

SN.410.2.2023

SEKRETARIAT NAUKOWY INSTYTUT GEOFIZYKI PAN	
WPŁYNĘŁO	
16.04.2024r.	
Nr dz.	Zal.
Ref.	

Dr hab. Bogdan Gądek, prof. UŚ
Instytut Nauk o Ziemi
Uniwersytet Śląski w Katowicach

Sosnowiec, 8 kwietnia 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Juliana Podgórskiego

Podstawą przygotowania niniejszej recenzji jest pismo Z-cy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Geofizyki PAN, dr. hab. Rafała Junoszy-Szaniawskiego, z dnia 6 lutego 2024 r., sporządzone w oparciu o uchwałę Rady Naukowej Instytutu Geofizyki PAN z dnia 25 stycznia 2024 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. Juliana Podgórskiego (Uchwała nr 7/278/2024).

Temat rozprawy: **Badanie procesów zachodzących na powierzchni lodowca andyjskiego w dobie intensyfikacji zmian klimatu w oparciu o metody teledetekcyjne**

Promotorzy: prof. dr hab. Piotr Głowacki i dr hab. Michał Pętlicki

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Juliana Podgórskiego składa się z serii trzech współautorskich publikacji:

- 1) Podgórski J., Pętlicki M., 2020. Detailed Lacustrine Calving Iceberg Inventory from Very High Resolution Optical Imagery and Object-Based Image Analysis. *Remote Sensing*, 12(11), 1807; doi:10.3390/rs12111807,
- 2) Podgórski J., Kinnard Ch., Pętlicki M., Urrutia R., 2019. Performance Assessment of TanDEM-X DEM for Mountain Glacier Elevation Change Detection. *Remote Sensing*, 11(2), 187; doi:10.3390/rs11020187,
- 3) Podgórski J., Pętlicki M., Fernández A., Urrutia R., Kinnard Ch., 2023. Evaluating the impact of the Central Chile Mega Drought on debris cover, broadband albedo, and surface drainage system of a Dry Andes glacier. *Science of the Total Environment*, 905, 166907. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166907.

Z deklaracji współautorów zawartych w odrębnych oświadczeniach oraz w końcowych akapitach każdej z tych publikacji wynika, że doktorant miał wiodący udział we wszystkich etapach procesu badawczego oraz w przygotowaniu manuskryptów i ich korektach.

Ocena doboru tematu, celu i zakresu pracy

W regionach wysokogórskich lodowce są ważnym elementem środowiska przyrodniczego i krajobrazu. Stanowią źródło słodkiej wody wykorzystywanej do celów rolniczych, przemysłowych i domowych, mają duże znaczenie ekonomiczne także w branżach turystycznej i energetycznej, mogą też stwarzać poważne zagrożenia naturalne. Lodowce są bardzo wrażliwe na zmiany klimatu i w związku z tym objęte są narodowymi i międzynarodowymi programami obserwacji. Najważniejsze z tych programów prowadzone są we współpracy ze Światową Służbą Monitoringu Lodowców, działającą pod auspicjami UNESCO. Dane zgromadzone w ramach tej współpracy pochodzą z całego świata, ale dominują te z półkuli północnej, zwłaszcza z Europy. Doktorant podejmując pracę badawczą dotyczącą zmian dwu dużych lodowców położonych w obrębie Północnego Patagońskiego Pola Lodowego oraz w Suchych Andach, których interakcję z klimatem komplikują procesy cielenia i rozwoju supraglacialnych pokryw gruzowych, włączył się w ważny nurt międzynarodowych badań naukowych. Głównym celem jego studiów była identyfikacja procesów zachodzących na powierzchni lodowca górskiego w warunkach pustynnienia. Cel ten został zrealizowany w trzech etapach udokumentowanych w trzech publikacjach tworzących rozprawę doktorską. Obejmowały one: 1) sprawdzenie przydatności Obiektowej Analizy Obrazów i uczenia maszynowego do kartowania brył lodowych na przedpolu lodowca uchodzącego do jeziora oraz określenie relacji powierzchni ich przekroju poprzecznego i objętości z wykorzystaniem optycznych zdjęć satelitarnych o wysokiej rozdzielczości, 2) określenie przydatności numerycznego modelu terenu TanDEM-X DEM do wykrywania zmian lodowców oraz oszacowanie geodezyjnego bilansu masy lodowca Universidad, 3) rozpoznanie ewolucji pokrywy gruzowej tego lodowca oraz zmian hydrologii powierzchniowej w warunkach ocieplającego się klimatu i wieloletniej suszy. Publikacje te mają w znacznym stopniu charakter metodyczny i wpisują się w strategiczne cele programowe Światowej Służby Monitoringu Lodowców: 1) wzmocnienie słabej sieci monitoringu lodowców w Ameryce Południowej, 2) wykorzystanie czasowego zróżnicowania numerycznych modeli terenu do pomiarów wieloletniego bilansu masy, oraz metod teledetekcyjnych i geoinformatycznych do śledzenia zmian powierzchni i zasięgu lodowców, 3) identyfikacja regionów, w których lodowce mają hydrologiczne znaczenie i wpływ na zagrożenia naturalne w nadchodzących dziesięcioleciach.

