



Wrocław, 30 listopada 2022 r.

dr hab. Marek Kasprzak
 Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego
 Uniwersytet Wrocławski
 pl. Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław
 marek.kasprzak@uwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Artura Marciniaka pt. „Uncertainty-driven geophysical imaging in environmental studies” wykonanej pod kierunkiem dr hab. Mariusza Majdańskiego

Zawartość dokumentu

Podstawa sporządzenia recenzji oraz kryteria oceny rozprawy.....	1
Charakterystyka rozprawy doktorskiej.....	2
Formalna strona rozprawy doktorskiej	4
Uwagi dotyczące problemu badawczego i postawionych hipotez badawczych	6
Uwagi dotyczące metodyki badań i etapów ich realizacji.....	8
Uwagi dotyczące uzyskanych wyników, ich interpretacji i wniosków końcowych	9
Uwagi dotyczące konstrukcji rozprawy	12
Konkluzja	12

Podstawa sporządzenia recenzji oraz kryteria oceny rozprawy

Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo wystosowane przez Zastępcę Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Geofizyki PAN dr hab. Mariusza Majdańskiego w dniu 29 września 2022 r., sporządzone w oparciu o uchwałę Rady Naukowej Instytutu Geofizyki PAN z dnia 28 września 2022 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. Artura Marciniaka.

Podstawą recenzji były kryteria wskazane w art. 187. *Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zmianami). Określono w nim, że:

1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.
3. Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.
4. Do rozprawy doktorskiej dołącza się streszczenie w języku angielskim, a do rozprawy doktorskiej przygotowanej w języku obcym również streszczenie w języku polskim. W przypadku, gdy rozprawa doktorska nie jest pracą pisemną, dołącza się opis w językach polskim i angielskim.

Dalsze wytyczne w tym zakresie wnosi art. 13. *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595 z późn. zmianami)*:

1. Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora albo pod opieką promotora i promotora pomocniczego, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne, lub oryginalne dokonanie artystyczne, oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.
2. Rozprawa doktorska może mieć formę maszynopisu książki, książki wydanej lub spójnego tematycznie zbioru rozdziałów w książkach wydanych, spójnego tematycznie zbioru artykułów opublikowanych lub przyjętych do druku w czasopiśmie naukowych, określonych przez ministra właściwego do spraw nauki na podstawie przepisów dotyczących finansowania nauki, jeżeli odpowiada warunkom określonym w ust. 1.
3. Rozprawę doktorską może stanowić praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, jeżeli odpowiada warunkom określonym w ust. 1.
4. Rozprawę doktorską może także stanowić samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej, jeżeli wykazuje ona indywidualny wkład kandydata przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy, odpowiadający warunkom określonym w ust. 1.
5. Za zgodą rady jednostki przeprowadzającej przewód, rozprawa doktorska może być przedstawiona w języku innym niż polski.
6. Rozprawa doktorska powinna być opatrzona streszczeniem w języku angielskim, a rozprawa doktorska przygotowana w języku obcym również streszczeniem w języku polskim. W przypadkach, gdy rozprawa doktorska nie ma formy pisemnej, powinna być opatrzona opisem w języku polskim i angielskim.

Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana Artura Marciniaka została zrealizowana pod opieką dr hab. Mariusza Majdańskiego w Zakładzie Obrazowania Geofizycznego Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Tytuł rozprawy „Uncertainty-driven geophysical imaging in

environmental studies” – w może niezbyt udanym przekładzie recenzenta: „Obrazowanie geofizyczne z określaniem niepewności w badaniach środowiskowych” – określa dominujący kierunek pracy badawczej, której efektem jest prezentowany dorobek. Autor podejmuje ważne zagadnienie niepewności w obrazowaniu geofizycznym wykorzystywanym powszechnie w badaniach środowiskowych. Niepewność ta wynika z reguły zarówno z niepewności będącej nieodłącznym elementem układów fizycznych, jak i niedostatku wiedzy na temat cech badanego podłoża, a jej określenie może mieć kluczowe znaczenie w interpretacji otrzymanych wyników i rzutować na końcowy efekt badań. Zagadnienie to łączy się poniekąd z problemem niejednoznaczności w badaniach geofizycznych. Niejednoznaczność ta, w pewnym uproszczeniu, wynika z faktu, że odmienne od siebie pod względem cech fizyko-chemicznych utwory skalne podłoża geologicznego mogą dawać bardzo zbliżone lub identyczne wartości mierzonych parametrów i utrudniać zarówno parametryczno-geometryczną interpretację geofizyczną (niejednoznaczność ilościowa), jak i wyjaśnienie otrzymanych wyników w aspekcie procesów geologiczno-geomorfologicznych (niejednoznaczność kontekstowa).

W rozprawie doktorskiej zauważalne są dwa główne kierunki badawcze, które autor wymienił jako swoje motywacje. Są to, zgodnie z podaną kolejnością, rozwój technik obrazowania geofizycznego oraz badanie podpowierzchniowych efektów ewolucji klimatu. Autor sformułował także główny cel badawczy, jakim była próba obrazowania podłoża w strefie przypowierzchniowej, gdzie jest ono silnie skorelowane z czynnikami środowiskowymi i aktualnym stanem klimatu. Tym niemniej to właśnie wymienione wcześniej motywacje trafnie definiują prezentowany dorobek, na który w ogólności składa się (i) gromadzenie danych geofizycznych w terenie – pomiary, (ii) integracja technik obrazowania geofizycznego, (iii) wiarygodne szacowanie niepewności danych, (iv) opracowanie optymalnej metody przetwarzania danych dla badań środowiskowych, (v) porównanie uzyskanych danych z aktualnym stanem klimatu, (vi) interpretacja wielu zestawów danych dla rozpoznania zmian sezonowych zachodzących w podłożu geologicznym.

