

MARTA WYSOCKA

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie
Katedra Logopedii i Językoznawstwa Stosowanego

ORCID ID: <https://orcid.0000-0002-7728-6102>

Percepcja rytmu w muzyce i mowie

Perception of Rhythm in Music and Speech

STRESZCZENIE

W artykule zaprezentowano zagadnienia dotyczące rytmiczności w muzyce i mowie. Scharakteryzowano biologiczne i poznawcze mechanizmy leżące u podstaw przetwarzania rytmu w muzyce i mowie oraz dostępne w literaturze hipotezy i wyniki badań empirycznych wyjaśniające biologiczne i poznawcze mechanizmy rytmiczności w zachowaniach muzycznych i językowych człowieka. Wskazano też obszary oddziaływań logopedycznych, w których możliwe jest wykorzystanie aktywności rytmicznych w celu podnoszenia poziomu sprawności językowych.

Słowa kluczowe: rytm, organizacja czasowa muzyki i mowy, przetwarzanie czasowe, rytm w terapii zaburzeń mowy

SUMMARY

The article presents issues related to rhythmicity in music and speech. The biological and cognitive mechanisms underlying the processing of rhythm in music and speech were characterized, as well as the hypotheses and empirical research results available in the literature that explain the biological and cognitive mechanisms of rhythmicity in human musical and linguistic behavior. The areas of speech and language therapy impact were also indicated, in which it is possible to use rhythmic activities to raise the level of language skills.

Key words: rhythm, time organization of music and speech, time processing, rhythm in the therapy of speech disorders

WPROWADZENIE

Uczestnictwo w aktywnościach opartych na rytmie muzycznym jest powszechne w populacji ludzkiej. Praktyki takie występowały już w czasach najdawniejszych i ujawniały się pod postacią zachowań muzycznych: bębnienia, tańca, gry na instrumentach oraz śpiewu (Mithen 2005; Fitch 2006). Towarzyszyły dalszej ewolucji człowieka i są popularne w czasach współczesnych. Obecnie, dzięki wynikom wielu badań, możliwa jest charakterystyka licznych biologicznych mechanizmów, które umożliwiają człowiekowi odbiór muzyki, jej tworzenie i odtwarzanie. Wiele z tych mechanizmów wykazuje związki z procesami przetwarzania mowy (m.in. Shields, McHugh, Martin 1974; Pitt, Samuel 1990; Patel 2011; Goswami 2011, 2018; Fujii, Wan 2014). Powiązania te tworzą duży potencjał terapeutyczny związany z usprawnianiem mowy przez aktywności muzyczne i otwierają możliwości kształtowania czy usprawniania funkcji zaangażowanych w odbiór i ekspresję mowy na różnych poziomach jej organizacji.

Do zjawisk muzycznych, które w sposób szczególny wykazują powiązania z mową i warunkującymi ją funkcjami, zalicza się organizację rytmiczną. Rytmiczność jest mocno wpisana w wiele aktywności człowieka – w procesy percepcyjne, ruchowe czy koordynacyjne (m.in. Fujii, Wan 2014; Kotz, Schwartz 2016). Rytm muzyczny silnie oddziałuje na różne rodzaje naszej aktywności – ruchową, percepcyjną, poznawczą, komunikacyjną oraz społeczną. Jego obecność w otoczeniu często wywołuje spontaniczne reakcje motoryczne, takie jak stukanie, klaskanie, chodzenie, taniec i śpiewanie, manifestujące się w szczególności u dzieci, które to w sposób nieskrępowany reagują na muzykę (Kirschner, Tomasello 2009; Fujii et al. 2014). Zachęca to ich opiekunów do inicjowania zabaw wykorzystujących wyraziście zrytmizowane piosenki oraz teksty mówione, charakteryzujące się regularnością rytmiczną i urozmaiconą, często powtarzalną charakterystyką prozodyczną, nadającą tym wykonaniom cechy muzyczności. Badania wykazały, że aktywność rytmiczna wzmacnia pozytywne zachowania i emocje w grupie, wspierając budowanie więzi i efektywną współpracę (Zentner, Eerola 2010; Reddish et al. 2013).

Okazuje się, że rytmiczność jest wpisana w mechanizmy biologiczne nie tylko człowieka, ale także innych naczelnych i ujawnia się w ich zachowaniach komunikacyjnych, np. w mlaskaniu rebusów (Ghazanfar, Morrill, Kayser 2013) czy bębieniu makaków (Remedios et al. 2009). Co istotne – z badań wynika, że częstotliwość wspomnianych ruchów odpowiada częstotliwości występowania sylab w ciągu mownym (Ghazanfar, Morrill, Kayser 2013). Skłania to do uznania ważnej, głęboko zakorzenionej w biologii, roli mechanizmów czasowych w tworzeniu i kontroli ruchów wykorzystywanych w zachowaniach komunikacyjnych i językowych.

W ostatnich latach badacze coraz częściej zwracają uwagę na terapeutyczny potencjał rytmu muzycznego w rehabilitacji mowy (m.in. Large, Kolen 1994; Semjen, Vorberg, Schulze 1998; Krause, Pollok, Schnitzler 2010; Kotz, Schwartze 2011; 2016, Fujii, Wan 2014; Tierney, Kraus 2014). Techniki oparte na rytmie i pulsie muzycznym, których podstawą jest uznanie założenia, że puls i rytm muzyczny mogą wyzwalać i stabilizować puls i rytm w mowie (por. Fujii, Wan 2014), znajdują zastosowanie w logopedycznej terapii osób jękających się (Andrews et al., 1982), z uszkodzonym narządem słuchu (Hidalgo, Falk, Schön 2017), SLI (Przybylski et al., 2013), afazją (Stahl et al., 2011), dyzartrią (Cohen, Masse 1993), dysleksją (Flaugnacco et al. 2015; Goswami 2011, 2018), autyzmem (Wan et al. 2011), (por. także przegląd badań w: Wysocka 2019).

W niniejszym artykule zostaną przedstawione dostępne w literaturze przedmiotu hipotezy i wyniki badań empirycznych wyjaśniające biologiczne i poznawcze mechanizmy leżące u podstaw rytmiczności w zachowaniach człowieka oraz obszary, w których możliwe jest wykorzystanie aktywności rytmicznych w celu podnoszenia poziomu sprawności językowych.

RYTMICZNOŚĆ I METRYCZNOŚĆ

Muzyka i mowa cechują się określonym uporządkowaniem w czasie składających się na nie elementów. Według obecnego stanu wiedzy przetwarzanie czasowe, angażujące coraz lepiej zbadane mechanizmy mózgowo, uznawane jest za proces warunkujący w dużym stopniu percepcję i ekspresję muzyki i mowy (m.in. Patel 2011a; Rothermich, Kotz 2013; Schwartze, Kotz 2013; Tierney, Kraus 2014).

