

Prof. dr hab. Krzysztof Kułakowski
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

**Recenzja w postępowaniu o nadanie stopnia doktora habilitowanego dr Rafałowi Rakowi
w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne**

Niniejszą recenzję sporządzam w związku z powołaniem mnie na recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym wszczętym na wniosek dr Rafała Raka, o czym informuje uchwała nr 205/12/2023 Rady Naukowej Kolegium Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Rzeszowskiego z dnia 14 grudnia 2023 r. Ocenę dorobku habilitacyjnego przeprowadziłem w oparciu o ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. 2018 poz. 1668, tekst ujednolicony D20181668Lj. Zgodnie z tą ustawą, osiągnięciem wskazanym do oceny może być cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, wskazanych w ustawie, które to osiągnięcie stanowi znaczący wkład w rozwój określonej dyscypliny.

Dr Rafał Rak ukończył studia fizyki w 2003 roku na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Rzeszowskiego, uzyskując tytuł magistra fizyki. W roku 2008 uzyskał stopień doktora nauk fizycznych, broniąc pracę doktorską „Ilościowe charakterystyki fluktuacji i korelacji na polskim rynku akcji” na tym samym Wydziale Uniwersytetu Rzeszowskiego. Promotorem pracy był prof. dr hab. Stanisław Drożdż. Praca została oceniona jako wyróżniająca się. Dr Rafał Rak jest od 2003 roku zatrudniony na Uniwersytecie Rzeszowskim; jako asystent do 2008 roku, potem – jako adiunkt – do dziś. Jego miejsce zatrudnienia to Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, włączony obecnie do Kolegium Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Rzeszowskiego. Dr Rak odbył kilkumiesięczne staże naukowe: w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie (2008-09, 2016-17) i na Politechnice Krakowskiej (2015). Uczestniczył też w szkole letniej ENS „Models for Complex Systems in Human and Social Sciences” w Lyonie w 2004 roku. We wrześniu 2023 dr Rafał Rak złożył na Uniwersytecie Rzeszowskim wniosek o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego. Według mojej wiedzy jest to jego pierwszy wniosek w tej sprawie.

Podstawą osiągnięcia naukowego wskazaną przez habilitanta jest cykl dziesięciu wieloautorskich artykułów naukowych, tematycznie powiązanych, pod tytułem „Ilościowe aspekty wybranych układów złożonych”. Te artykuły zostały opublikowane w Europhysics Letters (IF 1.8, 2 prace), Physica A (IF 3.3, 1 praca), Acta Physica Polonica B (IF 0.5, 2 prace), Acta Physica Polonica A (IF 0.7, 1 praca), New Journal of Physics (IF 3.3, 1 praca), Journal of Complex Networks (IF 2.1, 1 praca) i Entropy (IF 2.7, 2 prace). Dane IF dotyczą 2022 roku. Wszystkie te redakcje są wymienione w kolejnych wykazach wiodących czasopism naukowych o zasięgu międzynarodowym, publikowanych przez odpowiednie ministerstwa. Prace wskazane przez habilitanta jako oceniane tu osiągnięcie były cytowane w sumie 328 razy (Web of Science, 17.02.2024). Według tego samego źródła indeks Hirscha wszystkich prac habilitanta wynosi 11. Zgodnie z autorefereatem przyjmuję w recenzji oznaczenia wskazanych prac od [K1] do [K10]. W ośmiu z nich habilitant jest pierwszym autorem. Oświadczenia współautorów, obok wyrażonej zgody na włączenie prac do dorobku habilitacyjnego, określają wkład pracy habilitanta w sposób nie zostawiający wątpliwości co do istotnego udziału dr. Raka w tych pracach.

Kluczowe pojęcia w kręgu zainteresowań habilitanta to złożoność, fraktale i multifraktale

oraz sieci. Te zagadnienia są krótko omówione przez habilitanta we wprowadzeniu do autoreferatu. O ile – zgodnie z powszechną opinią – pojęcie złożoności pozostaje enigmatyczne, o tyle multifraktale i sieci dostarczyły wielu sformułowań i metod badawczych.

