

**Centre for Credible Artificial Intelligence
Warsaw University of Technology**

Rektorska 4, 5.02
00-614 Warsaw



Warszawa, 14 marca 2026

Prof. dr hab. inż. Przemysław Biecek
Centre for Credible AI
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: „Data-driven approaches to screening and prescreening of cardiovascular diseases: advancing early detection and risk identification”

“Zastosowanie modeli opartych o dane do rozwoju narzędzi pozwalających na lepsze przesiewowe wykrywanie i szacowanie ryzyka wystąpienia chorób sercowo-naczyniowych”

Autor rozprawy: mgr Urszula Białończyk-Cyba

Promotorzy rozprawy:

dr hab. Jan Poleszczuk

dr inż. Mauro Pietribiasi (pomocniczy)

Przygotowane dla Rady Naukowej Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej im. Macieja Nałęczyna PAN

**Politechnika
Warszawska**

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Centre for Credible Artificial Intelligence Warsaw University of Technology

Rektorska 4, 5.02
00-614 Warsaw



Praca doktorska Urszuli Białończyk-Cyby wpisuje się w jeden z najważniejszych nurtów kardionefrologii, t.j. jak w prosty, tani i nieinwazyjny sposób wykryć zwapnienia naczyniowe u pacjentów z przewlekłą chorobą nerek (CKD), zanim doprowadzą do poważnych powikłań sercowo-naczyniowych. Na jej rozprawę składają się trzy publikacje opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych. W każdej z tych prac rola pani Białończyk-Cyby była wiodąca i związana z modelowaniem statystycznym i konstrukcją oraz weryfikacją modelu predykcyjnego. Poniżej krótko omówię te artykuły oraz podsumuję całą rozprawę doktorską.

Pierwsza praca „Balancing accuracy and cost in machine learning models for detecting medial vascular calcification in chronic kidney disease: a pilot study”, opublikowana w 2025 roku w Scientific Reports, dotyczy zagadnienia klasyfikacji medialnego zwapnienia naczyniowego (mVC). W tej pracy autorka proponuje, by przy wyborze modelu oraz wyborze zmiennych uwzględnić nie tylko skuteczność predykcyjną klasyfikatora, ale również ocenę kosztowności użytych zmiennych.

Opisane w artykule badanie miało charakter retrospektywny. Kohorta obejmowała 152 pacjentów z zaawansowaną CKD (stadium końcowe), którzy przeszli transplantację nerki od żywego dawcy w Karolinska University Hospital w Sztokholmie. Etykietą była ocena histopatologiczna bioptatów: Grupa 0 (n=93): brak lub minimalne zwapnienia medialne, Grupa 1 (n=59): umiarkowane lub rozległe zwapnienia. Zbiór danych zawierał 60 zmiennych, przy czym dla 71% pacjentów dostępne były kompletne wartości zmiennych, w pozostałych przypadkach obecne były braki wartości. Do budowy modelu klasyfikacji wykorzystano dosyć standardowe techniki, takie jak regresja logistyczna (tak z jak i bez regularyzacji LASSO), maszyny wektorów nośnych lub drzewa decyzyjne.

Optymalizacja modelu uwzględniała miarę ICER (Incremental Cost-Effectiveness Ratio), którą autorka zaadaptowała z ekonomiki zdrowia. Zbudowane modele osiągały porównywalną dokładność predykcyjną (AUC w zbliżonym zakresie), ale dramatycznie różniły się liczbą i kosztem wybranych cech.

**Politechnika
Warszawska**

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Centre for Credible Artificial Intelligence Warsaw University of Technology

Rektorska 4, 5.02
00-614 Warsaw



Praca ma w mojej ocenie dwie silne strony: pierwsza to uwzględnienie ICER w kontekście modelowania predykcyjnego. Nie znam innych badań stosujących ICER ani żadnej innej metryki ekonomicznej do porównywania modeli predykcyjnych modelujących chorobę mVC, ale w pełni się zgadzam, że jest to bardzo ciekawy kierunek analiz. Druga silna strona to unikalny materiał biologiczny uwzględniający ocenę biopsji w badaniach nad mVC.