Organizacja czasowa w muzyce jest bardziej wyrazista percepcyjnie ze względu na izochronizm, który cechuje poszczególne rodzaje wartości rytmicznych realizowanych w określonym tempie – całe nuty, półnuty, ćwierćnuty, ósemki i krótsze jednostki. Puls muzyczny, na który składają się powtarzające się w stałych interwałach czasowych elementy (bity, ang. *beats*), pełni niejako funkcję szkieletu, matrycy, w obrębie której tworzone są określone przebiegi rytmiczne. W utworach muzycznych te stale powtarzające się elementy pojawiają się z częstotliwością od 1 do 2 Hz, w zależności od tego, jaką wartość rytmiczną przedstawiają i w jakim tempie są wykonywane (London 2004). Wśród bitów tworzących puls znajdują się bity mocne i słabe. Szczególna rola przypada bitom mocnym, wyrazistym percepcyjnie. To wokół nich organizują się przebiegi rytmiczne. Mocne i słabe bity tworzą struktury rytmiczne zorganizowane w określonym metrum. Zazwyczaj w utworach muzycznych mocnym jest pierwszy bit w takcie. Graficzną ilustrację omawianych zagadnień stanowi rycina 1.



Rycina 1. Przykładowa organizacja rytmiczna w metrum 4/4

Źródło: opracowanie własne

W pierwszym takcie przedstawionym na rycinie znajdują się cztery ćwierćnuty reprezentujące puls ćwierćnutowy, charakterystyczny dla tego rodzaju metrum. Poszczególne ćwierćnuty to bity, pojawiające się w równych odcinkach czasu. W takcie drugim rytm jest bardziej zróżnicowany, dzięki zastosowaniu również innych wartości rytmicznych, które jednak wpisują się w matrycę pulsu. Porównując go do taktu pierwszego, można dostrzec, że pierwsza ćwierćnuta została zachowana, drugą zastąpiły dwie ósemki, a trzecią i czwartą – półnuta. Trzeci takt przedstawia jeszcze inną organizację rytmiczną, w której w miejscu pierwszej ćwierćnuty umieszczono dwie ósemki, drugą i trzecią zastąpiła półnuta, zaś czwartą – pauza ćwierćnutowa.

Występowanie mocnych i słabych bitów w określonym porządku prowadzi do wytworzenia w świadomości słuchacza zjawiska metrum. Jednostka metryczna stanowi konstrukt poznawczy słuchacza (Lerdahl, Jackendoff 1983), którego powstawanie w umyśle wiąże się z umiejętnością przewidywania, na podstawie doświadczeń słuchowych, powtarzalnego w czasie przebiegu, z zachowaną kolejnością elementów mocnych i słabych. Metrum ma charakter hierarchiczny (Patel 2011) i składa się z elementu postrzeganego jako mocniejszy (akcentowanego) i bitów słabych, których liczba zależy od tego, jak często występuje bit mocny (np. w metrum 2/4 występują naprzemiennie bit mocny i słaby, każdy z nich odpowiadający jednej ćwierćnucie, w metrum 3/4 – bit mocny i dwa słabe, zaś w metrum 4/4 – mocny i 3 słabe).

W mowie interwały czasowe, które cechują kolejne elementy ciągu fonicznego, są bardziej zmienne, dlatego też tworzone przez nie jednostki rytmiczne mają charakter quasi-periodycznych (Wagner 2017). Jednostki te, tak jak i w muzyce, zbudowane są z elementów mocnych i słabych – akcentowanych i nieakcentowanych¹. Za najważniejszy parametr organizujący te struktury uznaje się obwiednię amplitudy sygnału odpowiedzialną za słuchowe wrażenie głośności dźwięku. Odbiór różnic głośności pozwala na wyodrębnienie elementów mocnych i słabych. Liczne wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają, że przewi-

¹ Tak rozumiany rytm mowy określany jest jako rytm kontrastowy, który postrzegany jest dzięki percepcji występujących w określonym porządku elementów silnych i słabych. Ta koncepcja rytmu jest bardzo zbliżona do rozumienia struktury metrycznej w muzyce. W literaturze można również odnaleźć pojęcie rytmu koordynacyjnego, oznaczającego grupowanie elementów w jednostki na podstawie wskazówek fonetycznych (Kotz, Ravignani, Fitch 2018).

dywanie struktur metrycznych w mowie i ich percepcja, oparta na zmianach obwiedni amplitudy, mają duże znaczenie w segmentacji ciągu mownego i rozumieniu mowy (Sanders, Neville 2000; Nazzi, Ramus 2003; Bion, Benavides-Varela, Nespor 2011; Ghitza 2012; Kotz, Schwartz 2016), a także w jej rozwoju w ontogenezie (Jusczyk, Cutler, Redanz 1993; Gervain, Werker 2013; Goswami 2019). W niektórych pracach podkreśla się również rolę innych czynników, istotnych zwłaszcza w odbiorze mowy naturalnej, w której parametry akustyczne mowy nie są ściśle kontrolowane przez mówiącego. Uważa się, że w detekcji akcentu w mowie, oprócz cech amplitudy, istotne są również zmiany częstotliwości podstawowej sygnału, czasu trwania elementów i nachylenie widma (Shattuck-Hufnagel, Turk 1996; Breen et al. 2012; Beier, Ferreira 2018).

Umiejętność przewidywania czasu występowania bitów mocnych okazuje się ważna zarówno w budowaniu metrum na poziomie poznawczym, które to ułatwia percepcję muzyki i kontrolę jej wykonania, jak i w percepcji mowy. Przewidywanie czasu występowania akcentu pozwala na efektywniejsze śledzenie ciągu mownego dzięki możliwości koncentracji uwagi na elementach wyróżnionych. O wadze tej koncentracji dla percepcji mowy świadczy fakt, że sylaby i fonemy akcentowane wykrywane są i przetwarzane szybciej od nieakcentowanych (Pitt, Samuel 1990; Gow, Gordon, 1993). Ponadto sylaby akcentowane uważane są za ważniejsze, nie tylko percepcyjne, ale też z uwagi na znaczenie niesione przez nie same lub przez jednostki, które tworzą z sylabami sąsiednimi (Altman, Carter 1989; Calhoun 2010). W celu uzyskania lepszej integracji przyswajanych informacji odbiorcy mowy mogą stosować strategię detekcji akcentów i kierowania uwagi na uwydatnione elementy. Takie założenie określono Hipotezą Skoków Uwagi (ang. *Attentional Bounce Hypothesis* (ABH) (Shields, McHugh, Martin 1974; Pitt, Samuel 1990), a będzie o niej mowa również w dalszej części artykułu.

Należy jednak podkreślić, że w mowie postrzeganie miejsca akcentu jest bardziej skomplikowane niż w muzyce. Oprócz wskazówek akustycznych, pozwalających dostrzec powtarzalność elementów uwydatnionych i przewidzieć quasi-periodyczność ich występowania, ważne są inne czynniki, np. semantyczne (Beier, Ferreira 2018; Rothermich, Kotz 2013).

Nie jest jasne, czy postrzeganie metrum w mowie jest zjawiskiem czysto poznawczym. Niektóre wyniki badań przemawiają za tym, że rytmiczne przewidywanie okresowości pojawiania się akcentu w mowie są najtrafniejsze wówczas, kiedy wywoływane są przede wszystkim fizyczną okresowością bodźca, trudną do utrzymania w naturalnej mowie (Otterbein et al. 2012). Jednak, jak sugerują wyniki innych badań, spójność wskazówek semantycznych z cechami akustycznymi poprawia skuteczność tej strategii i ułatwia przetwarzanie sygnału mowy pomimo tego, że przewidywanie metryczne i semantyczne angażują inne sieci neuronalne (Rothermich, Kotz 2013).

