

Pamięć robocza i jej rola w procesach uczenia się i pamięci

Working memory and its role in learning and memory processes

Anna Oroń

Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Światowe Centrum Słuchu, Warszawa/Kajetany

Adres autora: Anna Oroń, Światowe Centrum Słuchu, ul. Mokra 17, Kajetany, 05-830 Nadarzyn,
e-mail: anna.oron@gmail.com

Streszczenie

Pamięć i uczenie się to jedne z najciekawszych zdolności umysłu człowieka, porównywane do kleju, który skleja w jedną ciągłą całość ludzkie doświadczenia, epizody z życia, nabywaną wiedzę. Bez pamięci nasze świadome i nieświadome doświadczenia życiowe byłyby tylko grupą niepowiązanych ze sobą zdarzeń. Dlatego też procesy te stanowią inspirację badań wielu naukowców na całym świecie. Niniejsze opracowanie przybliży tematykę pamięci roboczej, stanowi podsumowanie aktualnej, bardzo szerokiej wiedzy dotyczącej tego rodzaju pamięci, jej miejsca w obecnych klasyfikacjach, roli w codziennym funkcjonowaniu człowieka. Omówiono metody badania pamięci roboczej i jej usprawniania, jak również zaprezentowano aktualną wiedzę na temat mózgowego podłoża pamięci roboczej.

Słowa kluczowe: pamięć robocza • pamięć krótkotrwała • neurobiologiczne podłożo pamięci roboczej • metody badania pamięci roboczej

Abstract

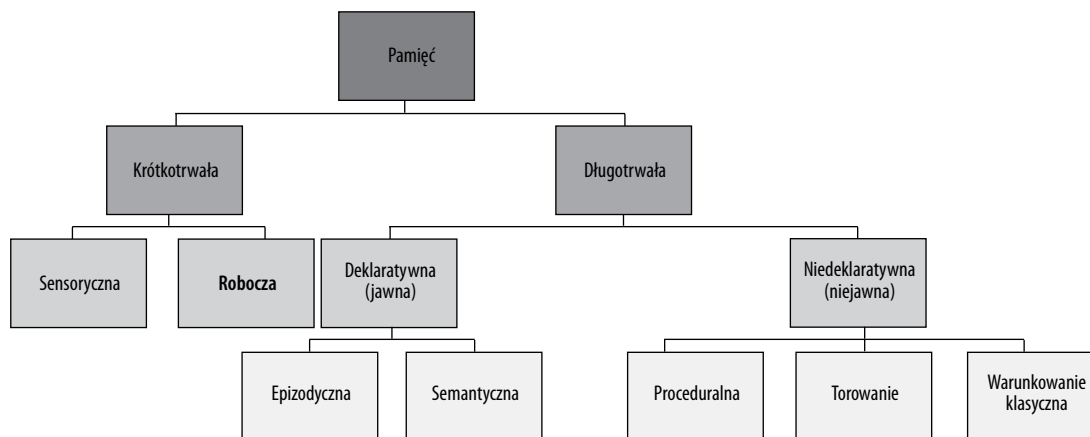
Learning and memory constitute one of the most interesting human capabilities. They are like glue that sticks together our mental life, episodes and knowledge. Without memory our conscious and unconscious life would be only a group of unrelated pieces. This is why those processes constitute a constant inspiration for many researchers worldwide. This review focuses on working memory, its place in current memory classifications, and its role in everyday life. This article describes the methods of working memory measurement, its improvement and neurobiological basis.

Key words: working memory • short-term memory • neurobiological basis of working memory • measures of working memory

„Głowa bez pamięci to twierdza bez garnizonu” – Napoleon Bonaparte, autor zacytowanego twierdzenia, trafnie określił charakter pamięci (www.wielkiemysli.pl). Wielki wódz doskonale wiedział, jaki byłby umysł bez pamięci – kruchy, bezbronny i słaby. Pamięć czyni nasz umysł silnym i mocnym, dzięki niej gromadzimy doświadczenia w ciągu życia i jesteśmy w stanie funkcjonować w społeczeństwie. Jak wyglądałby świat, gdybyśmy nie pamiętali niczego, co wydarzyło się w naszej przeszłości: faktów, ludzi, definicji, obrazów, znaczeń, emocji, zapachów. Życie byłoby puste i blade. Pamięć osadza człowieka w rzeczywistości, zapewnia prawidłowy przebieg wszystkim procesom poznawczym, dlatego też jest funkcją, którą szczególnie badają naukowcy na całym świecie.

Definicji pamięci w dostępnej literaturze jest bardzo wiele. Mówi się na przykład, że pamięć jest zdolnością organizmu do kodowania, przechowywania i odtwarzania informacji. Nie jest ona konstruktem jednolitym. Wymienia

się kilka typów pamięci, biorąc pod uwagę różnorodne kryteria, np. czas przechowywania informacji w pamięci czy rodzaj przechowywanej informacji [1,2]. Pamięć stanowi podstawę uczenia się, nabywania nowych umiejętności [3]. W tym opracowaniu skupiono się na omówieniu systemów pamięci krótkotrwałej, w tym pamięci roboczej, oraz procesu uczenia się, zwrócono uwagę na metody stosowane w badaniach pamięciowych oraz na neuronalne podłożo tych zjawisk. Opracowanie to stanowi podsumowanie aktualnej, bardzo szerokiej wiedzy dotyczącej pamięci roboczej, jej miejsca w obecnych klasyfikacjach, jej roli w codziennym funkcjonowaniu człowieka, sposobów jej usprawniania. Praca ta stanowić może cenne źródło informacji zarówno dla psychologów różnych specjalności, jak i innych specjalistów pracujących z ludźmi, np. trenerów prowadzących szkolenia z umiejętności zarządzania zasobami pamięciowymi czy strategii mnemotechnicznych.



Rycina 1. Klasyfikacja pamięci (na podstawie [53], str. 86)
Figure 1. Memory classification (based on [53], p. 86)

