

Rozdzielczość czasowa, pamięć robocza a rodzaje błędów w Teście Matryc Ravena – badanie pilotażowe

Krzysztof Tołpa¹ (0000–0001–6223–234X)

Monika Lewandowska² (0000–0002–7354–3693)

Jan Nikadon³ (0000–0002–2038–254X)

Joanna Dreszer^{*2} (0000–0002–2809–2934)

STRESZCZENIE

Cel

Celem badania pilotażowego było sprawdzenie zależności pomiędzy rozdzielczością czasową w zakresie milisekundowym, pamięcią roboczą oraz inteligencją psychometryczną z uwzględnieniem analizy jakościowej błędów w Teście Matryc Ravena w wersji dla Zaawansowanych *TMZ*.

Metoda

Trzydzieści sześć osób (24 mężczyzn i 12 kobiet, w wieku 17–19 lat) wykonało zadanie polegające na prezentowaniu par bodźców w szybkim następstwie czasowym, a następnie rozwiązywało zadanie mierzące pamięć roboczą Automated Operation Span Task *Aospan* oraz *TMZ*. Rozdzielczość czasową mierzono za pomocą progu postrzegania kolejności bodźców *PPK*, wyznaczanego za pomocą algorytmu adaptacyjnego dla poprawności 75%.

Wyniki

Wykazano tendencję do rzadszego popełniania błędów typu Błędna Zasada w *TMZ* przez osoby uzyskujące niskie wartości *PPK*: $\rho(34) = 0,46$, $p < 0,05$. Ponadto zaobserwowano

* Adres do korespondencji: Joanna Dreszer – Katedra Psychologii Klinicznej i Neuropsychologii, Instytut Psychologii, Wydział Filozofii i Nauk Społecznych, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Gagarina 39, 87-100 Toruń, e-mail: jdreszer@umk.pl.

¹ Katedra Kognitywistyki, Instytut Badań Informacji i Komunikacji, Wydział Filozofii i Nauk Społecznych, Uniwersytet Mikołaja Kopernika.

² Katedra Psychologii Klinicznej i Neuropsychologii, Instytut Psychologii, Wydział Filozofii i Nauk Społecznych, Uniwersytet Mikołaja Kopernika.

³ Centrum Badań nad Relacjami Społecznymi, Instytut Psychologii, SWPS Uniwersytet Humanistycznospołeczny.

związek między wynikami *Aospan* i *TMZ*, dla procentu poprawnie odpamiętanych liter ($\rho(34) = 0,55$, $p < 0,01$), zaś dla procentu poprawnie odpamiętanych sekwencji ($\rho(34) = 0,43$, $p = 0,05$).

Konkluzje

Prezentowane badanie jest pierwszym, w którym wykazano związek czasowego opracowywania informacji na poziomie milisekund z typami błędów popełnianymi w teście inteligencji ogólnej. Osoby, które uzyskały wyższe progi postrzegania kolejności bodźców częściej stosowały przy wyborze odpowiedzi jakościowo odmienne od poprawnych reguły rozumowania, co może odzwierciedlać mniejsze zasoby pamięci roboczej potrzebne do odkrycia właściwej reguły.

Słowa kluczowe: czasowe przetwarzanie informacji, rozdzielczość czasowa, inteligencja ogólna, pamięć robocza

WPROWADZENIE

Zachowania i zadania angażujące zdolności intelektualne, podobnie jak inne aktywności organizmów żywych, przebiegają i zmieniają się w czasie. Dotychczasowe badania pokazują zależności między różnie definiowaną inteligencją człowieka, a czasowymi (temporalnymi) aspektami przetwarzania informacji (Bartholomew, Meck, Cirulli, 2015; Chelonis, Flake, Baldwin, Blake, Merle, 2004; Coyle, Pillow, Snyder, Kochunov, 2011; Helmbold, Troche, Rammsayer, 2006, 2007; Holm, Ullén, Madison, 2011; Jensen, 2005; Karampela, Madison, Holm, 2020; Szymaszek, Sereda, Pöppel, Szeląg, 2009; Rammsayer, Brandler, 2002).

Na początku XX wieku Spearman wyodrębnił czynnik *g general* odzwierciedlający część wspólną wszystkich zdolności, odpowiadający pojęciu inteligencji i charakteryzujący ogólną efektywność w wykonywaniu różnych zadań umysłowych przez człowieka (Spearman, 1904). Czynnik *g* często utożsamiany jest z ogólną inteligencją płynną *Gf fluid intelligence* w ujęciu Cattella i Horna *Gf-Gc model* Horna i Cattella (1967). Zgodnie z tą koncepcją *Gf* to zdolność dostrzegania złożonych relacji między pojęciami, symbolami oraz wykonywania na nich operacji poznawczych. Wyodrębniana jest w kontraście do ogólnej inteligencji skryształizowanej *Gc crystallized intelligence*, czyli umiejętności adekwatnego korzystania z nabytych doświadczeń i wiedzy. Prezentowana praca bada zależności między czynnikiem *g*, pamięcią roboczą a percepcją czasu na poziomie milisekundowym.

Uważa się, że mózgowo podłoże czynnika *g* może być powiązane z mechanizmem kształtującym temporalne przetwarzanie informacji *TIP* (ang. *Temporal Information Processing*), czyli tzw. oscylatorem wewnętrznym (np. Drake, Jones, Baruch, 2000). Działanie tego hipotetycznego mechanizmu może być odpowiedzialne za kształtowanie ram czasowych przebiegu różnych procesów poznawczych (Block, 1990; Fraisse, 1984; Gibbon, 1991; Ivry, Spencer, 2004; Pöppel, 1994, 1997, 2004). Wśród nich znajdują się zdolności językowe, planowania i wykonywania ruchu, proces uwagi i zakres pamięci roboczej, a także zdolności

intelektualne (Habib, 2021; Hove, Gravel, Spencer, Valera, 2017; Jabłońska i in., 2020; Madison, Forsman, Blom, Karabanov, Ullén, 2009; Oroń, Szymaszek, Szeląg, 2015; Rammsayer, Brandler, 2002, 2007; Spencer, Ivry, 2005; Szeląg i in., 2014; Szymaszek i in., 2009; Tallal, 1980; Troche, Rammsayer, 2009; Ulbrich, Churan, Fink, Wittmann, 2009; Ullén, Forsman, Blom, Karabanov, Madison, 2008; Wittmann, von Steinbüchel, Szeląg, 2001).