Największą słabością przedstawionych wyników jest oparcie się na niewielkiej grupie pacjentów pochodzących z jednego ośrodka. Z uwagi na to, że samo badanie ma charakter retrospektywny i porównywanych jest wiele modeli predykcyjnych, rośnie ryzyko przeuczenia i uzyskania wyników, które będzie trudno potwierdzić na danych z innych ośrodków. Końcowy model o najlepszych wynikach to regresja logistyczna, więc względnie prosty - interpretowalny model. Jednak z uwagi na dużą korelację pomiędzy zmiennymi warto byłoby przeprowadzić pogłębioną analizę wrażliwości otrzymanych wyników. Omawiana praca zawiera co prawda analizę wrażliwości wyników ICER względem zmienności założeń (prewalencja, cena PET-CT, QALY), co częściowo adresuje problem niepewności parametrów. Niemniej jednak brakuje analizy zachowania modelu na poziomie predykcji indywidualnych - np. analizy Partial Dependence, która pokazałaby kształt zależności między poszczególnymi biomarkerami a prawdopodobieństwem wykrywania mVC. W gruncie rzeczy też weryfikacja modelu metodą LOOCV jest bardzo optymistyczna, być może wystarczająca w przypadku badania pilotażowego, ale warto ją uzupełnić np. porównaniem zachowań modeli z użyciem technik wyjaśnialnego uczenia maszynowego (XAI).

Druga praca „Detection of medial vascular calcification in chronic kidney disease based on pulse wave analysis in the frequency domain” opublikowana w 2024 roku w Biomedical Signal Processing and Control skupiona jest analizie biomarkerów które można pozyskać przez nieinwazyjne pomiary. Pierwsza publikacja pokazała, że biomarkery laboratoryjne można efektywnie łączyć z modelami predykcyjnymi do wykrywania mVC - ale nadal wymagają pobrania krwi i analiz biochemicznych. W tej pracy model jest oparty na cechach wyciągniętych z nieinwazyjnego pomiaru fali tętna, co czyni podejście jeszcze prostszym i (prawdopodobnie) tańszym. Dodatkowo

**Politechnika
Warszawska**

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Centre for Credible Artificial Intelligence Warsaw University of Technology

Rektorska 4, 5.02
00-614 Warsaw



zamiast korzystać ze standardowej miary prędkości fali tętna, autorka zaproponowała dekompozycję kształtu fali tętna w dziedzinie częstotliwości i użycie wynikających z niej cech jako wejścia do modeli predykcyjnych.

Badanie objęło 97 pacjentów, przy czym klasa „brak mVC” obejmowała 18 pacjentów, a klasa „mVC” obejmowała 79 pacjentów. Końcowy zaproponowany model to komitet pięciu najlepszych klasyfikatorów, wybieranych po kryterium zbalansowanej dokładności. W pracy porównano model podstawowy PC, zawierający tylko tradycyjne czynniki ryzyka (wiek, płeć, BMI), model PW, zawierający tylko cechy częstotliwościowe z fali tętna, i model łączony PWPC. Ostatecznie to model PWPC uzyskał najlepsze wyniki predykcyjne, co uzasadnia potrzebę łączenia klasycznych biomarkerów z cechami pozyskanymi z fali tętna.

Analiza nieinwazyjnych markerów to bardzo ciekawe rozwiązanie do predykcji mVC. Autorzy też stwierdzają, że do chwili publikacji fala tętna nie była wcześniej używana jako bezpośrednie wejście do modeli predykcyjnych wykrywających mVC. Analiza tej fali ma też uzasadnienie fizyczne; autorka argumentuje, dlaczego zwapnienia medialne powinny zostawiać ślad w widmie częstotliwościowym fali. To ciekawa próba użycia nowych cech z ugruntowaną interpretacją fizyczną.

Ponownie, też w tym badaniu znaczącym ograniczeniem pracy jest niska liczebność pacjentów - 97 pacjentów, z których 79 (81%) należy do klasy pozytywnej, a tylko 18 (19%) do negatywnej. Nawet przy zastosowaniu ważenia klas i komitetu klasyfikatorów, model de facto uczy się głównie na przykładach klasy pozytywnej. Klasa negatywna (brak mVC) jest tak mała, że każdy błąd klasyfikacji w tej grupie dramatycznie zmienia metryki (np. specificity). Wynik specificity = 0.89 oparty jest na 18 pacjentach, co oznacza dosłownie 2 błędy. W przypadku tak małej próby i względnie elastycznych i złożonych modeli ponownie pojawia się ryzyko przeuczenia. Rozwiązaniem, które pomogłoby zrozumieć sensowność zaproponowanego modelu, byłyby techniki XAI oparte na atrybucji cech, takie jak wartości Shapleya.

