

Dr hab. inż. Stanisław Lewiński, prof. CBK PAN
Zakład Obserwacji Ziemi
Centrum Badań Kosmicznych PAN
ul. Bartycka 18A
00-716 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Macieja Adamiaka

nt. „Wykorzystanie technik uczenia maszynowego i teledetekcji do wspomaganie interpretacji przestrzeni geograficznej”

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. UŁ

Promotor pomocniczy: dr Anna Majchrowska

1. Podstawa formalno-prawna

Podstawą formalno-prawną przygotowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr Macieja Adamiaka na temat: „Wykorzystanie technik uczenia maszynowego i teledetekcji do wspomaganie interpretacji przestrzeni geograficznej” jest uchwała Komisji Uniwersytetu Łódzkiego ds. stopni naukowych w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku, podjęta na posiedzeniu w dniu 15 marca 2022 oraz umowa na jej wykonanie.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr Macieja Adamiaka nt. „Wykorzystanie technik uczenia maszynowego i teledetekcji do wspomaganie interpretacji przestrzeni geograficznej” została wykonana pod opieką naukową promotora dr hab. inż. Krzysztofa Będkowskiego oraz promotora pomocniczego dr Anny Majchrowskiej.

Rozprawa jest cyklem spójnych tematycznie publikacji. Składa się z pięciu artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych znajdujących się na liście Ministerstwa Edukacji i Nauki z oceną rankingową 100 i 70 punktów:

1. Krysiak S., Papińska E., Majchrowska A., **Adamiak M.**, Koziarkiewicz M. (2020). Detecting Land Abandonment in Łódź Voivodeship Using Convolutional Neural Networks. *Land*, 9(3), 82. <https://doi.org/10.3390/land9030082>, MEiN: 70, IF'20: 3,398, CiteScore'20: 3.0.
2. **Adamiak M.**, Biczkowski M., Leśniewska-Napierała K., Nalej M., Napierała T. (2020). Impairing Land Registry: Social, Demographic, and Economic Determinants of Forest Classification Errors. *Remote Sensing*, 12(16), 2628, <https://doi.org/10.3390/rs12162628>, MEiN: 100, IF'20: 4.848, CiteScore'20: 6.6.

3. **Adamiak M.**, Jażdżewska I., Nalej M., (2021).
Analysis of Built-Up Areas of Small Polish Cities with the Use of Deep Learning and Geographically Weighted Regression.
Geosciences, 11(5), 223, <https://doi.org/10.3390/geosciences11050223>,
MEiN: 70, CiteScore'21: 3,4.
4. **Adamiak M.**, Będkowski K., Majchrowska A., (2021).
Aerial Imagery Feature Engineering Using Bidirectional Generative Adversarial Networks: A Case Study of the Pilica River Region, Poland.
Remote Sensing, 13(2), 306, <https://doi.org/10.3390/rs13020306>,
MEiN: 100, IF'20: 4.848, CiteScore'21: 6,9.
5. **Adamiak M.**, (2021).
Głębokie uczenie w procesie teledetekcyjnej interpretacji przestrzeni geograficznej przegląd wybranych zagadnień.
Czasopismo Geograficzne, 92(1), 49, <https://doi.org/10.12657/czageo-92-03>,
MEiN: 70.

Publikacje tworzące cykl, poza ostatnią, powstały w ramach współpracy trzech lub pięciu osób. Na podstawie oświadczeń współautorów oraz informacji zawartych w opublikowanych tekstach można stwierdzić, że udział doktoranta w ich powstaniu był kluczowy. Uczestniczył w sformułowaniu koncepcji, metodyki, opracowywał oprogramowanie, przeprowadzał obliczenia i analizę wyników. Z punktu widzenia tytułu rozprawy doktorskiej szczególnie istotne jest zaangażowanie związane z opracowaniem koncepcji i metod uczenia maszynowego Deep Learning. W tym zakresie rola doktoranta była podstawowa, jedynie w przypadku drugiego artykułu jeden ze współautorów, również uczestniczył w pracach nad oprogramowaniem.

W ramach części opisowej rozprawy doktorskiej przedstawiony jest spis publikacji tworzących cykl, wprowadzenie w temat, problemy badawcze które należało rozwiązać oraz charakterystyka zastosowanych w tym celu metod. Po prezentacji wyników zamieszczonych w publikacjach przedstawiona jest dyskusja i wnioski końcowe.

