Katarzynę Fudalę**, pod kierunkiem **dr hab. Roberta Józefa Bialika prof. IBB PAN** w Instytucie Biochemii i Biofizyki Polskiej Akademii Nauk

Formalne podstawy sporządzenia recenzji

1/ Recenzja została sporządzona przez dr hab. Dominika Marchowskiego, prof. MiIZ PAN, wyznaczonego na recenzenta na posiedzeniu Rady Dyscypliny Nauki o Ziemi i Środowisku na Wydziale Oceanografii i Geografii Uniwersytetu Gdańskiego, które odbyło się zgodnie z obowiązującymi przepisami.

2/ Zakres recenzji jest zgodny z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668).

3/ Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt.

„Teledetekcja obrazowa jako narzędzie do monitorowania wielkości populacji wybranych gatunków zwierząt morskich w obrębie Antarktycznych Obszarów Szczególnie Chronionych i Zarządzanych oraz Ostoi Ptaków”,

autorstwa mgr Katarzyny Fudali, została przygotowana pod kierunkiem dr hab. Roberta Józefa Bialika prof. IBB PAN w Instytucie Biochemii i Biofizyki Polskiej Akademii Nauk.



**MUZEUM I INSTYTUT ZOOLOGII
POLSKA AKADEMIA NAUK**

ul. Twarda 51/55
00-818 Warszawa

dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

Rozprawa przyjmuje formę cyklu czterech powiązanych tematycznie artykułów naukowych, wzbogaconych o dodatkowe opracowanie w języku polskim, które opisuje i spaja całość badań w jednolitą narrację naukową. Struktura pracy odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim w formie zbioru artykułów, co jest zgodne z przyjętą praktyką w naukach przyrodniczych.

4/ Recenzja została sporządzona zgodnie z wymogami określonymi w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668), w szczególności zgodnie z art. 187 ust. 1–3, który określa wymagania dotyczące rozprawy doktorskiej. Praca spełnia kryteria dotyczące prezentacji wiedzy teoretycznej kandydata, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań oraz oryginalności rozwiązania problemu naukowego.

5/ Podmiotem doktoryzującym jest Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii, al. Marszałka Piłsudskiego 46, Gdynia, przypisany do dziedziny nauk ścisłych i przyrodniczych, do dyscypliny nauki o Ziemi i środowisku (wg klasyfikacji w Dz. U. 2022, poz. 2202). Recenzja ma na celu udokumentowanie osiągnięć Doktorantki w zakresie nauki o Ziemi i środowisku.

Rozprawa doktorska mgr Katarzyny Fudali stanowi spójną i wartościową naukowo analizę wykorzystania nowoczesnych technik teledetekcji do monitorowania populacji zwierząt w ekosystemach Antarktyki. Autorka podjęła się tematyki niezwykle aktualnej i istotnej dla współczesnej ochrony przyrody, a jej praca wpisuje się w rozwijające się podejście do badań ekologicznych oparte na analizie danych przestrzennych. Autorka spełnia formalne wymogi określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Ocena rozprawy

1. Oryginalność i znaczenie problemu badawczego

Rozprawa podejmuje kluczowe zagadnienie dotyczące monitorowania populacji zwierząt antarktycznych, wykorzystując nowoczesne metody teledetekcji, w tym obrazowanie satelitarne i drony, a także algorytmy automatycznej detekcji obiektów oparte na uczeniu



dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

maszynowym. Praca posiada charakter interdyscyplinarny integrując elementy ekologii, ochrony środowiska, teledetekcji i metod widzenia komputerowego.

Podjęty problem badawczy ma istotne znaczenie praktyczne, szczególnie w kontekście ochrony obszarów cennych przyrodniczo, jak Antarctic Specially Protected Areas (ASPAs), Antarctic Specially Managed Areas (ASMAs) oraz Important Bird and Biodiversity Areas (IBAs). Wskazane w pracy metody monitorowania mogą zostać wykorzystane do usprawnienia działań ochronnych i zarządczych w rejonie Antarktyki, co potwierdza wartość aplikacyjną rozprawy.

2. Struktura rozprawy i jej osadzenie w kontekście naukowym

Rozprawa doktorska mgr Katarzyny Fudali składa się z czterech artykułów naukowych, stanowiących spójną całość pod względem tematycznym, wzbogaconych o dodatkowe opracowanie w języku polskim. Praca została starannie zaplanowana i charakteryzuje się logicznym układem treści.

