Prof. dr hab. Włodzisław Duch
Katedra Informatyki Stosowanej i Laboratorium Neurokognitywne
Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń

Ocena osiągnięć naukowych doktora Jacka Rogali, w związku z ubieganiem się o stopień doktora habilitowanego, w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauk fizycznych, opracowana na prośbę Rady Doskonałości Naukowej.

Toruń, 7 stycznia 2024

Uwagi wstępne.

Dr Jacek Rogala ukończył studia na Wydziale Biologii w 1991 roku, a doktorat ukończył w Pracowni Neuroinformatyki Zakładu Neurofizjologii Instytut Biologii Doświadczalnej PAN, w 2014 roku, zajmując się analizą danych elektrofizjologicznych.

Po doktoracie w latach 2014-2022 odbył 3 staże: najpierw w Pracowni Neurobiologii Układu Wzrokowego, należącej do Zakładu Neurofizjologii, gdzie pracował nad doktoratem, potem w ramach dużego projektu NCN Symfonia „W poszukiwaniu źródeł aktywności poznawczej mózgu" w Katedrze Informatyki Stosowanej Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu (2017–2018), a następnie w Naukowym Centrum Obrazowania Biomedycznego Światowego Centrum Słuchu, Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu (2018–2022). Obecnie zatrudniony jest jako specjalista w Zakładzie Fizyki Biomedycznej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Po obronie doktoratu zainteresował się problematyką neurofeedback, publikując dwie prace przeglądowe, których jest pierwszym autorem. Jedna z tych prac wchodzi w skład 5 publikacji stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego, związanych z badaniami „nad personalizacją i poprawą efektywności terapii neurofeedback z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych". Chociaż metody neurofeedback wykorzystujące sygnały EEG są szeroko stosowane, mechanizm ich działania nie jest znany. Panuje przekonanie, że działanie neurofeedback jest związane z neuroplastycznością mózgu, ale nie mamy żadnych modeli, które by to wyjaśniały. Najczęściej stosowane protokoły opierają się na monitorowaniu wzmacniania lub osłabiania sygnałów EEG w wybranych pasmach częstotliwości, wpływając w sposób niespecyficzny na wiele procesów w mózgu. Moc sygnału w różnych pasmach EEG trudno jest powiązać z zaburzeniami funkcjonowania i rezultatami eksperymentów. Treningi neurofeedback, pomimo kilkudziesięciu sesji, są kosztowne i czasochłonne, jednak często nie przynoszą pożądanych rezultatów. Cel badawczy prac doktora Rogali jest więc dobrze określony: to weryfikacja i poprawa skuteczności metod neurofeedback-EEG jako technik wspierających rozwój i terapię funkcji poznawczych, oraz opracowanie spersonalizowanego protokołu prowadzenia takich interwencji tak, by poprawić ich skuteczność. To ważne zagadnienie, zarówno z punktu widze-

nia próby zrozumienia zachodzących w mózgu procesów, jak i praktycznego wykorzystania w terapii i wspieraniu rozwoju funkcji poznawczych.

Omówienie publikacji, stanowiących podstawę postępowania habilitacyjnego.

Osiągnięcia naukowe będące podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego to „Badania nad personalizacją i poprawą efektywności terapii neurofeedback z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych." Poniżej postarałem się przybliżyć tematykę zawartą w 5 załączonych publikacjach.

Dr Rogala rozpoczął badania wpływu neurofeedback od krytycznej analizy literatury. Większość badań eksperymentalnych nie spełniała kryteriów pozwalających na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków, czyli uzasadnienia związku przyczynowego pomiędzy przeprowadzonymi treningami i obserwowanymi zmianami behawioralnymi. Analiza EEG napotyka na liczne trudności: sygnał EEG jest niestacjonarny nawet w krótkim okresie czasu, jest w nim wiele artefaktów, które usuwane są częściowo automatycznie za pomocą różnych algorytmów, a częściowo na podstawie wizualnej inspekcji. Cechy tego sygnału zmieniają się dla danej osoby w wyniku zakłóceń zewnętrznych jak i stanu wewnętrznego, pobudzenia emocjonalnego lub procesów fizjologicznych. Wyniki zależą od kształtu czaszki, liczby i precyzyjnego rozmieszczenia elektrod, typu elektrod, ich impedancji, sposobu wyznaczania źródeł oscylacji przez rozwiązywanie problemu odwrotnego, oraz wielu parametrów używanych w algorytmach analizy sygnałów EEG. Grupy badane i grupy kontrolne są zwykle mało liczne, a w wielu publikacjach nie było ich wcale. Trudno jest też ocenić wpływ efektu placebo na wyniki. Nic dziwnego, że pomimo doskonałych rezultatów licznych publikacji opisujących nowe metody diagnostyczne oparte na analizie EEG żadna z nich nie jest stosowana w praktyce klinicznej.