Dowodów na istnienie związku między TIP a inteligencją ogólną dostarcza ją m.in. badania szybkości mentalnej *mental speed*, czyli tempa i efektywności przetwarzania informacji, w których mierzono czas reakcji (np. Der, Deary, 2017; Jensen, 1993; Miller, Vernon, 1996) lub czas inspekcji IT *inspection time*, Duan, Dan, Shi, 2013; Grudnik, Kranzler, 2001; Nettelbeck, Lally, 1976; Petrill, Deary, 2001). Można założyć, że ujemne korelacje między czasem reakcji oraz czynnikiem *g*, występujące niezależnie od wieku badanych odzwierciedlają szybsze tempo przebiegu procesów poznawczych u osób o wyższym poziomie inteligencji (Der, Deary, 2017; Jensen, 1982). Podobne zależności obserwowano w badaniach IT, w których prezentowano bodziec wzorcowy w postaci dwóch pionowych linii połączonych ze sobą linią poziomą (Deary, 1995, 2000; Grudnik, Kranzler, 2001; Kranzler, Jensen, 1989; Nettelbeck, Lally, 1976; O'Connor, Burns, 2003). Długość jednej linii pionowej jest zawsze stała, a drugiej zmienna. Zadaniem osoby badanej jest określenie, która z dwóch linii pionowych wzorca (lewa czy prawa) jest dłuższa (np. Deary, 2000). W słuchowym wariancie tego zadania (np. Deary, 1995, 2000; O'Connor, Burns, 2003) należy wskazać kolejność prezentacji dwóch krótkich tonów różniących się wysokością. Czas ekspozycji tonów jest stały, zmienia się natomiast długość przerwy między nimi. IT to najkrótszy czas ekspozycji wzorca, przy którym badany udziela co najmniej 90% poprawnych odpowiedzi. Ogólnie wykazano, że krótsze IT, zarówno wzrokowe, jak i słuchowe, współwystępują z wyższym poziomem inteligencji psychometrycznej (Grudnik, Kranzler, 2001). Wyniki te mogą świadczyć o dokładnym różnicowaniu bodźców o krótkim czasie ekspozycji przez osoby o wyższym poziomie zdolności intelektualnych. Warto zaznaczyć, że w powyższych badaniach inteligencję mierzono za pomocą różnych, powszechnie stosowanych testów (*Skala Inteligencji Wechslera*, *Test Matryc Ravena*, *Neutralny Kulturowo Test Inteligencji Cattella*, itp.), których wyniki analizowano w sposób ilościowy.

Badania zespołu Rammsayera (Pahud, Rammsayer, Troche, 2018; Rammsayer, Brandler, 2002, 2007; Troche, Rammsayer, 2009) miały na celu weryfikację hipotezy rozdzielczości czasowej zegara wewnętrznego (ang. *temporal resolution power hypothesis*), zgodnie z którą tempo wewnętrznego oscylatora utożsamiane z cechami działania sieci neuronalnej (tj. częstością transmisji neuronalnej, częstotliwością oscylacji lub szybkością synchronizacji) jest szybsze u osób uzyskujących wyższe wyniki w testach inteligencji ogólnej lub płynnej. Łączy się to z szybszym i dokładniejszym opracowywaniem informacji, jak również z mniejszą podatnością na działanie czynników dystrakcyjnych. Rammsayer i Brandler (2007) uwzględnili zadania angażujące różne poziomy przeżywania czasu w zakresie milisekundowym (m.in. ocenę trwania interwałów czasowych, jednoczesności występowania bodźców, różnicowania rytmów, kolejności dwóch bodźców w parze) oraz baterię zadań, w których rejestrowano czasy

reakcji. Przeprowadzona na uzyskanych wynikach analiza czynnikowa pozwoliła stwierdzić, że wyłoniony czynnik czasowego *g* (ang. *temporal g*) silnie skorelowany z psychometrycznym *g*, może być lepszym wyjaśnieniem odmiennego funkcjonowania osób o wyższym potencjale intelektualnym niż hipoteza szybkości mentalnej.

Zadanie czasowe zastosowane w prezentowanym badaniu przypomina pomiar czasu inspekcji słuchowej, ponieważ polega na ocenie kolejności dwóch krótkich bodźców wzrokowych szybko następujących po sobie. Uzyskany wynik, czyli próg postrzegania kolejności *PPK* (ang. *Temporal Order Threshold*), to najkrótsza przerwa m.in. potrzebna, aby poprawnie rozpoznać ich kolejność. Pośrednich dowodów na istnienie związku między inteligencją ogólną a *PPK* dostarczają badania nad starzeniem się (Kołodziejczyk, Szelaąg, 2008; Skolimowska, 2011; Surwillo, 1964, 1973). Wykazano, że w przypadku zdrowego starzenia obserwuje się m.in. podwyższenie *PPK*, preferowanie istotnie wolniejszego tempa napływu stymulacji zmysłowej oraz wykonania ruchu w komfortowym tempie, co łatwe jest do zaobserwowania również w codziennych czynnościach. Interesujące, że stulatkowie o wyższym poziomie inteligencji charakteryzują się również szybszym i dokładniejszym czasowym opracowywaniem informacji niż osoby w podobnym wieku cechujące się niższą inteligencją (Kołodziejczyk, Szelaąg, 2008). Stwierdzone zmiany interpretowane są w kontekście spowolnienia wewnętrznego mechanizmu zegarowego następującego wraz z wiekiem (Surwillo, 1964, 1973).

Można również wskazać podobieństwa między wzorcem zmian rozwojowych inteligencji płynnej (Horn, Cattell, 1967) a wzorcem zmian, któremu podlega tempo hipotetycznego zegara wewnętrznego (Vanneste, Pouthas, Wearden, 2001). Dobrze udokumentowanym faktem jest spadek zdolności płynnych wraz z wiekiem, łączony ze zmianami atroficznymi w mózgu (Salthouse, 2011). Jednak uzyskane zależności należy traktować z dużą ostrożnością. Inteligencja we wspomnianych badaniach była jedynie zmienną towarzyszącą (Salthouse, 2001). Procesy starzenia odnoszą się do szeregu zmian zarówno w działaniu ośrodkowego układu nerwowego *OUN*, jak i w funkcjach poznawczych, które mogą obniżać wykonanie zadań mierzących *TIP* oraz inteligencję ogólną. Jak sugeruje Salthouse (2011), relacja między wiekiem a spadkiem zdolności poznawczych i zmianami mózgowymi nie jest jednoznacznie określona.

