

Przewodnictwo dźwięków na drodze kostnej

Sound transmission by bone conduction

Bożena Wiskirska-Woźnica, Piotr Świdziński

Katedra i Klinika Foniatrii i Audiologii Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu

Streszczenie

W warunkach fizjologicznych u człowieka podstawową drogą fali akustycznej do receptora jest droga powietrzna, natomiast przewodzenie dźwięku na drodze kostnej w warunkach normalnych okazuje się zjawiskiem w zasadzie niepożądanym i tłumionym. Przewodnictwo kostne będące komponentem słyszenia fizjologicznego określa się jako pośrednie i stanowi bodziec akustyczny słabszy od przewodnictwa powietrznego o 50–60 dB. Znajomość tego zjawiska pozwala na zastosowanie w niektórych przypadkach aparatów słuchowych na przewodnictwo kostne. Ze zjawiskiem przewodzenia dźwięków na drodze kostnej wiąże się zjawisko odczuwania wibracji na drodze czucia głębokiego. Najbardziej wrażliwe na wibracje są okolice twarzy i dłonie. Obok wrażeń kinestetycznych wibracje mają znaczenie poznawcze i kompensacyjne u osób głuchych, zwłaszcza przy „odbiorze” rytmu i muzyki. W ostatnich latach wraz ze wzrostem zainteresowania możliwością odbioru dźwięku na drodze kostnej u osób z normalnym słuchem pojawiły się urządzenia wykorzystujące przewodnictwo kostne dla osób przebywających w specyficznych warunkach, np. w hałasie lub w wodzie, gdzie słyszenie na drodze powietrznej jest utrudnione.

Słowa kluczowe: przewodnictwo kostne, aparaty słuchowe, wibratometria.

Abstract

The human ear normally works by trapping sound waves travelling through the air, amplifying them and turning them into signals the brain can understand. But bone conduction sends the waves through the skull bones or jaw instead, bypassing the natural air conduction system. In normal hearing patients, bone conduction is an unnecessary phenomenon and as a component of physiological hearing compared to air conduction is weaker by about 50-60 dB. Bone conduction transmission can be used in individuals with normal or impaired hearing. Bone conduction technology has long been used in hearing aids for the hearing impaired, but also in specialized communication products (e.g. in high-noise environments, or underwater) in normal hearing. Another phenomenon – sound vibrations – can be felt in the body (face and hands) as well as being detected in the ear. Vibratometry is a one of audiological method used for registration of sound vibrations feeling by bone conduction.

Key words: bone conduction, hearing aids, vibratometry.

(Postępy w chirurgii głowy i szyi 2009; 1: 11–16)



Od XIX w. wiadomo, że drgania czaszki są odbierane jako wrażenia słuchowe, chociaż badania nad przewodzeniem dźwięku na drodze kostnej prowadzili dopiero w latach 30. XX w. Bekesy i Barany. Kontynuowano je głównie w latach 50. i 60. ubiegłego wieku (Bekesy, Wever, Lawrence, Kirikae, Tonndorf), również w Polsce (Miodoński, Pędziwiatr). Przewodzenie dźwięków drogą kostną nadal nie jest do końca dobrze poznane. Wzrost zainteresowania przewodnictwem kostnym obserwuje się od czasu pierwszego zastosowania aparatów zakotwiczonych na przewodnictwo kostne typu BAHA, tj. od końca lat 70. XX w.

W warunkach fizjologicznych u człowieka podstawową drogą fali akustycznej do receptora jest droga powietrzna, natomiast przewodzenie dźwięku na drodze kostnej w warunkach normalnych jest zjawiskiem w zasadzie niepożądanym i tłumionym. Jednocześnie należy zaznaczyć, że sposób pobudzenia receptora słuchowego nie zależy od sposobu przekazywania energii dźwiękowej (na drodze powietrznej czy kostnej).

Przewodnictwo kostne będące komponentem słyszenia fizjologicznego określa się jako pośrednie i stanowi bodziec akustyczny słabszy od przewodnictwa powietrznego o 50–60 dB, natomiast przewodnictwo kostne bezpośrednie, tzw. badawczo-diagnostyczne, a więc przewodzone poprzez bezpośredni kontakt kości czaszki ze źródłem dźwięku, jest słabsze o 30–40 dB. Istotne dla natężenia bodźca jest również miejsce kontaktu na powierzchni czaszki ze źródłem dźwięku i tak na wyrostku sutkowatym w porównaniu z okolicą czołową daje obniżenie progu 5–10 dB.