**Politechnika
Warszawska**

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Centre for Credible Artificial Intelligence Warsaw University of Technology

Rektorska 4, 5.02
00-614 Warsaw



Trzecia publikacja „Leveraging pulse wave signal properties for coronary artery calcification screening in CKD patients” została opublikowana w 2025 roku w czasopiśmie *Computers in Biology and Medicine*. Praca ta stosuje metodę PW-FDFs na nowym celu diagnostycznym - przesiewowego wykrywania podwyższonego wyniku coronary artery calcium score ≥ 100 AU, który jest uznanym markerem zwapnienia intymalne w tętnicach wieńcowych. Dodatkowym, oryginalnym elementem tej pracy jest stratyfikacja wyników według grup wiekowych - co pozwala zidentyfikować, w których podpopulacjach metoda wnosi największą wartość kliniczną w stosunku do prostych czynników ryzyka. Słabością tej metody (poza liczebnością grupy, która po stratyfikacji prowadzi do bardzo małych podgrup) jest nieobecność w danych cholesterolu LDL, który jest obecnie jednym z głównych czynników predykcyjnych. Rodzi to ryzyko, że uzyskane wyniki są wciąż słabsze niż te uzyskane przez model wykorzystujący LDL. Autorka jednak o tym ograniczeniu pisze wprost w artykule.

Podsumowując, praca doktorska Urszuli Białończyk-Cyba wpisuje się w ważny problem kardiologii: jak w prosty, tani i nieinwazyjny sposób wykryć zwapnienia naczyniowe u pacjentów z przewlekłą chorobą nerek (CKD), zanim doprowadzą do poważnych powikłań sercowo-naczyniowych. Praca nie proponuje nowej terapii, raczej proponuje nowe wsparcie diagnostyki: jak za pomocą modeli predykcyjnych i niedrogich lub nieinwazyjnie pozyskanych cech można wskazać pacjentów wymagających dalszej analizy. Całość rozprawy składa się z trzech opublikowanych artykułów, tworzących spójną trylogię badawczą. Tematyka tych artykułów jest spójna i ma bardzo aplikacyjny charakter, co moim zdaniem jest dużą zaletą.

Autorka stosuje poprawnie zaawansowane techniki statystyczne do konstrukcji modeli predykcyjnych, proponując ciekawe rozwiązania w obszarze inżynierii zmiennych i modyfikacji kryterium optymalizacji.

Wspólną słabością wszystkich prac jest niewielka liczebność próby i jednośrodkowy charakter badania. Te dwa czynniki tworzą ryzyko przeuczenia się modeli predykcyjnych oraz utworzenia wyników niespójnych z wiedzą domenową. Rozwiązaniem, które zyskuje coraz większe znaczenie, jest zas-

**Politechnika
Warszawska**

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

Centre for Credible Artificial Intelligence Warsaw University of Technology

Rektorska 4, 5.02
00-614 Warsaw



tosowanie technik wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (XAI), by przyjrzeć się bliżej temu, jak opracowane modele działają, a nie tylko czy dały poprawny wynik na danych treningowych.

Podczas obrony chciałbym, by doktorantka przedstawiła taką pogłębioną analizę opracowanych modeli (tak z P1, jak i z P2), pokazującą, jakich zależności te modele się nauczyły. W przypadku P1 zastosowanie metod XAI, takich jak wykresy Partial Dependence czy wartości Shapleya, pozwoliłoby zweryfikować, czy modele nauczyły się patofizjologicznie sensownych zależności — np. monotonicznego wzrostu ryzyka z wiekiem, rosnącego wpływu fosforu i wapnia. Dla P2, gdzie cechy to składowe harmoniczne, interpretacja jest trudniejsza, ale globalne wartości Shapleya mogłyby przynajmniej wskazać, które składowe są diagnostycznie najważniejsze.

Wszystkie trzy prace składające się na recenzowaną rozprawę są interesujące i proponują oryginalne rozwiązania postawionych problemów naukowych. Rozprawa spełnia z nadatkiem wymogi formalne stawiane pracom doktorskim. Struktura jest przejrzysta – od wprowadzenia przez hipotezy badawcze po omówienie trzech publikacji i wspólną dyskusję. Bibliografia jest kompletna i aktualna. Wkład własny autorki jest jasno opisany w sekcji CRediT każdej z publikacji. Biorąc pod uwagę, że prezentowane metody zostały opublikowane w recenzowanych materiałach konferencyjnych o wysokim poziomie naukowym, stwierdzam, że rozprawa mgr. Urszuli Białończyk-Cyby spełnia warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie proszę autorkę, aby podczas obrony ustosunkowała się do pytań i uwag przedstawionych w niniejszej recenzji.

Przemysław Biecek

**Politechnika
Warszawska**

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa