

## Proces tworzenia głosu – przegląd aktualnej literatury przedmiotu

### Process of voice production – an overview of the current literature

Paulina Krasnodębska<sup>1ABEF</sup>, Tomasz Wolak<sup>2BE</sup>, Agata Szkiełkowska<sup>1,3D</sup>

<sup>1</sup> Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Światowe Centrum Słuchu, Klinika Audiologii i Foniatrii, Warszawa/Kajetany

<sup>2</sup> Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Światowe Centrum Słuchu, Naukowe Centrum Obrazowania Biomedycznego, Warszawa/Kajetany

<sup>3</sup> Uniwersytet Muzyczny Fryderyka Chopina, Katedra Audiologii i Foniatrii, Warszawa

#### Wkład autorów:

- A Projekt badania
- B Gromadzenie danych
- C Analiza danych
- D Interpretacja danych
- E Przygotowanie pracy
- F Przegląd literatury
- G Gromadzenie funduszy

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat roli układu nerwowego w procesie powstawania głosu fizjologicznego z uwzględnieniem doniesień literaturowych z ostatnich 5 lat. Współcześnie uznawana teoria tworzenia głosu zakłada, że do jego powstania konieczne jest współdziałanie układów mięśniowo-szkieletowego, oddechowego i nerwowego. W pracy prezentujemy wyniki badań własnych dotyczących aktywności obszarów kory mózgowej związanej z generowaniem głosu i mowy, w których wykorzystano funkcjonalny rezonans magnetyczny.

**Słowa kluczowe:** głos • tworzenie głosu • fMRI • fałdy głosowe

#### Abstract

The article presents an overview of the current state of knowledge about the role of nervous system in the process of physiological voice production with reference to the literature published in the last 5 years. Nowadays, the accepted theory of voice formation assumes that muscular, skeletal, respiratory and nervous systems are required for its production. In this paper we present the results of our own research of functional magnetic resonance imaging of cerebral cortical areas associated with voice and speech generation.

**Key words:** voice • voice production • fMRI • vocal folds

#### Wprowadzenie

Kontrola ośrodkowego układu nerwowego nad funkcją krtani ewoluowała od prostego odruchu chroniącego układ oddechowy u ryb do tworzenia mowy u ludzi. Krtani człowieka w niewielkim stopniu różni się budową od krtani innych ssaków, jednak znaczne zróżnicowanie czynności integracyjnej ośrodkowego układu nerwowego umożliwiło powstanie głosu u ludzi [1]. Współcześnie uznawana teoria tworzenia głosu opiera się na założeniach z końca lat 60. XX wieku [2]. Zakłada, że do wytworzenia głosu konieczne jest współdziałanie układów mięśniowo-szkieletowego, oddechowego i nerwowego. Kolejne przełomowe odkrycie dotyczyło zidentyfikowania 5-warstwowej mikrostruktury fałdu głosowego i zostało opisane w 1974 roku przez

Hirano [3]. Głos jest przedmiotem licznych badań naukowców na całym świecie. Przegląd bazy PubMed wykazał, że w ciągu ostatnich 5 lat zostało opublikowanych 5946 artykułów dotyczących głosu ludzkiego. Kryterium wyszukiwania stanowiły wyrażenia ‘voice production’, ‘human voice’, ‘phonation’. Znakomita większość pozycji dotyczyła zagadnień patologii głosu. Nieliczne doniesienia odnosiły się do badań nad fizjologią procesu. Autorzy zwracają uwagę na znaczenie metod obrazowych, a zwłaszcza funkcjonalnego rezonansu magnetycznego, w szczególności dotychczasowej wiedzy [4,5]. W niniejszym artykule przedstawiono aktualnie uznawaną teorię powstawania głosu fizjologicznego, ze szczególnym uwzględnieniem roli układu nerwowego.