Autor rozprawy przeprowadził określone postępowanie badawcze, które testował na obszarach występowania konkretnych zjawisk i procesów geologiczno-geomorfologicznych, także z wykorzystaniem metody pomiarów powtarzalnych *time-lapse*. Można wskazać, że zasadniczy efekt tego postępowania to opracowanie zintegrowanej metodyki obrazowania płytkiej budowy geologicznej.

Rozprawa zawiera wyniki badań prowadzonych w rejonie Hornsundu na południowo-zachodnim wybrzeżu Spitsbergenu oraz na obszarach górskich południowej Polski. Pierwszy z wymienionych rejonów znajduje się w Wysokiej Arktyce, gdzie podłoża obszarów lądowych, odślonięte spod lodu, znajduje się w stanie wieloletniego przemarznięcia. Implikuje to znacząco postępowanie badawcze i otrzymywane wyniki geofizyczne. Tym samym doktorant podejmuje zagadnienie niezwykle aktualne. Permafrost, będący efektem oddziaływania mroźnego klimatu na litosferę i hydrosferę, uważany jest za jeden z najważniejszych markerów globalnych zmian środowiska i poddany jest wnikliwym obserwacjom pod auspicjami Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO), m.in. w sieci Global Terrestrial Network on Permafrost (GTN-P). Tym niemniej badania termiki gruntu prowadzone w pojedynczych odwiertach trudno uznać za wystarczające i coraz częściej uzupełniane są rozpoznaniem stanu podłoża przy pomocy obrazowania geofizycznego, w tym tomografii elektrooporowej, pomiarów sejsmicznych czy georadarowych, jak i symulacji opartych o dane dostarczane z badań teledetekcyjnych (np. Czekirda et al. 2019 – *Transient Modelling of Permafrost*

Distribution in Iceland). Choć niemal każda z tego typu prac wnosi nowe informacje do rozpoznania fenomenu permafrostu w skali regionalnej, wiele zagadnień dotyczących permafrostu pozostaje wciąż otwartych, przykładowo tempo tworzenia i zaniku permafrostu oraz możliwości jego przetrwania w formie reliktovej. Pozostałe obszary badań to wzniesienia w obrębie synkliny Bolmina w Górach Świętokrzyskich, na południowy zachód od Chęcin oraz osuwisko w Beskidzie Śląskim, w pobliżu wsi Cisiec w powiecie żywieckim.

Jak podano w rozprawie akwizycja danych wykorzystanych w analizach była możliwa dzięki finansowaniu z trzech grantów Narodowego Centrum Nauki lub funduszy na działalność statutową jednostki doktoranta. Dwa z wymienionych projektów związane były wprost z badaniami kriosfery, w tym permafrostu, jeden dotyczył tworzenia trójwymiarowego modelu litosfery w Polsce i weryfikacji parametrów sejsmicznych pola falowego. Z podanych informacji nie wynika, czy doktorant był oficjalnym wykonawcą grantów. Organizował lub współorganizował natomiast wszystkie z opisywanych badań terenowych.

Kluczową sprawą mającą wpływ na charakterystykę rozprawy jest także fakt, że została ona zrealizowana i przedstawiona jako cykl sześciu artykułów naukowych napisanych w języku angielskim. Wszystkie artykuły zostały poddane już wcześniej merytorycznej weryfikacji w tzw. procesie *peer review* (niezależnej oceny recenzenckiej innych naukowców), który jest fundamentem prowadzenia badań w skali międzynarodowej. Oznacza to, że ich poziom naukowy został już uprzednio oceniony jako odpowiednio wysoki, odpowiadający wymogom stawianym przez redakcje konkretnych czasopism. Wszystkie przedstawione przez doktoranta artykuły naukowe są wieloautorskie.

Formalna strona rozprawy doktorskiej

Zasadniczą częścią pracy doktorskiej Pana mgr Artura Marciniaka jest cykl sześciu artykułów naukowych (indeksowanych w rozprawie jako *paper I–VI*), raportujących oryginalne wyniki badań. Artykuły ukazały się na łamach następujących czasopism:

1. **Marciniak, A.**, Stan-Kłeczek, I., Idziak, A., & Majdański, M. (2019). Uncertainty based multi-step seismic analysis for near-surface imaging. *Open Geosciences*, 11(1), 727–737. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0057>
2. Owoc, B., **Marciniak, A.**, Dzierżek, J., Kowalczyk, S., & Majdański, M. (2019). Seismic Imaging of the Mesozoic Bedrock Relief and Geological Structure under Quaternary Sediment Cover: The Bolmin Syncline (SW Holy Cross Mountains, Poland). *Geosciences (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/geosciences9100447>
3. Glazer, M., Dobiński, W., **Marciniak, A.**, Majdański, M., & Błaszczuk, M. (2020). Spatial distribution and controls of permafrost development in non-glacial Arctic catchment over the Holocene, Fuglebekken, SW Spitsbergen. *Geomorphology*, 358. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107128>
4. Majdański, M., Dobiński, W., **Marciniak, A.**, Owoc, B., Glazer, M., Osuch, M., & Wawrzyniak, T. (2022). Variations of permafrost under freezing and thawing conditions in the coastal catchment Fuglebekken (Hornsund, Spitsbergen, Svalbard). *Permafrost and Periglacial Processes*. <https://doi.org/10.1002/ppp.2147>