Z pojęciem inteligencji blisko związana jest koncepcja pamięci roboczej. Odzwierciedla ona umiejętność skoncentrowania się na aktywowanych elementach pamięci krótkotrwałej oraz utrzymania ich w ognisku uwagi, dzięki czemu możliwe jest dokonywanie na nich operacji (Engle, Laughlin, Tuholski, Conway, 1999; Engle, 2018). Pamięć robocza jest zatem konieczna do rozwiązywania zadań mierzonych testami inteligencji. Jednocześnie zwrócono uwagę, że to tak naprawdę pamięć robocza może tłumaczyć istnienie relacji między czynnikiem rozdzielczości czasowej a inteligencją (Troche, Rammsayer, 2009, Zajac, Burns, 2011). Rozdzielczość czasowa i pamięć robocza stanowią oddzielne konstrukty. Mimo to są ze sobą powiązane, zwłaszcza, jeśli do wyznaczenia tej pierwszej używane jest zadanie generalizacji czasowej (Zajac, Burns, 2011). Zaobserwowano, że 35% relacji między rozdzielczością czasową a inteligencją ogólną wyjaśniana

jest poprzez czynnik pamięci roboczej. Ponadto rozdzielczość czasowa koreluje w większym stopniu z pamięcią roboczą i szybkością przetwarzania informacji niż samą inteligencją. Ponadto badania raportują całkowitą mediację związku rozdzielczości czasowej i inteligencji przez pamięć roboczą (Troche, Rammsayer, 2009).

Jedną z najczystszych miar czynnika *g* jest Test Matryc Ravena (Raven, 1971), w którym badani muszą wychwycić relacje między elementami wzoru (matrycy) i wybrać brakujący element wzoru spośród dostępnych opcji. W teście tym najczęściej oblicza się liczbę poprawnych odpowiedzi, ale jego wykonanie można też oceniać w sposób jakościowy, analizując typy błędów popełniane przez osoby badane (Raven, 1971). Forbes (1964) wyróżnił cztery typy błędów popełnianych w *TMZ*: 1) Niepełne rozwiązania (Niepełny Korelat, *NK*), które występują, gdy osoba badana nie jest w stanie zidentyfikować wszystkich zmiennych koniecznych do rozwiązania problemu. W rezultacie wybrana odpowiedź jest częściowo dobra; 2) Arbitralne sposoby rozumowania (Błędna Zasada, *BZ*), czyli błędy wynikające z braku umiejętności zidentyfikowania jakichkolwiek zmiennych potrzebnych do wybrania właściwego wycinka. Reguła rozumowania odmienna jest jakościowo od tej wymaganej do poprawnego rozwiązania problemu; 3) "Wieloprzyczynowe" wybory (Natłok Pomysłów, *NP*), które występują, gdy osoba badana nie dostrzega, że niektóre zmienne są nieistotne dla rozwiązania lub nie podlegają zmianom. Wybrany wycinek najczęściej cechuje nadmierna złożoność oraz 4) Powtórzenia *PO*, czyli błędy wynikające z wyboru wzoru występującego na trzech wycinkach bezpośrednio sąsiadujących z miejscem do uzupełnienia. Babcock (2002) przeprowadziła analizę tendencji do popełniania błędów danego rodzaju w zależności od poziomu inteligencji – niski poziom umiejętności (1–10 punktów), średni poziom umiejętności (11–17 punktów), wysoki poziom umiejętności (18–31 punktów) oraz wieku – 18–30 lat, 31–59 lat oraz 60–90 lat. Zaobserwowano, że osoby o wysokim poziomie umiejętności częściej popełniały błąd *NK* niż osoby o średnim poziomie umiejętności. Te z kolei przejawiały większą tendencję do popełniania błędu tego typu niż osoby o niskim poziomie umiejętności. Odwrotny trend zaobserwowano dla błędu *BZ*. Osoby cechujące się przeciętnym lub wyższym od przeciętnego wynikiem w teście *TMZ* zazwyczaj rozumują w sposób poprawny. Ich błędy wynikają głównie z nieuchwycenia wszystkich istotnych zmiennych. Osoby osiągające niskie wyniki w teście nie przejawiają skłonności do popełniania określonego rodzaju błędów – niepoprawne rozwiązania w ich przypadku wynikają prawdopodobnie z losowego wyboru odpowiedzi.

Celem prezentowanego badania pilotażowego było sprawdzenie, czy istnieje związek między rozdzielczością czasową a typami błędów popełnianymi w teście inteligencji i pamięcią roboczą. Oczekiwano, że miara rozdzielczości czasowej będzie dodatnio korelować z wynikami testu inteligencji i pamięci roboczej. Biorąc pod uwagę badanie Babcock (2002) spodziewano się zaobserwować związek między *PPK* a tendencją do popełniania błędów *BZ* oraz *NK*. Według wiedzy autorów, prezentowane badanie jest pierwszym, w którym podjęto próbę sprawdzenia relacji między przetwarzaniem czasowym na poziomie milisekundowym, a wynikami analizy jakościowej wykonania *TMZ*.

METODA

Osoby badane

W badaniu wzięło udział 39 osób (25 mężczyzn i 14 kobiet) w wieku 17–19 lat ($M = 18,44$, $SD = 0,55$), uczniów toruńskich liceów. Wszystkie osoby badane były w ogólnie dobrym stanie zdrowia, regularnie uczęszczały na zajęcia w szkołach, posiadały prawidłowy lub odpowiednio skorygowany wzrok. Osoby rekrutowano za pomocą bezpośrednich ogłoszeń w liceach lub umieszczonych na portalu społecznościowym. Przed badaniem każdy uczestnik wyraził świadomą zgodę na udział w badaniu. W przypadku osób niepełnoletnich, świadomą zgodę wyrażali ich rodzice lub opiekunowie. Badanie zostało zatwierdzone przez Komisję Bioetyczną Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu.

W analizie wzięto pod uwagę wyniki 36 osób (24 mężczyzn, 12 kobiet) w wieku 17–19 lat ($M = 18,44$, $SD = 0,56$). Dwie osoby zakwalifikowano do obserwacji odstających. Jedna z nich osiągnęła wynik wyższy niż trzy odchylenia standardowe dla odchylenia od losowego wyboru błędu *BZ*. Druga zaś nie osiągnęła poprawności 75%, stąd *PPK* przyjął dla niej wartość ujemną. Ostatnią osobę wykluczono z powodu braku jakichkolwiek błędów w *TMZ*, co uniemożliwia interpretację wskaźnika odchylenia od losowego wyboru dla danego typu błędu.