3. Ocena istotności i celowości podjętego tematu

Zgodnie z tytułem rozprawy problemem badawczym cyklu artykułów jest ocena przydatności modeli uczenia maszynowego opartych na głębokich sieciach neuronowych w badaniach i interpretacji przestrzeni geograficznej.

Temat ten ze względu na nieustannie postępujący rozwój metod obliczeniowych jest niezmiernie istotny, zarówno pod względem rozwoju zaawansowanych algorytmów programistycznych jak również ich zastosowaniu w badaniach środowiskowych. Podjęta tematyka potwierdza potrzebę prowadzenia interdyscyplinarnych badań i prac w zakresie przetwarzania danych obrazowych, satelitarnych i lotniczych.

Realizując cel pracy, doktorant zdefiniował sześć pytań badawczych, na które starał się odpowiedzieć prezentując wyniki opublikowane w pięciu artykułach tworzących cykl publikacyjny rozprawy:

1. W jaki sposób przebiega nadzorowana klasyfikacja i segmentacja, prowadzona w ramach wybranej przestrzeni geograficznej, której reprezentacją w procesie analitycznym jest obraz cyfrowy uzyskany metodami teledetekcyjnymi?

2. Czy informacje, dotyczące cech badanej przestrzeni geograficznej przechowywane w warstwach spłotowej sieci neuronowej, umożliwiają prowadzenie analizy zjawisk zachodzących w tej przestrzeni?
3. Czy istnieje możliwość zastosowania rezultatów otrzymanych przy pomocy metod głębokiego uczenia, jako danych wejściowych, klasycznych algorytmów analizy przestrzennej, w tym analizy skupień?
4. W jakim stopniu analiza przestrzeni geograficznej może być prowadzona w oparciu o uczenie nienadzorowane?
5. Czy możliwe jest zaprojektowanie sieci neuronowej pozwalającej na zapis cech przestrzennych w postaci dopuszczającej przeprowadzenie z ich udziałem analizy skupień i nienadzorowanego podziału przestrzeni geograficznej na odrębne, jednorodne fragmenty?
6. Czy jakość opracowanej metody może być weryfikowana na podstawie procesu rekonstrukcji, polegającego na porównaniu prawdziwych próbek do ich sztucznie wytworzonych odpowiedników?

Postawione pytania są zasadne i istotne gdyż dotyczą nowych i jeszcze niestosowanych powszechnie metod analizy danych satelitarnych i lotniczych. Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają na pozytywną odpowiedź na wszystkie zdefiniowane pytania.

4. Charakterystyka i ocena cyklu publikacji

Tematem publikacji 1 "Detecting Land Abandonment in Łódź Voivodeship Using Convolutional Neural Networks" jest rozpoznanie odłogów w województwie łódzkim. Przedstawiono metodę identyfikacji na zdjęciach satelitarnych Sentinel-2 terenów gruntów porolnych, a następnie analizę uzyskanych wyników z punktu widzenia ich przestrzennego występowania.

Zdjęcia satelitarne analizowano z zastosowaniem podejścia nadzorowanego, stosując w tym celu specjalnie zaprojektowaną sieć Convolutional Neural Network. Zaimplementowano podejście polegające na określeniu stopnia występowania odłogów w zdefiniowanej siatce o wielkości pojedynczego elementu 15-25 ha. Jako źródło danych referencyjnych wykorzystano lotniczą ortofotomapę oraz wyniki badań terenowych.

Sklasyfikowane zostały zdjęcia Sentinel-2 z lat 2015-2019, dla których stopień pokrycia chmurami nie przekraczał 5%. Spośród wszystkich kanałów spektralnych wybrano kanały 2, 3, 4 oraz 8 o rozdzielczości przestrzennej 10 m, w których są rejestrowane obrazy odpowiednio w zakresie promieniowania niebieskiego, zielonego, czerwonego oraz bliskiej podczerwieni.

W artykule przedstawiony jest sposób postępowania, architektura opracowanej sieci, zastosowane narzędzia programistyczne i biblioteki uruchamiane z poziomu języka Python. Wyniki klasyfikacji w pełni potwierdziły skuteczność i zasadność przyjętego sposobu postępowania.