Pamięć krótkotrwała i jej pomiary

Tym, co cechuje odrębne systemy pamięciowe, jest pojemność i czas przechowywania kodowanych w nich informacji [1,4,5]. Pamięć krótkotrwała, w odróżnieniu od pamięci długotrwałej, cechuje się ograniczoną pojemnością i ograniczonym czasem przechowywania informacji [6,7]. Klasyczne umiejscowienie pamięci krótkotrwałej na tle innych rodzajów pamięci przedstawia rycina 1. Jeden z tradycyjnych pomiarów pamięci dotyczy zakresu pamięci bezpośredniej (często traktowanej jako synonim pamięci krótkotrwałej). Polega on na czytaniu osobie badanej szeregu cyfr i prośeniu o odtworzenie ich w takiej samej kolejności, w jakiej były zaprezentowane. Badanie zaczyna się od dwóch cyfr, a następnie podaje się coraz dłuższe szeregi, aż do momentu, kiedy osoba badana popełni błąd w odtwarzaniu. Maksymalna długość odtworzonego szeregu jest miarą zakresu pamięci bezpośredniej [5]. George Miller (1956) przeprowadził badania zakresu pamięci bezpośredniej i stwierdził, że niezależnie od rodzaju zapamiętywanego materiału, zakres pamięci bezpośredniej wynosi od 5 do 9 elementów, czyli 7 ± 2 elementy. Elementem może być każda zapamiętywana treść, np. cyfra, słowo czy ciąg cyfr lub słów. Zakres ten został nazwany „magiczną liczbą Millera” [8]. Obecnie z magiczną siódmką konkuruje w literaturze psychologicznej „magiczna liczba 4”, zaproponowana przez Nelsona Cowana (2001). N. Cowan analizował wykonanie zadań pamięciowych, w których utrudnione było porcjowanie materiału oraz jego powtarzanie, czyli wyeliminowano strategie ułatwiające zapamiętywanie. Zauważył, że wyniki osób mieściły się w granicach od 3 do 5 elementów, a więc 4 ± 1 . Zdaniem autora ograniczona pojemność pamięci krótkotrwałej ma związek z ograniczoną pojemnością uwagi, tzn. w danym czasie można utrzymać w centrum uwagi jedynie 3–5 elementów [5,9]. W praktyce okazuje się, że możliwe jest przekraczanie tego zakresu dzięki stosowaniu różnych strategii, jak np. powtarzanie, porcjowanie materiału czy korzystanie z innych systemów pamięciowych w czasie zapamiętywania. Zakres pamięci bezpośredniej wykazuje pozytywną korelację z poziomem inteligencji, dlatego testy służące do pomiaru poziomu intelektu często zawierają pomiar zakresu pamięci bezpośredniej, np.

WISC-R Skala Inteligencji Wechslera dla dzieci – wersja zmodyfikowana [10].

Przełomowe badania dotyczące oszacowania pojemności i czasu kodowania informacji w systemach pamięciowych przeprowadzili Petersonowie w latach 50. XX wieku [11]. Badania te wykazały, że prawidłowe odtwarzanie materiału z pamięci krótkotrwałej spada poniżej 50% po ok. 7 s. Procedura badania Petersonów zakładała eksponowanie trzech bezsensownych spółgłosek, np. XLR, oraz trzycyfrowej liczby, np. 123. Zadanie polegało na zapamiętaniu zestawu liter, a następnie odliczaniu trójkami wstecz, zaczynając od zaprezentowanej liczby (czyli np. 120, 117 itd.). Odliczanie było zadaniem dystrykcyjnym, mającym na celu odwrócenie uwagi od materiału, który należało zapamiętać. Po upływie określonego czasu należało przerwać liczenie i podać zapamiętaną wcześniej sekwencję trzech spółgłosek. Autorzy manipulowali interwałem pomiędzy prezentacją spółgłosek i prośbą o ponowne odtworzenie – interwał ten wynosił od 3 do 18 s. Odliczanie trójkami wstecz miało na celu zminimalizowanie udziału mechanizmu bezgłośnego powtarzania trzech spółgłosek, które należało zapamiętać. Autorzy celowo też wybrali do zapamiętania bezsensowny materiał językowy, aby uniemożliwić tzw. strategię grupowania (ang. *chunking strategy*), która polega na łączeniu prezentowanego materiału w większe całości. Wyniki badań wykazały, że poziom przypominania spółgłosek bardzo szybko spadał w funkcji czasu [za: 1]. Eksperyment ten wywołał duże zainteresowanie w środowisku naukowców, gdyż pokazał bardzo szybkie tempo zapomniania materiału, który nie jest powtarzany, a dodatkowo udowodnił, że przyczyną utraty informacji w pamięci krótkotrwałej jest rozpad śladu pamięciowego wraz z upływem czasu [5].

Wydobywanie informacji z pamięci krótkotrwałej

Naukowcy zadawali sobie pytanie, w jaki sposób informacje są wydobywane z pamięci krótkotrwałej. Wydaje się, że nie jest to trudne zadanie, ze względu na ograniczoną pojemność pamięci krótkotrwałej – w związku z tym zgromadzone informacje są nieliczne, dostępne świadomości,

a więc wydobywane są niemal natychmiast. Jednak to, jak przebiega proces wydobywania konkretnej informacji zawartej w pamięci, pozostawało kwestią nierozstrzygniętą. Czy jednocześnie mamy dostęp do wszystkich informacji w pamięci krótkotrwałej (tzw. przeszukiwanie równoległe), czy też przeszukujemy informacje po kolei (tzw. przeszukiwanie seryjne)? Badania w tym zakresie prowadził m.in. S. Sternberg [12]. Pokazywał on osobom badanym serię cyfr, która mieściła się w zakresie pamięci bezpośredniej. Po krótkiej przerwie pokazywano jedną z cyfr i pytano, czy należy ona do zaprezentowanego wcześniej zbioru. Badani odpowiadali, naciskając odpowiednie przyciski, najszybciej jak potrafili. Manipulowano liczbą cyfr w serii, od 1 do 6. S. Sternberg zaobserwował, że średni czas reakcji wzrastał liniowo wraz z liczbą jednostek utrzymywanych w pamięci, co potwierdza seryjny charakter przeszukiwania pamięci krótkotrwałej [5,12]. Kolejnym zadaniem było sprawdzenie, czy przeszukiwanie kończy się w chwili, gdy zostanie odnaleziony poszukiwany element – przeszukiwanie pamięci miałoby wtedy charakter samokończący się (ang. *self-terminating*), czy też przeszukiwana jest cała seria bodźców – wtedy przeszukiwanie miałoby charakter wyczerpujący (ang. *exhaustive*). Badania S. Sternberga dowiodły, że materiał w pamięci krótkotrwałej przeszukiwany jest w sposób wyczerpujący, chyba że zadanie polega na podaniu miejsca jednostki w serii, wtedy lepsza staje się strategia samokończąca się. Badania S. Sternberga stały się inspiracją dla wielu kolejnych badań, których część wykazała wyniki niezgodne z modelem. Na przykład okazało się, że odpowiedzi są bardzo szybko podawane wtedy, gdy dotyczą ostatniej jednostki w zbiorze (tzw. efekt świeżości), jak również wtedy, gdy testowana jest informacja, która w zbiorze występuje dwa razy (tzw. efekt powtarzania) [1,5].

Pamięć krótkotrwała a pamięć robocza

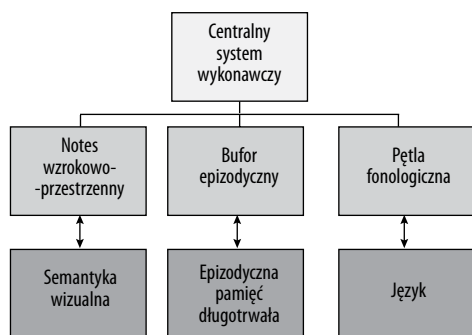
W modelu magazynowym, zakładającym istnienie kilku systemów (magazynów) pamięci, pamięć krótkotrwała traktowana była jako rodzaj przedsiionka pamięci długotrwałej, z którego informacje miały być przekazywane do magazynu pamięci długotrwałej. Dodatkowo funkcją pamięci krótkotrwałej miało być podtrzymywanie informacji przez krótki czas, aby można było z niej na bieżąco korzystać [5]. Z czasem ta druga funkcja zaczęła budzić coraz większe zainteresowanie badaczy, a pamięć krótkotrwała zaczęto w końcu traktować jako pamięć roboczą.

