

## Maciej Konarski

Maciej Konarski  
Wojskowy Instytut Medyczny, Zakład Medycyny Morskiej  
81-103 Gdynia 3, ul. kmdr J. Grudzińskiego 4  
tel./fax: (0-58) 6262405  
e-mail: mkonarski@op.pl

### WPLYW PODWODNEJ FALI AKUSTYCZNEJ NA BEZPIECZEŃSTWO I ZDROWIE

#### NURKA – UWAGI OGÓLNE

*Wiadomo powszechnie, iż nadmierna ekspozycja na oddziaływanie energii akustycznej wiązać się może z szeregiem niekorzystnych następstw dla organizmu człowieka. Nie inaczej jest w przypadku oddziaływania podwodnej fali akustycznej na nurka, przebywającego w zanurzeniu. Najczęstszym źródłem fal o parametrach, mogących zagrozić zdrowiu lub życiu nurka, są wybuchy podwodne i sonary.*

*W artykule, w oparciu o przegląd wybranego piśmiennictwa, scharakteryzowano potencjalne zagrożenia dla zdrowia i życia nurka, wynikające z oddziaływania podwodnej fali akustycznej, generowanej przez urządzenia sonarowe oraz wskazano na możliwości biernej i czynnej profilaktyki w tym zakresie.*

**Słowa kluczowe:** podwodna fala akustyczna, sonar, nurek, nurkowanie, bezpieczeństwo nurkowania

### THE INFLUENCE OF THE UNDERWATER SOUND-WAVE ON THE SAFETY

#### AND THE HEALTH OF THE DIVER – GENERAL REMARKS

*It is known universally, that the excessive exposition on the influence of the acoustic energy join one can with the row of unprofitable results for the organism of the man. Not otherwise it is in the case of the influence of the underwater sound-wave on the diver, spending in the dip. The most frequent source of waves about parameters, liable to threaten to the health or life of the diver, are underwater explosions and sonars.*

*In the article, basing on the review of the chosen literature, author characterized potential hazards for health and life of the diver, consequential from the influence of the underwater sound-wave, generated by sonar devices and evidenced possibilities of the passive and active prophylaxis in this range.*

**Key words:** underwater sound-wave, sonar, diver, diving, diving safety

## WSTĘP

Jednym z przejawów oddziaływania energii mechanicznej na organizm nurka jest działanie podwodnej fali akustycznej. Dźwięk to nic innego, jak okresowy ruch lub zmiana ciśnienia, przechodząca przez dany ośrodek (gaz, płyn lub ciało stałe). W powietrzu dźwięk przenoszony jest z szybkością ok. 335 m/s, podczas gdy w wodzie (słonej) szybkość ta jest ponad czterokrotnie większa (ok. 1550 m/s). Zakres fal, rejestrowanych przez ucho zdrowego człowieka jako dźwięki ogranicza się do przedziału częstotliwości pomiędzy 16 Hz i 20 kHz. Niestyszalną dolną część pasma częstotliwości (do 16 Hz) określa się mianem infradźwięków, natomiast górną (powyżej 20 kHz) mianem ultradźwięków. Chociaż zarówno w powietrzu, jak i w wodzie propagacja dźwięku jest dobra, to na granicy ośrodków powietrze/woda większość energii fali dźwiękowej ulega zanikowi.

Dźwięk przez wodę przenosi się jako seria fal ciśnienia. Ponieważ gęstość środowiska wodnego jest większa, niż gazowego, zmiana stanu równowagi wymaga w tym przypadku zadziałania większej energii. Równocześnie, dźwięk przemieszcza się dalej i szybciej w środowisku o większej gęstości (w wodzie).