**Adres autora:** Paulina Krasnodębska, Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, ul. Mochnackiego 10, Warszawa, e-mail: p.krasnodebska@ifps.org.pl

## Teoria tworzenia głosu

Myśl o inicjacji głosu zapoczątkowuje kaskadę procesów neuronalnych. Jako pierwsza pobudzona zostaje kora ruchowa (kora przedruchowa i dodatkowa kora ruchowa), która wysyła informacje do poszczególnych pięter biorących udział w procesie tworzenia głosu [6]. Ośrodki kontrolujące procesy wokalizacji dowolnej znajdują się w przedniej części zakrętu obręczy – polach 24 i 33 według Brodmanna oraz dodatkowym polu ruchowym – polu 6 według Brodmanna, zlokalizowanym w zakręcie czołowym górnym i środkowym [1]. Nadrzędny ośrodek kontroli ruchowej mowy, koordynujący między innymi czynność mięśni biorących udział w procesie tworzenia głosu, znajduje się w tak zwanym ośrodku Broki, w tylnej części zakrętu czołowego dolnego (pole 44, 45 według Brodmanna) [7].

Badania własne w oparciu o funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI) pokazały, że we wczesnym dzieciństwie mózg uczy się w pierwszej kolejności, jak kontrolować ruchy rąk i nóg. Początkowo ruchy te są niezgrabne i mało precyzyjne. Palce zginają się jednocześnie, ale po pewnym czasie dziecko uczy się ruchu pensetowego i coraz lepiej kontroluje poszczególne mięśnie. Gdy precyzja ruchów (kontrola nad sekwencją skurczu poszczególnych mięśni) jest wystarczająco rozwinięta, aby precyzyjnie kontrolować ruchy mięśni rąk, mózg jest gotowy do precyzyjnego kontrolowania języka i krtani. Zaczynają się pojawiać pierwsze wypowiedziane głoski. W wieku ok. 9–10 miesięcy dziecko koduje w mózgu usłyszane dźwięki mowy (fonemy) z języka, który słyszy. Jednocześnie uczy się naśladować te fonemy, kodując w ośrodku Broki informacje pozwalające wypowiadać poszczególne głoski. W ten sposób tworzone są wzorce neuronalne pozwalające kontrolować mięśnie. Te wzorce potrzebne są do przygotowania planu wypowiedzi. W momencie powstawania koncepcji wypowiedzi (za co odpowiadają rozproszone ośrodki czołowe), ośrodek Broki przekłada w sposób automatyczny koncepcję wypowiedzi na plan ruchu poszczególnych mięśni. Plan ruchu trafia następnie do ośrodków motorycznych, które bezpośrednio sterują mięśniami aparatu mowy znajdującymi się w obrębie całego traktu głosowego (Rycina 1) [8,9].