Procedury

Rozdzielczość czasowa

Do zbadania rozdzielczości czasowej osób badanych wykorzystano zadanie ustalania kolejności w czasie. Zadanie ma formę procedury wymuszonego wyboru spośród 2 odpowiedzi *2AFC* (ang. *Two-alternative forced choice task*). Polega na ustaleniu następstwa w czasie bodźców podawanych w krótkich, zmiennych odstępach czasu. Wartości przerw między bodźcami wyznaczone były za pomocą algorytmu adaptacyjnego opartego na metodzie aktualizowanej najwyższej wiarygodności (ang. *Updated Maximum Likelihood estimation*) (Shen, Dai, Richards, 2015). Zastosowano następującą konfigurację: maksymalna i jednocześnie początkowa wartość interwału – 150 ms, minimalna wartość interwału – 1 ms.

Procedurę eksperymentalną kontrolowano za pomocą minikomputera Raspberry Pi 3 Model B SBC (Bulk) wyposażonego w mikrokontroler Arduino Genuine Zero. Bodźce generowano przy użyciu sterownika LED Maxim Integrated MAX16822BEVKIT+. Do podawania użyto diod LED CREE świecących białym światłem o maksymalnym strumieniu światła 350 lm. Diody przymocowano po prawej i lewej stronie ekranu, na którym wyświetlano krzyżyk fiksacyjny na czarnym tle. Przyciski do udzielania odpowiedzi były podłączone do komputera za pomocą światłowodów. Czas pojedynczej próby w zadaniu wynosił 3 s. Bodźce świetlne prezentowano przez 40 ms najpierw po jednej, a po upływie interwału o zmiennej długości, po drugiej stronie ekranu. Osoba badana siedziała w odległości ok. 1 m przed ekranem. Jej zadanie polegało na wskazaniu, po której stronie

pojawił się pierwszy bodziec, poprzez naciśnięcie kciukiem przycisku trzymanego w dłoni po odpowiedniej stronie.

Przed rozpoczęciem badania wykonywano sesję ćwiczeniową, aby upewnić się, że procedura jest zrozumiała dla badanego. Aby wymusić podczas zadania fiksację, a także ograniczyć w ten sposób stosowanie różnych strategii na jednym punkcie bezpośrednio przed i w trakcie trwania zadania badanych proszono o skupienie wzroku na punkcie fiksacji. Po zakończeniu badania osoba badana proszona była o wypełnienie krótkiej ankiety dotyczącej wrażeń podczas eksperymentu i stosowania ewentualnych strategii radzenia sobie z zadaniem.

Na podstawie zebranych danych dla obu zadań obliczono wartości progowe *PPK*. *PPK* definiowane były jako wartość interwału czasowego przy poprawności 75% (Jabłońska i in., 2020; Szelaż i in., 2011, Szelaż, Jabłońska, Piotrowska, Szymaszek, Bednarek, 2018). Wartości te obliczono na podstawie estymowanych *post hoc* krzywych psychometrycznych dla każdej osoby przy użyciu toolboxa Psignifit 4 w Matlabie (Schütt, Harmeling, Macke, Wichmann, 2016). Wartości progowe obliczano w oparciu o wszystkie próby jakie wykonały osoby badane. Stąd, liczba prób pomiędzy badanymi znacznie się różniła: wahała się od 20 do 120. Pomimo tak małej liczby prób możliwe było dla osoby badanej osiągnięcie wartości progowych.

Pamięć robocza

Do zbadania funkcjonowania pamięci roboczej użyto zadania Automated Operation Span Task *Aospan* (Unsworth, Heitz, Schrock, Engle, 2005). Osobie badanej prezentowane były naprzemiennie działania do rozwiązania oraz litery do zapamiętania, tak jak to miało miejsce w trzeciej części ćwiczeniowej. Długość sekwencji liter była losowa i wynosiła od 3 do 7 elementów. Osoba badana rozwiązywała łącznie 15 prób, składających się z sekwencji liter oraz działań matematycznych. Każda długość sekwencji prezentowana była trzykrotnie. *Aospan* użyty w tym badaniu, pochodzi z baterii testów PEBL 2.1 (Mueller, Piper, 2014). Zadanie wykonywano na laptopie o rozdzielczości ekranu 1366 x 768. Do udzielania odpowiedzi używano myszki laserowej. Obliczono dwa wskaźniki funkcjonowania pamięci roboczej: procent poprawnie odtworzonych sekwencji oraz procent poprawnie odtworzonych liter w sekwencjach.

Inteligencja psychometryczna

W celu zbadania inteligencji psychometrycznej użyto Testu Matrycy Ravena w wersji dla Zaawansowanych *TMZ*. Dla każdej osoby obliczono wynik surowy oraz przeprowadzono analizę tendencji do popełniania błędów. Błędy w *TMZ* nie są rozmieszczone w sposób równomierny. Stąd, zastosowano miarę zaproponowaną przez Babcock (2002) w postaci odchylenia od losowego wyboru dla każdego z typów błędów. Obliczana jest ona w następujący sposób:

1. Klasyfikacja błędów w teście i ustalenie liczby błędów każdego typu w każdym problemie.
2. Określenie liczby błędów każdego typu w pytaniach, w których osoba badana się pomyliła.

3. Ustalenie całkowitej liczby błędów dla każdej osoby i pomnożenie jej przez 7. Wartość ta ma odzwierciedlać całkowitą liczbę dystraktorów w problemach, w których osoba badana się pomyliła.
4. Określenie indywidualnego prawdopodobieństwa popełnienia błędu każdego rodzaju przez przypadek: wartość uzyskana w punkcie 2 dzielona jest przez wartość z punktu 3.
5. Ustalenie liczby błędów każdego typu popełnionych przez osobę badaną.
6. Obliczenie indywidualnych proporcji liczby błędów każdego typu (wartość z punktu 5) do całkowitej liczby popełnionych błędów.
7. Obliczenie indywidualnego odchylenia od losowego wyboru dla każdego typu błędów. Od indywidualnych proporcji liczby błędów każdego typu (wartość otrzymana w punkcie 6) odejmowana jest wartość indywidualnego prawdopodobieństwa popełnienia błędu każdego rodzaju przez przypadek (wartość z punktu 4). Dodatnia wartość tego wskaźnika oznacza, że osoba badana częściej popełnia błędy danego typu niż to wynika z losowego wyboru. Ujemna wartość odzwierciedla tendencję do niepopelniania błędu danego typu.

W badaniu wykorzystano klasyfikację błędów zaproponowaną przez Babcock (2002) dla problemów 1–31 oraz Israel (2006) dla problemów 32–36. Wartości potrzebne do otrzymania wskaźnika odchylenia od losowego wyboru dla każdego typu błędów obliczono za pomocą własnego skryptu w środowisku Matlab.