5. **Marciniak, A.**, Osuch, M., Wawrzyniak, T., Owoc, B., Dobiński, W., Glazer, M., & Majdański, M. (2022). Multi-method geophysical mapping of ground properties and periglacial geomorphology in Hans Glacier forefield, SW Spitsbergen. *Polish Polar Research*, 43(2), 101–123. <https://doi.org/10.24425/ppr.2022.140363>
6. **Marciniak, A.**, Kowalczyk, S., Gontar, T., Owoc, B., Nawrot, A., Luks, B., Cader, J., & Majdański, M. (2021). Integrated geophysical imaging of a mountain landslide – A case study from the Outer Carpathians, Poland. *Journal of Applied Geophysics*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104364>

Wszystkie artykuły zostały opublikowane rozpoznawalnych wśród naukowców z dziedziny Nauk o Ziemi czasopismach branżowych. Pięć spośród tych czasopism znajduje się na liście JCR. Na tym tle wyróżnia się publikacja w „Geomorphology” – czasopiśmie oficyny wydawniczej Elsevier – które jest poczytne, często cytowane i posiada najwyższy z przywołanej listy *IF*, obecnie 4.406, przy wciąż rosnącym wskaźniku. Trzy czasopisma mają wysoką rangę w punktacji Ministerstwa Edukacji i Nauki (100 pkt.). Choć nie ma tu tytułów najwyżej punktowanych, na uwagę zasługuje fakt, że wszystkie artykuły są anglojęzyczne. Nie wydaje mi się też zasadne, aby na etapie studiów doktoranckich prestiż czasopisma musiał być sprawą kluczową, choć opinia ta będzie zapewne sporna.

Deklarowany udział doktoranta w przygotowaniu przedstawionych artykułów wynosi od 10 do 70%. Ma on najwyższy, dominujący udział w opracowaniu artykułu opublikowanego w czasopiśmie „Open Geosciences” (70%) oraz w czasopiśmie „Polish Polar Research” (50%) – zestawienie w tab. 1. poniżej.

Tabela 1. Wskaźniki bibliometryczne i deklarowany procentowy udział doktoranta w przygotowaniu opublikowanych artykułów naukowych.

Nr artykułu	Rok publikacji	<i>Impact Factor</i> czasopisma (aktualny)	Liczba punktów MEiN (aktualna)	Udział doktoranta w przygotowaniu artykułu według złożonej deklaracji [%]
1	2019	1.467	40	70
2	2019	–	70	20
3	2020	4.406	100	10
4	2022	4.262	100	20
5	2022	0.900	70	50
6	2021	1.845	100	30

Kopie opublikowanych artykułów tworzą dominującą pod względem objętości część tomu rozprawy, łącznie 94 strony. Zostały one poprzedzone syntetycznym omówieniem badań podzielonym na następujące części – *Introduction*, *Summary of the papers*, *Summary and conclusions*, *Bibliography* – mieszczącymi się na stronach 8–37. Każdy z rozdziałów podzielony został na podrozdziały. W spisie literaturowym tej części zamieszczono 82 pozycje. Tom uzupełniają pozostałe załączniki i elementy, takie jak strona tytułowa, spis treści, spis używanych akronimów, streszczenia w języku angielskim i polskim, podpisane oświadczenia o udziale autora w przygotowaniu publikacji. Cały tom zawiera się na 145 numerowanych stronach wydruku komputerowego.

Uwagi dotyczące problemu badawczego i postawionych hipotez badawczych

W rozprawie poruszono pięć głównych zagadnień. Są to:

1. Problem badań środowiskowych w odniesieniu do struktur płytkiego podłoża geologicznego
2. Zmiany wilgotności gleby i jej właściwości
3. Ograniczenia stosowania technik geofizycznych w badaniach podłoża geologicznego
4. Metody sejsmiczne w badaniach środowiskowych
5. Niepewność w obrazowaniu geofizycznym

Zagadnienia te przywołam i krótko skomentuję poniżej.

Do niewątpliwych problemów związanych z prowadzeniem rozpoznania geofizycznego podłoża geologicznego autor zalicza anizotropię, która rozumiana jest tradycyjnie jako uzależnienie otrzymywanego wyniku od kierunku prowadzonych pomiarów. W kontekście rozprawy ważny staje się jednak też czas prowadzenia pomiarów, gdy ośrodek skalny zmienia swoje właściwości w cyklu rocznym, sezonowo lub też zmienia się jego charakterystyka wskutek ogólnych zmian środowiska. Doktorant wskazuje także na ograniczoną wiarygodność próbek pobieranych w odwiertach, które nie zawsze są reprezentatywne dla całego obszaru badań. W konkluzji stwierdza, że należy opracować i prowadzić nowe podejście w zakresie pozyskiwania i przetwarzania danych.

Autor rozprawy podejmuje zagadnienie sezonowych zmian wilgotności gruntu. Choć przedstawiona problematyka bilansu wodnego jest mocno chaotyczna i trudna do zaakceptowania, nie można odmówić trafności postawionej diagnozy, że metody geofizyczne w znakomitej większości są podatne na zawartość wody w badanym ośrodku skalnym. W związku z tym metody te będą świetnie się sprawdzały wszędzie tam, gdzie zmiany nasycenia wodą gruntu są głównymi czynnikami do rozpoznania procesów geologiczno-geomorfologicznych lub są kluczem w zrozumieniu budowy geologicznej.

Wśród ograniczeń technik geofizycznych autor zauważa ogólne zasady matematyczno-statystyczne oraz te unikalne, specyficzne dla mierzonej cechy fizycznej. Krytycznym ograniczeniem jest także ilość uzyskanych danych i ich jakość. Wiąże się to bezpośrednio ze zmiennością parametrów badanych struktur podczas zbierania danych i zróżnicowaną precyzją pomiarów.