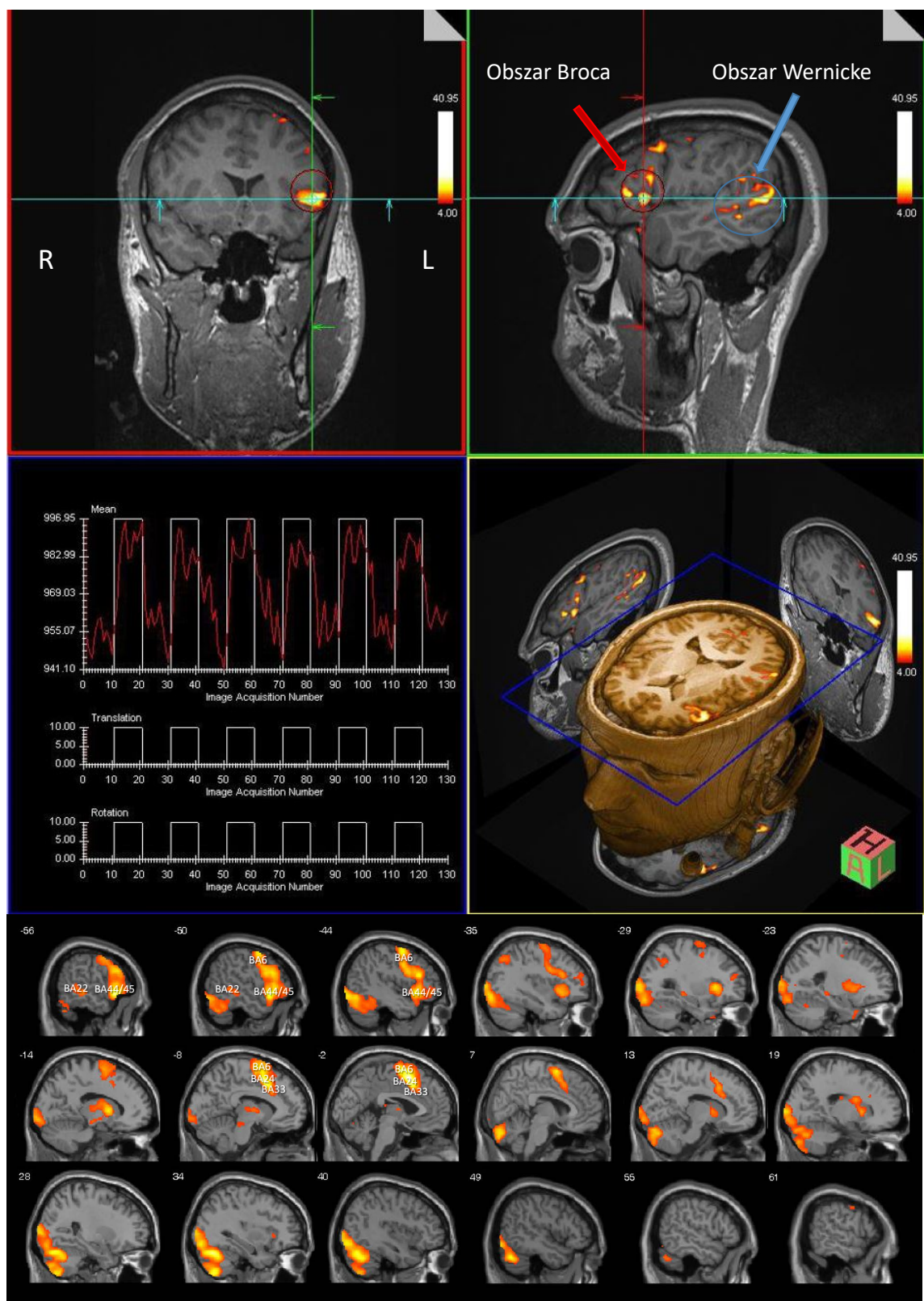
Ośrodek Broki odpowiada zatem za przygotowanie planu ruchu mięśni aparatu mowy, a ośrodek Wernickego odpowiada za rozpoznawanie dźwięków, które dochodzą z kory słuchowej, i identyfikację, czy wśród usłyszanych dźwięków są takie, które przypominają mowę. Ośrodek Wernickego zlokalizowany jest w polu 22 według Brodmanna. Oba ośrodki są połączone tzw. pęczkiem łukowatym, który pozwala na bezpośrednie przesyłanie informacji pomiędzy tymi ośrodkami. Ośrodek Wernickego jest unikalnym dla ludzi elementem odpowiedzialnym za zarządzanie procesami rozpoznawania komunikatu słownego, którego nośnikiem jest głos. Ośrodek czuciowy kieruje analizą poszczególnych części mowy docierających z ośrodków korowych słuchu, przez co nadaje mowie ostateczną formę. Powyżej lokalizacji ośrodka Broki znajdują się ośrodki, które uczestniczą w procesach związanych z semantyką, syntaktyką, gramatyką i leksyką. Podobne ośrodki znajdują się w środkowym i dolnym płacie skroniowym (rycina 1). Odpowiadające sobie obszary w płacie skroniowym i płacie czołowym są połączone ze sobą dwoma szlakami – tzw. drogą grzbietową, która odpowiada za przełożenie

materiału fonologicznego na reprezentację ruchową, oraz tzw. drogą brzuszną, gdzie dokonuje się translacja leksykalna, analiza semantyczna i syntaktyczna [10].

Odrębna droga w ośrodkowym układzie nerwowym koordynuje zabarwienie emocjonalne głosu. W skład traktu wchodzi: przednia część zakrętu obręczy, podwzgórze, istota szara okołowodociągowa, ciało migdałowe oraz twór siatkowaty. Wyniki ostatnich badań neuroobrazowych sugerują, że różne aspekty informacji głosowych są przetwarzane przez odrębne drogi korowe [5]. Autorzy uważają, że sposób percepcji głosu przypomina model percepcji mimiki ludzkiej twarzy. Badania funkcjonalnym rezonansem magnetycznym (fMRI) potwierdziły obecność w korze słuchowej obszarów wykazujących szczególną czułość na brzmienie głosu ludzkiego [11].