We wstępie swojej rozprawy Katarzyna Fudala szeroko omawia historię eksploatacji zasobów przyrodniczych Antarktyki przez człowieka, podkreślając, że choć często postrzega się ten kontynent jako izolowany od wpływów zewnętrznych, w rzeczywistości od ponad 200 lat jest on obszarem intensywnej działalności ludzkiej. Opisuje kolejne fale eksploatacji, począwszy od polowań na ssaki pływające na początku XIX wieku, które doprowadziły do niemal całkowitego wyćpienia kotików antarktycznych (*Arctocephalus gazella*) na Szetlandach Południowych. Ich populacja została niemal całkowicie zniszczona przez intensywne połowy w latach 20. i 70. XIX wieku.

Szczególnie dramatycznie autorka opisuje polowania na wieloryby, które rozpoczęły się pod koniec XIX wieku, gdy spadek liczebności populacji tych zwierząt w innych oceanach zmusił wielorybników do poszukiwania nowych łowisk w Oceanie Południowym. Komercyjne połowy wielorybów trwały tam aż do lat 70. XX wieku, a ich skutkiem była drastyczna redukcja populacji większości gatunków. W latach 1904–1978 na wodach antarktycznych odłowiono aż 1 393 254 wielorybów, co było poziomem całkowicie niezrównoważonym ekologicznie.

Autorka poświęca także dużo miejsca potrzebie ochrony przyrody Antarktyki, wskazując na kluczowe znaczenie różnych międzynarodowych regulacji, takich jak Protokół o ochronie środowiska Układu Antarktycznego z 1991 roku (Protokół Madrycki), na mocy którego uznano Antarktykę za „rezerwat naturalny przeznaczony dla pokoju i nauki”. Zwraca również uwagę na działania Komisji ds. Zachowania Żywych Zasobów Morskich Antarktyki (CCAMLR),



MUZEUM I INSTYTUT ZOOLOGII
POLSKA AKADEMIA NAUK

ul. Twarda 51/55
00-818 Warszawa

dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

która monitoruje wpływ działalności połowowej na tamtejszy ekosystem i stara się ograniczać jego negatywne skutki.

Autorka w swojej pracy podejmuje interesującą polemikę na temat monitoringu przyrodniczego, który – jak zauważa – bywa niekiedy traktowany jako działalność drugorzędna w stosunku do „właściwej” nauki. Odnosi się do tego krytycznie, wskazując, że systematyczna obserwacja środowiska i długoterminowe badania są kluczowe dla skutecznej ochrony przyrody, szczególnie w tak unikalnym i dynamicznie zmieniającym się ekosystemie jak Antarktyka.

Przywołuje m.in. poglądy Carpenter’a (1998), który porównał naukę o ekosystemach do stołu wspartego na czterech nogach: teorii, eksperymentach, porównaniach i badaniach długoterminowych. Autorka podkreśla, że monitoring środowiskowy nie powinien być marginalizowany jako jedynie narzędzie pomocnicze, ale powinien być traktowany jako pełnoprawna część nauki o ekosystemach, ponieważ to właśnie dzięki niemu możliwe jest podejmowanie racjonalnych decyzji dotyczących ochrony przyrody.

To podejście można uznać za niezwykle potrzebne, ponieważ w debacie naukowej monitoring przyrodniczy często jest pomijany lub niedoceniany. Fudala zwraca uwagę na to, że bez długoterminowych obserwacji trudno byłoby zrozumieć zmiany w ekosystemach i skutecznie reagować na zagrożenia wynikające m.in. z działalności człowieka czy zmian klimatycznych.

3. Artykuły naukowe składające się na rozprawę

Praca doktorska składa się z czterech artykułów naukowych, które łącznie ukazują różnorodne zastosowania teledetekcji w badaniach ekologicznych na obszarze Antarktyki. Każdy z nich koncentruje się na innej metodzie monitoringu – od fotogrametrii lotniczej z wykorzystaniem dronów, przez analizę zdjęć satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości, po zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego do automatycznej detekcji obiektów. Badania te nie tylko dostarczają cennych danych o populacjach ptaków i ssaków morskich, ale również poszerzają możliwości zastosowania nowoczesnych technologii w ekologii i ochronie środowiska.