W pracy [K1] zastosowano znaną metodę multifraktalnej analizy fluktuacji zdetrendowanych (MFDFA) do identyfikacji źródeł multifraktalności innych, niż korelacje nieliniowe. Do produkcji nieskorelowanych serii czasowych wykorzystano formalizm Tsallisa: kontrolując w sposób ciągły parametr q , można było generować rozkłady od Gaussa do Levy'ego. Autorzy badań [K1] wnioskują, że multifraktalny charakter serii może wynikać z jej długości, z tzw. grubych ogonów rozkładu oraz z nieliniowych korelacji czasowych. Formalizm zastosowano do serii danych dotyczących indeksu giełdowego DAX. Praca jest szeroko cytowana (133 pozycje).

Podobne obliczenia, rozszerzone na rozkłady asymetryczne, przeprowadzono w pracy [K2]. Jak się okazuje, w obszarze Gaussa asymetria nie zmienia znacząco własności multifraktalnych; różnice są widoczne w obszarze Levy'ego. Przebadano też dalsze serie danych rzeczywistych: polskiego WIG20 i amerykańskiego indeksu DJIA skonstruowanego z danych dla 30 spółek. Autorzy wnioskują, że największy wpływ na tzw. pozorną multifraktalność mają grube ogony rozkładów.

Celem pracy [K3] było zbadanie korelacji krzyżowych między wielkościami charakteryzującymi rynek: logarytmicznych stóp zwrotu, ich zmienności, liczby transakcji i wolumenu obrotu. Wykorzystano algorytm multifraktalnej analizy korelacji krzyżowych (MFCCA), opracowany w zespole prof. Drożdża w 2014 roku. Badaniom poddano zdetrendowane dane 31 amerykańskich spółek giełdowych z lat 2008-2011. Jak stwierdzono, najsilniejsze korelacje występują między liczbą transakcji a wolumenem obrotu.

W pracy [K4] zbadano relację między grubymi ogonami rozkładów stóp zwrotu i wolumenu obrotu dla indeksu WIG20 w latach 2000-2008. Okazuje się, że stosunek wykładników opisujących ogony rozkładów tych wielkości nie zależy od szczegółów: skali czasowej i rodzaju analizowanej spółki, a zmienia się w zależności od rynku. Poszukiwanie ogólniejszego związku między stopami zwrotu a wolumenem obrotu koncentruje się na zależności potęgowej, jednak mechanizm prowadzący do takiej zależności nie doczekał się ostatecznego wyjaśnienia.

Praca [K5] porusza kilka wątków. Jednym z nich jest analiza relacji par walut, których fluktuacje umożliwiają tzw. arbitraż trójkątny. Innym jest wyrażenie finansowych korelacji czasowych w postaci macierzy korelacji. Korelacje dotyczą tu szeregów czasowych stóp zwrotu. Wartości własne macierzy korelacji podlegają, jak się okazuje, rozkładowi charakterystycznym dla macierzy przypadkowych. Trzecim wątkiem jest tzw. efekt Eppsa: wzrost sprężenia między kursami walut z wzrostem skali czasowej. Dyskusja w literaturze mechanizmów prowadzących do efektu Eppsa nie została jeszcze zakończona. Czwartym wątkiem są nietypowe widma multifraktalne fluktuacji trójkątnych. W ich asymetrii autorzy dopatrują się podobieństwa do zastosowań związanych z turbulencją, omawianych w pracach Mandelbrota.

Praca [K6] jest poświęcona analizie technik detrendyzacji. Przetestowano wpływ stopnia wielomianów, używanych do detrendyzacji, i wpływ przekrywania przedziałów. Dane

syntetyczne o charakterze multifrakalnym otrzymano z kaskady multiplikatywnej. Dane rzeczywiste dotyczyły fluktuacji logarytmicznych stóp zwrotu amerykańskich spółek giełdowych. Prócz treści merytorycznych, praca ma duże walory dydaktyczne.

W pracy [K7] autorzy zastosowali metody analizy ilościowej do danych meteorologicznych, zbieranych z jednej stacji w latach 2001-2009. Dane dotyczyły temperatury przy gruncie i na wysokości 2m, prędkości wiatru i wilgotności powietrza. Oprócz zbadania grubych ogonów rozkładów wymienionych zmiennych, zastosowano metodę MFDFA, co pozwoliło zidentyfikować strukturę multifrakalną danych. Zastosowano też multifrakalną analizę korelacji krzyżowych; jak się okazało, najsilniejsze korelacje występują między danymi dot. temperatur w obszarze dużych fluktuacji. Ten wynik został potwierdzony niezależną metodą autoregresji wektorowej.