Ruchowa reprezentacja korowa mięśni krtani znajduje się w dolnej części zakrętu przedśrodkowego i tylnio-dolnej części płata czołowego. Impulsy nerwowe kierowane są następnie drogą korowo-jądrową do jądra dwuznacznego [1]. Jądro to, położone w rdzeniu przedłużonym, jest jądrem ruchowym IX i X nerwu czaszkowego. Następnie impuls przechodzi przez część eferentną nerwu błędnego do mięśni krtani. Odrębną drogą, wychodzącą z zakrętu przedśrodkowego płata czołowego, jest droga korowo-rdzeniowa. Dociera ona poprzez jądra ruchowe rogów przednich rdzenia kręgowego do mięśni oddechowych. Grupa nerwów przekazująca informację do poszczególnych grup mięśni w procesie tworzenia głosu składa się z sześciu nerwów czaszkowych oraz nerwów unerwiających mięśnie klatki piersiowej i mięśnie brzucha. Wspomniane nerwy czaszkowe obejmują: gałąź zuchwową nerwu trójdzielnego (V), nerw twarzowy (VII), językowo-gardłowy (IX), błędny (X), dodatkowy (XI) i podjęzykowy (XII).

Drogi eferentne do mięśni prążkowanych gardła i krtani, drogą nerwów czaszkowych IX, X i XI znajdują się w obrębie jądra dwuznacznego. Topografia motoneuronów krtani unerwiających poszczególne mięśnie wewnętrzne była szczegółowo badana w latach 90. XX wieku [12,13]. W obrębie jądra dwuznacznego najbardziej dogłębnie położona jest grupa motoneuronów przenoszących impulsy do mięśnia pierścienno-tarczowego. W 2/3 części ogonowej jądra dwuznacznego grzbietowobocznie układają się motoneurony przywodzicieli fałdów głosowych, które dystalnie stanowią nerw krtaniowy wsteczny. Kolejno obszary motoneuronów mięśnia tarczowo-nalewkowego, pierścienno-nalewkowego bocznego i między-nalewkowego występują w kierunku od głowy do ogona jądra dwuznacznego. Motoneurony mięśnia pierścienno-nalewkowego tylnego usytuowane są bardziej brzusznie, w 1/3 środkowej jądra dwuznacznego. Włókna nerwowe do różnych typów mięśni charakteryzują się ponadto odmiennym skupieniem w pęczkach. Nerwy przywodzicieli fałdów głosowych są rozproszone, natomiast mięśnia odwodzącego przebiegają w zwartej strukturze [7]. Cechy charakterystyczne włókien nerwów ruchowych są obserwowane nie tylko pod względem funkcji odwodzącej bądź przywodzącej mięśnia, lecz także w zakresie jego poszczególnych składowych. Przykładem są włókna mięśnia głosowego, które przebiegają bardziej przyśrodkowo w stosunku do pozostałych nerwów biegnących do mięśnia tarczowo-nalewkowego.



**Rycina 1.** Badanie fMRI aktywności związanej z generowaniem mowy. Na górnej rycinie widoczne są obszary Broki i Wernickego oraz wykres zmian sygnału zależnego od utlenowania krwi w mózgu, ukazujący wzrost utlenowania w czasie generowania słów zaczynających się na podaną literę oraz spadek utlenowania w czasie spoczynku. Poniżej widoczne są główne obszary Brodmanna związane z aktywnością mózgu podczas generowania słów

**Figure 1.** An fMRI study of speech generation. The upper figure shows Broca and Wernicke areas and BOLD signal change reflecting an increase of blood oxygenation during the generation of words starting with a given letter and a decrease of oxygenation at rest. The lower figure depicts Brodmann regions related to brain activation during word generation.

Gdy informacja o inicjacji głosu dotrze do krtani, po wdechu i przywiedzeniu fałdów głosowych do linii pośredniej rozpoczyna się faza przedfonacyjnego dostrajania fałdów głosowych [14]. W tej fazie uruchomiona zostaje dolna część zakrętu przedśrodkowego. Faza przedfonacyjna oznacza wzrost aktywności mięśni przywodzących i napiwiających fałdy głosowe, z równoczesnym spadkiem aktywności mięśni rozwierających fałdy głosowe, co można zarejestrować w badaniu elektromiograficznym krtani [13].