Autor w swoich badaniach wykorzystuje wiele technik badawczych, tym niemniej widać jego najmocniejsze zainteresowanie metodami sejsmicznymi, które syntetycznie scharakteryzował. Ich ograniczeniem jest wymuszony kompromis między rozdzielczością a informacją o własnościach mechanicznych badanego ośrodka skalnego. Doktorant wskazuje jednak na technikę FWI (full waveform inversion), która pozwala na znacznie bardziej szczegółową estymację prędkości fali i zwiększenie rozdzielczości obrazowania sejsmicznego, a w ogólności również na potrzebę integracji poszczególnych technik sejsmicznych.

Rozdzielczość obrazowania to jeden z aspektów problemu, jakim jest niepewność wyników. Doktorant omówił zagadnienie estymacji niepewności i wyróżnił tutaj dwa trendy. Pierwszy z nich dotyczy spadku rozdzielczości obrazowania wraz z głębokością pomiaru i wzrostem niepewności wyników, drugi lepszej interpretacji dla obszarów silniej pokrytych danymi pomiarowymi. Autor

rozprawy proponuje, aby niepewności traktować więc jako parametr wyznaczający, czy też ograniczający przestrzeń rozwiązań dla każdej z przyjętej później metody interpretacji geofizycznej. Ma to szczególne znaczenie przy obrazowaniu sejsmicznym struktur zmieniających swoje właściwości, np. zależnych od wody czy jej temperatury, jak warstwa czynna permafrostu.

Za hipotezę badawczą złożonej rozprawy, choć nie wyrażoną wprost, uznać należy możliwość stosowania nieinwazyjnych metod geofizycznych i szacowanie zmian stanu podłoża w warunkach zmian środowiskowych, związanych przede wszystkim z czynnikami klimatycznymi, a w domyśle z ich wpływem na warunki hydrogeologiczne. Autor testuje hipotezę przez integrowanie metod geofizycznych w celu rozwiązania następujących problemów badawczych:

1. Analiza sejsmiczna oparta na niepewności dla obrazowania płytkiej budowy geologicznej.
2. Efektywne wykorzystanie analizy opartej na niejednoznaczności w obrazowaniu podpowierzchniowym.
3. Zastosowanie tomografii elektrooporowej (ERT) i wielokanałowej analizy fal powierzchniowych (MASW) do wstępnego rozpoznania rozwoju wieloletniej zmarzliny na SW Spitsbergenie.
4. Obrazowanie sezonowej ewolucji wieloletniej zmarzliny w zlewni przybrzeżnej na SW Spitsbergenie.
5. Zastosowanie metod geofizycznych w rozpoznawaniu własności gruntu i geomorfologii peryglacjalnej na SW Spitsbergenie.
6. Zintegrowane obrazowanie geofizyczne osuwiska górskiego w południowej Polsce.

Wszystkie z wymienionych problemów badawczych uznaję za istotne i warte podjęcia. Poniżej odniosę się do nich zgodnie z przyjętą wyżej kolejnością i zebranymi w rozprawie artykułami. Moje uwagi, z racji wykształcenia i zainteresowań badawczych dotyczyć będą, tak jak i w pozostałej części pracy, głównie interpretacji środowiskowych uzyskiwanych modeli.

Autor rozprawy postawił sobie za cel opracowanie metodyki badań podłoża geologicznego, która będzie integrować wiele metod geofizycznych. Metodyka ta opiera się na wieloetapowej analizie sejsmicznej z wykorzystaniem informacji o niepewności poszczególnych metod (MASW, SRT, RI), gdzie dane uzyskane mniej precyzyjnymi metodami są wykorzystywane w kolejnych etapach przetwarzania przy użyciu bardziej precyzyjnych technik. Ta część pracy, zawarta w pierwszym z prezentowanych artykułów, stanowi wprowadzenie i podstawę do metodyki stosowanej i rozwijanej w reszcie studiów przypadków prezentowanych w rozprawie. Bez wątpienia jest to też publikacja, w której najłatwiej wskazać samodzielne osiągnięcie naukowe doktoranta.

Wypracowana metodyka posłużyła w pierwszej kolejności do zobrazowania utworów mezozoicznych synkliny Bolmina w Górach Świętokrzyskich. Praca ta wpisuje się w długoletnie badania geologiczne południowego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich (prace E. Stupnickiej, 1971), nastawione m.in. na rozpoznanie struktur fałdowych skał mezozoicznych i lokalnych uwarunkowań tektonicznych. Rozpoznanie starszego podłoża geologicznego utrudnia miększa seria osadów czwartorzędowych, w tym piasków fluwioglacjalnych i lessu oraz mała ilość głębokich otworów wiertniczych, zwłaszcza na wzniesieniach terenowych.

Dalsze badania geofizyczne według przyjętej metodyki prowadzono na obszarze spitsbergeńskiej zlewni Fugle. Przedmiotem badań stało się przemarznięte podłoże i warstwa czynna, a rozpoznanie