W publikacji 2 "Impairing Land Registry: Social, Demographic, and Economic Determinants of Forest Classification Errors" podjęto próbę określenia wpływu czynników społecznych, demograficznych oraz ekonomicznych na powstawanie różnic w identyfikacji terenów leśnych w ewidencji gruntów oraz na podstawie danych satelitarnych. Badania przeprowadzono na powierzchni całego kraju. Jako źródło danych referencyjnych modelu uczenia maszynowego zastosowano bazę danych BDOT10k. Utworzony model posłużył do klasyfikacji lasów na podstawie zdjęć Sentinel-2 zarejestrowanych w roku 2018.

Podobnie jak w przypadku pierwszej publikacji wykorzystano 4 kanały spektralne o wielkości piksela 10 m. Identyfikację powierzchni leśnych wykonano analizując fragmenty zdjęć o wielkości

256x256 pikseli a uzyskane wyniki zostały zagregowane do poziomu gmin. Dalsze analizy wykonano poprzez porównanie wyników klasyfikacji z danymi pozyskanymi na podstawie ksiąg wieczystych. Przeprowadzono ocenę źródeł błędów, które występują w ewidencji gruntów. Analizy te wykonano metodami niezwiązanymi z uczeniem maszynowym.

W ramach przeprowadzonych prac zdefiniowano strukturę sieci analizującej dane satelitarne. Określono m.in. jej głębokość oraz liczbę filtrów spłotowych działających w poszczególnych warstwach. Zadaniem przygotowanej sieci była segmentacja treści zdjęcia satelitarnego w celu uzyskania informacji o przebiegu granic lasów. Publikacja zawiera wiele interesujących i istotnych informacji o technikach głębokiego uczenia oraz o sposobie doboru parametrów sieci o architekturze U-Net.

Publikacja 3 „Analysis of Built-Up Areas of Small Polish Cities with the Use of Deep Learning and Geographically Weighted Regression”, przedstawia wyniki zastosowania sieci neuronowych do segmentacji i klasyfikacji zabudowy na zdjęciach Sentinel-2. Uzyskane wyniki pozwoliły na wykonanie szeregu analiz mających na celu określenie wpływu wybranych czynników społeczno-ekonomicznych na udział obszarów zabudowanych na obszarze zabudowy miejskiej. Stosując metody analizy regresyjnej, na przykładzie 665 małych miast w Polsce prześledzono zmiany zachodzące w zabudowie w latach 2015-2019. W pracy obok zdjęć satelitarnych wykorzystano jako dane referencyjne bazę danych BDOT oraz Bank Danych Lokalnych GUS.

Tym razem zastosowano architekturę głębokiej sieci neuronowej DeepLabV3+. Sieć trenowana była na przykładzie fragmentów zdjęć o wymiarach 256x256 pikseli z kanałów spektralnych o rozdzielczości przestrzennej 10 m. Dodatkowo w celu zwiększenia liczebności zbioru treningowego wycinki te poddawane były losowym przekształceniom polegającym na obracaniu i rozciąganiu. Pozwoliło to na istotną poprawę uzyskanych wyników. Opracowany model został zaimplementowany z wykorzystaniem języka programowania Python oraz bibliotek Tensorflow i Keras. W czasie prac badawczych testowano również sieci U-Net, FPN i PSPNet. Trening został przeprowadzony na podstawie zdjęć Sentinel-2 zarejestrowanych w roku 2015 w okresie od 1 kwietnia do 30 września. Dokładność uzyskanych wyników klasyfikacji przedstawiono wykorzystując w tym celu miarę F1-score. W artykule podano również sugerowane kierunki przyszłych prac.