Każdy z artykułów wnosi nowatorskie podejście do monitoringu ekosystemów Antarktyki, umożliwiając zarówno precyzyjniejsze szacunki liczebności gatunków, jak i ocenę potencjalnych zagrożeń. Prace te mają znaczenie nie tylko dla badań naukowych, ale także dla praktycznej ochrony przyrody, dostarczając podstaw do modyfikacji granic ostoi ptaków i



dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

obszarów chronionych. Poniżej omówiono szczegółowo ich zakres, wyniki oraz kluczowe wnioski.

1/ Wykorzystanie fotogrametrii lotniczej opartej na BSP w monitorowaniu populacji petrelców olbrzymich na terenie ASMA 1

Pierwszy artykuł koncentruje się na metodach inwentaryzacji kolonii petrelców olbrzymich (*Macronectes giganteus*) z wykorzystaniem dronów (BSP – bezzałogowe statki powietrzne). Opracowanie przedstawia optymalne parametry lotu umożliwiające precyzyjną identyfikację osobników dorosłych i piskląt na ortomozaikach, jednocześnie minimalizując wpływ dronów na ich zachowanie.

Wyniki

- Dzięki zastosowanej metodzie udało się zlokalizować 508 aktywnych gniazd oraz 380 piskląt w sezonie 2020/21 na terenie ASMA 1.
- Eksperymenty wykazały, że loty dronem na wysokości 112–121 m zapewniają odpowiednią rozdzielczość obrazu do identyfikacji ptaków, przy jednoczesnym uniknięciu niepożądanych reakcji behawioralnych.
- Przeprowadzono eksperymentalną analizę reakcji behawioralnych petrelców, ustalając, że na tej wysokości nie odnotowano statystycznie istotnych zmian w zachowaniu ptaków w porównaniu do naturalnej aktywności kolonii.
- Praca wskazuje na możliwość, że monitoring z użyciem BSP może prowadzić do lepszych szacunków liczebności w porównaniu do tradycyjnych metod naziemnych, eliminując zakłócenia kolonii wynikające z obecności ludzi.

Komentarze

Istotnym walorem artykułu jest analiza reakcji behawioralnych ptaków na obecność drona, co podnosi wartość praktyczną badania i ułatwia opracowanie wytycznych dla ekologicznych metod monitoringu.

W badaniach brakuje empirycznego porównania skuteczności metody dronowej z innymi technikami. Choć w pracy podkreślono zalety wykorzystania BSP i wspomniano o potencjalnych przewagach tej metody nad monitoringiem naziemnym, nie przeprowadzono bezpośredniego testu porównawczego. Analiza byłaby bardziej przekonująca, gdyby zestawiono wyniki uzyskane dronem z tradycyjnymi metodami liczenia ptaków, np. obserwacjami naziemnymi czy monitoringiem lotniczym. Taki eksperyment pozwoliłby na



dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

rzetelną ocenę dokładności, efektywności czasowej oraz wpływu różnych metod na zachowanie ptaków, a także na określenie potencjalnych ograniczeń podejścia BSP.

2/ Zastosowanie zdjęć satelitarnych o bardzo wysokiej rozdzielczości do oceny wielkości populacji mirung południowych na terenie ASPA 128

Drugi artykuł opisuje zastosowanie satelitarnych zdjęć WorldView-3 o rozdzielczości 31 cm do oceny liczebności kolonii mirung południowych (*Mirounga leonina*) na terenie ASPA 128. Celem badań było określenie skuteczności metody satelitarnej w identyfikacji różnych grup wiekowych i płciowych w obrębie kolonii.

Wyniki

- Wykazano, że obrazy satelitarne umożliwiają skuteczną identyfikację samców i samic w kolonii. Liczenia przeprowadzone na podstawie zdjęć satelitarnych wykazały błąd względny w stosunku do liczeń dronowych na poziomie 1,5%–7,0%, w zależności od strefy kolonii.
- Skuteczność rozpoznawania szczeniąt była znacznie niższa, a błąd względny wahał się w przedziale 24,6%–40,2%. Wynikało to głównie z braku wystarczającego kontrastu między ciemno ubarwionymi młodymi a podłożem, co powodowało częste fałszywe pozytywne i negatywne predykcje.
- W badaniu dokonano bezpośredniego porównania wyników uzyskanych z obrazów satelitarnych z liczeniami przeprowadzonymi przy użyciu drona. Wykazano, że choć zdjęcia satelitarne są użyteczne do szacowania liczby dorosłych mirung, to metoda ta jest mniej precyzyjna w przypadku młodych osobników.