struktur podłoża prowadzono w mocno zróżnicowanym genetycznie środowisku tego obszaru (pokrywy stokowe, utwory morenowe, osady plażowe wyniesionych teras morskich, wychodnie skalne, wszystkie te powierzchnie w różnym stopniu zawodnione w zależności od konfiguracji terenu i poddane procesom mrozowym o różnej specyfice). W tym przypadku integrowano pomiary elektrooporowe i sejsmiczne. Podjętą tematykę uważam za istotną i odkrywczą, i to nie z tego względu, że sam się dokładnie takim tematem zajmuję. Ma ona fundamentalne znaczenie dla prognozowania dalszych przekształceń środowiska w strefie wybrzeży Arktyki oraz funkcjonowania infrastruktury posadowionej na permafroście strefy brzegowej wysokich szerokości geograficznych. Doktorant, jako współautor artykułu, poruszył zagadnienie występowania intruzji morskiej w głąb lądu na wybrzeżach Arktyki, które do niedawna nie było szerzej rozpoznane, a istniejące schematy rozwinienia permafrostu zbyt uproszczone, w niektórych przypadkach po prostu błędne i w tej postaci przerysowywane / powtarzane w innych pracach (tutaj warto porównać prace hydrogeologiczne tworzone na podstawie badań w okolicach Longyearbyen (np. Liestøl 1975, Haldorsen et al. 2010, Ploeg et al. 2012). Rozpoznanie geofizyczne przemarzniętego podłoża w zlewni Fugle kontynuowano przy pomocy metod ERT i MASW, dysponując już także wynikami monitoringu termicznego gruntu. Obserwowano różną reakcję podłoża na zjawiska mrozowe w zależności od cech osadów. Trzecia publikacja opracowana na podstawie danych zebranych w rejonie Hornsundu przedstawia szczegółowe obrazy polodowcowych i peryglacialnych form terenu uzyskane przez połączoną interpretację trzech metod geofizycznych: ERT, GPR (ground penetrating radar) i SRT (seismic refraction tomography). Pomiary geofizyczne prowadzono wzdłuż wyjątkowo długiego (1,5 km długości) profilu w strefach odmiennych od siebie pod względem procesów rozmarzania i zamarzania warstwy czynnej.

Wypracowaną metodę badawczą autor rozprawy zastosował także w badaniach, które dotyczyły osuwiska na obszarze górskim. Posłużyła ona do identyfikacji nieciągłości zarówno w ciele skalnym tworzącym przemieszczony grawitacyjnie materiał koluwalny, jak i w masywie skalnym pod powierzchnią odkucia. Możliwe stało się zidentyfikowanie głębokości, na jakiej występuje powierzchnia poślizgu. Teren badań wykorzystywany jest jako stok narciarski, stąd aktywizacja osuwiska, jak przyznaje sam autor rozprawy, ma związek bardziej z bezpośrednim oddziaływaniem człowieka (antropopresją), niż z długofalowymi zmianami klimatu, które stanowią temat przewodni sugerowany w pierwszej części rozprawy.

Uwagi dotyczące metodyki badań i etapów ich realizacji

Podstawą warsztatu badawczego doktoranta jest zastosowanie metod geofizycznych w badaniach struktur płytkiego podłoża geologicznego oraz autorska ścieżka przetwarzania danych pomiarowych. Do najmocniejszych stron tego postępowania należy integracja metod geofizycznych, w najszerszym zakresie metod sejsmicznych. Zagadnienie to nie jest powszechnie stosowane, a duża część publikacji opiera się na wykorzystaniu jednej metody geofizycznej lub zawiera interpretację uzyskanych wyników pozbawioną należytej dyskusji o możliwych błędach i niepewnościach. Z drugiej strony zagadnienia te są także przedmiotem rozważań innych geofizyków i prace w tym zakresie nietrudno odnaleźć w bazach bibliograficznych. Wiele z tego typu postępowań analitycznych i rozwiązań inwersyjnych prowadzi się przy okazji studiów nad konkretnymi problemami środowiskowymi i z reguły mają one postać eksperymentalną. Sprawia to, że wypracowana metodyka jest często trudna

do powtórzenia, np. z uwagi na brak komplementarnych danych wejściowych, niewystarczający opis postępowania czy inne ograniczenia.

Doświadczenie zebrane przez autora pozwoliło mu na sformułowanie kilku rekomendacji, pomocnych w obrazowaniu geofizycznym płytkiego podłoża geologicznego. Zalicza się do nich: (a) stosowanie możliwie gęstej akwizycji danych, (b) umiejętne przetwarzanie danych uzyskiwanych w pomiarach sejsmicznych ma potencjał do wypełnienia luki między rozdzielczością a estymacją pomiarów geomechanicznych ośrodka skalnego, (c) w podejściu „wielometodowym” musi być zachowana odpowiednia kolejność w stosowaniu technik geofizycznych, aby wyniki były odpowiednio rewidowane i łatwo integrowane, (d) podejście „wielometodowe” w obrazowaniu sejsmicznym pozwala na pominięciu ograniczeń, które czynią metody RI (reflection imaging) nieprzydatnymi w badaniach przypowierzchniowych, (e) zbiory danych muszą być weryfikowane ze znanymi informacjami *a priori*, (f) w przypadku występowania czynników sezonowo wpływających na stan podłoża geologicznego, wyniki muszą być przedstawione z szacowaną niepewnością, (g) należy zwrócić uwagę, że zmiany środowiskowe mogą znacząco wpływać na mierzone parametry fizyczne, najlepiej przez podejście „wielometodowe” oraz *time lapse*.

Nie wnoszę krytycznych uwag w odniesieniu do zaproponowanej i stosowanej przez doktoranta procedury badawczej. Będzie ona zapewne poddana bardziej wnikliwej ocenie przez pozostałych recenzentów specjalizujących się w teorii pomiarów geofizycznych. W przypadku pierwszej z prezentowanych publikacji (Marciniak et al. 2019), która ma cechy opracowania metodycznego, muszą jednak zauważyć pewien mankament polegający na braku bezpośredniego odniesienia uzyskanych wyników do budowy geologicznej. Moim zdaniem praca tego typu mogłaby się kończyć ścisłą korelacją z danymi geologicznymi. Tutaj jednak wkrada się kolejne zagadnienie dotyczące jakości informacji geologicznych pozyskiwanych z wierceń, niejednokrotnie odbiegającej od oczekiwań i mocno uzależnionej od kompetencji osób prowadzących wiercenia. W przypadku obrazowania geofizycznego nie można pominąć także nakładów czasu i kosztów potrzebnych do uzyskania zadowalającego wyniku. Być może w niektórych przypadkach uproszczenie procedur, a nie ich złożoność będzie bardziej uzasadnione, co pozostawiam pod niezobowiązującą dyskusję.