NEUROBIOLOGICZNE MECHANIZMY LEŻĄCE U PODSTAW PRZETWARZANIA RYTMU W MUZYCE I MOWIE

Podobieństwa występujące w czasowej i dynamicznej organizacji muzyki i mowy oraz w słuchowych i poznawczych procesach ich percepcji otwierają szeroką perspektywę badań porównawczych oraz dociekań nad możliwościami wykorzystania bodźców muzycznych w celu kształtowania czy usprawniania percepcji i ekspresji mowy. Badacze zajmujący się tą problematyką starają się, za pomocą konstruowania licznych hipotez oraz uwzględnienia potwierdzających je lub motywujących do ich tworzenia wyników badań empirycznych, uszczegółowić ustalenia dotyczące wspólnych procesów leżących u podstaw przetwarzania rytmu w muzyce i mowie oraz wytłumaczyć mechanizmy wspierania usprawniania sprawności językowych przez aktywności, w których wykorzystuje się rytm muzyczny.

Jednym ze sposobów służących objaśnieniu wpływu rytmu muzycznego na kształtowanie się rytmu mowy jest odwołanie się do wspomnianej Hipotezy Skoków Uwagi (*Attentional Bounce Hypothesis*, ABH; Shields, McHugh, Martin 1974; Pitt i Samuel, 1990), która zakłada, że śledzenie rytmu i przewidywanie miejsca występowania kolejnych akcentów są silnie powiązane z poziomem aktywności uwagi. Podczas śledzenia ciągu fonicznego ten poziom jest zmienny. Uwaga jest przede wszystkim skierowana na przewidywaną na podstawie dotychczasowych doświadczeń słuchowych lokalizację akcentu, niezależnie od tego, czy elementy akcentowane pojawiają się bardziej czy mniej regularnie, przy czym regularność wskazywana jest jako czynnik sprzyjający temu mechanizmowi i ułatwiający jego funkcjonowanie. Zastosowanie rytmu muzycznego w usprawnianiu mowy wiąże się zatem z tym, że ekspozycja na regularny rytm muzyczny może służyć kształtowaniu mechanizmu przewidywania, wykorzystywanego również w percepcji mowy. Sygnał mowy ma mniej regularną organizację czasową, a następstwo elementów akcentowanych nie jest w nim ściśle izochroniczne, stąd też jego odbiór wymaga znacznej sprawności mechanizmu przewidywania (Ding et al. 2017, Zoefel 2018).

Kolejnym zjawiskiem świadczącym o wspólnych procesach leżących u podstaw przetwarzania rytmu w muzyce i mowie jest mechanizm regulacji pulsu w mowie przez puls muzyczny i metrum, występujący dzięki temu, że percepcja pulsu i metrum w muzyce wpływa na czasowe mechanizmy przetwarzania mowy. W celu wyjaśnienia tego zjawiska posłużono się Teorią Dynamicznego Uczestnictwa (ang. *Dynamic Attending Theory*, DAT; Large, Kolen 1994; Large, Jones 1999), korespondującą także ze wspomnianą już Hipotezą Skoków Uwagi. Teoria ta została opracowana głównie dla zrozumienia mechanizmów percepcji rytmu w muzyce. Zgodnie z jej założeniami tworzenie oczekiwań słuchaczy

dotyczące miejsca pojawienia się akcentu powstaje dzięki pobudzeniu albo synchronizacji oscylacji neuronowych, zachodzących w ich mózgowach, ze słuchowym bodźcem zewnętrznym, którego występowanie ma charakter okresowy. Dzięki temu słuchacze koncentrują uwagę na określonych punktach w czasie. Eksperymenty badań pokazują, że rytmicznie zorganizowane bodźce, okresowe serie równych w czasie uderzeń oraz jednocześnie wyobrażone metrum pobudzają oscylacje neuronowe (Lakatos et al. 2008; Nozaradan, Peretz, Missal 2011, za: Beier, Ferreira 2018).

Dokonując wyjaśnienia sposobu powstawania wykorzystywanych w percepcji sygnału przewidywań, badacze odwołują się do teorii zagnieżdżonych, sprzężonych oscylatorów (Gitza 2011; Mai, Minett, Wang 2016), która znajduje zastosowanie również w interpretacji czasowych mechanizmów przetwarzania mowy. Przetwarzanie sygnału mowy ma charakter hierarchiczny i uporządkowany czasowo. Teoria ta zakłada, że angażują się w nie połączenia neuronalne zlokalizowane w korze skroniowej, czołowej, mózdzku oraz wzgórzu (Kotz, Schwartze 2016; Schwartze, Kotz 2016). Połączenia te generują oscylacje powiązane ze sobą, wśród których, kierując się klasyfikacją stworzoną z uwzględnieniem ich częstotliwości, wyróżniono pięć typów, odpowiadających częstotliwości fal mózgowych *gamma*, *beta*, *alfa*, *theta* i *delta*. Sygnał mowy jest przetwarzany wielopoziomowo, w tzw. oknach integracji czasowej, które odpowiadają falom *gamma*, *beta*, *theta* i *delta*. W oknie czasowym *gamma*, z częstotliwością około 30-50 Hz, odpowiadającą interwałowi czasowemu trwającemu około 20–30 ms, odbywa się przetwarzanie informacji subsegmentalnych (związanych z cechami fonemów, np. dźwięcznością czy szybko zachodzącymi zmianami spektralnymi, od których zależy postrzeganie miejsca artykulacji spółgłosek zwarto-wybuchowych). W oknie *beta* (ok. 15–30 Hz; 30–60 ms) odbierane są informacje segmentalne, pozwalające na różnicowanie fonemów, w oknie *theta* (ok. 4–7 Hz, 125–250 ms) przetwarzane są informacje na poziomie sylaby, zaś w oknie *delta* (ok. 1–2 Hz, 500 ms-1 s) odbywa się integracja informacji uzyskanych podczas przetwarzania danych we wcześniej wymienionych oknach, która pozwala wnioskować o znaczeniach obecnych w sygnałach, oraz kontrola przebiegów intonacyjnych (za: Wagner 2017, 28; por. także: Giraud, Poeppel 2012; Peelle, Davis 2012; Bourguignon et al. 2013). Sprzężenie oscylatorów związane jest z ich wzajemnym wpływaniem na siebie pod względem regulacji ich fazy. Najważniejszy w przetwarzaniu mowy jest oscylator *theta*, „który nie tylko śledzi rytm sylabiczny i dostarcza ram dla percepcyjnej segmentacji na poziomie sylab, ale stanowi trzon / główny ośrodek systemu zagnieżdżonych i sprzężonych oscylatorów (zob. Gitza 2011) w tym sensie, że pozostałe oscylatory neuronalne, tj. w paśmie *gamma*, *beta* i *delta*, synchronizują się z nim” (Wagner, 2017, 28–29).