Pierwsza publikacja dr Rogali i 5 współautorów, „The Do's and Don'ts of Neurofeedback Training: A Review of the Controlled Studies Using Healthy Adults" z Frontiers of Human Neuroscience (2016), dotyczyła krytycznej analizy wpływu niekontrolowanych niespecyficznych czynników na ocenę wpływu treningów. Jest to jedna z pierwszych krytycznych analiz publikacji na temat neurofeedback i jak widać po jej cytowaniach (około 130 w Google Scholar, 60 w bazie Web of Science) cieszy się zasłużonym zainteresowaniem. W tej pracy pokazano wiele błędów metodologicznych, pozwalających wątpić w osiągane rezultaty: brak grupy kontrolnej, brak statystycznie istotnych wyników, brak związku mocy w paśmie alfa, wykorzystywanym w większości publikacji z wpływem na wyniki treningów. Wśród 28 metodologicznie poprawnych eksperymentów wybranych z kilkuset publikacji aż 11 nie wykazało istotnych efektów. To niestety dość typowa sytuacja w badaniach behawioralnych.

Krytyczny przegląd literatury pozwolił na sformułowanie wskazówek dla efektywnych treningów: wykorzystanie pojedynczych pasm, zwłaszcza teta i alfa, zamiast całego sygnału; używanie jak naj-

większej liczby elektrod do rejestracji, oraz optymalizacja położenia elektrod. Zaskoczeniem był brak związku pomiędzy obserwowaną mocą sygnału EEG w trenowanych pasmach, a specyficznymi efektami behawioralnymi, z wyjątkiem treningu pamięci roboczej z wykorzystaniem pasma teta. Ta praca nie analizowała wpływu lokalizacji źródeł czy innych zaawansowanych metod analizy sygnałów, gdyż publikacji z użyciem takich metod do analizy EEG o wysokiej rozdzielczości jest bardzo niewiele. Przegląd publikacji z 2019 roku (Coben, Hammond, Arns, Applied Psychophysiology and Biofeedback), w których używano 19-kanałowy sprzęt biofeedback i analizy Z-score lub 3-D LORETA zawiera tylko 6 publikacji, w których jednak nie doszukano się znaczących przewag tych metod. Alternatywą dla takich metod jest precyzyjna lokalizacja elektrod w miejscach odpowiednich z punktu widzenia funkcji przypisywanych regionom kory, ale wymaga to dodatkowego sprzętu i jest równie rzadko stosowane.

Własne badania grupy, w której odbywał staż dr Rogala, szybko ujawniły różne problemy z artefaktami, w tym problemy z sygnałami o dużej amplitudzie, związanymi z ruchem i napięciem mięśni, powodujące oscylacje w wysokich częstotliwościach. Wyniki opublikowano w pracy K. Paluch i inn, w Frontiers of Human Neuroscience 2017. Rolą dr Rogali była tu interpretacja wyników. Sam spotkałem się wcześniej z mylnymi interpretacjami sygnałów EEG w paśmie beta, które wynikały z takich artefaktów. Praca służy jako ostrzeżenie przed takimi błędami, ale nie zawiera dyskusji metod stosowanych w analizie sygnałów do usuwania tego typu artefaktów, takich jak ICA, IVA czy MEMD.

Trzecia z omawianych publikacji, „Resting-state EEG activity predicts frontoparietal network reconfiguration and improved attentional performance (Rogala, Kublik, Krauz i Wróbel, Scientific Reports 2020) dotyczy korelacji fazowych sygnału EEG, mierzonych za pomocą indeksu PLV (phase locking value). Ta miara ma sporo zalet, jest odporna na artefakty mięśniowe i fluktuacje mocy spektralnej. Zabrakło w niej jednak dyskusji wpływu przewodnictwa objętościowego na wartości PLV i relacji do innych miar korelacji, takich jak PLI, wPLI, czy PLM, czy AEC. Testowano procesy uwagowe 33 osób, czasy reakcji w testach wyszukiwania wzrokowego i wyniki treningu strzelectwa sportowego. Czasy reakcji i błędy wyszukiwania po zakończeniu treningu nie uległy zmianie, wzrosła jedynie liczba punktów w strzelaniu. Analiza sygnału EEG w stanie spoczynku w okienkach 3Hz w przedzia e 2-45 Hz pokazała pozytywną korelację mocy sygnału dla pasma 22-29 Hz (beta-2) z szybkością reakcji poszczególnych osób, a jednocześnie negatywną z punktami w strzelectwie sportowym. Wartości PLV obliczone dla wszystkich par elektrod w stanie spoczynkowym pokazały istotne korelacje z mocą uśrednionego globalnie sygnału w tym pasmie. Dotyczyło to szczególnie korelacji obszarów czołowo-ciemieniowych. Porównanie danych sprzed i po treningu pokazało istotne zmiany siły tych korelacji tylko w grupie o niskiej sile połączeń. To bardzo ładny wynik, chociaż przewidziany w pracach teoretycznych Nancy Kopell o symulacji sprzężonych oscylatorów już w 1990 roku, i pracy Chandrasekaran, Achuthan, Canavier z 2010 roku: silne połączenia są stabilne, sieci mają mniejszą złożoność, a korela-