Pod względem merytorycznej spójności, pierwsza publikacja wchodząca w skład recenzowanego cyklu prac odbiega od pozostałych, pomimo że została złożona do wydawnictwa i ukazała się jako druga. Dotyczy ona wyłącznie teledetekcyjnej metodyki

wykrywania brył lodowych w środowisku, w którym kontrast spektralny między lodem a wodą nie jest wyraźny. Badania przeprowadzono na jeziorze położonym u czoła lodowca San Quintín. Natomiast w pozostałych dwu publikacjach przedstawiono złożoną metodykę i wyniki kompleksowego rozpoznania zmian lodowca Universidad w latach 2000-2022 i ich środowiskowe uwarunkowania. Przy czym wbrew temu co wskazano w publikacjach, badany lodowiec nie jest lodowcem referencyjnym. Lodowce referencyjne to te, których bilans masy monitorowany jest przez co najmniej 30 lat. Spośród andyjskich lodowców status „referencyjnych” mają tylko dwa: Echaurren Norte w Chile i Zongo w Boliwii (https://wgms.ch/products_ref_glaciers/). Biorąc jednak pod uwagę, że baza danych Światowej Służby Monitoringu Lodowców obecnie zawiera tylko dwie informacje o położeniu czoła lodowca Universidad (w 1945 i 2010 roku), to pozyskane przez doktoranta dane o bilansie masy tego lodowca w latach 2000-2013 oraz fluktuacjach wraz ze zmianami linii śnieżnej i powierzchni strefy akumulacji w latach 2013-2022 należy uznać za unikatowe.

Ocena oryginalności rozprawy

Wszystkie publikacje tworzące rozprawę doktorską prezentują wyniki autorskich prac badawczych, które cechują się nowatorskimi rozwiązaniami metodycznymi, oryginalnym doбором materiałów źródłowych oraz unikatowością pozyskanych danych. W tym kontekście na szczególne wyróżnienie zasługuje: 1) zaproponowanie autorskiej procedury teledetekcyjnego wykrywania brył czystego i brudnego lodu w jeziorze proglacialnym zawierającym dużą ilość zawiesiny, 2) wykorzystanie numerycznego modelu terenu TanDEM-X DEM, czyli średnich wieloletnich danych wysokościowych, w badaniach glaciologicznych, 3) teledetekcyjne ustalenie zawartości gruzu na powierzchni lodowca w obrębie miejsc reprezentowanych przez pojedyncze piksele obrazów satelitarnych Landsat 8 OLI, oraz 4) kompleksowe rozpoznanie zmienności geometrii (zasięgu i grubości), bilansu masy i cech powierzchni (albedo, pokrycie gruzem, położenie linii śnieżnej, powierzchnia strefy akumulacji) lodowca Universidad w okresie ocieplenia klimatu i wieloletniej suszy.

Ocena doboru oraz zastosowania materiałów źródłowych i metod badawczych

Zebrane na potrzeby pracy materiały były bardzo różnorodne. Obejmowały wielospektralne i panchromatyczne zdjęcia lotnicze i satelitarne oraz numeryczne modele terenu z lat 2000-2023 o bardzo wysokiej i średniej rozdzielczości, obrys lodowca Universidad pozyskany z globalnej bazy danych GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) oraz wieloletnie dane meteorologiczne i hydrologiczne. Zintegrowanie tych materiałów i ich

skuteczne wykorzystanie w kompleksowych badaniach zmian wysokogórskich lodowców wymagało akademickiej wiedzy z zakresu nauk o Ziemi oraz eksperckich kompetencji z zakresu teledetekcji i geoinformatyki.