Organizacja funkcjonalna motoneuronów mięśni krtani nie została do końca wyjaśniona. Yajima i Larson wykazali, iż aktywacja różnych części jądra dwuznacznego zależy nie tylko od spodziewanej aktywności poszczególnych mięśni, lecz także od rodzaju funkcji pełnionej przez krtani [16]. W lewej półkuli mózgu znajduje się reprezentacja korowa szybkich i precyzyjnych ruchów fałdów głosowych podczas zadań fonacyjnych [17]. Odmienne odwzorowanie korowe charakteryzuje akt polykania, manewu Valsalwy, kaszlu czy oddychania.

Płytki ruchowe mięśni krtani charakteryzują się polineuroanym unerwieniem. Dzięki temu układ jest mniej podatny na uszkodzenia, co ma kluczowe znaczenie dla fałdów głosowych drgających do kilku tysięcy razy na sekundę. Ponadto równoczesowa aktywacja zwiększa napięcie i szybkość reakcji, co jest kluczowe dla ochrony dróg oddechowych. W mięśniach wewnętrznych krtani obserwuje się odrębności od klasycznego wzorca rekrutacji jednostek motorycznych [18]. Różna aktywność mięśni krtani związana jest między innymi z unikalną budową histochemiczną jednostek [19]. Każdy z mięśni krtani charakteryzuje się innym wzorcem ułożenia płytek nerwowo-mięśniowych.

### Teoria mioelastyczno-aerodynamiczna

Opisany obszar reprezentacji korowej, włókien nerwowych, jak również wyjątkowa struktura układu mięśni krtani odgrywają kluczową rolę w procesie tworzenia głosu. Współcześnie proces ten opisywany jest za pomocą teorii mioelastyczno-aerodynamicznej (rycyna 2). Twórca tej teorii – van den Berg uzależnił proces tworzenia głosu od trzech składowych [2].

Pierwszą z nich jest czynność układu oddechowego. Generowane w płucach podgłośnie ciśnienie wydechowe inicjuje proces tworzenia głosu. Kolejna składowa to krtani. Zawarte w niej fałdy głosowe rytmicznie modelują przestrzeń pomiędzy sobą a wewnętrzną powierzchnią chrząstek nalewkowatych (zwaną głośnią) [20]. Zachodzące tu zjawisko modelowania przepływającego strumienia powietrza przez oscylujące fałdy głosowe nosi nazwę fonacji. Podstawą do zrozumienia czynności wibracyjnej fałdów głosowych jest wspomniana we wprowadzeniu koncepcja Hirano, przedstawiająca fałd głosowy jako wielowarstwową strukturę wibracyjną (ang. *cover-body complex*). W tłumaczeniu *cover-body complex* oznacza podział fałdu głosowego na warstwę trzonu i pokrycia [3]. Zaawansowane metody wizualizacji drgań fonacyjnych fałdów głosowych i opracowane na ich podstawie modele matematyczne pozwalają zobrazować nieliniowe zjawiska zachodzące na poziomie głośni [21]. W ich wyniku ciśnienie podgłośnie, przechodząc przez krtani, zmienia się w energię akustyczną. W przeliczeniu na jednostki ciśnienia słupa wody,



**Rycyna 2.** Składowe teorii mioelastyczno-aerodynamicznej  
**Figure 2.** Components of the myoelastic-aerodynamic theory of voice production

ciśnienie panujące nad poziomem głośni wynosi zero, podczas gdy ciśnienie podgłośnie waha się od 3 do 30 cm słupa wody [22]. Wartość ciśnienia może być świadomie regulowana, co ma bezpośredni wpływ na wysokość oraz głośność tonu krtaniowego [23]. Ostatnim elementem modyfikującym dźwięk krtaniowy są przestrzenie rezonatorowe. Zjawiska aerodynamiczne w nich zachodzące są niezwykle złożone. Do tej pory nie udało się stworzyć idealnego modelu matematycznego procesów zachodzących w trakcie głosowym [24,25].