Teorie, które tłumaczą sposób przekazywania energii na drodze kostnej, opierają się na badaniach wspomnianych już autorów Bekesy'ego, Barany'ego, Kirikae i Tonndorfa.

Mówi się o:

- mechanizmie przenośnikowym (bezwładnościowym), który tłumaczy przenoszenie drgań kości czaszki i łańcucha kosteczek na drgania strzemiączka w okienku przedsionka i dalej do przestrzeni płynowej ucha wewnętrznego jak na drodze powietrznej (Bekesy) (ryc. 1A.),

• mechanizmie kompresyjnym, gdzie na skutek drgań kości czaszki dochodzi do kompresji i dekompresji błędniczka kostnego, a więc sprężania i rozprężania płynów w błędniku, i tą drogą do pobudzenia błony podstawnej i receptora (Barany, Kirikae, Tonndorf) (ryc. 1B.),

- mechanizmie przemieszczenia żuchwy (Tonndorf) – uważa się, że główka wyrostka stawowego żuchwy powoduje powstanie drgań w części chrzęstnej przewodu słuchowego, które – trafiając na błonę bębenkową – dalej przewodzone są tak jak na drodze powietrznej.

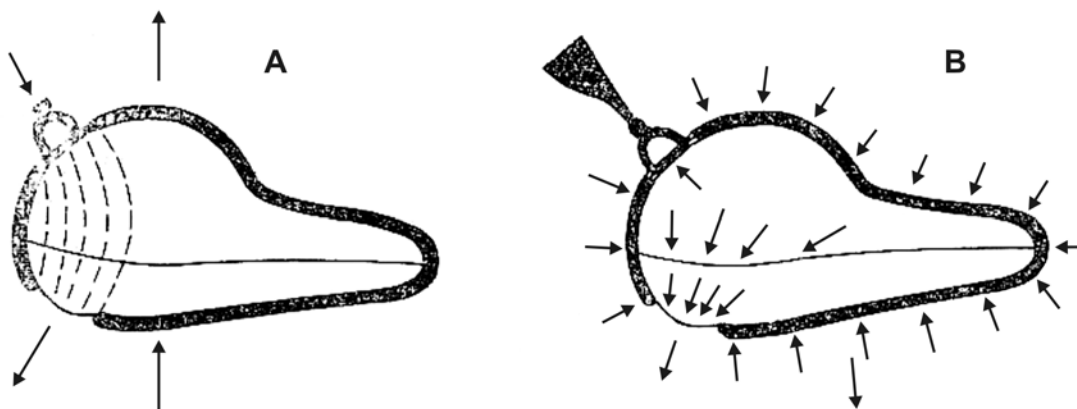
Bekesy, Barany i Kirikae określili również sposób, w jaki przenoszą się drgania w kościach czaszki pod wpływem dźwięku.

Dźwięki o częstotliwości do 800 Hz powodują drgania czaszki jako całości, te powyżej 800 Hz – drgania odcinkami, do 1600 Hz – drgania każdej połowy czaszki, powyżej 1600 Hz drgania czaszki obserwuje się w 4–6 segmentach, tzw. węzłach (ryc. 2.).

Sposób przekazywania energii na drodze kostnej nadal stanowi przedmiot badań naukowców (Sohmer, Freeman). Najnowsze badania dotyczą lat 2000–2004. Freeman uważa, że drgania czaszki po pobudzeniu drogą kostną wywołują częstotliwościowo zależne zmiany ciśnienia w jamie czaszki, które dalej są przenoszone do przestrzeni płynowych ucha wewnętrznego (ryc. 3.).

Sposób przekazywania energii na drodze kostnej próbuje się wytłumaczyć również poprzez eksperymenty doświadczalne na szczurach (Freeman, Sohmer) lub żabach (Seaman).

Próbowano udowodnić (ryc. 4.), że po pobudzeniu kostnym drgania do receptora nie są przekazywane tylko na drodze kostnej. Stymulowano szczura dźwiękiem na drodze kostnej, następnie poprzez kraniotomię przenoszono drgania bezpośrednio na tkankę mózgową drugiego szczura drogą fali ciśnieniowej (turka wypełniona płynem). Pobudzenie receptora słuchowego drugiego



Ryc. 1. Przewodnictwo kostno-ślimakowe wg Bekesy'ego: A – przez przemieszczenie, B – przez kompresję (za Bystrzanowską)



szczura rejestrowano elektrofizjologicznie, zapisy odpowiedzi elektrycznych u obu szczurów były podobne.