Uważa się, że zjawisko sprzężenia oscylatorów – dostosowanie ich faz względem oscylatora wiodącego – leży u podstaw mechanizmów neuronalnych wspierających tworzenie wzorców czasowych i przewidywań temporalnych w mowie (Kotz, Schwartze 2010; Schwartze, Kotz 2013). Aktywacja sylabicznego tempa przetwarzania, związana z aktywnością fal *theta*, może być zatem podstawowym mechanizmem przewidywania, segmentacji i przetwarzania mowy w ogóle (Ghitza, Greenberg 2009; Peelle, Davis 2012).

Badania pokazują, że mechanizm przewidywania następstwa elementów w czasie i strukturze leży u podstaw rozumienia ciągłej mowy. Przewidywanie to ma miejsce na różnych poziomach organizacji językowej. Związane jest z mechanizmami ekspresji mowy, dlatego też rozumieniu towarzyszy ukryte naśladowanie. Dane płynące z bodźców zewnętrznych łączone są z przewidywaniami, dzięki czemu istnieje możliwość rekonstrukcji elementów w przypadku ich błędnej czy zaburzonej realizacji w słyszanej mowie (Pickering, Garrod 2007).

Opisana powyżej Teoria Dynamicznego Uczestnictwa (DAT) zainspirowała naukowców do stworzenia kolejnych, które służą charakterystyce czasowego przetwarzania rytmu i określeniu sposobów oddziaływania rytmu muzycznego na funkcje związane z mową. Jedną z nich jest Teoria Ram Czasowego Pobierania Próbek (ang. *Temporal Sampling Framework*, TSF; Goswami 2011, 2018). Powstała ona w toku badań nad mechanizmami tkwiącymi u podstaw dysleksji. Zgodnie z jej założeniami próbkowanie czasowe mowy za pomocą oscylacji neuroelektrycznych, przetwarzających odbierane informacje w różnych częstotliwościach, może wyjaśniać trudności percepcyjne i fonologiczne występujące u osób z dysleksją, objawiające się na poziomie fonemów i sylab. Autorka omawianej teorii podkreśla, że akustyczny sygnał mowy można traktować jako sumę kilku pasm częstotliwości, których amplituda zmienia się w czasie. Neuronowo układ słuchowy koduje modulację amplitudy dźwięków naturalnych w różnych kanałach częstotliwości (obwiednia amplitudy). Sieci komórkowe w korze słuchowej tworzą hierarchię oscylacyjną, która odzwierciedla hierarchię modulacji amplitudy obecnej w rytmicznej mowie, wspierając wydzielenie w sygnale mowy jednostek fonologicznych. Oscylacje o częstotliwości około 2 Hz (odpowiadające falam *delta*) umożliwiają identyfikację sylab akcentowanych, zaangażowanych w proces przekazywania znaczenia leksykalnego. Oscylacje o częstotliwości 4–6 Hz (fale *theta*) zaangażowane są w percepcję sylab i przetwarzanie informacji w ich obrębie (Goswami 2018). U. Goswami twierdzi, że za wiodące w procesie rozwoju sprawności fonologicznych należy uznać oscylacje *theta*. Modelem próbkowania *theta* umożliwia integrację czasową sygnału na poziomie sylab. Głównym czynnikiem obecnym w sygnale mowy, który służy wspieraniu mechanizmu próbkowania *theta*, jest śledzenie obwiedni amplitudy poprzez percepcję czasu narastania amplitudy. Częstotliwości modulacji amplitudy w mowie wynoszą

4–6 Hz, niezależnie od częstotliwości sygnału mowy, rodzaju wypowiedzi czy indywidualnych cech mówcy, odzwierciedlając sekwencyjną częstotliwość sylab (Goswami 2012, 3). Śledzenie zmian amplitudy umożliwia wyodrębnianie sylab, które cechują się największymi poziomami amplitudy w swoich centrach, a jej spadkiem na granicach. Na podstawie tych ustaleń U. Goswami sformułowała hipotezę, zgodnie z którą przyczyną problemów fonologicznych osób z dysleksją, oraz występujących w innych rozwojowych zaburzeniach mowy, może być osłabione funkcjonowanie próbkowania *theta*, niezaburzone zaś działanie próbkowania *gamma*, odpowiedzialnego za przetwarzanie informacji na poziomie fonemów. Może to skutkować wzmożoną czułością percepcyjną w odniesieniu do cech fonemów, prowadzącą do charakterystycznych dla osób z dysleksją problemów z mapowaniem dźwięków mowy na litery (Goswami 2012). Tak więc, zgodnie z powyższymi założeniami, za ważną przyczynę powstawania zaburzeń dyslektycznych należy uznać zaburzenia przetwarzania na poziomie *theta*, które utrudniają śledzenie rytmu sylabowego, istotnego w procesie czytania.

Kolejną popularną teorią tłumaczącą wpływ oddziaływania muzycznego na przetwarzanie mowy jest Hipoteza OPERA (akronim od ang. *overlap, precision, emotion, repetition, attention*; Patel 2011; 2014). Powstała ona w celu wyjaśnienia wpływu zjawisk muzycznych opartych na charakterystyce częstotliwościowej (głównie melodii), jednak po dodaniu dodatkowych założeń (Fujii, Wan 2014) przybliży również rozumienie zależności zachodzących między przetwarzaniem rytmicznym muzyki i mowy. Zgodnie z założeniami Hipotezy OPERA oddziaływanie muzyki na procesy związane z mową jest możliwe dzięki spełnieniu pięciu warunków. Pierwszym i podstawowym jest anatomiczne nakładanie się na siebie sieci neuronowych, które są aktywne podczas przetwarzania muzyki i mowy. Kolejne związane są z silnym pobudzeniem aktywności tych wspólnych sieci przez bodźce muzyczne. Drugim warunkiem hipotezy OPERA jest precyzja związana z faktem, że dźwięki muzyki wymagają większej dokładności przetwarzania poszczególnych parametrów dźwięków, co przekłada się na dużą aktywność sieci neuronalnych. Warunek trzeci, emocje, należy łączyć z faktem, że aktywności muzyczne wyzwalają silne pozytywne emocje. Warunek czwarty zakłada oddziaływanie powtarzania, niezbędnego w opanowaniu materiału muzycznego, stwarzającego warunki do wielu pobudeń w sieciach i ich utrwalania. Warunek piąty – uwaga, konieczna w aktywności muzycznej – zapewnia utrzymanie wysokiego poziomu pobudzenia sieci neuronowych. Hipoteza OPERA wyjaśnia wpływ oddziaływania muzycznego na przetwarzanie mowy, analizując proces aferentny, zachodzący w układzie słuchowym w kierunku od ślimaka do poziomu kory słuchowej.