Koncepcja pamięci roboczej (ang. *working memory*) pochodzi od Alana Baddeleya i Grahama Hitcha (1974). Odrzucili oni ujęcie pamięci krótkotrwałej jako systemu wyspecjalizowanego wyłącznie w przechowywaniu informacji [13]. A. Baddeley i G. Hitch (1974) stworzyli przełomową teorię pamięci roboczej, która miała być konstruktem odpowiedzialnym zarówno za przechowywanie, jak i przetwarzanie informacji [13,14]. Pamięć robocza pełniłaby więc kluczową rolę w poznawczej aktywności człowieka, ponieważ z jej udziałem miałyby się odbywać wszelkie kontrolowane przetwarzanie informacji. A. Baddeley (2007) ponadto dodał, że pamięć robocza jest systemem tymczasowego przechowywania informacji, który podlega kontroli uwagi i wspomaga wykonywanie złożonych zadań poznawczych [15]. Inni badacze pamięci roboczej podali nieco inne definicje tego systemu. A. R. Conway

i wsp. (2007) zdefiniowali pamięć roboczą jako zdolność do jednoczesnego utrzymywania i przetwarzania informacji ważnych z punktu widzenia celów, które są aktualnie realizowane [16]. N. Cowan (1993) z kolei traktował pamięć roboczą jako mechanizm jednorodny, który zdolny jest do przechowywania i przetwarzania informacji, a jego główną funkcją jest zapewnienie dostępności reprezentacji zakodowanych w pamięci długotrwałej dla intencjonalnego przetwarzania informacji [17, za: 4]. Widać wyraźnie, że złożoność procesu pamięciowego ma swoje odzwierciedlenie w mnogości definicji. W niniejszym opracowaniu omówiona została dokładniej koncepcja pamięci roboczej autorstwa A. Baddeleya, począwszy od jego przełomowej pracy [13], ponadto przedstawione zostały przykładowe metody badań tego zjawiska oraz wyjaśnione zostały mechanizmy mózgowie pamięci roboczej.

Model pamięci roboczej A. Baddeleya

Model A. Baddeleya i G. Hitcha [13] zakładał, że pamięć jest wielokomponentowym systemem, odpowiedzialnym za przechowywanie i kontrolę przetwarzania informacji. Dlatego też pamięć robocza odgrywa ważną rolę w złożonej aktywności poznawczej człowieka, np. w przetwarzaniu języka, uczeniu się, rozumowaniu [14]. Autorzy zdecydowali się oddzielić kontrolę uwagową od magazynu tymczasowo przechowywanego informacji i w ten sposób powstał model, który początkowo obejmował 3 podsystemy: centralny system wykonawczy (ang. *central executive*) i dwa podległe mu bufor pamięciowe (autorzy nazywają je systemami niewolniczymi (ang. *slave systems*): pętlę fonologiczną (ang. *phonological loop*) i szkicownik wzrokowo-przestrzenny (ang. *visuospatial sketch pad*). W kolejnej wersji modelu [18,19] pojawił się nowy podsystem – bufor epizodyczny (ang. *episodic buffer*), tymczasowy magazyn zintegrowanych informacji o epizodach, którego funkcją miało być przechowywanie informacji pochodzącej z różnych modalności. Centralny system wykonawczy pełnił funkcję kontrolującą i był zależny od procesów uwagowych. Zdaniem A. Baddeleya [14] centralny system wykonawczy odgrywał szczególnie ważną rolę podczas tak złożonych czynności jak np. gra w szachy. Zadaniem magazynów było krótkotrwałe przechowywanie i manipulowanie informacjami w dwóch kanałach – słuchowym (kod akustyczny) i wzrokowym (kod wizualny). Badacze w swoich eksperymentach dotyczących pamięci stosowali tzw. metodę podwójnego zadania (ang. *dual task method*), która wymagała wykonywania dwóch zadań w tym samym czasie. Osoby badane wykonywały zadanie poznawcze (zadanie A: np. rozumowanie albo czytanie tekstu ze zrozumieniem) i jednocześnie obciążano ich pamięć innym zadaniem (zadanie B: np. zapamiętywanie zestawu liczb o zmiennej długości) [1,5,14]. A. Baddeley i G. Hitch [13] zakładali, że skoro pamięć krótkotrwała ma ograniczoną pojemność, to rosnące obciążenie pamięci przechowywaniem coraz większych zbiorów liczb spowoduje pogorszenie wykonania złożonego zadania poznawczego. Badania eksperymentalne potwierdziły te przypuszczenia [13,14]. Wyjaśniano je spadkiem ilości wolnych zasobów, które mogłyby zostać przydzielone do wykonania zadania poznawczego. Okazało się jednak, że nawet przy niemal maksymalnym obciążeniu pamięci roboczej (8 cyfr), osoby badane nadal potrafiły wykonywać zadanie poznawcze polegające np. na rozumowaniu, z tym że



Rycina 2. Model pamięci roboczej A. Baddeleya (zmodyfikowany za: Baddeley, 2012, s. 16). Przedstawia systemy pamięci roboczej oraz procesy związane z poszczególnymi podsystemami (opis w tekście)

Figure 2. A. Baddeley working memory model (modified from: Baddeley, 2012, p. 16). The model represents working memory systems and the processes involved in particular subsystems (description in the text)

czas potrzebny do wykonania zadania wzrósł o 35% [5]. Wyniki uzyskane przez autorów sugerują, że pamięć operacyjna może funkcjonować nawet wtedy, gdy jest silnie obciążona powtarzaniem, co może świadczyć o istnieniu kilku podsystemów pamięci roboczej. Powyższe badania skłoniły A. Baddeleya i G. Hitcha do refleksji, że pamięć robocza z pewnością nie jest pojedynczym magazynem pamięci o ograniczonej pojemności, lecz musi zawierać kilka podsystemów. Wtedy to przeładowanie jednego modułu nie musiałyby zaburzyć pracy całego systemu. A. Baddeley (1992) twierdził, że pamięć robocza pośredniczy pomiędzy pamięcią, uwagą i percepcją [14].

Systemy pamięci roboczej w modelu A. Baddeleya

Na rycinie 2 zaprezentowano schemat przedstawiający systemy pamięci roboczej w modelu A. Baddeleya oraz opis poszczególnych systemów.

Centralny system wykonawczy

Centralny system wykonawczy (por. rycina 2) jest prawdopodobnie bardziej złożony niż inne podsystemy, a zarazem najtrudniejszy do badania i najsłabiej poznany, ponieważ trudno znaleźć dla niego specyficzne zadanie [13]. A. Baddeley przypuszczał, że zawiera on kilka oddzielnych podsystemów wykonawczych, czy też angażuje kilka funkcji wykonawczych takich jak: zdolność do koncentracji, przełączania uwagi, podzielności uwagi [18].