Mówiąc o przewodzeniu dźwięku na drodze kostnej, nie można pominąć efektu okluzji, tj. obniżenia progu słyszenia dla przewodnictwa kostnego po zatkanie przewodu słuchowego zewnętrznego. Okluzję można wywołać w prosty sposób, np. przez zatkanie ucha palcem. Wcześniej zjawisko to tłumaczono mniejszym wpływem hałasu z otoczenia na zagłuszanie, dziś uważa się, że jest to wynik przeniesienia drgań czaszki na zamknięty przewód słuchowy zewnętrzny i powstania fali powietrznej, która – docierając do błony bębenkowej – powoduje wzmocnienie przewodzenia na drodze kostnej.

Badanie przewodnictwa kostnego stanowi podstawowe badanie psychofizyczne pozwalające określić charakter niedosłuchu – przewodzeniowy czy odbiorczy.

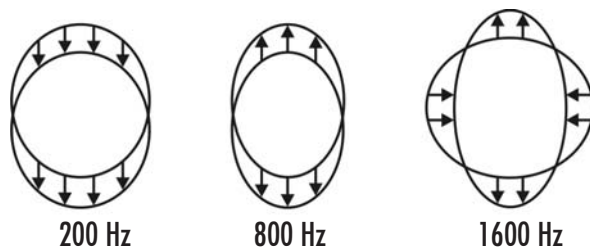
W próbach stroikowych w próbie Webera głośniejsze słyszenie stroika w uchu z niedosłuchem przewodzeniowym tłumaczy się eliminacją przewodzenia powietrzno-ślimakowego i przyspieszenia fazy oraz lokalizacji przewodzenia dźwięku na drodze kostnej, zahamowaniem odpływu części energii akustycznej drogą powietrzną oraz mniejszym wpływem hałasu zewnętrznego w niedosłuchu przewodzeniowym.

Pomiar przewodnictwa kostnego w badaniu audiometrycznym wymaga zastosowania słuchawki kostnej umieszczonej na wyrostku sutkowatym. Badanie wykonuje się do 4000 Hz, wyższych częstotliwości nie bada się ze względu na silne tłumienie przez kości czaszki. Badanie przewodnictwa kostnego przy otwartym lub zamkniętym przewodzie słuchowym zewnętrznym w związku z efektem okluzji powoduje różnice w odbiorze dźwięku. Próg słuchu drogą kostną przy zamkniętym przewodzie słuchowym jest lepszy – przewodnictwo kostne względne i bezwzględne.

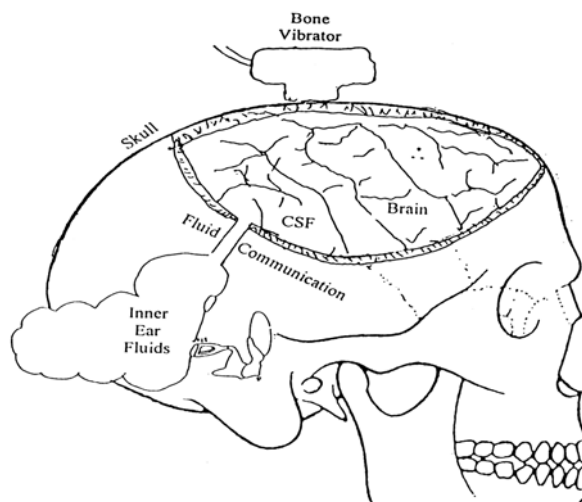
Współczesne normy opisujące kalibrację audiometrów (ISO norma numer 389-3 i 8253-1 oraz Polska Norma PN-EN 27566) nie uwzględniają efektu okluzji. Oznacza to, że obecnie używane audiometry są przystosowane do badania przewodnictwa kostnego wyłącznie przy otwartym przewodzie słuchowym zewnętrznym. Badanie progu słyszenia drogą kostną przy założonej słuchawce powietrznej prowadzi do uzyskania zbyt dobrych wyników progu słyszenia przewodnictwa kostnego.