Analiza

W celu zbadania relacji między przetwarzaniem czasowym, pamięcią roboczą oraz inteligencją obliczono korelacje parami ρ Spearmana z poprawką FDR na wielokrotne porównania dla następujących wyników: PPK , procentu poprawnie odtworzonych sekwencji i procentu poprawnie odtworzonych liter w sekwencjach z zadania $Aospan$, surowego wyniku TMZ i wartości odchyień dla każdego typu błędów w TMZ . Powyższe analizy wykonano w środowisku R.

WYNIKI

PPK korelował w sposób istotny jedynie z odchyleniem od losowego wyboru dla błędu BZ (Błędna Zasada): $\rho(34) = 0,46$, $p < 0,05$. Nie zaobserwowano znaczącego związku między PPK a wynikami $Aospan$ dla procentu poprawnie odpamiętanych sekwencji liter $\rho(34) = 0,18$, $p = 0,62$, zaś dla procentu poprawnie odpamiętanych liter $\rho(34) = 0,03$, $p = 0,89$ i TMZ $\rho(34) = -0,18$, $p = 0,62$.

Wykazano korelacje między wskaźnikami z zadania $Aospan$ oraz surowym wynikiem z TMZ o przeciętnej sile: dla procentu poprawnie odpamiętanych sekwencji na progu istotności statystycznej $\rho(34) = 0,43$, $p = 0,05$, a dla procentu poprawnie odpamiętanych liter: $\rho(34) = 0,55$, $p < 0,01$. Obie miary zadania $Aospan$ łączą silną korelacją: $\rho(34) = 0,78$, $p < 0,01$.

Ponadto wykazano istotny związek między dwoma wskaźnikami tendencji do popełniania błędów w *TMZ* – odchyleniem od losowego wyboru dla błędu *BZ* oraz odchyleniem od losowego wyboru *NK* ($\rho(34) = -0,47, p < 0,05$).

DYSKUSJA

Celem tego badania pilotażowego było sprawdzenie, czy jakościowa analiza wyników *TMZ* (analiza typów błędów popełnianych w teście) może przyczynić się do lepszego rozumienia związku inteligencji ogólnej z czasowym przetwarzaniem informacji i pamięcią roboczą. Wykazano oczekiwane i spójne z wcześniejszymi badaniami korelacje między miarami pamięci roboczej oraz zdolności intelektualnych (np. Engle i in., 1999; Engle, 2018; Troche, Rammsayer, 2009). Wartości *PPK* nie korelowały istotnie z ogólnym wynikiem *TMZ* oraz wynikami zadania *Aospan*. Analiza jakościowa wykonania testu inteligencji ujawniła związek wartości *PPK* z tendencją do popełniania błędów *BZ*. Może to ujawniać odmienne sposoby rozumowania u osób o różnych poziomach *PPK*.

Babcock (2002) wykazała, że osoby cechujące się wysoką inteligencją, które uzyskały wynik w *TMZ* między 18 a 31 punktów, wykazują tendencję do popełniania błędów typu *NK* (Niepełny Korelat), przy jednoczesnym braku popełniania *BZ* (Błędna Zasada). W naszym badaniu najniższy osiągnięty wynik to 18 punktów, a zatem wszyscy uczestnicy badania mogą być traktowani jako osoby o wysokiej inteligencji psychometrycznej. Pomimo że związek między *PPK* a ogólnym wynikiem *TMZ*, okazał się w naszym badaniu nieznaczący. Wykazaliśmy istotne korelacje między wartościami prognozy a odchyleniem od losowego wyboru błędu *BZ*. Innymi słowy, okazało się, że osoby o wysokim poziomie inteligencji i uzyskujące wyższe wartości *PPK* (oznaczające mniej sprawne przetwarzanie czasowe w przedziale milisekundowym), rozwiązując zadania w *TMZ*, mogą kierować się odmiennym, od potrzebnego do udzielenia poprawnej odpowiedzi, tokiem rozumowania.

Biorąc pod uwagę raportowany w literaturze związek inteligencji z pamięcią roboczą, efekt ten może wynikać z mniejszych zasobów uwagowych i pamięciowych potrzebnych do zidentyfikowania właściwych reguł i utrzymywania ich w celu wykonywania operacji (Chuderski, 2015). Badania Jarosz i Wiley (2012) pokazują, że wyniki uzyskane w pytaniach, w których najczęściej popełnianym błędem jest *BZ* silniej korelują z czynnikiem pamięci roboczej niż pytania, w których najczęstszym błędem jest *NK*. Sugeruje to, że tendencja do popełniania błędów tego typu w największym stopniu zależy od funkcjonowania pamięci roboczej (Chuderski, 2015). W naszym badaniu nie zaobserwowaliśmy istotnej korelacji między tendencją do popełniania błędu *BZ* a pamięcią roboczą. Jednocześnie w literaturze raportowana jest mediacja relacji między rozdzielczością czasową a inteligencją przez pamięć roboczą. Można więc przypuszczać, że wśród osób o wysokiej inteligencji tendencja do popełniania błędów *BZ* w największym stopniu zależy od przetwarzania czasowego. Włączenie zaś do analiz osób o niższych zdolnościach intelektualnych zaowocowałoby pojawieniem się istotnego związku

między pamięcią roboczą a prawdopodobieństwem popełniania błędu *BZ*. Zakładając, że powyższy efekt potwierdziłby się w badaniach z udziałem większej liczby osób, analiza jakościowa wyników testów inteligencji mogłaby dostarczyć bardziej czułego (niż sam ogólny wynik testu) wskaźnika różnic indywidualnych w zdolnościach intelektualnych i czasowym opracowywaniu informacji.

Brak korelacji między miarami rozdzielczości czasowej a wynikiem *TMZ*, obserwowany w naszym badaniu, może wynikać ze specyfiki zadania mierzącego *PPK*. Może wynikać również z faktu, że w uczestniczyły w nim wyłącznie osoby o wysokim poziomie inteligencji (mała wariancja wyników). W tym miejscu należy zaznaczyć, że chociaż większość doniesień naukowych sugeruje dodatnią korelację między rozdzielczością czasową a inteligencją (np. Troche, Rammsayer, 2009), nie zawsze udaje się wykazać ten związek (np. Rammsayer, Brandler, 2002). Zadanie polegające na ocenie kolejności bodźców angażuje specyficzny rodzaj przetwarzania czasowego. Rodzaj ten leży u podstaw procesów związanych z językiem, takich jak: produkcja mowy oraz czytanie. Być może zatem w badanej próbie istnieje trzeci czynnik mediujący relację między rozdzielczością czasową a inteligencją ogólną, np. w postaci szybkości przetwarzania informacji czy uwagi (Pahud, 2017).