Centralny system wykonawczy pełni funkcje nadrzędne i kontrolne w stosunku do pozostałych systemów, jest zależny od uwagi, kieruje zasobami poznawczymi [19,20]. Nadzoruje systemy mu podporządkowane, współdziała z pamięcią długotrwałą, jest odpowiedzialny za selekcję i integrację informacji pochodzących z różnych źródeł [20–23]. A. Baddeley uważał, że ważną rolę nadrzędnego systemu jest nadzór nad bieżącym przetwarzaniem informacji, kontrola uwagowa nad dopływającymi

informacjami [21]. Z jednej strony zwracał uwagę, że centralny system wykonawczy działa jak „kontroler uwagowy”, który filtruje dochodzące informacje, wybierając te, które są istotne, i odrzucając nieistotne [21]. Z drugiej strony A. Baddeley [20,21,23] powoływał się na koncepcję uwagi Normana i Shallice (1986), której składową jest tzw. nadzorczy system uwagi (ang. *supervisory attentional system*, SAS). W teorii Normana i Shallice (1986) SAS pełnił rolę kontrolną, polegającą na planowaniu i nadzorowaniu wykonywania złożonych zadań poznawczych, szczególnie w nowych zadaniach i warunkach [24]. A. Baddeley wcielił ten koncept we własny model centralnego systemu wykonawczego, początkowo utożsamiając centralny system wykonawczy z SAS [20]. Kolejną ważną funkcją systemu wykonawczego jest zdolność przydzielania zasobów uwagowych dwóm konkurencyjnym zadaniom w tym samym czasie, co przekłada się na umiejętność jednoczesnego wykonywania dwóch zadań np. w różnych modalnościach. System ten cechuje się ograniczoną pojemnością, rozumianą w kategoriach ograniczonych zasobów uwagowych [25]. Dodatkowo centralny system wykonawczy bierze udział w kodowaniu i przywoływaniu informacji z pamięci długotrwałej. Dowody na to pochodzą m.in. z badań Susan Gathercole (1995), w których okazało się, że krótkotrwałe przechowywanie bezsensownych zlepków głosek jest tym bardziej efektywne, im są one bardziej podobne do słów języka naturalnego [26]. Osoby badane, które brały udział w jej eksperymentach, zdecydowanie łatwiej przypominały sobie zlepki słów o podobnej strukturze literowej do angielskiej niż te zlepki słów, które w ogóle nie przypominały angielskich słów. S. Gathercole (1995) stwierdziła, że ten wynik sugeruje obustronny przepływ informacji z pamięci roboczej do pamięci długotrwałej i na odwrot [1].

Przytoczenie kilku najważniejszych funkcji centralnego systemu wykonawczego z pewnością nie wyjaśnia w pełni tego zagadnienia, ale pokazuje złożoność tego konstruktu.

Pętla fonologiczna

Pętla fonologiczna jest jednym z trzech buforów pamięciowych podlegających centralnemu systemowi wykonawczemu. Jej główna rola polega na krótkotrwałym przechowywaniu informacji fonologicznych. A. Baddeley (1992, 1994) wyróżnił w pętli fonologicznej dwa mechanizmy przechowywania informacji: pasywny (ang. *retention*) i aktywny (ang. *rehearsal*). Pasywne przechowywanie informacji możliwe jest dzięki istnieniu magazynu fonologicznego. Ślad pamięciowy rozpada się w ciągu ok. 2 sekund, chyba że jest aktywnie odświeżany poprzez proces bezgłośnego powtarzania (tzw. pętla artykulacyjna). Bezgłośne powtarzanie podtrzymuje ślad pamięciowy oraz prowadzi do zakodowania w pętli fonologicznej materiału językowego zaprezentowanego w modalności wzrokowej [14]. Poniżej wyjaśniono zjawiska charakterystyczne dla pętli fonologicznej.

Efekt podobieństwa fonologicznego

Badania nad efektem podobieństwa fonologicznego dostarczają dowodu na poparcie tezy, iż kod fonologiczny dominuje w przechowywaniu materiału werbalnego w pętli fonologicznej. Badania wykazały istotnie większy wpływ

podobieństwa brzmieniowego słów niż ich podobieństwa semantycznego na liczbę błędów popełnianych w zadaniu pamięciowym. Zapamiętywanie niepodobnych do siebie pod względem brzmieniowym słów (np. ang. *pit, day, cow, pen, ring* [14, str. 558]) było zdecydowanie łatwiejsze niż słów brzmiących podobnie (np. ang. *man, cap, can, map, mad* [14, str. 558]). Oznacza to, że materiał werbalny zakodowany w pętli fonologicznej ma przede wszystkim charakter fonologiczny – podobne słowa mają mniej cech, które je różnią, niż słowa niepodobne, dlatego są bardziej podatne na zapominanie. Nie oznacza to jednak, że przechowywany materiał nie ma charakteru semantycznego – owszem ma, jednak mechanizm jego odświeżania odwołuje się do bezgłośnych powtórek, wykorzystujących brzmienie słowa, a nie jego znaczenie [14].

Efekt długości słowa

Odwołując się do działania pętli artykulacyjnej, można wyjaśnić wpływ różnych czynników na zakres pamięci bezpośredniej. Jak była mowa wcześniej, zakres pamięci bezpośredniej i zarazem pojemność pamięci krótkotrwałej wynosi 7 elementów ± 2 elementy.

A. Baddeley i wsp. (1975) przeprowadzili ciekawe badanie, mające na celu zbadanie efektu długości słowa. Badano natychmiastowe odtwarzanie z pamięci sekwencji 5 słów różniących się długością – od 1-sylabowych słów (np. ang. *pen, day, hot, cow, tub*) do 5-sylabowych słów (np. ang. *university, tuberculosis, opportunity, refrigerator*) [27]. Autorzy wykazali, że łatwiej było zapamiętać sekwencję słów jednosylabowych niż taką samą liczbę słów wielosylabowych. Okazało się, że krytycznym czynnikiem był czas artykulacji słowa, a nie liczba sylab. Zakres pamięci jest bowiem mniejszy dla słów zawierających długie samogłoski (w języku angielskim) i wymawianych wolno, niż dla słów o tej samej liczbie sylab, ale wymawianych szybko i o krótkich samogłoskach (np. angielskie słowa: *harpoon vs bishop*). Odtwarzanie dłuższych słów wymagało dłuższego czasu ich powtarzania w pętli artykulacyjnej, która zajmuje się odświeżaniem zawartości magazynu fonologicznego. Dodatkowo poproszono osoby badane, aby czytały na głos słowa różnej długości tak szybko, jak to możliwe. Okazało się, że osoby były w stanie zapamiętać tyle słów, ile były w stanie wyartykułować w 2 sekundy [14,27]. Osoby, które szybko czytały, osiągały wyższe wyniki w pomiarze zakresu pamięci. Szybka artykulacja umożliwiała odświeżenie większej liczby śladów pamięciowych, zanim nastąpił ich rozpad, co w konsekwencji prowadziło do zwiększenia zakresu pamięci. Wynik ten wskazuje na związek między tempem czytania sekwencji słów a ich reprodukcją [5].

Efekt stłumienia artykulacji (ang. articulatory suppression)

Efekt ten stanowi kolejny dowód fonologicznego charakteru działania pętli artykulacyjnej. A. Baddeley i wsp. (1975) zakładali, że skoro zakres pamięci bezpośredniej zależy od bezgłośnego powtarzania, które odbywa się w pętli artykulacyjnej, warto sprawdzić, co wydarzy się, gdy uniemożliwi się osobie badanej bezgłośnie powtarzanie materiału [27]. Zastosowali więc efekt tzw. stłumienia artykulacji, który polegał na powtarzaniu narzuconego słowa podczas

wykonywania zadania pamięciowego, co uniemożliwiało bezgłośnie artykulację zapamiętywanych słów [5,20]. Badania A. Baddeleya i wsp. (1975) wykazały, że powtarzanie rodzajnika „the, the, the...” spowodowało zmniejszenie liczby zapamiętanych słów, co oznacza obniżenie zakresu pamięci bezpośredniej [27].