Według opisywanej teorii ciśnienie podgłośnie w sposób bierny otwiera i zamyka głośnię. Głównym elementem teorii jest prawo Bernoulliego dotyczące zasady zachowania energii. W myśl prawa Bernoulliego, przyjmując, że objętość przepływającego powietrza jest stała, prędkość przepływu musi rosnąć w miejscach przewężenia przekroju. Skutkuje to spadkiem ciśnienia w tym miejscu. W odniesieniu do krtani miejscem przewężenia jest głośnia. Oznacza to, że panujące w niej ujemne ciśnienie Bernoulliego wywiera na fałdy głosowe siłę ssącą. Po zamknięciu fałdów dochodzi do wzrostu ciśnienia podgłośnie, wypychającego w górę brzeg wolny fałdów głosowych, aż do ponownego otwarcia głośni. Ruchy brzegów wolnych fałdów głosowych powtarzają się cyklicznie [26].

Przepływający przez głośnię, modyfikowany strumień powietrza powoduje podrażnienie zakończeń nerwowych w krtani [27]. Liczne receptory w błonie śluzowej, torebkach stawowych oraz proprioceptorach mięśni wewnętrznych krtani drogą nerwu błędnego przekazują informację aferentną do jąder wzgórza. Stąd przesyłana jest ona do pierwszorzędowej kory słuchowej w zakręcie pozaśrodkowym i do tylnej części płacika okołosrodkowego. Znajdująca się w tym obszarze reprezentacja somatotopowa poszczególnych okolic ciała przedstawiana jest w postaci „człowieka czuciowego”. Na szczególną uwagę zasługuje obszar zajmowany przez narząd głosu, który ma nieproporcjonalną wielkość w stosunku do większości innych części ciała [22]. Ośrodki korowe głosu, znajdujące się w płatach czołowych, są ponadto powiązane z ośrodkami słuchu, oddychania oraz mowy (zarówno czuciowymi, jak i ruchowymi). Zjawisko to umożliwia porównanie dźwięku wytworzonego z zamierzonym i zwrotną informację do krtani. Zgodnie z powyższym opisem współcześnie uważa

się, że funkcja wibracyjna fałdów głosowych jest wywołana zarówno w sposób pasywny – poprzez przepływające przez głośnię powietrze z płuc, jak i aktywny – w wyniku stymulacji z ośrodkowego układu nerwowego [26].

## Wnioski

Studia literaturowe przedmiotu pokazują, że fizjologia procesu fonacji jest nadal niedostatecznie poznana a głos

jest zjawiskiem bardzo interesującym badaczy. Doświadczenia wielu ośrodków badawczych wskazują na kluczową rolę wykorzystania technik obrazowych w wyjaśnianiu mechanizmów tworzenia głosu i mapowaniu aktywności kory mózgowej. Udoskonalenie metod pomiarowych i technik informatycznych umożliwi tworzenie coraz dokładniejszych modeli matematycznych, co pozwoli na opisanie zjawisk aerodynamicznych zachodzących w trakcie głosowym.