cje fazowe są silne. To charakteryzuje stabilne struktury neuronalne, które łatwo się nie zmieniają, stąd słabsze postępy w testach behawioralnych. Trening modyfikuje konfiguracje słabszych połączeń, pozwalają na adaptację sieci do nowych zadań. To chyba pierwsza publikacja pokazująca jak działa w mózgu ten mechanizm na rzeczywistych danych. Potwierdza intuicyjne przekonania, np. książka Shunryu Suzuki, najbardziej znanego nauczyciela Zen, zaczyna się od motta „W umyśle początkującego jest wiele możliwości, w umyśle eksperta – parę".

Wyniki tych badań stały się podstawą do opracowania spersonalizowanego protokołu treningów poznawczych, z wyborem par elektrod na podstawie korelacji fazowych i wąskich pasm EEG. Wydawało się to naturalnym kierunkiem rozwoju metod neurofeedback, jednak te plany badawcze zostały przerwane z powodu pandemii Covidu-19. Przed lockdownem przeprowadzono badania wstępne na 44 osobach, w celu kontroli skuteczności planowanego treningu N-EEG. W dalszych badaniach już w czasie pandemii uczestniczyła mniejsza grupa 18 osób. Wykonano też testy osobowości i funkcji poznawczych, oraz testy lęku przed Covid-19, które nie wykazały różnic pomiędzy uczestnikami grupy pandemicznej i grupą badanych osób w pierwszym etapie. Zebrane dane pozwoliły na zbadanie relacji dla obu grup pomiędzy siłą korelacji fazowych sygnału EEG i różnych cech osobowości. Główną różnicą była wyższa ekstrawersja świadcząca o większej odporności na stres i silniejsze średnie globalne korelacje fazowe sygnału EEG u osób kontynuujących badania w czasie pandemii. Zgodnie z wynikami z wcześniejszej publikacji można uznać, że sieci neuronowe tych osób były bardziej stabilne, więc ich decyzja o udziale w badaniach się nie zmieniła.

Badania znane z literatury pokazały związek stresu w trudnych zadaniach poznawczych ze zwiększoną siłą korelacji w paśmie beta. W omawianych badaniach siła korelacji wzrosła we wszystkich pasmach, co autorzy uzasadnili długotrwałym silnym stresem. Trudno tu o jednoznaczną weryfikację takich interpretacji. Na Ryc. 4 autoreferatu w obu grupach, pandemicznej i kontrolnej, dokładność post-testu wzrasta a czasy reakcji maleją, przy czym dokładność jest wyższa a czasy reakcji krótsze dla grupy kontrolnej, a nie pandemicznej. Jednakże w publikacji jak i autoreferacie czytamy, że „osoby nieróżniące się średnią globalną siłą połączeń, które ukończyły badania przed pandemią, uzyskały gorsze wyniki w powtórzonych testach (post-test), niż osoby wystawione na długotrwały stres (Ryc. 4)". Czy długotrwałą ekspozycja na stres istotnie modyfikuje połączenia funkcjonalne poprawiając wyniki w zadaniach na rozumowanie przechodnie? Wydaje się to sprzeczne z intuicją, tu raczej można się doszukiwać efektów związanych z neurochemią, o czym nie wspomniano.