Efekt nieistotnych bodźców dźwiękowych (ang. the irrelevant speech effect)

Efekt ten odnosi się do redukcji liczby przypominanych sobie słów, które były prezentowane wzrokowo, w wyniku obecności dodatkowego, nieistotnego materiału [14]. Colle i Welsh (1976) prezentowali wzrokowo osobom badanym cyfry i prosili o ich zapamiętanie. W jednym warunku prezentacja cyfr odbywała się w ciszy, w drugim warunku prezentacji cyfr towarzyszył biały szum albo mowa w obcym języku – osoby badane proszone były o ignorowanie obu rodzajów bodźców. Wyniki badania wykazały, że jedynie materiał językowy zakłócił kodowanie wzrokowo prezentowanych bodźców, a efekt był niezależny od głośności czy źródła nieistotnych bodźców. Ponownie więc stwierdzono, że nieważna jest semantyka (prezentowany materiał językowy był obcy dla osób badanych), tylko fonologia, która ma natychmiastowy dostęp do magazynu pamięci fonologicznej [28].

Podsumowując, pętla artykulacyjna jest zaangażowana w różnego typu zadania z użyciem materiału werbalnego. Jedną z głównych jej funkcji jest udział w rozumieniu języka, zwłaszcza długich, skomplikowanych zdań. Pomaga utrzymać informacje o kolejności słów. Jagodzińska (2008) podaje doskonały przykład korzystania z pętli artykulacyjnej: tłumacz, który na bieżąco dokonuje przekładu tekstu mówionego, musi w tym samym czasie tłumaczyć zdania, śledzić dalszy tok wypowiedzi mówcy i utrzymać w pamięci to, co już przetłumaczył aż do momentu, gdy mówca zrobi przerwę i odda mu głos. Podczas własnej wypowiedzi również musi korzystać z pętli artykulacyjnej [5]. Według A. Baddeleya wraz z rozwojem mowy następuje rozwój pętli fonologicznej. Magazyn fonologiczny rozwija się w wyniku percepcji mowy, natomiast ekspresja mowy daje początek pętli artykulacyjnej. Badania wykazały udział pętli fonologicznej w przyswajaniu przez dzieci słownika oraz podczas nauki czytania. Podobny proces rozwija się u dorosłych, którzy uczą się języka obcego [za: 5].

Szkicownik wzrokowo-przestrzenny

Szkicownik (notes) wzrokowo-przestrzenny stanowi kolejny podsystem pamięci roboczej. Uważa się, że jest swego rodzaju analogiem pętli fonologicznej, z tym że jego podstawową funkcją jest przechowywanie materiału wzrokowego i przestrzennego [20]. Badaniem szkicownika zajmował się przez wiele lat R. Logie, który zaproponował rozróżnienie pomiędzy dwoma podsystemami szkicownika. Magazyn wzrokowy (bierny magazyn wizualny, ang. *visual cache*) miał być strukturą przechowującą informacje wzrokowe, cechy przedmiotów i scen. Drugi podsystem, zwany „wewnętrznym skrybą” (ang. *inner scribe*), miał być aktywnym systemem przestrzennym, który pełniłby rolę aktywną, manipulując informacjami przestrzennymi, tworząc system powtórek oraz miał być odpowiedzialny za planowanie i kontrolowanie ruchu [29–31]. Wewnętrzny

system piszący miałby też tworzyć wyobrażenia i korzystać z magazynu wzrokowego, podobnie jak podsystemy pętli fonologicznej. Badania dały ciekawe wyniki, podobne do zjawiska tłumienia artykulacyjnego w pętli fonologicznej. R. Logie (1986) udowodnił, że wykonywanie zadania wzrokowego przy jednoczesnej prezentacji obrazów niezwiązanych z tym zadaniem powoduje pogorszenie przechowywania informacji wzrokowej [31]. W późniejszych badaniach dowiódł też, że wykonywanie czynności ruchowych jednocześnie z zadaniem wzrokowo-przestrzennym pogarsza przechowywanie informacji o relacjach przestrzennych [za: 1]. Oba podsystemy szkicownika wzrokowo-przestrzennego wydają się mieć odrębną lokalizację anatomiczną, o czym świadczą wyniki badań pacjentów neurologicznych, którzy wykazują np. deficyty w rozpoznawaniu cech przedmiotu przy jednocześnie zachowanej zdolności do lokalizowania przedmiotu w przestrzeni i odwrotnie.

Klasyczną metodą badania pamięci przestrzennej są tzw. klocki Corsiego (ang. *Corsi block*, Milner 1971). W pierwotnej wersji testu zadanie polegało na tym, że osoba badana otrzymywała plansze z 9 otworami, w których sekwencyjnie (w tempie co 1 s) pojawiały się sześciennie klocki. Zadaniem osoby badanej było zapamiętanie lokalizacji prezentowanych klocków oraz kolejności ich prezentacji. Liczba prezentowanych klocków zwiększała się do momentu, aż osoba badana zaczynała popełniać błędy. Vandierendonck i wsp. (2004) postanowili zbadać wykonanie testu Corsiego jednocześnie z innym zadaniem angażującym albo szkicownik wzrokowo-przestrzenny, albo pętlę fonologiczną, albo centralny system wykonawczy [32]. Wyniki badania wykazały, że wykonanie tego zadania było związane z obciążeniem szkicownika wzrokowo-przestrzennego oraz centralnego systemu wykonawczego, natomiast nie obciążało pętli fonologicznej. Badanie to potwierdziło założenie, że test klocki Corsiego jest trudny do werbalizacji, trudno bowiem zwerbalizować przestrzenną lokalizację bodźców.

Szkicownik wzrokowo-przestrzenny należy do słabo poznanych podsystemów pamięci roboczej [20]. W jego opisie autorzy teorii korzystali z wyników badań dotyczących wyobraźni wzrokowej i przestrzennej uzyskanych przez innych autorów. Jagodzińska (2008) twierdzi natomiast, że system ten musi odgrywać kluczową rolę u osób wykonujących zawody takie jak architekt, inżynier czy technik [5].

Bufor epizodyczny

Bufor epizodyczny stanowi dodatkowy podsystem pamięci roboczej, którego główną funkcją jest tymczasowe magazynowanie informacji pochodzących z różnych źródeł: z pętli fonologicznej, szkicownika wzrokowo-przestrzennego czy pamięci długotrwałej [18,19]. Bufor epizodyczny czasowo przechowuje zintegrowane epizody, jest ograniczony pojemnościowo i podlega kontroli centralnego systemu wykonawczego, podobnie jak inne podsystemy. Informacje w nim zawarte są zintegrowane czasowo i przestrzennie, a więc stanowią krótkotrwały odpowiednik treści epizodycznych przechowywanych w pamięci długotrwałej [5]. Bufor magazynuje informacje w kodzie wielomodalnym. Epizody są wydobywane świadomie, według A. Baddeleya (2012) bufor zapewnia dostęp do świadomości [20].