Uwagi dotyczące uzyskanych wyników, ich interpretacji i wniosków końcowych

Zapoznałem się z wszystkimi przedstawionymi do recenzji artykułami naukowymi, niektóre z nich przeczytałem zresztą bezpośrednio po ich opublikowaniu. Szczególnie zainteresowały mnie artykuły dotyczące permafrostu, ponieważ podejmowana tematyka pokrywa się z moimi zainteresowaniami badawczymi. W mojej ocenie zaprezentowane wyniki są wartościowe i ważne. Co ważne problem oceny wkładu naukowego autora rozprawy do prac wieloautorskich rozwiązuje tu sporządzony przez niego rozdział rozprawy „The scientific contribution of the presented research”. Aby nie poprzestać na ogólnych stwierdzeniach i włożyć nieco polemiki do prezentowanych osiągnięć, poniżej wymienię kilka mniej lub bardziej krytycznych spostrzeżeń.

Doktorant pisze, że dostarczył dowody, że zmiany termiki podłoża na wybrzeżu Spitsbergenu sięgają głębiej pod powierzchnię terenu niż dotychczas sądzono, nawet do 40 m p.p.t. pod wpływem perkolacji wody. Trudno się niestety zgodzić z prezentowaną przy tej okazji opinią, jakoby zmiany

temperatury gruntu według wcześniejszej wiedzy miały ograniczać się do warstwy czynnej nad permafrostem. Podejrzewam, że jest to skrót myślowy związany ze zobrazowaniem nieoczekiwanego dla doktoranta głębokiego rozmarznięcia podłoża w strefie podstokowej masywu Arie–Fuggle. Zmiany termiki podłoża w cyklu rocznym zostały na Spitsbergenie dokładnie rozpoznane w głębokich otworach wiertniczych (także chodnikach kopalni węgla kamiennego), co opisują klasyczne prace dotyczące zmarzliny regionu Svalbardu i Skandynawii, np. Sollid et al. (1951) – *Deep permafrost boreholes in western Svalbard...*, Harris et al. (2009) – *Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling...* Nawet bez silnego oddziaływania wody, zmiany roczne termiki gruntu, uzależnione od wymiany ciepła z atmosferą, sięgają 15–20 m pod powierzchnię terenu, a zmiany temperatury powierzchni o dłuższej okresowości przenikają znacznie głębiej i mogą być czynnikiem wpływającym na spąg permafrostu i zmianę jego położenia. Analizowaliśmy tę sytuację z prof. Dobińskim w publikacji wydanej na początku tego roku – *Permafrost base degradation: characteristics and unknown thread...* (Dobiński, Kasprzak 2022). Także koncentracja wody w takiej sytuacji morfologicznej jak podnóże stoków, choć faktycznie nie obrazowana wcześniej na Svalbardzie, wynika z prostych i ogólnie znanych modeli hydrogeologicznych, opracowywanych dla obszarów górskich w innych częściach świata, w tym w Polsce (np. Marszałek 2007 – Kształtowanie zasobów wód podziemnych w rejonie Kotliny Jeleniogórskiej). Nie mogę się także zgodzić ze stwierdzeniem zawartym przy tej okazji, że podłoże geologiczne Arktyki jest bardziej podatne na zmiany klimatu niż w innych regionach świata. Traktuję je jako kolejny, niepotrzebny skrót myślowy. Zmiany charakterystyki składników klimatu są w Arktyce szybsze niż w innych częściach świata, m.in. za sprawą tzw. *Arctic amplification* (wzmocnienia arktycznego), jednak nie ma to związku z samą podatnością gruntu na zmiany własności fizycznych, tym bardziej że efekty działania procesów geologiczno-geomorfologicznych na powierzchni terenu w różnych warunkach klimatycznych trudno ze sobą porównywać.

Wkładem autora w rozwój prezentowanych badaniach jest rozpoznanie struktur polodowcowych i peryglacjalnych w zlewni Fugle i na przedpolu Hansa. Są to bezpośrednie okolice Polskiej Stacji Polarnej, jednak w opinii recenzenta obszar ten jest wyjątkowo niewdzięczny do prowadzenia obrazowania geofizycznego. Rozpoznanie struktur podłoża utrudnia znaczne urozmaicenie budowy geologicznej, zarówno w sensie petrograficznym jak i tektonicznym, gdzie dominują różnego rodzaju skały metamorficzne, w tym łupki wykazujące anizotropowość. Powierzchnię glaciostatycznie podnoszonego wybrzeża pokrywają osady o różnej genezie, w tym osady morskie deponowane w warunkach urozmaiconej linii brzegowej, częściowo przykryte osadami stokowymi oraz utworami morenowymi i sandrowymi. Osady te nie tworzą ciągłych pokryw, ponieważ spod nich wystają silnie spękane skały litego podłoża, genetycznie – paleoskizery. W takich warunkach rozpoznawanie takiego elementu, jak termika podłoża jest po prostu trudna.