Chociaż wydawało się, że dobór par elektrod i pasm EEG to ciekawy kierunek, to podejście jest zbyt pracochłonne by je stosować w praktyce klinicznej i ma szereg wad. Stąd w ostatniej publikacji (Żygierewicz i inn, J. of Neural Engineering), w której oprócz dr Rogali brało udział 10 osób, do analizy danych EEG zastosowano cztery architektury sieci neuronowych znanych z literatury, próbując okre-

ślić parametry, które miały wpływ na retencję informacji w pamięci roboczej. Stosowanie sieci neuronowych jest obecnie bardzo modne, chociaż często trudne w interpretacji. Trzy ze stosowanych tu sieci mają ponad 20 000 parametrów, a czwarta ponad milion. To nie jest „mała liczba trenowanych parametrów", jak czytamy w autoreferacie. W publikacji nie wspomniano o „wyjaśnialnych sieciach neuronowych" (XAI), do których dr Rogala odwołuje się w autoreferacie. Takie określenie dotyczy nie tyle samych sieci neuronowych, co algorytmów analizy modeli uczenia maszynowego. Określenie „wyjaśnialne" jest dość mylne, bo nie odnosi się do wyjaśnienia mechanizmu jakiegoś zjawiska. Próba odkrycia, które cechy są istotne dla poprawnej klasyfikacji nie daje obiektywnych ocen ważności tych cech, tylko informacje zależne od architektury sieci i metody uczenia. Dzieje się tak dlatego, że sieć potrafi wykorzystać kombinacje wielu podzbiorów cech do osiągnięcia podobnego wyniku. Przestrzeń wejściowa tych sieci jest bardzo duża, w przypadku ShallowNet to 38 000, a Parallel ConvNet wejściem był tensor 19x9x400, czyli 68 400 składowych. Korelacje pomiędzy rezultatami klasyfikacji a wynikami eksperymentów nie przekraczały 0.36.

Pomimo takiej złożoności można próbować określić, które z cech mają największy wpływ na wyniki klasyfikacji, stosując metody perturbacyjne i wybierając z różnych modeli cechy wspólne. Rezultaty zgadzają się z informacjami znanymi z literatury na temat pamięci roboczej: pozytywny wpływ oscylacji teta w okolicach czołowych jest dobrze uzasadniony, ale negatywny wpływ alfa (11 Hz) i beta (15 Hz) w obszarach ciemieniowych, chociaż obserwowany wcześniej, trudno jest zinterpretcwać. Nie porównano jednak wyników z samym pasmem teta i elektrodami czołowymi z klasyfikacją wykorzystującą całe pasmo.

Ciekawym pomysłem było zastosowanie danych klinicznych do uczenia wstępnego modelu gMLP by zbadać, czy można wykorzystać uczenie na dodatkowych danych (transfer learning). Jednakże poprawa w stosunku do pozostałych modeli była marginalna. Klasa większościowa to 56%, a sieci neuronowe osiągnęły dokładność od 61.5 do 65.3%. W tej sytuacji rozważania dotyczące istotności cech trudno uznać za istotne. Pomimo częściowego usunięcia artefaktów za pomocą analizy czynników niezależnych wyniki wydają się zależeć od mrugnięć i artefaktów mięśniowych.

Ocena omówionych publikacji.

5 publikacji przedstawionych jako podstawa habilitacji przedstawia spójny program badawczy związany z poszukiwaniem spersonalizowanych metod zwiększających efektywność procedur neurofeedback. Osiągnięte rezultaty pozwalają na zwrócenie uwagi na liczne ograniczenia i błędy stosowanych powszechnie metod. Związek cech osobowości i wpływ silnego stresu z siłą korelacji fazowych EEG i wynikami behawioralnymi testów funkcji poznawczych jest pionierskim odkryciem. W tym obszarze publikuje się bardzo wiele nowych pomysłów, jest więc duży potencjał do dalszego rozwoju.

Chociaż wszystkie publikacje są współautorskie Jacek Rogala jest pierwszym autorem w trzech z nich. W publikacji dotyczącej zastosowania sieci neuronowych udało mu się zaangażować większą grupę neuroinformatyków, fizyków i neurobiologów, którzy zajmowali się prowadzeniem eksperymentów, tworzeniem oprogramowania i modelami sieci neuronowych. Z naukowego punktu widzenia ta publikacja stanowi istotne osiągnięcie, wymagała współpracy wielu osób, ale jej wyniki z punktu widzenia klinicznych zastosowań nie są tak obiecujące, jak napisał dr Rogala. Pomimo zastosowania wyrafinowanych metod analizy EEG za pomocą sieci neuronowych trudno jest odkryć cechy sygnałów, które są silnie skorelowane z wynikami eksperymentów.