Model pamięci roboczej A. Baddeleya znalazł swoje zastosowanie w wielu badaniach. Na przykład S. Gathercole, bazując na modelu A. Baddeleya, stworzyła metodę badania pamięci roboczej u dzieci. Jej badania doprowadziły do identyfikacji tych dzieci w wieku szkolnym, które wykazywały deficyty w zakresie pamięci roboczej, oraz do zaplanowania terapii skierowanej na rozwijanie funkcji pamięciowych. Kolejnym ważnym skutkiem badań nad pamięcią roboczą było stworzenie i walidacja zadania do wczesnego wykrywania choroby Alzheimera [33]. Model pamięci roboczej może być szeroko stosowany w celu zrozumenia innych dziedzin nauki – od psychiatrii, farmakologii po terapię językowe.

Metody pomiaru pojemności i usprawniania pamięci roboczej

Obecnie wymienia się szereg metod służących do badania pojemności pamięci roboczej. Nawiązuje się w nich do zadań stosowanych do pomiaru pojemności pamięci krótkotrwałej. Klasycznie zadania polegały na zapamiętywaniu zestawu cyfr lub wyrazów. Następnie proszono o przypomnienie sobie materiału w kolejności zgodnej z zaprezentowaną sekwencją. Badano w ten sposób pułap możliwości obciążenia pamięci danej osoby. Wspomniano o tych eksperymentach powyżej, pisząc o zakresie pamięci bezpośredniej (eksperymenty Petersonów, Millera). Opracowano także tzw. paradygmat zadań jednoczesnych, które badały jednocześnie przeprowadzanie operacji poznawczych na prezentowanym materiale i zapamiętywanie wyników tych działań. Jedno z takich zadań polega na głośnym czytaniu zdań i zapamiętywaniu ostatniego słowa z każdego zdania. Głośne czytanie angażuje centralny system wykonawczy, a zapamiętywanie słów – pętlę fonologiczną. Innym zadaniem angażującym podobne mechanizmy jest rozwiązywanie zadań arytmetycznych (angażują centralny system wykonawczy) i jednocześnie zapamiętywanie towarzyszących im słów (pętla fonologiczna).

Obok zadań jednoczesnych w badaniach pamięci roboczej stosuje się również inne paradygmaty, wymagające zarówno przechowywania, jak i przetwarzania informacji. Przykładem tego rodzaju procedur jest tzw. zadanie *n-wstecz* (ang. *n-back task*), wymagające detekcji danego bodźca, który pojawia się w ciągu kolejno prezentowanych bodźców na określonej pozycji od końca ciągu (na przykład na pozycji drugiej od końca – „zadanie 2-wstecz” albo trzeciej od końca – „zadanie 3-wstecz”). Zadanie to wymaga ciągłej aktualizacji zbioru, bowiem z każdą kolejną prezentacją bodźca zmienia się element będący na danej pozycji *n-wstecz*. Inny rodzaj zadania badającego pamięć roboczą polega na odtworzeniu ostatnich kilku bodźców długiego ciągu elementów lub też na rozpoznaniu wystąpienia wzorca wśród nich. Trudność tego zadania polega na tym, że nie można przewidzieć, które elementy będą tymi ostatnimi w ciągu, ponieważ jego długość jest losowa. Zadanie to wymaga więc nieustannego uaktualniania pamięci roboczej [4].

Powyżej skupiono się na omówieniu systemów pamięci roboczej, która umożliwia utrzymanie materiału w pamięci i manipulowanie tym materiałem w celu bieżącego wykorzystania. Należy jednak pamiętać, że aby informacja mogła przejść w formę trwałą, przechowywaną w układzie nerwowym, w pamięci długotrwałej przez miesiące

i lata, musi ona ulec konsolidacji [34]. Co więcej, sprawna pamięć robocza warunkuje poprawne funkcjonowanie innych procesów poznawczych (np. języka). Zakłócenia funkcjonowania pamięci roboczej stanowią więc podstawowy mechanizm wielu zaburzeń i rzutują na funkcjonowanie człowieka w różnych sferach. Na przykład, u pacjentów po uszkodzeniach mózgu, po udarze często obserwuje się zaburzenia pamięci roboczej oraz innych funkcji poznawczych [35,36], podobnie jest u dzieci z nadaktywnością psychoruchową [37]. Okazuje się, że usprawnianie pamięci roboczej w tych grupach klinicznych prowadzi do znacznej poprawy funkcjonowania poznawczego [35,36]. Jest to często punkt wyjściowy rehabilitacji neuropsychologicznej.

Nie tylko osoby chore wymagają usprawniania pamięci roboczej. Sprawne działanie pamięci roboczej bardzo ułatwia codzienne funkcjonowanie w domu i w pracy. Okazuje się, że stosowanie różnych mnemotechnik, a przede wszystkim bezgłośnego powtarzania materiału, pozwala na znaczące wydłużenie czasu przechowywania informacji w pamięci krótkotrwałej. Na przykład jedną ze strategii pamięciowych ułatwiających zapamiętywanie jest wspomniane już powyżej grupowanie, które polega na takiej organizacji zapamiętywanego materiału, aby lepiej go „upakować” w pamięci. Łączy się ze sobą materiał tak, aby każda część tworzyła odrębny pakiet informacji. Przykładowo ciągi cyfr 356892 można pogrupować w dwie grupy: 356 i 892. Wyniki badań pokazują jednak, że nie można w nieskończoność zwiększać pojemności pamięci krótkotrwałej – na przykład w pamięci można pomieścić mniej dużych grup informacji (przykładowo zdań złożonych z 8 słów), a więcej małych grup (np. jednosylabowych słów). W pamięci krótkotrwałej dość łatwo dochodzi do interferencji między zawartymi w niej informacjami, to znaczy im bardziej są one do siebie podobne, tym silniejsza interferencja. Ponadto w wyniku przekierowania uwagi na jakiś inny bodziec dochodzi do zaniechania powtarzania danej informacji na rzecz innego zadania, co prowadzi do zapominania danego materiału [1]. Technika bezgłośnego powtarzania zaliczana jest do treningu uczenia się określonej strategii (ang. *strategy training*). Treningi te dotyczą uczenia się efektywnego zapamiętywania, utrzymania i wydobycia informacji z pamięci. Do tych technik zalicza się również metodę zapamiętywania opartą na tworzeniu w myślach historyjki, która zawiera elementy, jakie należy zapamiętać. Wyobrażenie sobie obrazów zawierających te elementy znacznie ułatwia proces kodowania [38]. Odmienne podejście do usprawniania pamięci roboczej (ang. *core training*) zakłada, że wykorzystanie innych funkcji poznawczych podczas zapamiętywania, wykorzystywanie bodźców pochodzących z wielu modalności czy indywidualne dostosowywanie technik do aktualnych możliwości osoby jest kluczem do skutecznego zapamiętywania. Dlatego też uważa się, że to właśnie ten rodzaj treningu, czerpiący z innych funkcji poznawczych, sprzyja usprawnianiu szerokiego spektrum funkcjonowania poznawczego [38]. Dokładny opis ćwiczeń wykracza poza zakres niniejszego opracowania, ale można je odnaleźć w pracy Morrison i Chein (2011) [38].