Postrzeganie dźwięku w wodzie różni się od postrzegania w powietrzu; o słyszeniu pod wodą można mówić w przypadku, kiedy czaszka wystawiona jest na bezpośredni kontakt z wodą, bez zabezpieczenia, bądź w przypadku, gdy okryta jest kapturem skafandra nurkowego typu mokrego – głowę pod kapturem otacza wtedy „film” wodny. Nie dotyczy to więc przypadków, kiedy nurek używa skafandra z hełmem nurkowym, którego przestrzeń jest wypełniona gazem. Słyszenie pod wodą odbywa się poprzez tzw. przewodnictwo kostne: docierający do dowolnego miejsca na czaszce impuls dźwiękowy jest przenoszony bezpośrednio do ucha wewnętrznego przez kostne elementy strukturalne czaszki, z pominięciem „normalnej” drogi odbioru, tj. ucha zewnętrznego i środkowego, jak to się dzieje w przewodnictwie powietrznym.

## 1. CHARAKTERYSTYKA ZAGROŻEŃ I SPOSOBY PROTEKCJI

Dźwięk związany jest nierozdzielnie z funkcjonowaniem człowieka w środowisku naturalnym; równocześnie, stała i/lub nadmierna ekspozycja na oddziaływanie energii akustycznej wiązać się może z szeregiem niekorzystnych następstw dla organizmu. Wymienić tu należy tymczasowy lub trwały ubytek ostrości słyszenia, zaburzenia snu, rozdrażnienie, niepokój, niekorzystny wpływ na sprawność psychomotoryczną organizmu, stres, zaburzenia funkcji przedsionka, zaburzenia sercowo-naczyniowe

i –prawdopodobnie – wiele innych [6, 7, 8]. Zwykle te niekorzystne następstwa utożsamiane są z zakresami częstotliwości, rejestrowanymi przez ucho, jednakże zarówno ekspozycja na pasmo infra-, jak i ultradźwiękowe wiąże się z ryzykiem wystąpienia niekorzystnych następstw zdrowotnych [13, 23]. Stwierdzono, że ekspozycja na infradźwięki generuje oczopląs u zwierząt doświadczalnych (świnki morskie), co dowodzi podrażnienia przedsionka [14], zaś ultradźwięki są najczęściej przyczyną nieprzyjemnych doznań termicznych.

Chociaż niekorzystne następstwa oddziaływania fali akustycznej zależą bezpośrednio od natężenia dźwięku w funkcji czasu ekspozycji, to w praktyce, dla celów porównawczych mierzy się ciśnienie akustyczne, wyrażone w decybelach (dB). Decybel nie jest wartością absolutną, lecz zależną od wartości odniesienia i te referencyjne wartości różnią się w zależności od środowiska, w którym dokonuje się pomiaru. W powietrzu (środowisku gazowym) wartością referencyjną jest 20  $\mu$ Pa, podczas gdy w płynach (środowisku wodnym) jest to 1  $\mu$ Pa (zamiennie: 1 Pa lub 1  $\mu$ bar).