W publikacji 4 “Aerial Imagery Feature Engineering Using Bidirectional Generative Adversarial Networks: A Case Study of the Pilica River Region, Poland” przedstawiono wyniki podjętej próby zwiększenia liczebności danych wykorzystywanych w procesie treningu poprzez generowanie sztucznych obrazów. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem sieci BigBiRAN (Big Bidirectional generative Adversarial Network). Opracowano postępowania oraz sposób postępowania pozwalający na wygenerowanie obrazu sztucznego poprzez rekonstrukcję fragmentu obrazu rzeczywistego. Skuteczność zaproponowanej metody sprawdzono na przykładzie analizy zdjęć lotniczych obrazujących dolinę Pilicy. Testy przeprowadzono na podstawie fragmentów zdjęć o wymiarach 128x128, 256x256, 512x512 i 1024x1024 pikseli. Podjęto próbę rozwiązania jednego z podstawowych ograniczeń stosowania metod głębokiego uczenia, którym są duże zbiory uczące. W praktyce wskazanie setek lub tysięcy wzorców występowania danej klasy jest zadaniem trudnym i kłopotliwym. Z tego względu generowanie sztucznych obrazów, które można wykorzystać w procesie uczenia sieci jest rozwiązaniem wyjątkowo atrakcyjnym. Pomysł oraz sposób przyjętego rozwiązania jest nowatorski.

Ostatnią publikacją cyklu jest „Głębokie uczenie w procesie teledetekcyjnej interpretacji przestrzeni geograficznej – przegląd wybranych zagadnień”. Doktorant podjął próbę usystematyzowania wiedzy dotyczącej przetwarzania danych obrazowych satelitarnych i lotniczych z zastosowaniem metod Deep Learning. Przedstawił wybrane zagadnienia dotyczące semantycznej segmentacji, klasyfikacji,

augmentacji materiału badawczego i inżynierii cech. Przedstawione zostały podstawy i zasady działania algorytmów. Dodatkowo podano przykłady zastosowań.

Publikacja 5 ma charakter przeglądowy o zasięgu krajowym, równocześnie jednak jest bardzo istotna z punktu widzenia poznania i stosowania nowych technik obliczeniowych w teledetekcji satelitarnej i lotniczej. Publikacja dobrze wpisuje się w cykl artykułów, w zasadzie jest wstępem do rozprawy. Od niej należy rozpocząć analizę dorobku doktoranta. Przedstawione zostały metody, które opracowano i zastosowano w pracach badawczych będących tematem kolejnych publikacji cyklu. W przystępny sposób przedstawione są istotne szczegóły postępowania składające się na całość opracowanych metod przetwarzania danych satelitarnych i lotniczych.

5. Uwagi szczegółowe

W publikacjach 1, 2 i 3 przedstawione są analizy danych satelitarnych, które można wykonać również stosując inne metody analizy i klasyfikacji danych satelitarnych. W dyskusji wyników brakuje komentarza jaka jest przewaga zastosowanych rozwiązań nad dotychczas stosowanymi. Czy korzyści wynikają z dostępności oprogramowania, szybkości wykonywanych operacji, dokładność wyników, czy też zapewniony jest większy stopień automatyzacji procesu klasyfikacji?

Zdjęcia Sentinel-2 zawsze były klasyfikowane z wykorzystaniem tylko kanałów spektralnych o rozdzielczości przestrzennej 10 m. Czy wynika to z przeprowadzonych analiz i doświadczeń? Kanały o rozdzielczości 20 m są wykorzystywane w większości znanych opracowań. Zastosowanie kanałów o mniejszej rozdzielczości wydaje się tym bardziej uzasadnione gdy analizowane są nie pojedyncze piksele lecz fragmenty zdjęć o wielkości np. 128x128 lub 256x256 pikseli.

Komentarza wymaga również sposób wyboru klasyfikowanych zdjęć. Podstawowym kryterium selekcji zdjęć był jedynie niski poziom zachmurzenia. Brakuje informacji o terminach analizowanych zdjęć. Podane informacje są bardzo ogólne, a przecież charakterystyki spektralne poszczególnych klas są związane z porą roku, okresem wegetacji i decydują o stopniu rozróżnialności poszczególnych klas pokrycia terenu. Nie podano również informacji czy klasyfikowane dane satelitarne były po korekcji atmosferycznej.

Ocena wyników klasyfikacji została przeprowadzona z zastosowaniem metod stosowanych w uczeniu maszynowym. Nie posłużono się w tym celu tradycyjną macierzą błędów, która jest standardową metodą oceny klasyfikacji zdjęć satelitarnych i lotniczych. Macierz błędów pozwala na kompleksową ocenę i przegląd zależności między poszczególnymi klasami. Jest to szczególnie istotne w przypadku stosowania nowych technik obliczeniowych, które porównujemy z aktualnie stosowanymi. W artykule 3 podano wartości F1 score, ale jest to orientacyjna miara błędu będąca wypadkową dokładności użytkownika i producenta, które nie zostały podane.