Neurobiologiczne podłoże pamięci roboczej

Pięćdziesiąt lat badań nad zagadnieniem pamięci zaowocowało stworzeniem wielu modeli pamięci, w tym również

modeli wyjaśniających podłoże neurobiologiczne pamięci roboczej i systemów pamięci długotrwałej. Już A. Baddeley na początku swoich badań poszukiwał neuronalnego podłoża pamięci roboczej [21,33]. Obserwacje pacjentów neurologicznych skłaniały go do wyciągnięcia wniosków, że kora czołowa jest strukturą zaangażowaną w procesy pamięci roboczej [21]. Obecnie dostęp do metod neuroobrazowych umożliwia prowadzenie badań w tym zakresie na szeroką skalę. Wiele światowych ośrodków zajmuje się badaniem neurobiologicznego podłoża pamięci roboczej. Aktualne dane na ten temat prezentują między innymi M. D’Esposito i B. R. Postle (2015), D. Talsma (2015) czy M. Quak i wsp. (2015) [39–41]. Ogromne zainteresowanie badaniem pamięci roboczej w normie i patologii odzwierciedlone jest w liczbie publikacji: w połowie 2014 r. w bazie PubMed, podając hasło „pamięć robocza”, otrzymano 17 597 cytowań, natomiast w Google Scholar otrzymano 1 580 000 wyników [39]. Pokazuje to ogrom zainteresowania tym tematem na całym świecie. Poniżej zaprezentowano bieżące informacje na temat neuronalnych korelatów pamięci roboczej.

M. D’Esposito i B. R. Postle (2015) przedstawili dowody na udział obszarów bocznej kory przedczołowej w pamięci roboczej. Badania neuropsychologiczne, fizjologiczne i obrazowe dowiodły, że kora przedczołowa ma budowę hierarchiczną, tzn. przesuwać się od kory przedczerwonej w kierunku bieguna czołowego, napotykałyśmy obszary, które są zaangażowane w różnorodne funkcje psychiczne, m.in. funkcje wykonawcze zajmujące się m.in. planowaniem, selekcją działań itd. Koechlin i wsp. (2003) poparli ten pogląd. Przeprowadzając badania fMRI z udziałem osób zdrowych, dowiedli, że im prezentowana informacja wymagała wybrania bardziej abstrakcyjnej odpowiedzi, tym obserwowana aktywacja przesuwała się w kierunku bieguna czołowego i przednich obszarów kory przedczołowej [42]. Te wyniki, jak również wyniki innych badań (np. [43]), sugerują, że obszary kory przedczołowej mogą być zróżnicowane pod kątem poziomu abstrakcyjności działań poznawczych, które są aktualnie wykonywane. Obserwowany jest gradient funkcji poznawczych wzdłuż bocznej osi kory przedczołowej w płaszczyźnie przód – tył [39].

Kolejnym mechanizmem kluczowym dla pamięci roboczej jest synchronizacja aktywności wielu rozproszonych obszarów mózgu. Badania wykazały liczne połączenia funkcjonalne pomiędzy odległymi strukturami mózgu, np. korą przedczołową a obszarami językowymi, związanymi z przechowywaniem informacji o brzmieniu słów, ale bez informacji wzrokowej na ich temat [44]. Dodatkowo naukowców interesowało, która z częstotliwości synchronizacji neuronalnej (tj. alfa, beta, gamma, theta) byłaby związana z pamięcią roboczą. Autorzy tych badań zasugerowali, że aktywność neuronów w każdej z badanych częstotliwości związana jest z innym zadaniem pamięci roboczej, np. oscylacje gamma uważane są za te, które są zaangażowane w aktywne podtrzymywanie informacji w pamięci roboczej, oscylacje theta są specyficznie związane z czasową organizacją materiału w pamięci roboczej, oscylacje alpha natomiast są związane z hamowaniem informacji nieistotnych dla zadania. Oznacza to, że oscylacje neuronalne mają kluczowe znaczenie dla utrzymywania informacji w pamięci roboczej [45].

Uważa się, że synchronizacja oscylacji neuronalnych w odległych obszarach mózgu pełni również ważną rolę

w procesach pamięci roboczej (por. [46]), np. uważana jest za podstawę efektywnej komunikacji pomiędzy obszarami mózgu zaangażowanymi w czasowe przechowywanie istotnych informacji wzrokowych [47]. Niedawne badania pokazały, że wzgórze odgrywa kluczową rolę w procesach regulacji transmisji informacji pomiędzy różnymi obszarami korowymi, przynajmniej na poziomie lokalnym [48].

Istnieje bogata literatura obejmująca zarówno badania na ludziach, jak i na modelach zwierzęcych, wskazująca na ważną rolę szlaków dopaminergicznyc w procesach pamięci roboczej. Istnieją dane literaturowe, które pokazały duże stężenie dopaminy w korze przedczołowej, która – jak przedstawiono wyżej – pełni nadrzędną rolę w procesach pamięci roboczej [49]. Inne dane dowiodły, że dopamina jest zaangażowana w pamięć długotrwałą kodowaną przez hipokamp [50]. Z kolei najnowsze wyniki badań z udziałem pacjentów z uszkodzeniami jąder wzgórza oraz środkowej części płata skroniowego wykazały u tych pacjentów zaburzenia pamięci

roboczej [51]. Wyniki te potwierdziły ważną rolę szlaków wzgórzowych w regulacji pamięci roboczej.

Pamięć i uczenie się są najbardziej „magicznymi” zdolnościami umysłu człowieka, jak określił je Eric Kandel [52]. Są jak klej, który skleja nasze doświadczenia i wiedzę w jedną całość. Bez pamięci nasze świadome i nieświadome doświadczenia życiowe byłyby tylko niezliczoną grupą niepowiązanych ze sobą zdarzeń, a życie byłoby puste i bezsensowne. Dlatego też zagadnienia te nieustannie inspirują naukowców do zgłębiania tajemnic pamięci – od poziomu komórkowego, poprzez strukturę mózgową, aż po konkretne zachowania człowieka.

Publikacja powstała w związku z realizacją projektu pt. „Zintegrowany system narzędzi do diagnostyki i telerehabilitacji schorzeń narządów zmysłów (słuchu, wzroku, mowy, równowagi, smaku, powonienia)” INNOSENSE, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu STRATEGMED.