Penetrująca z otoczenia fala akustyczna musi pokonać kilka przeszkód, nim dotrze do struktur odbiorczych w uchu wewnętrznym nurka. Zależy to od stosowanego rodzaju wyposażenia nurkowego, a ściślej od rodzaju osłony głowy nurka [4, 6, 15, 17]. Najtrudniejsze do stłumienia są fale dźwiękowe niskiej częstotliwości [9, 10]. Nurkowy skafander neoprenowy typu mokrego stanowi efektywną barierę dla dźwięków o częstotliwości powyżej 1000 Hz, a skuteczność tej protekcji wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału. Równocześnie, właściwości tłumiące neoprenu zmniejszają się wraz ze wzrostem głębokości (wzrostem ciśnienia otoczenia). Doświadczalnie stwierdzono, że zastosowanie kaptura z gumy neoprenowej o grubości 5 mm podczas ekspozycji na głębokości 3,5 msw podwyższa próg słyszalności pod wodą o 27-59 dB w przedziale częstotliwości 0,5-8 kHz [9, 16]. Bezpośrednio pod powierzchnią nie obserwowano żadnego efektu protekcyjnego dla dźwięków o częstotliwości poniżej 50 Hz, natomiast dla częstotliwości 8 kHz próg słyszalności uległ podwyższeniu o > 65 dB [11]. Nie bez znaczenia jest też różnica w impedancji akustycznej pomiędzy środowiskiem wodnym i gazowym; z pomiarów wynika, że na granicy ośrodków woda/powietrze, jak to ma miejsce w przypadku wykorzystania sprzętu izolującego głowę nurka od dostępu wody (sztywne hełmy nurkowe i/lub kaptury suchych skafandrów nurkowych), stłumieniu ulega znaczna część energii fali dźwiękowej, powodując redukcję odbieranego poziomu ciśnienia akustycznego o ok. 35 dB. W przypadku niektórych standardowych hełmów sztywnych i skafandrów zmierzony wynik łączny dawał wartość redukcji bliską 80 dB dla wybranych częstotliwości [11]. Równocześnie, zmiana składu atmosfery gazowej wewnątrz hełmu nurkowego, jak to ma miejsce np. podczas oddychania przez nurka helioksem (mieszaniną helowo-tlenową) w istotny sposób wpływa modyfikująco na opisane wyżej efekty, co związane jest z lepszą przewodnością dźwięku w atmosferze helowej [5, 21]. Warto w tym miejscu wspomnieć, że pewne działanie ochronne wykazują też powszechnie stosowane aparaty nurkowe o obiegu otwartym: przepływ czynnika oddechowego zaburza percepcję dźwięków pod wodą w mechanizmie generowania hałasu o wysokim natężeniu w obrębie głowy nurka oraz poprzez wytwarzanie swoistego ekranu z pęcherzyków powietrza, uchodzących z automatu oddechowego, co zmniejsza efektywny poziom ciśnienia akustycznego, oddziałującego na nurka [22].

Fala o wysokiej wartości ciśnienia, transmitowana ze środowiska wodnego otaczającego nurka do przestrzeni gazowych wewnątrz organizmu (uszy, zatoki, płuca), może spowodować podwyższenie ciśnienia wewnątrz tych przestrzeni, do wywołania urazu włącznie. Najczęstszym źródłem fal o parametrach, mogących zagrozić zdrowiu nurka, są wybuchy podwodne i sonary.

## **2. SONARY**

Sonary o niskiej intensywności wiązki, jak np. urządzenia służące do oceny głębokości pod stępką, czy echosondy do poszukiwania ryb w toni wodnej, zwykle nie generują ciśnienia akustycznego wystarczającego, aby stanowiło zagrożenie dla nurka. Dane z piśmiennictwa wskazują, że zachowanie odległości 30 m od transpondera dowolnego typu sonaru cywilnego zastosowania uważane jest za bezpieczne. Dla nurka wyposażonego w kaptur neoprenowy albo hełm nurkowy, za bezpieczny uważany jest dystans 10 m [20].

Zagrożenie takie stanowią jednak mogą urządzenia, przeznaczone do celów militarnych, np. wykrywania okrętów podwodnych w zanurzeniu, wytwarzające pulsacyjną wiązkę o wysokiej intensywności fali ciśnienia. Z tego powodu zalecanym postępowaniem jest zawiesić wszelkie operacje nurkowe w rejonie działania transpondera sonaru o wysokiej mocy na czas jego pracy. Sonary wojskowe generują energię o poziomie wystarczająco wysokim, by mogło to być szkodliwe dla nurków [13], stąd np. British Sub-Aqua Club zaleca zrzeszonym członkom utrzymywanie podczas

nurkowania dystansu min. 457 m (500 jardów) od okrętów wojennych z sonarem dużej mocy na pokładzie [2].