W przedstawionym materiale najbardziej intryguje mnie interpretacja pomiarów przeprowadzonych przez morenę boczną lodowca Hansa w publikacji Marciniak et al. 2022. Na rycinie interpretacyjnej (Fig. 9 artykułu), prawdopodobnie silnie wzorowanej wynikami pochodzącymi z pomiarów GPR (Fig. 7 artykułu), zaznaczono jądro lodowe moreny oddzielone od przemarzniętego podłoża warstwą nieprzemarzniętych (?) osadów. Osobiście spodziewałbym się jedności w pionowym profilu termicznym między jądrem lodowym moreny a przemarzniętym podłożem, tak jak sugeruje to pole o ekstremalnie wysokich opornościach na modelu ERT. W innym wypadku w strefie dolnego załomu stoku moreny spodziewałbym się ciągu wysięków i wypływów wód podziemnych. Strefa ta jest co prawda silnie zawodniona, ale wodami ablacyjnymi z powierzchni moreny i wodami spływającymi ze

strony stoku Fugle. Czy to może ich termiczne oddziaływanie sięga zgodnie z nachyleniem terenu pod całą powierzchnię moreny? Niestety koncepcję tę wyklucza chyba model inwersyjny ERT. A może jest to odbicie sygnału GPR od powierzchni litej skały, której przedłużeniem byłby pas szkieł wychodzących w Isbjørnhamn (Zatokę Białego Niedźwiedzia)? Obraz uzyskany w wyniku badań sejsmicznych nie pozwala niestety na weryfikację przedstawionych założeń. Mimo to profil ten jest świetnym przykładem badań „wielometodowych” i obiektem do potencjalnej dyskusji.

Jednym z artykułów przyciągających moją szczególną uwagę jest publikacja Glazer et al. (2020) – *Spatial distribution and controls of permafrost development...* Ponieważ był on przedmiotem osobnej recenzji dorobku dr Michała Glazera, sparafrazuję tutaj kilka moich wcześniejszych uwag. Na podstawie wykonanej kampanii pomiarowej dobrze rozpoznano warstwę czynną, wskazując na głębokie tajanie podłoża do 4 m p.p.t. Wyniki analizy MASW (multichannel analysis of Surface wave) zestawiono z modelami inwersyjnymi ERT dla sekcji przebiegających po powierzchni wyniesionych teras morskich. Umożliwiło to wyłączenie z modeli inwersyjnych partii, za których powstanie odpowiedzialne były zbyt skomplikowane warunki geologiczne przy powierzchni terenu. Udowodniono, że wraz z oddalaniem się od brzegu morskiego permafrost cechują coraz wyższe oporności. Sformułowano hipotezy, że wynika to albo z transgresji morskiej, albo z działalności wód ablacyjnych lodowca Hansa, skutkującymi przemieszczeniem sedymentu i usunięciem drobniejszej frakcji. Dotyczy to zewnętrznego odcinka najdłuższego z analizowanych profili, znajdującego się w zasięgu wąskiego (50–100 m) sandru rozwiniętego wzdłuż moreny końcowej lodowca Hansa. Proszę zauważyć, w kontekście stawianych tez, że jest on elementem stosunkowo młodym w morfologii obszaru i powstał współcześnie do formowania moreny końcowej lodowca Hansa w LIA. Badania ERT opublikowane niedawno (Kasprzak 2020) pokazują podobną sytuację na podłożu skał litych, jest więc to temat do dalszej dyskusji i być może struktura podłoża nie będzie tu czynnikiem tak decydującym jak oddalenie od morza czy pośrednio wiek wyniesienia powierzchni terasy morskiej.

Sprawą dyskusyjną pozostaje wyznaczenie zasięgu przestrzennego stropu (*table*) i spągu (*base*) permafrostu w strefie brzegu morskiego. Z uwagi na oczywiste ograniczenia powodowane prowadzeniem pomiarów wyłącznie na lądzie, granicę tę autorzy prowadzą hipotetycznie, wskazując możliwość występowania permafrostu podwodnego – w głębszych poziomach podłoża pod dnem morskim. Na temat tego podejścia do problemu chętnie dyskutuję ze wszystkimi autorami artykułu. Jak dotąd nie przedstawiono dowodów na istnienie permafrostu podwodnego SW wybrzeży Spitsbergenu, nie licząc kalkulacji Werenskiolda z 1922 r., która jest niezgodna z tworzonymi później modelami termicznymi (Kristensen et al. 2008).

Badania na obszarze Polski wpisują się w podstawowe zadania geofizyki geologicznej. Jak wyczytałem na stronach internetowych Narodowego Centrum Nauki, osuwisko w Cisnej jest przedmiotem większego, aktualnego projektu Preludium pt. „Czynniki antropogeniczne wpływające na wyzwalanie osuwisk w środowisku zmodyfikowanym w wyniku zmian klimatu – badania geofizyczne”, którego kierownikiem jest autor rozprawy. Podaję tę informację jako przeciwwagę dla braku danych o własnych projektach badawczych doktoranta. Prezentowany w rozprawie artykuł (Marciniak et al. 2022 – *Integrated geophysical imaging of a mountain landslide...*) dostarcza informacji na temat złożonej struktury osuwiska i pozwala na identyfikację powierzchni poślizgu mas skalnych.