We wszystkich publikacjach koncepcje artykułów, interpretacja i analiza danych, oraz główne wnioski były indywidualnym wkładem dr Rogali. Potwierdzają to deklaracje współautorów. Czasopisma, w których te prace zostały opublikowane, należą do najlepszych w tej dziedzinie. Dane naukometryczne podane w autoreferacie dotyczą bazy Web of Science, w której na początku 2024 roku było 13 publikacji, o sumarycznym współczynniku wpływu około 22, indeksie Hirscha 5, i liczbie cytowań 144. Większość tych cytowań jest z ostatnich 3 lat. Przy ocenie całego dorobku baza Scopus pokazuje nieco szerszy obraz, 16 publikacji, 170 cytowań i h=5. Rozdziały w książkach i materiałach konferencyjnych są odnotowane w Google Scholar, który pokazuje 30 publikacji, 290 cytowań i h=6.

Ocena pozostałego dorobku.

Po uzyskaniu stopnia doktora w 2014 roku dr Rogala był współautorem 18 publikacji, w tym w 8 był pierwszym autorem. Brał udział w 8 konferencjach, w tym trzech za granicą, jak i wygłosił wykład na zaproszenie Uniwersytetu Hertfordshire w Anglii. Był członkiem dwóch komitetów organizacyjnych konferencji w Warszawie i Paryżu. Napisał recenzję artykułów naukowych dla siedmiu czasopism.

Badania związane z neurofeedbackiem mają praktyczne zastosowanie i dr Rogala brał udział jako podwykonawca naukowy w kilku takich projektach, realizując jako główny kierownik projektu w programie RPO WM w latach 2014-20 projekt „EEGDigiTrack Biofeedback AI - innowacyjne urządzenie do spersonalizowanej neuroterapii o naukowo potwierdzonej skuteczności", w ramach POIR „Opracowanie innowacyjnego wielokanałowego urządzenia do treningu EEG-neurofeedback („EEG-NFB") z zastosowaniem wirtualnej rzeczywistości umożliwiającego skuteczną terapię kliniczną, w oparciu o dowody naukowe (Evidence Based Practice), oraz w ramach POIR w projekcie „Neuroscreeninig-EEG asystent lekarza. Inteligentny system przesiewowy do zastosowania w procesie wykrywania zaburzeń czynności bioelektrycznej mózgu." Wniosek patentowy również nie został opisany i nie ma go w wykazie osiągnięć.

Obecnie jest członkiem trzech zespołów badawczych. Dwa projekty realizowane są w Centrum Badania Ryzyka Systemowego przy Wydziale Artes Liberales Uniwersytetu Warszawskiego: Dynamika społecznych i biologicznych układów złożonych, oraz Mechanizmy oddziaływania sztuki na ośrodkowy układ nerwowy. Trzeci projekt dotyczy „Wczesnych biomarkerów podgrup spektrum autyzmu" i realizowany jest w ramach współpracy Instytutu Matki i Dziecka oraz Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Współpracując z informatykami dr Rogala próbuje wykorzystać metody uczenia maszynowego do weryfikacji tożsamości, oceny biomarkerów zmian neurodegeneracyjnych oraz procesu starzenia. W tym celu utworzył konsorcjum, które złożyło wniosek do programu Horizon Europe. Poszukiwanie praktycznych zastosowań wiedzy zdobytej w badaniach podstawowych jest godne pochwały. Zainteresowania dr Rogali dotyczą również percepcji sztuki. Rozważania teoretyczne, opublikowane w artykule o dekodowaniu intencji artysty, stały się podstawą eksperymentu przeprowadzonego w jedne z galerii w Toruniu, oraz wystąpień konferencyjnych w Warszawie i Paryżu. Prace na pograniczu neuronauk i sztuki są również jednym z projektów badań w ramach Centrum Badania Ryzyka Systemowego, którego współzałożycielem jest doktor Rogala.

Słabą stroną działalności dr Rogali jest niewielka współpraca międzynarodowa i brak zagranicznych staży. Wynika ro zapewne ze skupiania na praktycznych zastosowaniach metod neurofeedback i analizy EEG.

Konkluzja

Szeroki zakres interdyscyplinarnych badań opisanych powyżej nie mieści się w żadnej tradycyjnej dyscyplinie naukowej. Jednak metodologia badań, wykorzystanie urządzeń EEG, analiza sygnałów i danych z eksperymentów, pozwala je zakwalifikować do szeroko rozumianych nauk biofizycznych i zastosowań metod fizyki. Nie mam wątpliwości, że dr Rogala wykazał się dużą inwencją w pracy badawczej, angażuje się w liczne wartościowe projekty i posiada kwalifikacje do dalszej samodzielnej pracy naukowo-badawczej. Przedstawiony mi do oceny materiał uważam za w pełni wystarczający, by spełnić ustawowe i zwyczajowe wymagania dotyczące nadania mu stopnia doktora habilitowanego. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie dr Rogali do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

Włodzisław Duch

Toruń, 10.01.2024