Jednakże to poziom ciśnienia akustycznego SPL (ang. Sound Pressure Level), a nie odległość od źródła, jest czynnikiem determinującym dopuszczalny limit czasu ekspozycji PEL (ang. Permissible Exposure Limit). Dopuszczalne limity czasu ekspozycji (PEL) przy danym poziomie ciśnienia akustycznego (SPL) w funkcji odległości od źródła sygnału, dla nurków narażonych na oddziaływanie wiązki sonarowej urządzeń do zastosowań wojskowych można znaleźć w załączniku 1A US Navy Diving Manual (tabele 1A-3 do 1A-6) [22]. Ujęte w tabelach SPL uzyskano na drodze matematycznej, przyjmując do obliczeń wielokierunkową propagację impulsu sonarowego oraz prawa wykorzystywane w hydroakustyce. Estymacji SPL w miejscu nurkowania można dokonać za pomocą dowolnych zmiennych, uzyskanych na drodze wiarygodnego pomiaru, z kolei SPL używa się do wyznaczenia PEL. Przeszacowanie poziomu narażenia podczas ekspozycji nie stanowi błędu metodycznego. Jakikolwiek skargi ze strony nurka na nadmierny hałas, ból uszu, bądź też inne nieprzyjemne doznania podczas ekspozycji wymagają podjęcia zdecydowanych działań zaradczych.

Próg wrażliwości sensorycznej jest wykorzystywany jako wartość wyjściowa do obliczeń minimalnej odległości od transpondera sonaru, kiedy z powodu uwarunkowań operacyjnych konieczne jest przeprowadzenie nurkowania podczas pracy sonaru. Próg ten dla nurków wyposażonych w standardowy skafander neoprenowy z kapturem wynosi ok. 175 dB (re 20  $\mu$ Pa), zaś dla nurków bez skafandra lub w skafandrze bez kaptura ok. 165 dB (re 20  $\mu$ Pa), jednakże badania doświadczalne wskazują, że do niebezpiecznych dla nurka efektów niepożądanych, a szczególnie zaburzenia (utruty) orientacji przestrzennej, dochodzi zazwyczaj podczas ekspozycji znacznie przekraczających wymienione wartości progowe [1, 2, 3, 9, 12, 14].

Kiedy poziom ciśnienia akustycznego wzrośnie powyżej 215 dB (re 1  $\mu$ Pa), u nurka wyposażonego w skafander z kapturem może wystąpić nieznaczne zaburzenie pola widzenia, prawdopodobnie zależne od bezpośredniej stymulacji kanałów półkolistych, jak również zamglenie szyby czołowej maski nurkowej wskutek rozpylenia cząsteczek wody pod postacią pary wodnej wewnątrz przestrzeni gazowej maski. Z badań przeprowadzonych w Naval Submarine Medical Research Laboratory wynika, iż nurkowie, u których wystąpiły zaburzenia podczas prowadzonych prac badawczych zgłaszali, że chociaż były to doznania nieprzyjemne, to równocześnie w pełni tolerowalne [6, 17, 18]. Podobnych danych brak w odniesieniu do nurków nie wyposażonych w skafander z kapturem i pływaków, choć należy przyjąć, że zaburzenia pola widzenia mogą u nich wystąpić przy znacznie niższych wartościach SPL. Jeżeli istnieje uzasadniona potrzeba poddania nurków takim warunkom ekspozycji, powinni oni zostać odpowiednio poinstruowani o możliwych efektach (objawach) i – jeśli to wykonalne – poddani ekspozycjom treningowym w ściśle kontrolowanych warunkach [19, 22].

Ponieważ prawdopodobieństwo zaistnienia niekorzystnych z fizjologicznego punktu widzenia następstw zwiększa się znamienne wraz ze wzrostem ciśnienia akustycznego powyżej 200 dB (przy dowolnej częstotliwości), ekspozycja nurka na SPL > 200 dB jest zabroniona, o ile nie będzie on ubrany (minimum) w kompletny mokry skafander nurkowy z kapturem [17, 18; 22]. Przyjmuje się, że nawet w pełni zabezpieczonego nurka (kompletny mokry skafander z kapturem) nie powinno się poddawać ekspozycji na SPL > 215 dB (przy dowolnej częstotliwości sygnału).

W przypadku narażenia na oddziaływanie impulsów sonarowych o długim czasie trwania impulsu (powyżej 1 s) można zaobserwować zaburzenia działania niektórych istotnych elementów wyposażenia nurkowego, jak głębiomierze (nieprecyzyjny odczyt), czy automaty oddechowe (tendencja do swobodnego wypływu czynnika oddechowego), co może być pośrednią przyczyną niekorzystnych następstw zdrowotnych u nurków [22].