## Piśmiennictwo:

1. Szkielkowska A, Kazanecka E. Emisja głosu. Wskazówki metodyczne. Warszawa: Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, 2011; 13–25.
2. van den Berg J. Myoelastic-aerodynamic theory of voice production. *J Speech Hear Res*, 1958; 3(1): 227–44.
3. Hirano M. Morphological structure of the vocal cord as a vibrator and its variations. *Folia Phoniatr (Basel)*, 1974; 26(2): 89–94.
4. Simonyan K, Ackermann H, Chang EF, Greenlee JD. New developments in understanding the complexity of human speech production. *J Neurosci*, 2016; 36(45): 11440–48.
5. Traser I, Ozen AC, Burk F, Burdumy M, Bock M, Richter B. Respiratory dynamics in phonation and breathing – a real time MRI study. *Respir Physiol Neurobiol*, 2017; 236: 69–77.
6. Kumar V, Croxson P, Simonyan K. Structural organization of the laryngeal motor cortical network and its implication for evolution of speech production. *J Neurosci*, 2016; 36(15): 4170–81.
7. Blitzer A, Brin M, Ramig L. Neurologic disorders of the larynx. Nowy Jork: Thieme, 2011; 21–30.
8. Pluta A, Wolak T, Skarzyński H. Badanie dominacji półkulowej dla funkcji mowy z zastosowaniem techniki rezonansu magnetycznego. *Now Audiofonol*, 2014; 3(3): 9–16.
9. Skarzyński H, Lorens A, Wolak T, Skarzyński PH, Olszewski L, Naumczyk P i wsp. Functional magnetic resonance imaging in Primary Auditory Cortex function assessment: Partial Deafness Treatment. *J Hear Sci*, 2011; 1(1): 29.
10. Hickok G, Poeppel D. The cortical organization of speech processing. *Nat Rev Neurosci*, 2007; 8(5): 393–402.
11. Schirmer A, Adolphs R. Emotion perception from face, voice, and touch: Comparisons and convergence. *Trends Cogn Sci*, 2017; 21(3): 216–28.
12. Sanders II, Wu BL, Mu L, Li Y, Biller HF. The innervation of the human larynx. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*, 1993; 119(9): 934–39.
13. Pernet C, McAleer P, Latinus M, Gorgolewski K, Charest I, Bestelmeyer P i wsp. The human voice areas: Spatial organization and inter-individual variability in temporal and extra-temporal cortices. *Neuroimage*, 2015; 119: 164–74.
14. Obrębowski A. Narząd głosu i jego znaczenie w komunikacji społecznej. Poznań: UM Poznań; 2008.
15. Fang T, Pei Y, Hsin, L, Lin W, Lee L, Li H i wsp. Quantitative laryngeal electromyography assessment of cricothyroid function in patients with unilateral vocal fold paralysis. *Laryngoscope*, 2015; 25(11): 2530–35.
16. Yajima Y, Larson C. Multifunctional properties of ambiguous neurons identified electrophysiologically during vocalization in the awake monkey. *J Neurophysiol*, 1993; 70(2): 529–40.
17. Schulz G, Varga M, Jeffires K, Ludlow C, Braun A. Functional neuroanatomy of human vocalization: An H215O PET study. *Cereb Cortex*, 2005; 15(12): 1835–47.
18. Szkielkowska A, Krasnodębska P, Miałkiewicz B. Zastosowanie elektromiografii w praktyce otolaryngologicznej i foniatrycznej. *Now Audiofonol*, 2015; 4(4): 53–57.
19. Sciote J, Morris T, Horton M, Brandon C, Rosen C. Unloaded shortening velocity and myosin heavy chain variations in human laryngeal muscle fibers. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 2002; 111(2): 120–27.
20. Krasnodębska P, Szkielkowska A. Direct and indirect mucosal wave imaging techniques. *Pol Merk Lek*, 2016; XL(238): 260–63.
21. Pinheiro A, Kerschen G. Vibrational dynamics of vocal folds using nonlinear normal modes. *Med Eng Phys*, 2013; 35(8): 1079–88.
22. Bitniok M. Rola mózgu w procesie językowego porozumiewania się – rehabilitacja logopedyczna w neurologii. *Logopeda*, 2007; 2(5): 4–15.
23. Šidlof P, Zörner S, Hüppe A. A hybrid approach to the computational aeroacoustics of human voice production. *Biomech Model Mechanobiol*, 2015; 14(3): 473–88.
24. Delebecque L, Pelorson X, Beautemps D. Modeling of aerodynamic interaction between vocal folds and vocal tract during production of a vowel–voiceless plosive–vowel sequence. *J Acoust Soc Am*, 2016; 139(1): 350–60.
25. Döllinger M, Kniesburges S, Kaltenbacher M, Echternach M. Current methods for modelling voice production. *HNO*, 2016; 64(2): 82–90.
26. Story BH, Titze IR. Voice simulation with a body cover model of the vocal folds. *J Acoust Soc Am*, 1995; 97(2): 1249–60.
27. Hammer M, Krueger M. Voice-related modulation of mechanosensory detection thresholds in the human larynx. *Exp Brain Res*, 2014; 232(1): 13–20.
28. Zalesska-Kręcicka M. Rola krtani w mechanizmie tworzenia głosu. Materiały VII sympozjum naukowego „Problemy pedagogiki wokalne”. Zeszyty naukowe AM we Wrocławiu nr 68, Wrocław.