Zaproponowana w pierwszym artykule procedura kartowania brył czystego i brudnego lodu dryfującego w wodzie zawierającej dużą ilość zawiesiny jest złożona pod względem metodycznym, ale koncepcyjnie prosta i ma duży potencjał praktyczny. Polega ona na: 1) nadzorowanej klasyfikacji obiektowej obrazu przy użyciu uczenia maszynowego metodą Losowych Lasów Decyzyjnych z ręcznym doбором treningowych segmentów zawierających poszczególne klasy obiektów wraz z ich cechami statystycznymi, 2) kontekstowej korekcji uzyskanych danych, 3) łączeniu grup sąsiadujących pikseli przypisanych do tych samych klas i 4) wododziałowej segmentacji klas brył lodowych. Kluczowe w tej procedurze wydają być przede wszystkim jakość danych wejściowych, reprezentatywność danych treningowych oraz odległości pomiędzy sąsiadującymi bryłami lodu. W pracy tej ustalono także relacje pomiędzy polem przekroju poprzecznego na wysokości lustra wody skartowanych brył lodowych a ich objętością. Brakuje jednak informacji, że określona na podstawie numerycznego modelu terenu objętość brył lodowych dotyczy ich nadwodnych części.

Także zaprezentowana w drugim artykule analiza jakości globalnych numerycznych modeli terenu, szczególnie TanDEM-X DEM, ma istotne znaczenie praktyczne. Doktorant wykazał się przy tym dużą świadomością metodyczną i dociekliwością. Procedura przygotowania modeli do badań zmian lodowców obejmowała: 1) filtrowanie różnic wysokości pomiędzy modelami globalnymi a modelem referencyjnym w strefie pozalodowcowej, 2) filtrowanie pikseli nie zawierających danych oraz o wartościach nie mieszczących się w przedziale od 5 do 95 percentyla, 3) korekcję geometryczną wszystkich modeli oraz 4) korekcję błędów systematycznych modelu TanDEM-X DEM. Źródłem danych referencyjnych był wysokorozdzielczy numeryczny model terenu ALS opracowany na podstawie wyników lotniczego skaningu laserowego. Wysokorozdzielczy model TanDEM-X DEM wygenerowany z interferometrycznych obserwacji radarowych przedstawia wieloletnią średnią wysokość powierzchni terenu. Jednak po wstępnym filtrowaniu i korekcji dobrze odwzorował powierzchnię lodowca Universidad w środkowym okresie pozyskiwania danych składowych. Nie wykryto przy tym wpływu na uzyskane wyniki propagacji sygnału radarowego w suchym śniegu. Wyjaśniono to niewielką liczbą zimowych danych składowych oraz generalnie dużą wilgotnością śniegu na badanym lodowcu. Słusznie jednak postulowano by znaczenie tych czynników było uwzględniane w badaniach z zastosowaniem modeli TanDEM-X DEM lodowców w innych regionach świata. Do oszacowania geodezyjnego

bilansu masy lodowca Universidad ostatecznie wykorzystano modele SRTM i ALS o ujednoczonej rozdzielczości równej 12 m - czyli te o największej różnicy czasowej i optymalnej dokładności. Do obliczenia niepewności różnicy wysokości porównywanych modeli i tym samym niepewności bilansu masy wykorzystano błąd standardowy średniej zakładając, że numeryczne modele terenu są zbiorami danych częściowo skorelowanymi przestrzennie.

Wysoko oceniam przedstawiony w trzecim artykule sposób rozpoznania wpływu wieloletniej suszy na supraglacialne pokrywy gruzowe, albedo oraz system drenażu wód powierzchniowych lodowca Universidad. Zastosowana procedura analizy obrazów satelitarnych i lotniczych oraz wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu składała się z 9 etapów: 1) obiektowa klasyfikacja powierzchni lodowca metodą Losowych Lasów Decyzyjnych poprzedzona wydzieleniem segmentów treningowych obejmujących powierzchnie gruzowe, śnieżne oraz czystego i brudnego lodu lodowcowego, 2) ręczne wyznaczenie zasięgów lodowca i pokrywy śnieżnej w kolejnych sezonach letnich, wraz z ustaleniem średniej wysokości linii śnieżnej i wartości współczynników powierzchni akumulacji, 3) utworzenie mapy udziału lodu i gruzu w miejscach reprezentowanych przez pojedyncze piksele wysokorozdzielczego obrazu hiperspektralnego i zagregowanie uzyskanych wyników do rozdzielczości zdjęcia Landsat 8 OLI, stosując kolejno nadzorowaną klasyfikację pikselową MESMA (Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis) i algorytm uśredniania GDAL Average, 4) detekcja materiału skalnego z wykorzystaniem wskaźnika GRAI (Glacial Rock Abundance Index), którego wartość zależy od reflektancji w zakresie krótkofalowej (SWIR) i bliskiej (NIR) podczerwieni zarejestrowanej przez instrument zdalnego wykrywania Landsat 8 OLI, 5) opracowanie map albedo, 6) określenie statystycznej relacji pomiędzy wartościami GRAI a określoną wcześniej zawartością materiału skalnego, 7) wykorzystanie wartości GRAI do prześledzenia ekspansji pokryw gruzowych metodą nienadzorowanego uczenia maszynowego (Accelerated Hierarchical Density-Based Clustering Algorithm), 8) opracowanie map sieci strumieni wody roztopowej na powierzchni lodowca z wykorzystaniem narzędzia PCRaster oraz obliczenie ich gęstości i rzędu, 9) ustalenie kierunku zmian sieci drenażu wód supraglacialnych na podstawie analizy lokalnych wskaźników zależności przestrzennej (LISA – Lokal Index of Spatial Association). Wyniki tego kompleksowego rozpoznania zmian lodowca Universidad, uzupełnione zimowymi i letnimi wartościami oceanicznego indeksu Niño (ONI - Oceanic Niño Index), danymi reanalizy klimatycznej ERA-5 Land oraz danymi o przepływach rzeki Tinguiririca, były w znacznej części przewidywalne. Świadczą, że w okresie wielkiej suszy recesji lodowca