Dodatkowo, trzeba w tym miejscu zaznaczyć trudności, jakie niesie ze sobą interpretacja wskaźnika tendencji do popełniania błędów w postaci odchylenia od losowego wyboru dla danego typu błędu. Po pierwsze, żeby włączyć wynik do analizy osoba badana musi popełnić błąd. Stąd, w analizie tego typu trzeba wykluczyć część osób, które cechują się wysoką inteligencją. Po drugie, odchylenie od losowego wyboru jest wskaźnikiem tendencji do popełniania błędu danego typu. Nie mówi dużo na temat rzeczywistej liczby popełnionych błędów. Wysoki wynik może pojawić się w przypadku bardzo małej liczby błędów (nawet dla jednego złego wyboru), w których prawdopodobieństwo popełnienia błędu danego typu w danej macierzy było niskie. Stąd, wpływ na wynik mają zmienne losowe, zwłaszcza w przypadku badania osób, które popełniają niewiele błędów.

Ograniczenia i kierunki dalszych badań

Prezentowane badanie ma charakter pilotażowy, a przeprowadzenie tylko jednego testu mierzącego inteligencję stanowi ograniczenie. Dlatego, żeby sprawdzić m.in. na ile ta grupa rzeczywiście jest specyficzna warto uwzględnić więcej niż jedną miarę inteligencji, pamięci roboczej i rozdzielczości czasowej.

Podstawowym ograniczeniem przeprowadzonych badań jest stosunkowo mała liczebność próby. Uniemożliwia ona stworzenie modelu statystycznego o liczbie predyktorów większej niż jeden. Z tego powodu, w celu zbadania związków między zmiennymi analizę ograniczono głównie do korelacji. W badaniach właściwych warto byłoby również zniwelować dysproporcję w liczebności między obiema płciami ponieważ przewaga mężczyzn w pilotażu utrudnia przewidywanie jak analizowane zmienne będą zachowywać się względem siebie w całej populacji. Ponadto należy w tym miejscu zaznaczyć, że badana grupa była stosunkowo homogeniczna, ograniczała się w większości do cechujących się ponadprzeciętną

inteligencją uczniów szkół średnich. Stąd, aby móc wnioskować o tendencjach obecnych w populacji, należałoby potwierdzić otrzymane wyniki na bardziej zróżnicowanej próbie. W badaniu właściwym, w celu uwiarygodnienia ewentualnych zależności, warto dodatkowo uwzględnić więcej niż jedną miarę pamięci roboczej, inteligencji ogólnej oraz rozdzielczości czasowej.

Dodatkowo należy mieć świadomość ograniczeń przyjętej za Forbes (1964) klasyfikacji błędów w *TMZ*. Poza brakiem równoliczności oraz równomiernego rozmieszczenia błędów danego typu w teście, zwraca się uwagę na brak jasno określonych zasad, według których tworzone są błędne odpowiedzi (Chuderski, 2015). W rezultacie występują różnice w obrębie danej kategorii błędu pod względem liczby błędnych reguł rozumowania, co utrudnia interpretację tendencji do popełniania błędów danego typu. W odpowiedzi na te ograniczenia modyfikuje się testy inteligencji kontrolując liczbę błędnych reguł w możliwych odpowiedziach. Powtórzenie analiz przy jednoczesnej kontroli liczby błędnych reguł rozumowania pozwoli na zwiększenie wiarygodności i pogłębienie prezentowanego wnioskowania.

PODSUMOWANIE

Według wiedzy autorów jest to pierwsze, wstępne doniesienie na temat związku prognozy postrzegania kolejności bodźców prezentowanych w szybkim następie czasowym z błędami popełnianymi w Teście Matrycy Ravena. Ze względu na wskazane wyżej ograniczenia uzyskane wyniki należy interpretować z dużą ostrożnością. Wydaje się jednak, że analiza jakościowa wyników testów inteligencji może być przydatna w celu dokładniejszego poznania zależności między funkcjonowaniem poznawczym a czasowymi aspektami przetwarzania informacji.

BIBLIOGRAFIA

- Babcock, R. L. (2002). Analysis of age differences in types of errors on the Raven's Advanced Progressive Matrices. *Intelligence*, 30(6), 485–503. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(02\)00124-1](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(02)00124-1).
- Bartholomew, A. J., Meck, W. H., Cirulli, E. T. (2015). Analysis of Genetic and Non-Genetic Factors Influencing Timing and Time Perception. *PLOS ONE*, 19. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143873>.
- Block, R.A. (1990). *Cognitive models of psychological time*. New York: Lawrence Erlbaum Associates.
- Chelonis, J., Flake R. A., Baldwin, R. L., Blake, D. J., Merle, G. P. (2004). Developmental aspects of timing behavior in children. *Neurotoxicology and Teratology*, 26(3), 461–476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2004.01.004>.
- Chuderski, A. (2015). Why People Fail on the Fluid Intelligence Tests. *Journal of Individual Differences*, 36(3), 138–149. DOI: <https://doi.org/10.1027/1614-0001/a000164>.