## **2.1. SONARY NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI (160-320 Hz)**

W miarę możliwości, powinno się unikać nurkowania w sąsiedztwie sonarów niskiej częstotliwości (LFS – ang. Low Frequency Sonar). Sonar niskiej częstotliwości generuje spójny puls dźwięku o wysokiej energii, który może być szkodliwy przy wyższych poziomach mocy. Z uwagi na szerokie spektrum możliwych doznań, związanych z narażeniem na LFS, niezbędne jest poinformowanie nurków o prawdopodobieństwie ekspozycji i zapoznanie z możliwymi efektami, które mogą usłyszeć i których mogą doświadczyć fizycznie. Spektrum możliwych objawów niepożądanych jest szerokie: od (początkowo łagodnych) zawrotów głowy, przez oszołomienie, mrowienie i parastezje skóry, uczucie wibrowania w gardle, do pełności w jamie brzusznej i nudności. Wskutek ekspozycji może również dojść do zaburzenia komunikacji głosowej, co wymusza konieczność wcześniejszego przygotowania zastępczego sposobu komunikacji nurka z powierzchnią. Zaburzenia komunikacji werbalnej w mniejszym stopniu dotyczą nurków, wyposażonych w sztywny hełm nurkowy [1, 13, 14, 20, 22].

## **2.2. SONARY ULTRADŹWIĘKOWE (250 KHz I WIĘCEJ)**

Częstotliwości używane w sonarach ultradźwiękowych przekraczają próg słyszalności ucha ludzkiego. W przypadku tego typu sonarów podstawowym efektem niekorzystnego oddziaływania na organizm jest efekt termiczny. Ponieważ moc wiązki sonaru ultradźwiękowego ulega szybkiemu zmniejszeniu w funkcji odległości od źródła, za bezpieczny dla nurka przyjmuje się dystans minimum ~ 9,1 m (10 jardów) od pracującego urządzenia. Operacje nurkowe mogą być prowadzone w sąsiedztwie sonaru pod warunkiem, że nurek nie będzie pozostawał w granicach wiązki sygnału ultradźwiękowego [1, 13, 20, 22].

### **WNIOSKI**

1. Nurkowanie w strefie pracy sonaru może stanowić potencjalne zagrożenie dla bezpieczeństwa i zdrowia nurka.
2. Zabezpieczenie nurka poprzez wyposażenie go w standardowy skafander neoprenowy z kapturem, a szczególnie w skafander typu suchego z hełmem nurkowym, wydatnie zmniejsza zagrożenie związane z niekorzystnymi następstwami oddziaływania podwodnej fali akustycznej.
3. Zachowanie odległości 30 m od transpondera dowolnego typu sonaru cywilnego zastosowania uważane jest za bezpieczne.
4. W przypadku konieczności przeprowadzenia nurkowania w sąsiedztwie działającego sonaru wojskowego zastosowania, każdorazowo powinna zostać przeprowadzona kalkulacja dopuszczalności takiej ekspozycji wg metodyki opisanej w załączniku 1A do US Navy Diving Manual lub zachowana odległość od urządzenia, uważana za bezpieczną – tj. 457 m (500 jardów).

### **PIŚMIENNICTWO**

1. ADivP-2(B): "Allied guide to diving medical disorders" (STANAG 1432). Military Agency for Standardization (MAS), NATO 2009
2. Ainslie MA: "Review of published safety thresholds for human divers exposed to underwater sound". Netherlands Organization for Applied Scientific Research Report No. TNO-DV 2007 A598, The Hague 2008
3. Adolfson JA, Berghage T: "Spatial orientation under water. Communication

- under water". W: Adolfson JA, Berghage T, eds. "Perception and performance under water", John Wiley & Sons, New York 1974, ISBN: 0-4710-0900-8
4. Eknes E: "Noise inside a Superlite 17 diving helmet from seismic air guns and a water jet". NUTEC Report No. 19-89, Bergen 1989
  5. Farmer JC Jr, Thomas WG, Preslar M: "Human auditory responses during hyperbaric helium-oxygen exposure" Surg. Forum 1971; 22: 456-458, ISSN: 0071-8041
  6. Harris JD: "The ear and hearing in the aquatic and dysbaric environment". USN Submarine Medical Research Laboratory Report No. 746, Groton 1973
  7. Kryter KD: "The effects of noise on man" Academic Press, New York 1985, ISBN: 0-1242-7460-9
  8. Miller JD: "Effects of noise on people" J. Acoust. Soc. Am. 1974; 56(3): 729-764, ISSN: 0001-4966
  9. Molvær OI: "Effects of diving on the human cochleovestibular system". NUTEC Report No. 29-88, Bergen 1988
  10. Molvær OI, Gjestland T: "Hearing damage risk to divers operating noisy tools under water" Scand. J. Environ. Health 1981; 7(4): 263-270, ISSN: 0355-3140
  11. Molvær OI, Eknes E, Sundland H: "Tiltak mot strøyksponering av dykkarar". Del 2. "Strøydemping i hetter og hjelm". NUTEC-rapport 10-89, Bergen 1989
  12. Montague WE, Strickland JE: "Sensitivity of the water-immersed ear to high- and low-level tones" J. Acoust. Soc. Am. 1961; 33(10): 1376-1381, ISSN: 0001-4966
  13. NATO Instructions: SACLANTCEN Staff Instruction No. 77-98, M-133, Section 4. NATO 1998
  14. Parker DE, von Gierke HE, Reschke MA: "Studies of acoustical stimulation of the vestibular system" Aerospace Med. 1968; 39(12): 1321-1325, ISSN: 0001-9402
  15. Reimers SD, Summitt JK: "Sound level testing of the Standard USN Mk V Air and Helium-Oxygen diving helmets" USN Experimental Diving Unit Report 4-73, Washington DC 1973
  16. Smith PF: "Underwater hearing in man". I: "Sensitivity" USN Submarine Medical Center Report No. 569, Groton 1969
  17. Smith PF: "Toward a standard for hearing conservation for underwater and hyperbaric environments" J. Auditory Res. 1985; 25(4): 221-238, ISSN: 0021-9177
  18. Smith PF: "Effects of exposure to intense tones in water while wearing wet-suit hoods" USN Submarine Medical Center Research Laboratory Report No. 1120, Groton 1988
  19. Smith PF, Wojtowicz J, Carpenter S: "Temporary auditory-threshold shifts induced by repeated ten-minute exposures to continuous tones in water" USN Submarine Medical Center Research Laboratory Report No. 1122, Groton 1988
  20. Recommendations DMAC 06: "The effect of sonar transmission on commercial diving activities" The Diving Medical Advisory Committee, London 1981 z: <http://www.dmac-diving.org/guidance/DMAC06.pdf>
  21. Thomas WG, Summitt J, Farmer JC Jr: "Human auditory thresholds during deep saturation helium oxygen dives" J. Acoust. Soc. Am. 1974; 55(4): 810-813, ISSN: 0001-4966
  22. US Navy Diving Manual (Rev. 6): "Safe diving distances from transmitting sonar" (Appendix 1A) SS521-AG-PRO-010/0910-LP-106-0957 Naval Sea Systems Command, Washington DC 2008
  23. WHO: "Environmental health criteria 22" Geneva 1982, ISBN: 92-4-154082-6

Autor:

**kmdr por. dr n. med. Maciej Konarski**

Adiunkt w Zakładzie Medycyny Morskiej (z siedzibą w Gdyni) Wojskowego Instytutu Medycznego w Warszawie, specjalista chorób płuc, medycyny morskiej i tropikalnej oraz medycyny transportu, konsultant Wojskowej Służby Zdrowia w zakresie medycyny transportu, lekarz Komisji Kwalifikacyjnej dla Nurków przy Urzędzie Morskim w Gdyni. Zajmuje się problematyką bezpieczeństwa nurkowania oraz aspektami medycznymi technologii prac podwodnych.