Komentarze

Praca rzetelnie opisuje trudności związane z rozpoznawaniem młodych na zdjęciach satelitarnych. Można by jednak rozważyć zastosowanie algorytmów głębokiego uczenia do poprawy detekcji, co mogłoby zwiększyć skuteczność tej metody.

Artykuł zawiera empiryczne porównanie skuteczności zdjęć satelitarnych i ortomozaik dronowych, co czyni go rzetelną analizą metodologiczną. Wyniki wskazują, że monitoring satelitarny jest użytecznym narzędziem do liczenia dorosłych osobników, ale mniej efektywnym dla młodych, co stanowi ważną informację dla przyszłych badań nad teledetekcją ssaków morskich.



dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

3/ Identyfikacja ostoi ptaków w Antarktyce z wykorzystaniem BSP na przykładzie Przylądka Melville, Wyspa Króla Jerzego

Trzeci artykuł koncentruje się na wykorzystaniu dronów do inwentaryzacji ostoi ptaków na Przylądku Melville oraz w przybrzeżnej strefie Zatoki Destrukcji. Celem badania było oszacowanie liczebności kolonii pingwina maskowego (*Pygoscelis antarcticus*), kormorana antarktycznego (*Leucocarbo bransfieldensis*) oraz innych gatunków ptaków morskich w tym rejonie.

Wyniki

- Dzięki wykorzystaniu bezzałogowych statków powietrznych (BSP) przeprowadzono szczegółowe liczenia kolonii ptaków, co pozwoliło na oszacowanie 4960 (+/-12) gniazd pingwina maskowego oraz 456 gniazd kormorana antarktycznego.
- Analiza zdjęć z drona ujawniła kolonie kormoranów antarktycznych na niewielkich wyspach w obrębie Zatoki Destrukcji, co doprowadziło do rewizji szacunków światowej populacji tego gatunku – liczba par wzrosła z 11 684 do 12 191.
- Na podstawie wyników badań zaproponowano przywrócenie Przylądkowi Melville statusu ostoi ptaków oraz sugerowano zmianę granic obszaru chronionego, co zostało pozytywnie rozpatrzone przez BirdLife International.

Komentarze

Badania dostarczyły nowych danych, które mogą mieć bezpośrednie przełożenie na strategię ochrony ostoi ptaków w Antarktyce. Wyniki te stanowią argument za modyfikacją granic obszarów chronionych, co zwiększa ich wartość praktyczną.

Choć w artykule przedstawiono dane na temat rozmieszczenia kolonii, nie podjęto szczegółowej analizy wpływu zmian klimatycznych oraz działalności człowieka, takich jak rybołówstwo, turystyka czy zakłócenia spowodowane infrastrukturą badawczą. Uzupełnienie o modelowanie wpływu temperatury, pokrywy lodowej, dostępności pożywienia oraz presji ludzkiej mogłoby wzbogacić pracę i podkreślić długofalowe zagrożenia dla badanych gatunków.



dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

4/ Wykorzystanie uczenia maszynowego do automatycznej detekcji i liczenia gniazd kormoranów antarktycznych na ortomozaikach lotniczych

Czwarty artykuł przedstawia zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego (widzenie komputerowe), a konkretnie modelu YOLO (You Only Look Once), do automatycznej detekcji i liczenia gniazd kormoranów antarktycznych (*Leucocarbo bransfieldensis*) na poddanych georeferencjonowaniu mozaikach lotniczych. Praca pokazuje wysoką skuteczność algorytmu w analizie obrazów z dronów, co może znacząco usprawnić przyszłe inwentaryzacje tego gatunku.

Wyniki

- Model YOLO osiągnął dokładność detekcji gniazd na poziomie $F1 > 0,95$, co potwierdza jego wysoką precyzję w identyfikacji obiektów na ortomozaikach lotniczych.
- Aby umożliwić odtwarzalność wyników, kod źródłowy, dane treningowe oraz gotowy model YOLO zostały publicznie udostępnione na platformie GitHub.
- Model był testowany na obrazach z 11 kolonii kormorana antarktycznego rozmieszczonych na wyspach Króla Jerzego i Nelsona. Wyniki detekcji automatycznej zostały zestawione z manualnie przeprowadzoną analizą ortomozaik, co potwierdziło jego wysoką skuteczność.
- Praca obejmuje analizę zmian liczebności kolonii w latach 2019–2022, w koloniach Turret Point i Shag Rock, co pokazuje potencjał ML w długoterminowym monitoringu ptaków.

Komentarze

Wykorzystanie uczenia maszynowego do automatycznej detekcji gniazd jest nowatorskim podejściem i stanowi ważny krok w stronę automatyzacji inwentaryzacji ptaków morskich.

Praca mogłaby zostać wzbogacona o analizę ograniczeń modelu YOLO, szczególnie w kontekście zmieniających się warunków środowiskowych, takich jak oświetlenie, kontrast tła czy zakłócenia atmosferyczne, które mogą wpływać na skuteczność detekcji.

Wyniki pokazują, że model YOLO może być przydatny nie tylko do jednorazowych inwentaryzacji, ale również do analizy długoterminowych zmian populacyjnych. Rozszerzenie modelu o analizę trendów liczebności mogłoby być ciekawym kierunkiem przyszłych badań.



dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

4. Podsumowanie

Każdy z czterech artykułów wchodzących w skład rozprawy wnosi istotny wkład w rozwój metod monitoringu ekologicznego w Antarktyce. Autorka wykazała się interdyscyplinarnym podejściem, łącząc metody teledetekcyjne, analizy obrazów satelitarnych, naloty dronowe oraz algorytmy uczenia maszynowego.

Najważniejsze atuty rozprawy

- Nowatorskie wykorzystanie dronów i zdjęć satelitarnych do badań ekologicznych.
- Zastosowanie metod uczenia maszynowego w monitoringu populacji ptaków.
- Możliwość adaptacji zaproponowanych metod do innych obszarów i gatunków.

Możliwe kierunki dalszych badań

- Rozszerzenie analiz o wpływ zmian klimatu i działalności człowieka na badane populacje.
- Testowanie algorytmów uczenia maszynowego w analizie obrazów ekologicznych.
- Integracja danych teledetekcyjnych z tradycyjnymi metodami badawczymi.

Rozprawa mgr Katarzyny Fudali stanowi wartościowy wkład w rozwój nowoczesnych metod monitoringu ekologicznego i w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku, zgodnie z art. 187 ust. 1–3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Praca prezentuje zaawansowaną wiedzę teoretyczną w zakresie ekologii, ochrony środowiska i teledetekcji, wykazując głębokie zrozumienie aktualnych problemów badawczych oraz metod ich rozwiązywania. Doktorantka samodzielnie przeprowadziła badania, integrując różne podejścia technologiczne, w tym fotogrametrię lotniczą, analizę obrazów satelitarnych i algorytmy uczenia maszynowego, co świadczy o wysokim stopniu kompetencji badawczych oraz zdolności do interdyscyplinarnej analizy danych.

Rozprawa spełnia również kryterium oryginalności, gdyż przedstawione w niej badania dostarczają nowych rozwiązań naukowych w zakresie automatyzacji monitoringu populacji ptaków i ssaków morskich w Antarktyce. Wyniki pracy mają istotne znaczenie praktyczne, mogą znaleźć zastosowanie zarówno w długoterminowym monitoringu ekosystemów



MUZEUM I INSTYTUT ZOOLOGII
POLSKA AKADEMIA NAUK

ul. Twarda 51/55
00-818 Warszawa

dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN, email: dmarchowski@miiz.waw.pl

polarnych, jak i w strategiach ochrony przyrody, w tym w wyznaczaniu granic ostoi ptaków i obszarów chronionych.

Biorąc pod uwagę powyższe aspekty, rozprawa mgr Katarzyny Fudali w pełni realizuje wymagania dotyczące rozprawy doktorskiej, zarówno w zakresie oryginalności rozwiązania problemu naukowego, jak i przydatności wyników do dalszego rozwoju wiedzy i praktyki naukowej. W związku z tym, praca zasługuje na pozytywną ocenę i przyznanie stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych.

dr hab. Dominik Marchowski prof. MiIZ PAN

DominiK Marchowski