- Coyle, T. R., Pillow, D. R., Snyder, A. C., Kochunov, P. (2011). Processing Speed Mediates the Development of General Intelligence (g) in Adolescence. *Psychological Science*, *22*(10), 1265–1269. DOI: <https://doi.org/10.1177/0956797611418243>.
- Deary, I.J. (1995). Auditory inspection time and intelligence: What is the direction of causation? *Developmental Psychology*, *31*, 237–250. DOI: <https://doi.org/10.1037/0012-1649.31.2.237>.
- Deary, I.J. (2000). *Looking down on human intelligence. From psychometrics to the brain*. Oxford: Oxford University Press. DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/978-0198524175.001.0001>.
- Der, G., Deary, I. J. (2017). The relationship between intelligence and reaction time varies with age: Results from three representative narrow-age age cohorts at 30, 50 and 69 years. *Intelligence*, *64*, 89–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.08.001>.
- Drake, C., Jones, M.R., Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: Attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, *77*, 251–288. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(00\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(00)00106-2).
- Duan, X., Dan, Z., Shi, J. (2013). The Speed of Information Processing of 9- to 13-Year-Old Intellectually Gifted Children. *Psychological Reports*, *112*(1), 20–32. DOI: <https://doi.org/10.2466/04.10.49.PR0.112.1.20-32>.
- Engle, R. W., Laughlin, J. E., Tuholski, S. W., Conway, A. R. A. (1999). Working Memory, Short-Term Memory, and General Fluid Intelligence: A Latent-Variable Approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, *128*(3), 309–331. DOI: <https://doi.org/10.1037/0096-3445.128.3.309>.
- Engle, R. W. (2018). Working Memory and Executive Attention: A Revisit. *Perspectives on Psychological Science*, *13*(2), 190–193. DOI: <https://doi.org/10.1177/1745691617720478>.
- Forbes, A. R. (1964). An Item Analysis Of The Advanced Matrices. *British Journal of Educational Psychology*, *34*(3), 223–236. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2044-8279.1964.tb00632.x>.
- Fraisse, P. (1984). Perception and estimation of time. *Annual Review of Psychology*, *35*, 1–36. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.35.020184.000245>.
- Gibbon, J. (1991). Origin of scalar timing. *Learning and Motivation*, *22*, 3–38. DOI: [https://doi.org/10.1016/0023-9690\(91\)90015-Z](https://doi.org/10.1016/0023-9690(91)90015-Z).
- Grudnik, J. L., Kranzler, J. H. (2001). Meta-analysis of the relationship between intelligence and inspection time. *Intelligence*, *29*(6), 523–535. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(01\)00078-2](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(01)00078-2).
- Habib, M. (2021). The Neurological Basis of Developmental Dyslexia and Related Disorders: A Reappraisal of the Temporal Hypothesis, Twenty Years on. *Brain Sciences*, *11*(6), 708. DOI: <https://doi.org/10.3390/brainsci11060708>.
- Helmbold, N., Troche, S., Rammsayer, T. (2006). Temporal information processing and pitch discrimination as predictors of general intelligence. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *60*(4), 294–306. DOI: <https://doi.org/10.1037/cjep2006027>.
- Helmbold, N., Troche, S., Rammsayer, T. (2007). Processing of Temporal and Nontemporal Information as Predictors of Psychometric Intelligence: A Structural-Equation-Modeling

- Approach. *Journal of Personality*, 75(5), 985–1006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-6494.2007.00463.x>.
- Holm, L., Ullén, F., Madison, G. (2011). Intelligence and temporal accuracy of behaviour: Unique and shared associations with reaction time and motor timing. *Experimental Brain Research*, 214(2), 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2817-6>.
- Horn, J.L., Cattell, R.B. (1967). Age differences in fluid and crystallized intelligence. *Acta Psychologica*, 26, 107–129. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(67\)90011-X](https://doi.org/10.1016/0001-6918(67)90011-X).
- Hove, M. J., Gravel, N., Spencer, R. M. C., Valera, E. M. (2017). Finger tapping and pre-attentive sensorimotor timing in adults with ADHD. *Experimental Brain Research*, 235(12), 3663–3672. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5089-y>.
- Israel, N. (2006). Raven's Advanced Progressive Matrices within a South African context. Unpublished Masters Research Report, University of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Ivry, R.B., Spencer, R.M.C. (2004). The neural representation of time. *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 225–232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.013>.
- Jabłońska, K., Piotrowska, M., Bednarek, H., Szymaszek, A., Marchewka, A., Wypych, M., Szlag, E. (2020). Maintenance vs. Manipulation in Auditory Verbal Working Memory in the Elderly: New Insights Based on Temporal Dynamics of Information Processing in the Millisecond Time Range. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 12, 194. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.00194>.
- Jarosz, A. F., Wiley, J. (2012). Why does working memory capacity predict RAPM performance? A possible role of distraction. *Intelligence*, 40(5), 427–438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intell.2012.06.001>.
- Jensen, A. R. (2005). Psychometric G and Mental Chronometry. *Cortex*, 41(2), 230–231. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70902-X](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70902-X).
- Jensen, A. R. (1982). Reaction Time and Psychometric g. W H. J. Eysenck (Red.), *A Model for Intelligence* (s. 93–132). Springer Berlin Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-68664-1_4.
- Jensen, A. R. (1993). Why Is Reaction Time Correlated with Psychometric g? *Current Directions in Psychological Science*, 2(2), 53–56. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-8721.ep10770697>.
- Karampela, O., Madison, G., Holm, L. (2020). Motor timing training improves sustained attention performance but not fluid intelligence: Near but not far transfer. *Experimental Brain Research*, 238(4), 1051–1060. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05780-4>.
- Kołodziejczyk, I., Szlag, E. (2008). Auditory perception of temporal order in Centenarians in comparison with young and elderly subjects. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 68(3), 373–381.
- Kranzler, J. H., Jensen, A. R. (1989). Inspection time and intelligence: A meta-analysis. *Intelligence*, 13(4), 329–347. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(89\)80006-6](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(89)80006-6).
- Miller, L. T., Vernon, P. A. (1996). Intelligence, reaction time, and working memory in 4- to 6-year-old children. *Intelligence*, 22(2), 155–190. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(96\)90014-8](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(96)90014-8).

- Madison, G., Forsman, L., Blom, Ö., Karabanov, A., Ullén, F. (2009). Correlations between intelligence and components of serial timing variability. *Intelligence*, *37*, 68–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intell.2008.07.006>.
- Mueller, S. T., Piper, B. J. (2014). The Psychology Experiment Building Language (PEBL) and PEBL Test Battery. *Journal of Neuroscience Methods*, *222*, 250–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2013.10.024>.
- Nettelbeck, T., Lally, M. (1976). Inspection time and measured intelligence. *British Journal of Psychology*, *67*, 17–22. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1976.tb01493.x>.
- O'Connor, T. A., Burns, N. R. (2003). Inspection time and general speed of processing. *Personality and Individual Differences*, *35*(3), 713–724. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(02\)00264-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00264-7).
- Oroń, A., Szymaszek, A., Szelag, E. (2015). Temporal information processing as a basis for auditory comprehension: clinical evidence from aphasic patients. *International Journal of Language & Communication Disorders*, *50*(5), 604–615. DOI: <https://doi.org/10.1111/1460-6984.12160>.
- Pahud, O. (2017). *The influence of attention on the relationship between temporal resolution power and general intelligence*. Rozprawa doktorska. University of Bern, Faculty of Human Sciences.
- Pahud, O., Rammsayer, T. H., Troche, S. J. (2018). Elucidating the Functional Relationship Between Speed of Information Processing and Speed-, Capacity-, and Memory-Related Aspects of Psychometric Intelligence. *Advances in Cognitive Psychology*, *14*(1), 3–13. DOI: <https://doi.org/10.5709/acp-0233-4>.
- Petrill, S.A., Deary, I. (2001). Inspection time and intelligence: Celebrating 25 years of research. *Intelligence*, *29*(6), 441–442. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(01\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(01)00079-4).
- Pöppel, E. (1997). A hierarchical model of temporal perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *1*, 56–61. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(97\)01008-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(97)01008-5).
- Pöppel, E. (2004). Lost in time: a historical frame, elementary processing units and the 3-second window. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, *64*, 295–302.
- Pöppel, E. (1994). Temporal mechanisms in perception. *International Review of Neurobiology*, *37*, 185–202. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0074-7742\(08\)60246-9](https://doi.org/10.1016/s0074-7742(08)60246-9).
- Rammsayer, T. H., Brandler, S. (2002). On the relationship between general fluid intelligence and psychophysical indicators of temporal resolution in the brain. *Journal of Research in Personality*, *36*, 507–530. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0092-6566\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0092-6566(02)00006-5).
- Rammsayer, T. H., Brandler, S. (2007). Performance on temporal information processing as an index of general intelligence. *Intelligence*, *35*(2), 123–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.04.007>.
- Raven, J. C. (1971). *Advanced Progressive Matrices, Sets I and II. Plan and use of the scale with report of experimental work*. London: H. K. Lewis and Co. Ltd.
- Salthouse, T.A. (2001). Structural models of the relations between age and measures of cognitive functioning. *Intelligence*, *29*, 93–115. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(00\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(00)00040-4).