Piśmiennictwo:

- Nęcka E, Orzechowski J, Szymura B. Psychologia poznawcza. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2006.
- Squire LR, Zola-Morgan M. The memory system of the rat. In: *Handbook of contemporary learning and memory*. Cold Spring Harbor: Cold Spring Harbor Laboratory Press; 1991: 495–502.
- Longstaff A. Krótkie wykłady. Neurobiologia. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2006.
- Orzechowski J. Magiczna liczba jeden. Czyli co jeszcze zmieści się w pamięci roboczej. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego; 2012.
- Jagodzińska M. Psychologia pamięci. Badania, teorie, zastosowania. Gliwice: Wydawnictwo Helion; 2008.
- Cowan N. What are the differences between long-term, short-term, and working memory? *Prog Brain Res*, 2008; 169: 323–38.
- Macken B, Taylor J, Jones D. Limitless capacity: a dynamic object-oriented approach to short-term memory. *Front Psychol*, 2015; 23(6): 293.
- Miller GA. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 1956; 63: 81–97.
- Cowan N. The magical number 4 in short-term memory: a reconsideration of mental storage capacity. *Behav Brain Sci*, 2001; 24: 87–185.
- Matczak A, Piotrowska A, Ciarkowska W. WISC-R – Skala Inteligencji Wechslera dla Dzieci – Wersja Zmodyfikowana. Warszawa: Pracownia Testów Psychologicznych Polskiego Towarzystwa Psychologicznego; 2008.
- Peterson LR, Peterson MJ. Short-term retention of individual verbal items. *J Exp Psychol*, 1959; 58: 193–98.
- Sternberg S. High speed scanning in human memory. *Science*, 1966; 153: 652–4.
- Baddeley AD, Hitch GT. Working memory. W: Bower GA, red. *The psychology of learning and motivation*. New York: Academic Press; 1974; t. 2, s. 47–90.
- Baddeley AD. Working memory. *Science*, 1992; 255: 556–9.
- Baddeley AD. Working memory, thought, and action. Oxford: Oxford University Press; 2007.
- Conway ARA, Jarrold C, Kane MJ, Miyake A, Towse JN. Variation in working memory: An introduction. W: Conway ARA, Jarrold C, Kane MJ, Miyake A, Towse JN, red. *Variation in working memory*. Oxford: Oxford University Press; 2007; s. 3–17.
- Cowan N. Activation, attention, and short-term memory. *Memory and Cognition*, 1993; 21: 162–67.
- Baddeley AD. The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends Cogn Sci*, 2000; 4: 417–23.
- Baddeley AD. Is working memory still working? *European Psychologist*, 2001; 7: 85–97.
- Baddeley A. Working memory: theories, models, and controversies. *Annu Rev Psychol*, 2012; 63: 1–29.
- Baddeley AD. Exploring the central executive. *Q J Exp Psychol A*, 1996; 49: 5–28.
- Baddeley AD, Della Sala S. Working memory and executive control. W: Roberts AC, Robbins TW, Weiskrantz L, red. *The prefrontal cortex. Executive and cognitive functions*. Oxford: Oxford University Press; 1998; s. 9–21.
- Baddeley A. The central executive: a concept and some misconceptions. *J Int Neuropsychol Soc*, 1998; 4(5): 523–6.
- Norman DA, Shallice T. Attention and action: Willed and automatic control of behavior. W: Davidson RJ, Schwartz GE, Shapiro D, red. *Consciousness and Self-regulation: Advances in research and theory*. New York: Plenum Press; 1986; t. 4, s. 1–18.
- Baddeley A, Della Sala S. Working memory and executive control. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 1996; 351(1346): 1397–403.
- Gathercole SE. Is nonword repetition a test of phonological memory or long-term knowledge? It all depends on the nonwords. *Mem Cognit*, 1995; 23: 83–94.
- Baddeley AD, Thomson N, Buchanan M. Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 1975; 14: 575–89.
- Colle HA, Welsh A. Acoustic masking in primary memory. *J Verbal Learn Verbal Behav*, 1976; 15: 17–32.
- Logie RH. Visuo-spatial working memory. Hove, UK: Erlbaum; 1995.
- Logie RH. The functional organisation and the capacity limits of working memory. *Curr Dir Psychol Sci*, 2011; 20: 240–5.
- Logie RH. Visuo-spatial processing in working memory. *Q J Exp Psychol*, 1986; 38A: 229–47.
- Vandierendonck A, Kemps E, Fastame MC, Szmalec A. Working memory components of the Corsi blocks task. *Br J Psychol*, 2004; 95(Pt 1): 57–79.

33. Kaschel R, Logie RH, Kazén M, Della Sala S. Alzheimer's disease, but not ageing or depression, affects dual-tasking. *J Neurol*, 2009; 256: 1860–68.
34. Niewiadomska G. W poszukiwaniu molekularnych mechanizmów pamięci. W: Górska T, Grabowska A, Zagrodzka J, red. *Mózg a zachowanie*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1997; s. 269–97.
35. Hellgren L, Samuelsson K, Lundqvist A, Börsbo B. Computerized training of working memory for patients with acquired brain injury. *Open Journal of Therapy and Rehabilitation*, 2015; 3: 46–55.
36. Westerberg H, Jacobaeus H, Hirvikoski T, Clevberger P, Östenson M-L, Bartfai A i wsp. Computerized working memory training after stroke – A pilot study. *Brain Injury*, 2007; 21(1): 21–29.
37. Melby-Lervåg M, Hulme C. Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Dev Psychol*, 2013; 49(2): 270–91.
38. Morrison AB, Chein JM. Does working memory training work? The promise and challenges of enhancing cognition by training working memory. *Psychon Bull Rev*, 2011; 18: 46–60.
39. D'Esposito M, Postle BR. The cognitive neuroscience of working memory. *Annu Rev Psychol*, 2015; 3(66): 115–42.
40. Talsma D. Predictive coding and multisensory integration: an attentional account of the multisensory mind. *Front Integr Neurosci*, 2015; 26(9): 19.
41. Quak M, London RE, Talsma D. A multisensory perspective of working memory. *Front Hum Neurosci*, 2015; 21(9): 197.
42. Koehlin E, Ody C, Kouneiher F. The architecture of cognitive control in the human prefrontal cortex. *Science*, 2003; 302: 1181–85.
43. Badre D, D'Esposito M. Functional magnetic resonance imaging evidence for a hierarchical organization of the prefrontal cortex. *J Cogn Neurosci*, 2007; 19: 2082–99.
44. Fiebach CJ, Rissman J, D'Esposito M. Modulation of inferotemporal cortex activation during verbal working memory maintenance. *Neuron*, 2006; 51: 251–61.
45. Roux F, Uhlhaas PJ. Working memory and neural oscillations: alpha-gamma versus theta-gamma codes for distinct WM information? *Trends Cogn Sci*, 2014; 18: 16–25.
46. Crespo-Garcia M, Pinal D, Cantero JL, Diaz F, Zurrón M, Atienza M. Working memory processes are mediated by local and long-range synchronization of alpha oscillations. *J Cogn Neurosci*, 2013; 25: 1343–57.
47. Fell J, Axmacher N. The role of phase synchronization in memory processes. *Nat Rev Neurosci*, 2011; 12: 105–18.
48. Saalman YB, Pinsk MA, Wang L, Li X, Kastner S. The pulvinar regulates information transmission between cortical areas based on attention demands. *Science*, 2012; 337: 753–56.
49. Williams SM, Goldman-Rakic PS. Characterization of the dopaminergic innervation of the primate frontal cortex using a dopamine-specific antibody. *Cereb Cortex*, 1993; 3: 199–222.
50. Shohamy D, Adcock RA. Dopamine and adaptive memory. *Trends Cogn Sci*, 2010; 14: 464–72.
51. Voets NL, Menke RA, Jbabdi S, Husain M, Stacey R, Carpenter K, Adcock JE. Thalamo-cortical disruption contributes to short-term memory deficits in patients with medial temporal lobe damage. *Cereb Cortex*, 2015 [w druku].
52. Kandel ER, Dudai Y, Mayford MR. The molecular and systems biology of memory. *Cell*, 2014; 157(1): 163–86.
53. Liao SM, Sandberg A. The normativity of memory modification. *Neuroethics*, 2008; 1: 85–99.