Universidad towarzyszył wzrost wysokości linii śnieżnej, powierzchni odsłoniętego lodu, ilości osadów oraz gęstości cieków supraglacialnych, a ilość wody roztopowej z naddatkiem wyrównywała niedobory wody spowodowane małymi sumami opadów. W mojej ocenie największym walorem ostatniego artykułu wchodzącego w skład recenzowanej rozprawy jest zaproponowana metodyka badań teledetekcyjnych, a zwłaszcza zastosowanie obiektowej klasyfikacji powierzchni lodowca z wykorzystaniem uczenia maszynowego i indeksu spektralnego GRAI. Prace tego typu zmierzają do automatyzacji zaawansowanych analiz teledetekcyjnych i przyczyniają się do bardziej efektywnego i precyzyjnego monitorowania zmian środowisk wysokogórskich i polarnych Ziemi.

Najważniejsze osiągnięcia

Do najważniejszych osiągnięć doktoranta przedstawionych w recenzowanej rozprawie zaliczam:

- 1) Opracowanie procedury kartowania jeziornych brył lodowych w ramach paradygmatu obiektowej analizy obrazu, obejmującej klasyfikację metodą Losowych Lasów Decyzyjnych, korekcję kontekstową i cięcie wododziałowe.
- 2) Ustalenie, że numeryczny model terenu TanDEM-X DEM, przedstawiający uśrednione wieloletnie dane wysokościowe, odwzorowuje powierzchnię lodowca w środku okresu pozyskiwania danych lepiej niż globalne modele terenu ASTER oraz SRTM. Konieczne jest jednak filtrowanie wartości odstających i powierzchni o nachyleniu przekraczającym 40°.
- 3) Stwierdzenie, że wskaźnik spektralny GRAI, obliczony na podstawie danych z sensora Landsat 8 OLI, umożliwia śledzenie zmian zasięgu osadowych pokryw supraglacialnych i stanowi nośnik informacji o zawartości materiału skalnego w miejscach reprezentowanych przez poszczególne piksele zdjęcia satelitarnego, niezależnie od stopnia zacienienia.
- 4) Pozyskanie ilościowych danych o zmianach zasięgu, grubości, bilansu masy, linii śnieżnej, pokryw gruzowych i drenażu wód powierzchniowych lodowca Universidad w ostatnich dekadach.

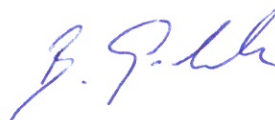
Ocena formalnej strony pracy

Struktura każdej z publikacji wchodzącej w skład recenzowanej rozprawy doktorskiej jest podobna i typowa dla prac naukowych. Każdy artykuł zawiera wstęp, charakterystykę obszaru badań, opis danych i metod badawczych, prezentację wyników, dyskusję, wnioski

i wykaz cytowanej literatury. Wszystkie te prace opublikowano w międzynarodowych, prestiżowych czasopismach naukowych i spełniły one nie tylko wymagania merytoryczne, ale także formalne, zarówno redakcji jak i powołanych przez nie zewnętrznych recenzentów. Wszystkie trzy prace cechuje bardzo dobra szata graficzna i bardzo dobre osadzenie w literaturze przedmiotu.

Wniosek

Uważam, że oceniana rozprawa doktorska jest oryginalnym opracowaniem naukowym wnoszącym wartościowy wkład do wiedzy z zakresu metodyki badań obszarów zlodowaconych oraz funkcjonowania wysokogórskich środowisk Ameryki Południowej w warunkach zmieniającego się klimatu. Spełnia ona wszystkie wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668, z późn. zm.). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Geofizyki PAN o dopuszczenie Pana mgr. Juliana Podgórskiego do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.



Bogdan Gądek