Praca [K8] przynosi zastosowanie metod analizy sieciowej do sieci grani górskich. Rozpatrywane są różne możliwości reprezentacji tej sieci, nazwane tu siecią topograficzną i siecią graniową. W zależności od reprezentacji otrzymuje się strukturę fraktalną o wymiarze pudełkowym zależnym od skali, lub brak takiej struktury. Zwraca jednak uwagę powtarzalność wyników odnoszących się do różnych pasm górskich, co pozwala mówić o ich uniwersalności. O ile problem reprezentacji sieci, przedyskutowany w pracy [K8], nie ma jeszcze jednoznacznego rozwiązania, o tyle zastosowanie analizy sieciowej do ukształtowania terenu jest nowatorskie i zostało zauważone przez media, np. www.sciencealert.com.

Praca [K9] dotyczy sieci bezskalowych i zawiera propozycję modyfikacji mechanizmu preferencyjnego przyłączania, która by odtwarzała dowolne wartości wykładnika rozkładu stopnia wierzchołka. Modyfikacja dotyczy zbioru wybieranych węzłów do których dołączany jest nowy węzeł. Wprowadzony został parametr f , który ogranicza ten zbiór. Dodatkowo wybrany węzeł może być zastąpiony przez węzeł nadrzędny. W istocie uzyskano możliwość kontroli wykładnika. Wbrew nadziei autorów uzyskane sieci nie są fraktalne. W autoreferacie habilitanta nakreśla możliwości kolejnych modyfikacji metody.

W pracy [K10] podjęto badanie sieci przestrzennych pod kątem ich możliwej struktury multifrakalnej. Badanie było motywowane faktem, że umiejscowienie węzłów w przestrzeni rzeczywistej jest w standardowym opisie pomijane. Typowe charakterystyki, jak współczynnik gronowania, rozkład stopnia wierzchołka czy najkrótsze ścieżki, nie zależą od położenia węzłów. Tymczasem wiele sieci rzeczywistych ma przestrzenny charakter. W pracy zaproponowano metodę badania, która jest wypadkową dwóch znanych metod ('box counting' i 'sand-box'). Metodę przetestowano na sieciach syntetycznych bezskalowych, dla drzew i na sieci grani otrzymanej dla gór Liguryjskich. Wynikiem pracy jest zależność struktury multifrakalnej tam, gdzie ona występuje, od geometrii sieci. Można więc mówić o zależności złożoności sieci od jej charakterystyk przestrzennych.

Podsumowanie dorobku habilitanta, zawarte w autoreferacie, jest listą piętnastu punktów która w istocie zbiera wszystkie uzyskane wyniki. Większość tych wyników dotyczy struktury multifrakalnej szeregów czasowych, badanej na danych syntetycznych i danych pochodzących z rynków finansowych. Wyniki te należą więc do szybko rozwijającej się interdyscyplinarnej tematyki Data Science, nabierającej znaczenia w każdej dziedzinie wiedzy i technologii. Bez wątpienia wyniki otrzymane przez dr. Rafała Raka na tym polu stanowią znaczący wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne. Uważam też, że trzy spośród wskazanych prac, [K7], [K8] i [K10], dobrze świadczą o poszukiwaniu nowych zagadnień i

rozszerzaniu tym samym pola badawczego.

Przed uzyskaniem stopnia doktora habilitant był współautorem 6 publikacji w czasopismach z bazy JCR. Po uzyskaniu stopnia doktora liczba ta wzrosła o dalsze 5 prac spoza listy zgłoszonych jako osiągnięcie naukowe w ocenianym dorobku. Aktywność organizacyjna i popularyzatorska habilitanta jest opisana w starannie zredagowanym autoreferacie. Odnotowuję tu więc tylko kierownictwo projektem badawczym NCN „Miniatura I” (2017-2018) oraz funkcję głównego organizatora sympozjów „Physics in Economy and Social Sciences” w Rzeszowie w 2009 i 2015 roku.

Podsumowując, w mojej opinii opisane wyżej osiągnięcie naukowe jest wystarczające i spełnia wymagania stawiane przed kandydatami do stopnia doktora habilitowanego nauk fizycznych, o których mowa w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. Wnoszę o przyjęcie rozprawy habilitacyjnej dr. Rafała Raka i dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Kraków, 19 luty 2024.