Rozwinięcie hipotezy OPERA stanowi Hipoteza Synchronizacji Obwiedni Dźwięku oraz Pobudzenia do Pulsu, opartej na sprzężeniu sensomotorycznym

(*Synchronization and Entrainment to a Pulse*, SEP; Fujii, Wan 2014). Ukierunkowana jest ona na wyjaśnienie wspólnych mechanizmów przetwarzania rytmu w muzyce i mowie. Zakłada, że pobudzenie do pulsu przez dźwięki muzyki może pozytywnie wpływać na proces przetwarzania mowy dzięki pobudzaniu do aktywności sieci neuronów, które są aktywne podczas przetwarzania sygnału mowy. Synchronizacja i pobudzanie pulsu mowy przez puls muzyczny zakłada, że w mózgu nakładają się na siebie sieci neuronowe aktywne nie tylko podczas percepcji rytmu, ale także jego motorycznego wytwarzania i sprzężenia sensomotorycznego będącego reakcją na słyszane dźwięki muzyki i mowy (Kotz, Schwartze 2010, 2011). Autorzy tej koncepcji wskazują trzy obwody neuronalne, które biorą w tym udział: a) słuchowy obwód aferentny, odpowiedzialny za precyzyjne kodowanie parametrów czasowych i amplitudowych dźwięku, składający się z pnia mózgu, wzgórza, mózdzku i kory skroniowej, b) obwód podkorowo-przedczołowy, służący do przetwarzania emocjonalnego i związany z układem nagrody, obwód wzgórzowo-korowy, odpowiedzialny za przetwarzanie pojawiających się regularnie w czasie uderzeń oraz procesy uwagi, a także c) korowy obwód eferentny, aktywny podczas czynności motorycznych towarzyszących percepcji rytmu i pulsu.

Wyjaśnieniu związków przetwarzania rytmu muzyki i mowy poświęcona jest również Hipoteza Precyzyjnej Synchronizacji Słuchowej (*Precise Auditory Timing Hypothesis* – PATH; Tierney, Kraus 2014). Została ona sformułowana podczas poszukiwania próby wyjaśnienia mechanizmów, które warunkują uzyskanie, dzięki praktyce muzycznej, wysokiego poziomu sprawności fonologicznych przez muzyków, które to sprawności zaangażowane są w proces czytania. Autorzy hipotezy podkreślają, że opisywane powyżej (por. Fujii, Wan 2014) pobudzenie do pulsu jest podstawowym zjawiskiem, które odpowiada za wysoko rozwinięte zdolności fonologiczne muzyków. Podkreślają również ważną rolę założeń przyjętych w hipotezie OPERA (Patel 2011, 2014). „Taktowanie słuchowo-motoryczne”, czyli generowanie odpowiedzi ruchowych przez rytmiczne bodźce słuchowe, spełniające założenia zarówno hipotezy OPERA, jak i hipotezy SEP, doskonalili się podczas treningu muzycznego, związanego z wykorzystaniem często dość złożonych struktur rytmicznych. Ich percepcja i wykonanie wiążą się z koniecznością przetwarzania wzorców metro-rytmicznych, kształtującą dużą precyzję mechanizmów percepcji słuchowej i zaangażowanego w odbiór rytmu sprzężenia słuchowo-ruchowego. Ze względu na możliwość transferu sprawności z domeny muzyki do mowy usprawnianie to skutkuje poprawą umiejętności fonologicznych niezbędnych w procesie czytania, które również wymagają precyzyjnego przetwarzania słuchowego i zaangażowania synchronizacji słuchowo-ruchowej. Dzięki nim możliwe jest postrzeganie kategorii fonologicznych oraz tworzenie połączeń neuronalnych, umożliwiających powiązanie obrazu graficznego

liter i ich połączeń z odpowiadającymi im dźwiękami mowy i ich aktywność podczas czytania. Mechanizm pobudzania do rytmu wiąże się z aktywnością wzgórza dolnego oraz mózdzku, które to obszary odpowiadają na precyzję przetwarzania w czasie, synchronizację czasową i sprzężenie sensomotoryczne, a także kontrolę organizacji czasowej w mowie.

KORZYŚCI PŁYNĄCE Z ZASTOSOWANIA RYTMU MUZYCZNEGO W STYMULACJI ROZWOJU MOWY I TERAPII JEJ ZABURZEŃ

Percepcja struktur rytmicznych w muzyce, cechujących się ściśle określoną organizacją czasową oraz opartych na stałym pulsie i metrum, może być wykorzystywana do kształtowania mechanizmów czasowego przetwarzania słuchowego i przewidywania, które są zaangażowane w percepcję dźwięków mowy. Dzięki nim rozwija się leżąca u podstaw rozumienia mowy i jej ekspresji sprawność segmentacji ciągu mownego, oparta na detekcji zmieniających się w czasie cech dźwięku. Jak opisano w powyższej części artykułu, ekspozycja na rytm muzyczny wpływa pozytywnie na kształtowanie się koordynacji słuchowo-ruchowej. Podczas dostrajania się ruchowego do bodźca dźwiękowego uruchamiane jest słuchowo-motoryczne sprzężenie zwrotne. Jest to proces wymagający precyzji, ponieważ nawet niewielkie różnice w synchronizacji motorycznej, przy braku korekty, będą powodowały oddalanie się ruchu od bodźca. Aby do tego nie doszło, niezbędne jest postrzeganie czasu każdego dźwięku, porównanie go z czasem wykonywania ruchu i adekwatne do czasu trwania bodźca dostosowanie kolejnego ruchu.

Biorąc pod uwagę korzyści, które mogą płynąć z treningów rytmicznych, badacze wskazują na ważną rolę ćwiczeń z wykorzystaniem synchronicznie występujących w czasie dźwięków, których rozpowszechnioną formą są np. ćwiczenia z metronomem (Semjen, Vorberg, Schulze 1998; Krause, Pollok, Schnitzler 2010). Podkreślają, że wykonywanie ruchów bez zewnętrznych bodźców słuchowych niekoniecznie usprawnia mechanizmy przetwarzania czasowego i koordynacji słuchowo-ruchowej, gdyż wtedy ruch jest jedynie wypadkową sprawności układu ruchowego i wewnętrznego wyobrażenia określonego tempa. Nie angażuje słuchowo-motorycznego sprzężenia zwrotnego i precyzji przetwarzania słuchowego. Funkcje te doskonałą się za to w czynnościach, podczas wykonywania których człowiek dostosowuje własną aktywność ruchową do słyszanych synchronicznych bodźców słuchowych (Tierney, Kraus 2014).

Należy również podkreślić, że percepcja rytmu muzycznego kształtuje precyzję postrzegania zmian parametrów dźwięków w czasie, która to z kolei jest nieodzowna w rozwoju sprawności fonologicznych. Postrzeganie cech subseg-

mentalnych (VOT czy czasu trwania przejść formantowych), niezbędne w percepcji dźwięków mowy, zachodzi w przedziale czasowym kilkudziesięciu milisekund (Poeppel 2014). Dostosowywanie ruchu do rytmu muzycznego odbywa się często na podstawie postrzegania zmian w krótszych odcinkach czasu, wynoszących nawet 3 ms (Madison, Merker 2004). Tak więc ogromna precyzja związana z indukowanym przez sygnał słuchowy rytmicznym dostrajaniem do niego ruchów może być wykorzystywana w usprawnianiu przetwarzania czasowego warunkującego rozwój sprawności fonologicznych. Wpływa też na kształtowanie się koordynacji percepcyjno-motorycznej, którą wykorzystujemy w procesie czytania. Pozwala na tworzenie integracji informacji dotyczących znaku graficznego (litery) z wzorcem słuchowym jej wymowy i czynnością artykulacyjną (Tierney, Kraus 2014). Stosowane zatem usprawnianie precyzji słuchowego przetwarzania czasowego za pomocą pobudzania do percepcji i ruchowej ekspresji rytmu oraz metrum znajduje zastosowanie we wspomaganie rozwoju mowy i terapii zaburzeń fonologicznych, a także takich, w których występują problemy dotyczące sprzężenia słuchowo-ruchowego.

Ze względu na to, że muzyczne struktury rytmiczne są w wysokim stopniu powtarzalne – wartości rytmiczne są izochroniczne, a tempo ich realizacji jest przez dłuższy czas utrzymywane – percepcja i ekspresja rytmu rozwijają mechanizmy przewidywania. Dzięki powtarzalności stwarzają możliwość osiągania widocznych postępów w monitorowaniu czasowym przebiegów i spójności w czasie reakcji ruchowych z odbieranym bodźcem (Pitt, Samuel 1990).

Również w odniesieniu do innych funkcji istnieją korzyści związane z ekspozycją na rytm muzyczny. Dostosowywanie czynności motorycznych do muzycznych przebiegów rytmicznych wymaga koncentracji uwagi. Dowiedziono, że jej zaburzenia znacznie osłabiają precyzję przetwarzania rytmu i jego wykonania, zarówno u osób z zaburzeniami uwagi (Toplak, Tannock 2005), jak i w zdrowej populacji (Tierney, Kraus 2013), a ćwiczenia z wykorzystaniem rytmicznych czynności ruchowych pozytywnie wpływają na stan tej funkcji.

Badacze podkreślają, że wykonywanie ruchowych czynności rytmicznych, dostosowanych do bodźców słuchowych, niezależnie od tego czy wykonywane są wspólnie z innymi czy indywidualnie, angażuje układ nagrody i wyzwala pozytywne zaangażowanie, które podnosi aktywność percepcyjną, motoryczną i poznawczą (Kirschner, Tomasello 2009; Janata, Tomic, Haberman 2012).

Należy również podkreślić, że oprócz korzyści płynących z ćwiczeń synchronizacji ruchu z rytmicznymi bodźcami słuchowymi istnieje wpływ innych sprawności rytmicznych na kształtowanie mechanizmów odbioru mowy i jej ekspresji oraz na sprawność czytania. Wyniki badań dowodzą związku umiejętności odbioru akcentu metrycznego i organizacji rytmiczno-metrycznej muzyki ze sprawnością czytania (Huss et al. 2011). W rozwoju obydwu tych umiejętno-

ści ogromną rolę pełni postrzeganie amplitudy sygnału i czasu narastania drgań. Dzięki postrzeganiu akcentu i grup akcentowych, złożonych z elementu akcentowanego i elementów nieakcentowanych, rozwija się w percepcji mechanizm grupowania rytmicznego, nieodzowny w segmentacji ciągu fonicznego mowy oraz w jej rozumieniu, ale także w organizacji ruchów artykulacyjnych (Chandrasekaran et al. 2009).

PODSUMOWANIE

Organizacja rytmiczna muzyki i mowy cechuje się wieloma cechami wspólnymi (puls, regularny akcent), ale też odmiennościami (ściśły izochronizm wartości rytmicznych w muzyce i jego brak w mowie). Jak ukazują przywołane w niniejszym artykule ustalenia, istnienie zarówno jednych, jak i drugich okazuje się przydatne z punktu widzenia usprawniania percepcji i ekspresji mowy oraz kształtowania licznych sprawności językowych. Podobieństwa sprawiają, że możliwe jest przenoszenie umiejętności związanych z przetwarzaniem rytmu muzycznego na rytm mowy, natomiast charakterystyczny dla rytmu muzycznego izochronizm i zaangażowanie słuchowo-motorycznego sprzężenia zwrotnego w czynności rytmiczne powodują wysoki poziom aktywności mózgowej, uaktywniają wiele sieci neuronalnych i wymagają dużej precyzji przetwarzania słuchowego.

Z uwagi na to wykorzystanie rytmu muzycznego w terapii logopedycznej może przynieść wiele korzyści – przyczynić się do usprawniania przetwarzania czasowego i detekcji akcentu, autokontroli słuchowej, umiejętności segmentacji ciągu fonicznego, poprawy sprawności fonologicznych, czytania i pisania oraz płynności mowy.

Percepcja rytmu jest zjawiskiem szczególnym z racji tego, że poprzez zaangażowanie dróg eferentnych jest silnie powiązana z aktywnością ruchową. Otwiera to wiele możliwości usprawniania nie tylko czynności słuchowych, ale również koordynacji słuchowo-ruchowej, a dzięki podobieństwom rytmu muzycznego i rytmu mowy możliwe jest także kształtowanie tej sprawności w odniesieniu do procesów językowych – mówienia, czytania i pisania.

Warto na zakończenie podkreślić, że – biorąc pod uwagę prezentowane w artykule ustalenia – ocena sprawności rytmicznych, zaangażowanych w liczne wymienione procesy językowe, wydaje się ważna w diagnozie logopedycznej. Wczesne wykrywanie trudności rytmicznych, możliwe już u małych dzieci, pozwoliłoby na określenie ryzyka powstawania zaburzeń procesów językowych, w które zaangażowane są sprawności rytmiczne i podjęcie czynności usprawniających, zanim rozwiną się wymagające intensywnej i długotrwałej interwencji trudności. Ćwiczenia rytmiczne powinny zatem stanowić ważny element profilaktyki zaburzeń mowy.

BIBLIOGRAFIA

- Andrews G., Howie P.M., Dozsa M., Guitar B.E., 1982, *Stuttering: speech pattern characteristics under fluency-inducing conditions*, „Journal of Speech and Hearing Research”, 25, 208–216, doi: 10.1044/jshr.2502.208.
- Altman G., Carter, 1989, *Lexical stress and lexical discriminability: stressed syllables are more informative, but why?*, „Computer Speech and Language”, 3, 265–275, doi: 10.1016/0885-2308(89)90022-3.
- Beier E. J., Ferreira F., 2018, *The temporal prediction of stress in speech and its relation to musical beat perception*, „Frontiers in Psychology”, 9, doi: 431. 10.3389/fpsyg.2018.00431.
- Bion R.A.H., Benavides-Varela S., Nespor M., 2011, *Acoustic markers of prominence influence infants' and adults' segmentation of speech sequences*, „Language and Speech”, 54(1), s. 123–140, doi: 10.1177/0023830910388018.
- Bourguignon M., De Tiège X., De Beeck M.O., Ligot N., Paquier P., Van Bogaert P. et al., 2013, *The pace of prosodic phrasing couples the listener's cortex to the reader's voice*, „Human Brain Mapping”, 34, s. 314–326, doi: 10.1002/hbm.21442.
- Breen M., Fedorenko E., Wagner M., Gibson E., 2010, *Acoustic correlates of information structure*, „Language & Cognitive Processes”, 25, 1044–1098, doi: 0.1080/01690965.2010.504378
- Calhoun S., 2010, *How does informativeness affect prosodic prominence?*, „Language & Cognitive Processes”, 25, 1099–1140, doi: 10.1080/01690965.2010.491682.
- Chandrasekaran C., Trubanova A., Stillitano S., Caplier A., Ghazanfar A.A., 2009, *The natural statistics of audiovisual speech*, „PloS Computational Biology”, 5(7), doi: 10.1371/journal.pcbi.1000436.
- Cohen N.S., Masse R., 1993, *The application of singing and rhythmic instruction as a therapeutic intervention for persons with neurogenic communication disorders*, „Journal of Music Therapy”, 30(2), 81–99, doi: 10.1093/jmt/30.2.81.
- Ding N., Patel A.D., Chen L., Butler H., Luo C., Poeppel D., 2017, *Temporal modulations in speech and music*, „Neuroscience & Biobehavioral Reviews”, 81, s.181–187, doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.02.011.
- Fitch W.T., 2006, *The biology and evolution of music: a comparative perspective*, „Cognition”, 100, s. 173–215, doi: 10.1016/j.cognition.2005.11.009.
- Flaugnacco E., Zoia S., Flaugnacco E., Lopez L., Terribili C., Montico M., Schon D., 2015, *Music training increases phonological awareness and reading skills in developmental dyslexia: A randomized control trial*, „PLoS ONE”, 10(9), e0138715, doi: 10.1371/journal.pone.0138715.
- Fujii S., Wan C.Y., 2014, *The role of rhythm in speech and language rehabilitation: The SEP hypothesis*, „Frontiers in Human Neuroscience”, 8, 777, doi: 10.3389 / fnhum.2014.00777.
- Fujii S., Watanabe H., Oohashi H., Hirashima M., Nozaki D., Taga G., 2014, *Precursors of dancing and singing to music in three- to four-months-old infants*. „PLoS ONE”, 9, e97680, doi: 10.1371/journal.pone.0097680.
- Gervain J., Werker J. F., 2013, *Prosody cues word order in 7-month-old bilingual infants*, „Nature Communications”, 4(1), 1490, doi: 1490 10.1038/ncomms2430.
- Ghazanfar A. A., Morrill R. J., Kayser C., 2013, *Monkeys are perceptually tuned to facial expressions that exhibit a theta-like speech rhythm*, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America”, 110, s. 1959–1963, doi: 10.1073/pnas.1214956110.
- Ghitza O., 2011, *Linking speech perception and neurophysiology: speech decoding guided by cascaded oscillators locked to the input rhythm*, „Frontiers in Psychology”, 27, doi: 10.3389/fpsyg.2011.00130.

- Ghitza O., 2012, *On the role of theta-driven syllabic parsing in decoding speech: Intelligibility of speech with a manipulated modulation spectrum*, „Frontiers in Psychology”, 3, s. 1–12, doi: 10.3389/fpsyg.2012.00238.
- Ghitza O., Greenberg S., 2009, *On the possible role of brain rhythms in speech perception: intelligibility of time-compressed speech with periodic and aperiodic insertions of silence*, „Phonetica”, 66, s. 113–126, doi: 10.1159/000208934.
- Giraud A., Poeppel D., 2012, *Cortical oscillations and speech processing: emerging computational principles and operations*, „Nature Neuroscience”, 15, s. 511–517, doi: 10.1038/nn.3063.
- Goswami U., 2011, *A temporal sampling framework for developmental dyslexia*, „Trends in Cognitive Sciences”, 15(1), s. 3–10, doi: 10.1016/j.tics.2010.10.001.
- Goswami U., 2018, *A neural basis for phonological awareness? An oscillatory temporal-sampling perspective*, „Current Directions in Psychological Science”, 27(1), s. 56–63. 10.1177/0963721417727520.
- Goswami U., 2019, *Speech rhythm and language acquisition: An amplitude modulation phase hierarchy perspective*, „Annals of the New York Academy of Sciences”, 1453, s. 67–78, doi: 10.1111/nyas.14137.
- Gow D., Gordon P., 1993, *Coming to terms with stress: effects of stress location in sentence processing*, „Journal of Psycholinguistic Research”, 22, s. 545–578.
- Hidalgo C., Falk S., Schön D., 2017, *Speak on time! Effects of a musical rhythmic training on children with hearing loss*, „Hearing Research”, 351, s. 11–18, doi: 10.1016/j.heares.2017.05.006.
- Huss M., Verney J.P., Fosker T., Mead N., Goswami U., 2011, *Music, rhythm, rise time perception and developmental dyslexia: perception of musical meter predicts reading and phonology*, „Cortex”, 47, s. 674–689., doi: 10.1016/j.cortex.2010.07.010.
- Janata P., Tomic S., Haberman J., 2012, *Sensorimotor coupling in music and the psychology of the groove*, „Journal of Experimental Psychology: General”, 141, s. 54–75, doi: 10.1037/a0024208.
- Jusczyk P.W., Cutler A., Redanz N.J., 1993, *Infants' preference for the predominant stress patterns of English words*, „Child Development”, 64(3), s. 675–687, doi: 10.2307/1131210.
- Kirschner S., Tomasello M., 2009, *Joint drumming: social context facilitates synchronization in preschool children*, „Journal of Experimental Child Psychology”, 102, s. 299–314, doi: 10.1016/j.jecp.2008.07.005.Kotz S.A., Ravnani A., Fitch W.T., 2018, *The evolution of rhythm processing*, „Trends in Cognitive Sciences”, 22(10), s. 896–910, doi: 10.1016/j.tics.2018.08.002.
- Kotz S.A., Schwartze M., 2010, *Cortical speech processing unplugged: a timely subcortico-cortical framework*, „Trends in Cognitive Science”, 14, s. 392–399, doi: 10.1016/j.tics.2010.06.005.
- Kotz S.A., Schwartze M., 2011, *Differential input of the supplementary motor area to a dedicated temporal processing network: functional and clinical implications*, „Frontiers in Integrative Neuroscience”, 5, 86, doi: 10.3389/fnint.2011.00086.
- Kotz S.A., Schwartze M., 2016, *Motor-timing and sequencing in speech production: a general-purpose framework*, [w:] G. Hickok, S.L.Small, *Neurobiology of Language*, Amsterdam, s. 717–724.
- Krause V., Pollok B., Schnitzler A., 2010, *Perception in action: the impact of sensory information on sensorimotor synchronization in musicians and non-musicians*, „Acta Psychologica”, 133, s. 28–37, doi: 10.1016/j.actpsy.2009.08.003.
- Lakatos P., Karmos G., Mehta A.D., Ulbert I., Schroeder C.E., 2008, *Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection*, „Science”, 320, s. 110–113, doi: 10.1126/science.1154735.
- Large E.W., Fink P., Kelso J.A. S., 2002, *Tracking simple and complex sequences*, „Psychological Research”, 66, s. 3–17, doi: 10.1007/s004260100069.

- Large E.W., Kolen J.F., 1994, *Resonance and the perception of musical meter*, „Connection Science”, 6, s. 177–208, doi: 10.1080/09540099408915723.
- Lerdahl F., Jackendoff R., 1983, *A generative theory of tonal music*, Cambridge.
- London J., 2004, *Hearing in time: psychological aspects of musical meter*, Oxford–New York.
- Madison G., Merker B., 2004, *Human sensorimotor tracking of continuous subliminal deviations from isochrony*, „Neuroscience Letters”, 370, s. 69–73, doi: 10.1016/j.neulet.2004.07.094.
- Mai G., Minett J.W., Wang W.S.Y., 2016, *Delta, theta, beta and gamma brain oscillations index levels of auditory sentence processing*, „NeuroImage”, 133, s. 516–528, doi: 10.1016/j.neuroimage.2016.02.064.
- Mithen S., 2005, *The singing Neanderthals: the origins of music, language, mind, and body*, London.
- Nazzi T., Ramus, F., 2003, *Perception and acquisition of linguistic rhythm by infants*, „Speech Communication”, 41, s. 233–243, doi: 10.1016/S0167-6393(02)00106-1.
- Nozaradan S., Peretz I., Missal M., 2011, *Tagging the neuronal entrainment to beat and meter*, „Journal of Neuroscience”, 31, s. 10234–10240, doi: 10.1523/JNEUROSCI.0411-11.2011.
- Otterbein S., Abel C., Heinemann L.V., Kaiser, J., Schmidt-Kassow M., 2012, *P3b reflects periodicity in linguistic sequence*, „PLoS ONE”, 7, e51419, doi: 10.1371/journal.pone.0051419.
- Patel A.D., 2011a, *Musical rhythm, linguistic rhythm, and human evolution*, „Music Perception”, 24, s. 99–104, doi: 10.1525/rep.2008.104.1.92.
- Patel A.D., 2011b, *Why would musical training benefit the neural encoding of speech? The OPERA hypothesis*, „Frontiers in Psychology”, 2:142, doi: 10.3389/fpsyg.2011.00142.
- Patel A.D., 2012, *The OPERA hypothesis: assumptions and clarifications*, „Annals of the New York Academy of Sciences”, 1252, s. 124–128, doi: 10.1111/j.1749-6632.2011.06426.x.
- Patel A.D., 2014, *Can nonlinguistic musical training change the way the brain processes speech? The expanded OPERA hypothesis*, „Hearing Research”, 308, s. 98–108, doi: 10.1016/j.heares.2013.08.011.
- Peelle J.E., Davis M.H., 2012, *Neural oscillations carry speech rhythm through to comprehension*, „Frontiers in Psychology”, 3, 320, doi: 10.3389/fpsyg.2012.00320.
- Pickering M. J., Garrod S., 2007, *Do people use language production to make predictions during comprehension?*, „Trends in Cognitive Sciences”, 11, (3), s. 105–110, doi: 10.1016/j.tics.2006.12.002.
- Pitt M.A., Samuel A.G., 1990, *The use of rhythm in attending to speech*, „Journal of Experimental Psychology”, 16, s. 564–573, doi: 10.1037/0096-1523.16.3.564.
- Poeppl D., 2014, *The neuroanatomic and neurophysiological infrastructure for speech and language*, „Current Opinion in Neurobiology”, 28, s. 142–149, doi: 10.1016/j.conb.2014.07.005.
- Przybylski L., Bedoin N., Krifi-Papoz S., Herbillon V., Roch D., Lécuelier L., Kotz S.A., Tillmann B., 2013, *Rhythmic auditory stimulation influences syntactic processing in children with developmental language disorders*, „Neuropsychology”, 27(1), s. 121–131, doi: 10.1037/a0031277.
- Reddish P., Fischer R., Bulbulia J., 2013, *Let's dance together: synchrony, shared intentionality and cooperation*, „PLoS ONE”, 8, e71182, doi: 10.1371/journal.pone.0071182.
- Remedios R., Logothetis N.K., Kayser C., 2009, *Monkey drumming reveals common networks for perceiving vocal and nonvocal communication sounds*, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America”, 106, s. 18010–18015, doi: 10.1073/pnas.0909756106
- Rothermich K., Kotz, S. A., 2013, *Predictions in speech comprehension: fMRI evidence on the meter-semantic interface*, „Neuroimage”, 70, s. 89–100, doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.12.013.
- Sanders L.D., Neville H.J., 2000, *Lexical, syntactic, and stress-pattern cues for speech segmentation*, „Journal of Speech, Language, and Hearing Research”, 43, 1301–1321. doi: 10.1044/jslhr.4306.1301.

- Semjen A., Vorberg D., Schulze H.H., 1998, *Getting synchronized with the metronome: comparisons between phase and period correction*, „Psychological Research”, 61, s. 44–55, doi: 10.1007/s004260050012.
- Shattuck-Hufnagel S., Turk A.E., 1996, *A prosody tutorial for investigators of auditory sentence processing*, „Journal of Psycholinguistic Research”, 25, s. 193–247, doi: 10.1007/BF01708572.
- Schwartz M., Kotz S.A., 2013, *A dual-pathway neural architecture for specific temporal prediction*, „Neuroscience & Biobehavioral Reviews”, 37, s. 2587–2596, doi: 10.1016/j.neubiorev.2013.08.005.
- Schwartz M., Kotz S., 2016, *Contributions of cerebellar event-based temporal processing and preparatory function to speech perception*, „Brain and Language”, 161, s. 28–32, doi: 10.1016/j.bandl.2015.08.005.
- Stahl, B., Kotz, S.A., Henseler I., Turner R., Geyer F., 2011, *Rhythm in disguise: Why singing may not hold the key to recovery from aphasia*, „Brain”, 134(10), s. 3083–3093, doi: 10.1093/brain/awr240.
- Tierney A., Kraus N., 2013, *The ability to move to a beat is linked to the consistency of neural responses to sound*, „Journal of Neuroscience”, 33, s. 14981–14988, doi: 10.1523/jneurosci.0612-13.2013.
- Tierney A., Kraus N., 2014, *Auditory-motor entrainment and phonological skills: Precise auditory timing hypothesis (PATH)*, „Frontiers in Human Neuroscience”, 8, s. 949, doi: 10.3389/fnhum.2014.00949.
- Toplak M.E., Tannock R., 2005, *Tapping and anticipation performance in attention deficit hyperactivity disorder*, „Perceptual and Motor Skills”, 100, s. 659–675, doi: 10.2466/pms.100.3.659-675.
- Wagner A., 2017, *Rytm w mowie i języku w ujęciu wielowymiarowym*, Warszawa.
- Wan C.Y., Bazen L., Baars R., Libenson A., Zipse L., Zuk J., Norton A., Schlaug G., 2011, *Auditory-motor mapping training as an intervention to facilitate speech output in non-verbal children with autism: a proof of concept study*, „PloS ONE”, 6(9), e25505, doi: 10.1371/journal.pone.0025505.
- Wysocka M., 2019, *Możliwości zastosowania muzyki w terapii logopedycznej. Przegląd badań*, „Logopedia”, 48–1, s. 215–229, doi: 10.24335/fqr2-tg45.
- Zentner M., Eerola T., 2010, *Rhythmic engagement with music in infancy*, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America”, 107, s. 5768–5773, doi: 10.1073/pnas.1000121107.
- Zoefel B., 2018, *Speech entrainment: rhythmic predictions carried by neural oscillations*, *Current Biology*, 28(18), s. 1102–1104, doi: 10.1016/j.cub.2018.07.048.