Proteżowanie klasyczne na drodze kostnej

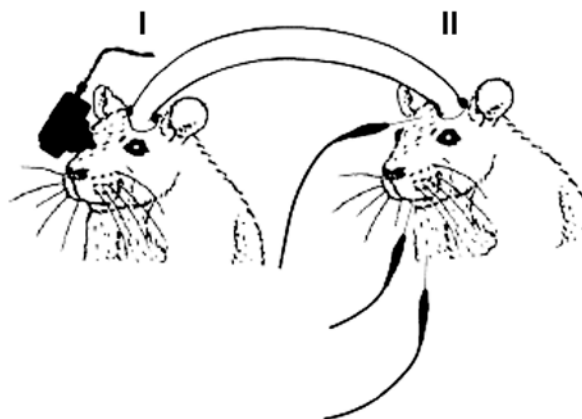
Zastosowanie aparatów słuchowych na przewodnictwo kostne jest ograniczone do niedosłuchów przewodzeniowych i mieszanych jedno- lub obustronnych stopnia małego lub średniego. W praktyce są one stosowane głównie wtedy, gdy w tego typu niedosłuchach nie ma możliwości zastosowania aparatów na przewodnictwo powietrzne. Są to m.in. takie przypadki, jak:



Ryc. 2. Przenoszenie się drgań czaszki w zależności od częstotliwości dźwięku (za Pruszewiczem)



Ryc. 3. Przewodzenie dźwięku na drodze kostnej do receptora wg Freemana

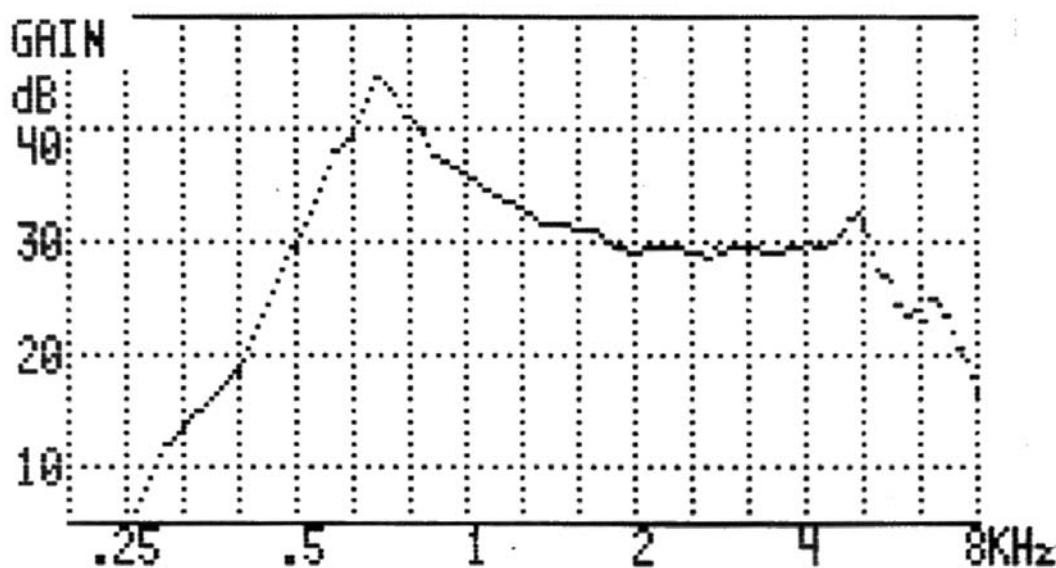


Ryc. 4. Eksperyment Freemana i Sohmera na szczurach: dowód na przeniesienie dźwięku do receptora po pobudzeniu kostnym nie tylko na drodze kostnej

przewlekłe zapalenia ucha, wady anatomiczne ucha zewnętrznego (zarośnięcie przewodu słuchowego zewnętrznego), zmiany odczynowe i zapalne skóry w przewodzie słuchowym.

Obecnie stosowane aparaty słuchowe na przewodnictwo kostne to aparaty okularowe oraz aparaty w po-





Ryc. 5. Przykład charakterystyki wzmocnienia aparatu słuchowego okularowego na przewodnictwo kostne (Amico-Coselgi)

staci opaski nagłownej. Budowa ich oraz działanie niczym się nie różnią od klasycznych aparatów na przewodnictwo powietrzne z tym, że rolę słuchawki odgrywa wibrator kostny.

Typową charakterystykę wzmocnienia takich aparatów pokazano na ryc. 5.

W badaniach akustycznych i elektrofizjologicznych wykazano, że przy ubytkach słuchu dla przewodnictwa kostnego powyżej 30 dB w paśmie częstotliwości pomiędzy 250 i 4000 Hz możliwość skutecznego działania aparatów słuchowych na przewodnictwo kostne wyraźnie się pogarsza. Przy silniejszym obniżeniu sprawności ucha wewnętrznego (komponent odbiorczy w niedosłuchach mieszanych) niezbędne jest wzmocnienie, uwzględniające wysoki poziom wyjściowy dźwięku. Powstające przy tym – głównie w wibratorze – akustyczne zniekształcenia prowadzą przy dalszym podwyższeniu wzmocnienia do zniekształcenia sygnałów, a przenoszona mowa staje się niezrozumiała.