- Salthouse, T. A. (2011). Neuroanatomical substrates of age-related cognitive decline. *Psychological Bulletin*, 137(5), 753–784. DOI: <https://doi.org/10.1037/a0023262>.
- Schütt, H. H., Harmeling, S., Macke, J. H., Wichmann, F. A. (2016). Painfree and accurate Bayesian estimation of psychometric functions for (potentially) overdispersed data. *Vision Research*, 122, 105–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.02.002>.
- Shen, Y., Dai, W., Richards, V. M. (2015). A MATLAB toolbox for the efficient estimation of the psychometric function using the updated maximum-likelihood adaptive procedure. *Behavior Research Methods*, 47(1), 13–26. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-014-0450-6>.
- Skolimowska, J. (2011). *Charakterystyka wybranych funkcji poznawczych w zdrowym starzeniu się, łagodnych zaburzeniach poznawczych i chorobie Alzheimerera*. Nieopublikowana rozprawa doktorska (promotor: prof. dr hab. E. Szelaĝ). Instytut Biologii Doświadczalnej PAN, Warszawa.
- Spearman, C. (1904). ‘General intelligence,’ objectively determined and measured. *The American Journal of Psychology*, 15(2), 201–293. DOI: <https://doi.org/10.2307/1412107>.
- Spencer, R. M. C., Ivry, R. B. (2005). Comparison of patients with Parkinson’s disease or cerebellar lesions in the production of periodic movements involving event-based or emergent timing. *Brain and Cognition*, 58(1), 84–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.09.010>.
- Surwillo, W.W. (1964). Age and the perception of short intervals of time. *Journal of Gerontology*, 19, 322–324. DOI: <https://doi.org/10.1093/geronj/19.3.322>.
- Surwillo, W.W. (1973). Choice reaction time and speed of information processing in old age. *Perceptual and Motor Skills*, 36, 321–322. DOI: <https://doi.org/10.2466/pms.1973.36.1.321>.
- Szelaĝ, E., Jabłońska, K., Piotrowska, M., Szymaszek, A., Bednarek, H. (2018). Spatial and Spectral Auditory Temporal-Order Judgment (TOJ) Tasks in Elderly People Are Performed Using Different Perceptual Strategies. *Frontiers in Psychology*, 9, 2557. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02557>.
- Szelaĝ, E., Szymaszek, A., Aksamit-Ramotowska, A., Fink, M., Ulbrich, P., Wittmann, M., i in. (2011). Temporal processing as a base for language universals: Cross-linguistic comparisons on sequencing abilities with some implications for language therapy. *Restorative Neurology and Neuroscience*, (1), 35–45. DOI: <https://doi.org/10.3233/RNN-2011-0574>.
- Szelaĝ, E., Lewandowska, M., Wolak, T., Seniow, J., Poniatowska, R., Pöppel, E., Szymaszek, A. (2014). Training in rapid auditory processing ameliorates auditory comprehension in aphasic patients: A randomized controlled pilot study. *Journal of the Neurological Sciences*, 338(1–2), 77–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jns.2013.12.020>.
- Szymaszek, A., Sereda, M., Pöppel, E., Szelaĝ, E. (2009). Individual differences in the perception of temporal order: The effect of age and cognition. *Cognitive Neuropsychology*, 26(2), 135–147. DOI: <https://doi.org/10.1080/02643290802504742>.
- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language*, 9(2), 182–198. DOI: [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(80\)90139-X](https://doi.org/10.1016/0093-934X(80)90139-X).
- Troche, S. J., Rammsayer, T. H. (2009). The influence of temporal resolution power and working memory capacity on psychometric intelligence. *Intelligence*, 37(5), 479–486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intell.2009.06.001>.

- Ulbrich, P., Churan, J., Fink, M., Wittmann, M. (2009). Perception of Temporal Order: The Effects of Age, Sex, and Cognitive Factors. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 16(2), 183–202. DOI: <https://doi.org/10.1080/13825580802411758>.
- Ullén, F., Forsman, L., Blom, Ö., Karabanov, A., Madison, G. (2008). Intelligence and variability in a simple timing task share neural substrates in the prefrontal white matter. *Journal of Neuroscience*, 28(16), 4238–4243. DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0825-08.2008>.
- Unsworth, N., Heitz, R. P., Schrock, J. C., Engle, R. W. (2005). An automated version of the operation span task. *Behavior Research Methods*, 37(3), 498–505. DOI: <https://doi.org/10.3758/BF03192720>.
- Wittmann, M., von Steinbüchel, N., Szelağ, E. (2001). Hemispheric specialisation for self-paced motor sequences. *Cognitive Brain Research*, 10, 341–344. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(00\)00052-5](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(00)00052-5).
- Vanneste, S., Pouthas, V., Wearden, J.H. (2001). Temporal control of rhythmic performance: A comparison between young and old adults. *Experimental Aging Research*, 27, 83–102. DOI: <https://doi.org/10.1080/036107301750046151>.
- Zajac, I. T., Burns, N. R. (2011). Do Auditory Temporal Discrimination Tasks Measure Temporal Resolution of the CNS? *Psychology*, 02(07), 743–753. DOI: <https://doi.org/10.4236/psych.2011.27114>.

Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2015/18/E/HS6/00399 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.