Chciałbym jednak zwrócić jeszcze uwagę na interpretację obrazowania geofizycznego prowadzonego dla synkliny Bolmina w Górach Świętokrzyskich. Sugeruję zrewidować pogląd o spłaszczeniu

powierzchni skał jurajskich w wyniku mniejszej lub większej działalności morfotwórczej lądolodu skandynawskiego (w oryginale autor posługuje się terminem *glacier*, lepiej *icesheet*). Obecna morfologia wzgórz ma zdecydowanie założenie strukturalne, a takie elementy tektoniki fałdowej jak synkliny i antykliny są naturalnie silniej spękanе i uszczelinione, tym samym narażone na procesy niszczące i ostatecznie na szybszą denudację niż sąsiednie elementy fałdowe / tektoniczne. W przypadku wychodni skał wieku górn jurajskiego procesy denudacyjne trwały miliony lat (koniec górnej jury przypada na 145 mln lat wstecz), a efekty działalności lądolodu można traktować za ledwie jako makijaż w rzeźbie terenu. Tym bardziej, że mowa o południowej Polsce, gdzie miąższość lądolodu skandynawskiego w jego maksymalnym plejstoceniowym zasięgu była stosunkowo niewielka. Niestety nadinterpretacje czy też błędne moim zdaniem wyobrażenie o morfotwórczej działalności lodowców znajdowałem także w artykułach dotyczących Spitsbergenu, jak np. przeświadczenie spychaniu materiału morenowego przez lodowiec (lodowiec nie pracuje jak spychacz). Nawet tzw. *push moraines* – po polsku moreny z wyciśnięcia – powstają wskutek plastycznego odkształcenia podłoża poddanego oddziaływaniu masy lodu znajdującego się w sąsiedztwie. W związku z wieloautorskim charakterem artykułów nie mam jednak podstaw, aby obarczać tym zarzutem autora tej rozprawy.

Uwagi dotyczące konstrukcji rozprawy

Konstrukcja rozprawy scharakteryzowana została ogólnie już w rozdziale pt. „Formalna strona rozprawy doktorskiej”. Jest ona poprawna. Przyjęta forma rozprawy jako komentarz do zbioru opublikowanych artykułów pozostawia niedosyt pewnych informacji. Należy jednak pamiętać, że zadaniem tego opisu nie jest wyczerpanie wszystkich informacji pojawiających się w załączonych publikacjach.

Z uwagi na oczywiste uwarunkowania, nie podejmuję się jednoznacznej oceny stylu wypowiedzi autora rozprawy i autorów załączonych publikacji w języku angielskim. Nie jestem *native speakerem*, a co ważniejsze, teksty te podlegały wcześniejszym recenzjom i korektom redakcyjnym. W mojej opinii tekst komentarza mógłby być natomiast z powodzeniem krótszy po wyeliminowaniu zbędnych powtórzeń i jeszcze lepiej zrozumiały, gdyby wyrugować skróty myślowe autora, o których wspominałem wcześniej. Nawiązania do uwarunkowań klimatycznych i hydrologicznych też wymagałyby uporządkowania i korekty merytorycznej.

Nie byłbym sobą, gdybym nie poruszył zagadnienia typografii tekstu. Uważam, że jest to ważne dla naukowców mających ciągły kontakt ze słowem pisanym. W pracach geofizycznych często podajemy zakresy liczb, np. „10–20”. Poprawny zapis, jak po lewej, prowadzi się z półpauzą, ewentualnie pauzą, a nie dywizem (krótszym znakiem). Jest to oczywiście drobiazg, nie stanowiący meritum recenzji i nie mający znaczenia dla dobrego wrażenia dokonanego składu tekstu, ale może za to przydatny w dalszej pracy naukowej.

Konkluzja

Przechodząc do zakończenia recenzji, chciałbym stwierdzić, że mimo podnoszonych wątpliwości i wątków dyskusyjnych, rozprawa doktorska pana mgr Artura Marciniaka zawiera istotny wkład badawczy w rozwój obrazowania geofizycznego, w rozpoznanie obszarów występowania

permafrostu i poznanie jego struktury oraz ogólnie pojmowaną geofizykę geologiczną. Oceny przedstawionego dorobku doktoranta nie ułatwia fakt, że rozprawa zbiera wyłącznie publikacje wieloautorskie. Taki jest jednak trend w nauce, z reguły zresztą konieczny do wytworzenia wartościowego wyniku. Tym niemniej doktorant starał się jasno w komentarzu do artykułów sygnalizować, gdzie występowała granica między dorobkiem własnym i wkładem współautorów opublikowanych artykułów. Być może było to też jedną z największych trudności przy tworzeniu końcowej wersji rozprawy.

Bez wątpliwości niemożliwe byłoby otrzymanie i zaprezentowanie wyników badań bez umiejętności analitycznych i biegłości w posługiwaniu się metodami geofizycznymi doktoranta. Wyrażam dla tych umiejętności duży szacunek i cieszę się z rozwoju tego kierunku badań w Polsce. Być może wypracowane umiejętności pozwolą w przyszłości na stworzenie skryptów czy wręcz autorskiego oprogramowania podnoszącego jakość standardowo wykonywanych obrazowań. Doktorant jest jedną z niewielu osób w Polsce, która ma ku temu odpowiednie predyspozycje – wiedzę teoretyczną i praktykę.

Zwracam uwagę, że publikacje włączone w cykl niniejszej rozprawy nie stanowią całego dorobku publikacyjnego doktoranta. Ma on na swoim koncie także inne recenzowane artykuły naukowe oraz rozszerzone abstrakty konferencyjne. Udanie aplikuje także o granty badawcze (wspomniany projekt Preludium). Uważam, że cały przedstawiony obraz jego dorobku wystarczająco potwierdza wiedzę geofizyczną i umiejętności badawcze.

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska Pana mgr. Artura Marciniaka pt. „Uncertainty-driven geophysical imaging in environmental studies” wykonanej pod kierunkiem dr. hab. Mariusza Majdańskiego w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim z uwzględnieniem kryteriów wskazanych w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 Nr 65 poz. 595 z późn. zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie pracy do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Autorowi rozprawy gratuluję zakończenia tego etapu procesu naukowego, życzę udanej publicznej obrony rozprawy i realizacji dalszych planów.

Signed by /
Podpisano przez:

M. Kasprzak
Marek Marcin
Kasprzak
Uniwersytet
Wrocławski

Date / Data:
2022-11-30 15:51

M. Kasprzak