Ważny problem związany z przenoszeniem dźwięku za pośrednictwem kości dotyczy także kontaktu urządzenia wibrującego do skóry na wyrostku sutkowatym. Szczególne problemy stwarza nieregularna rzeźba skóry i kości w tym obszarze. Miejscowe zmiany występują szczególnie często po operacjach ucha, takich jak mastoidektomia czy operacja radykalna. Pacjenci posługujący się aparatem słuchowym na przewodnictwo kostne wiedzą, że aparat słuchowy przyciskany palcami do głowy przenosi fale dźwiękowe lepiej, a także, że optymalna pozycja oraz równomierne, mocne przyleganie urządzenia wibrującego jest trudno osiągalne. Z kolei jednak zbyt intensywny nacisk prowadzi do zmian bądź podrażnień skóry, włącznie z nekrozą. Niekorzystne są także konsekwencje no-

szczenia tych aparatów ze względów estetycznych i kosmetycznych. Częstokroć pacjenci o normalnym wzroku, którzy zwykle obywają się bez okularów, w przypadku przepisania aparatu słuchowego okularowego, zmuszeni są do posługiwania się okularami niekorekcyjnymi.

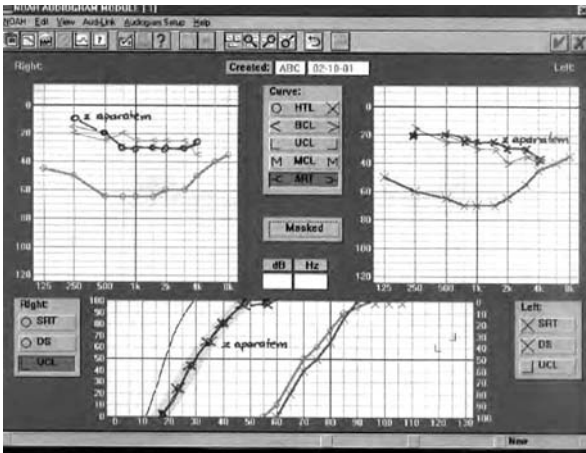
W praktyce aparaty nagłowne w postaci opaski i okularowe muszą być indywidualnie dopasowywane przez audioprotetyków. Przykład dopasowania aparatu okularowego na przewodnictwo kostne (z naniesionym zyskiem w wolnym polu słuchowym) przedstawiono na ryc. 6.

Przewodnictwo kostne a odczuwanie wibracji

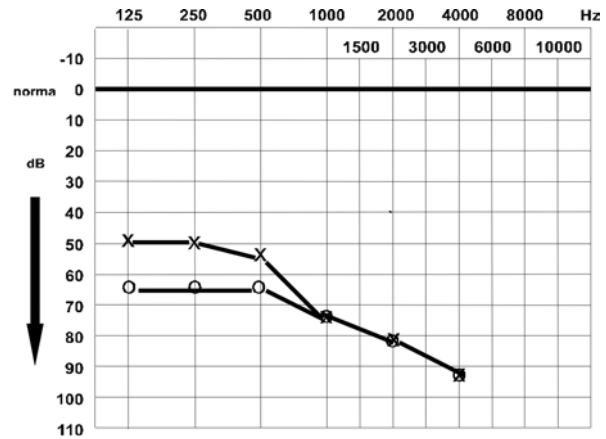
Ze zjawiskiem przewodzenia dźwięków na drodze kostnej wiąże się zjawisko odczuwania na drodze czucia głębokiego wibracji. Najbardziej wrażliwe na wibracje są okolice twarzy i dłonie. Obok wrażeń kinestetycznych wibracje mają znaczenie poznawcze i kompensacyjne u osób głuchych, zwłaszcza przy odbiorze rytmu i muzyki. Odczuwanie wibracji wykorzystuje się w rehabilitacji głuchoty (m.in. logorytmika).

Pomiar odczucia wibracji połączony z odbieraniem drgań fali dźwiękowej na drodze kostnej określa się mianem wibratometrii. Wibratometria stanowi jedną z metod badania audiologicznego wprowadzonego na stałe do badań diagnostycznych przez zespół pracowników Kliniki Foniatrii i Audiologii Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu w latach 80. XX w. Polega na podawaniu przez wibrator kostny bodźców dźwiękowych, którymi są pasma szumów filtrowanych w zakresie częstotliwości używanych do badań audiometrycznych.





Ryc. 6. Przykład dopasowania aparatu słuchowego okularowego na przewodnictwo kostne u 45-letniej kobiety z przewlekłym obustronnym zapaleniem ucha środkowego i perforacją obu błon bębenkowych przy użyciu audiometrii tonalnej i słownej oraz naniesionym zyskiem w badaniu z wolnego pola akustycznego



Ryc. 7. Wibratogram 11-letniej dziewczynki z głuchotą postlingwalną (w badaniu audiometrycznym – obustronne resztki słuchowe 90–110 dB w zakresie 125–500 Hz)



Ryc. 8. Słuchawka kostna E-mimi kun i zwykła



Za pomocą przetwornika wibracji (używanego w audiometrii) są podawane sygnały wąskopasmowego szumu (szumu różowego) z zakresu pasma 125–8000 Hz.

Badania odbioru dźwięków na drodze kostnej i wibracji u osób głuchych mają na celu określenie skali przenoszonych częstotliwości oraz poziomów natężeń potrzebnych do wywołania odczucia dźwięku i wibracji.

Tę metodę badawczą wprowadzono jako jedną z metod dodatkowych w kryteriach kwalifikacyjnych osób głuchych do wszczepów ślimakowych. Wykonane wibratogramy osób głuchych bądź tych z resztkami słuchu w paśmie 125–1000 Hz wskazują na pewną korelację między dobrym wynikiem wibratometrii a skutecznością rehabilitacji po założeniu implantu ślimakowego. Wibratogram 11-letniej dziewczynki z głuchotą postlingwalną przedstawiono na ryc. 7.

W ostatnich latach wraz ze wzrostem zainteresowania możliwością odbioru dźwięku na drodze kostnej przez osoby z normalnym słuchem pojawiły się urządzenia wykorzystujące przewodnictwo kostne dla przebywających w specyficznych warunkach, np. w hałasie lub wodzie, gdzie słyszenie na drodze powietrznej jest utrudnione. Pracujący w hałasie lub przebywający w pomieszczeniach, w których panuje hałas, mogą stosować słuchawkę kostną (ryc. 8.).

Dla przebywających długo pod wodą powstały urządzenia wykorzystujące przewodnictwo kostne – *aquaFM*, tj. radio do słuchania pod wodą, lub *swimMP3* – odtwarzacz do słuchania muzyki pod wodą (ryc. 9.).

Nowoczesnym urządzeniem są również aparaty telefoniczne wyposażone w wibrator przewodnictwa kostnego, który znajduje się w górnej części słuchawki





Ryc. 9. AquaFM i swimMP3

telefonu, w miejscu, gdzie standardowo znajduje się głośnik.

Na koniec ciekawostka przyrodnicza – zwierzętami najlepiej wykorzystującymi przewodnictwo dźwięków na drodze kostnej są węże. Dźwięki powodujące drgania podłoża, po którym się poruszają, przenoszone są na przylegającą do podłoża dolną szczękę i stamtąd na drodze kostnej prosto do ucha wewnętrznego. Ponieważ fala akustyczna szybciej przenosi się przez drgania substancji stałych (podłoże) niż w powietrzu, dlatego też tak szybkie są reakcje obronne i atak węża.

Piśmiennictwo

1. Bystrzanowska T. Audiologia kliniczna. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 1978.
2. Freeman S, Sichel JY, Sohmer H. Bone conduction experiments in animals – evidence for a non-osseous mechanism. *Hear Res* 2000; 146: 72-80.
3. Holgers KM, Håkansson BE. Sound stimulation via bone conduction for tinnitus relief: a pilot study. *Int J Audiol* 2002; 41: 293-300.
4. McBride M, Letowski T, Tran P. Bone conduction reception: head sensitivity mapping. *Ergonomics* 2008; 51: 702-18.
5. Audiologia kliniczna – zarys. Pruszevicz A (red.). Wydawnictwo Akademii Medycznej im. K. Marcinkowskiego w Poznaniu, Poznań 2003.
6. Sohmer H, Freeman S, Geal-Dor M, et al. Bone conduction experiments in humans – a fluid pathway from bone to ear. *Hear Res* 2000; 146: 81-8.
7. Stenfelt S, Goode RL. Bone-conducted sound: physiological and clinical aspects. *Otol Neurotol* 2005; 26: 1245-61.