Szkoda, że w publikacji 5 nie została podjęta próba bardziej kompleksowego przedstawienia działania sieci neuronowych i uczenia maszynowego. Kolejna uwaga dotyczy braku dobrego powiązania z terminologią stosowaną obecnie w teledetekcji satelitarnej. Przykładem tego jest termin „segmentacja” lub „segmentacja instancji”. W środowisku teledetekcyjnym (nie informatyków) segmentacja jest utożsamiana z utworzeniem obiektów składających się z pikseli spełniających zdefiniowane zasady podobieństwa, które analizowane są metodami analizy obiektowej. Czytając o segmentacji stosowanej w Deep Learning można mieć wątpliwości czy dotyczy to tego samego procesu. Usystematyzowanie pojęć jest szalenie istotne i równocześnie trudne. Jest jednak konieczne, aby zapewnić poprawną komunikację między różnymi środowiskami naukowymi. Ułatwi to stosowanie i ocenę nowych metod, które zostały pierwotnie stworzone do innych celów i były rozwijane w

oderwaniu od środowiskowych analiz danych satelitarnych. Cennym uzupełnieniem publikacji byłoby uwzględnienie w literaturze przedmiotu pierwszych wyników klasyfikacji zdjęć satelitarnych z zastosowaniem sieci neuronowych, wykonywanych w kraju 20 lat temu (prace zainicjonowane na Akademii Rolniczej we Wrocławiu i później kontynuowane na Uniwersytecie Warszawskim).

W publikacjach nie podano informacji o dostępności opracowanego oprogramowania. Byłoby to bardzo pomocne dla rozwoju zaproponowanych podejść klasyfikacyjnych. W ten sposób można zwiększyć liczbę wykonanych testów i opracowań. Dostępność oprogramowania pozwala także innym na wprowadzanie modyfikacji. Zapewnia to rozwój metod, których źródłem są ogólnodostępne języki oprogramowania oraz biblioteki. Takie postępowanie wpisuje się w schemat wdrażania zasady Open Science.

Byłbym wdzięczny za ustosunkowanie się do poruszonych wyżej kwestii w toku publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Temat rozprawy jest istotny ze względu na zastosowanie nowych technik klasyfikacyjnych, które pozwoliły na wykonanie klasyfikacji danych satelitarnych i lotniczych, a następnie na przeprowadzenie złożonych analiz geograficznych.

Zbiór publikacji składających się na rozprawę jest spójny tematycznie i przedstawia nowatorskie metody analizy danych teledetekcyjnych.

Realizacja postawionych zadań wymagała opanowania teorii jak również praktycznych zasad działania sieci głębokiego uczenia, poznania dostępnych bibliotek programistycznych oraz opracowania procedur postępowania i zaimplementowania ich w autorskim oprogramowaniu. Doktorant wykazał się wiedzą nie tylko z zakresu inżynierii oprogramowania ale również musiał rozwiązać zagadnienia matematyczne aby móc przystąpić do implementacji założeń teoretycznych.

Sieci głębokiego uczenia są stosunkowo nową techniką klasyfikacji zdjęć satelitarnych i lotniczych i dlatego uzyskane wyniki są szczególnie interesujące. Przedstawiony materiał nie pozwala na jednoznaczną odpowiedź na pytanie czy metody głębokiego uczenia zastąpią i w jakim zakresie aktualnie stosowane algorytmy. Jest jednak przyczynkiem do odpowiedzi na to pytanie. Podstawowym celem podjętej pracy było wykazanie przydatności nowych algorytmów w interpretacji przestrzeni geograficznej co zostało wykazane. Rozprawa doktorska stanowi istotny wkład w rozwój i stosowanie nowych technik w przetwarzaniu i analizie danych teledetekcyjnych. Uwagi krytyczne zawarte w recenzji nie pomniejszają wartości osiągniętych wyników.

*

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Macieja Adamiaka nt. "Wykorzystanie technik uczenia maszynowego i teledetekcji do wspomaganie interpretacji przestrzeni geograficznej" spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z dnia 20 lipca 2018 r., art. 187, z późniejszymi zmianami. Wnoszę o dopuszczenie mgr Macieja Adamiaka do dalszych etapów postępowania oraz publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.