

# WPŁYW INFRADŹWIĘKÓW I HAŁASU NISKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO NA ZDROWIE I SAMOPOCZUCIE CZŁOWIEKA. CZĘŚĆ II: PRZEGLĄD BADAŃ EPIDEMIOLOGICZNYCH

IMPACT OF INFRASOUND AND LOWFREQUENCY NOISE  
ON HUMAN HEALTH AND WELL-BEING.  
PART II: REVIEW OF EPIDEMIOLOGICAL STUDIES

Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska<sup>1</sup>, Adam Dudarewicz<sup>1</sup>, Iryna Myshchenko<sup>2</sup>, Alicja Bortkiewicz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland  
Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych / Department of Vibroacoustic Hazards

<sup>2</sup> Politechnika Wrocławska / Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland  
Laboratorium Bezpieczeństwa Pracy, Katedra Górnictwa, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii /  
Laboratory of Occupational Safety, Department of Mining, Faculty of Geoen지니어ing, Mining and Geology

<sup>3</sup> Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland  
Kolegium Nofera / Nofer Collegium

## STRESZCZENIE

Niniejsza praca podsumowuje dostępną wiedzę na temat wpływu infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego (HNcz) na zdrowie i samopoczucie ludzi. Podstawą tego narracyjnego przeglądu piśmiennictwa były wybrane, głównie recenzowane prace badawcze, artykuły poglądowe i metaanalizy opublikowane w latach 1971–2022. Uwagę skoncentrowano na wynikach badań epidemiologicznych dotyczących dokuczliwości przypisywanej infradźwiękom i HNcz, a także ich wpływowi na układ sercowo-naczyniowy i zaburzenia snu. Szczególną uwagę poświęcono także ostatnim wynikom badań i swoistym źródłom infradźwięków i HNcz, tj. turbinom wiatrowym. *Med Pr Work Health Saf.* 2023;74(5):409–23.

**Słowa kluczowe:** ekspozycja zawodowa, ekspozycja środowiskowa, infradźwięki, hałas niskoczęstotliwościowy, skutki ekspozycji, badania epidemiologiczne

## ABSTRACT

This paper summarizes the currently available knowledge on the impact of infrasound (IS) and low frequency noise (LFN) on human health and well-being. This narrative review of the literature data was based on the selected, mostly, peer-reviewed research papers, review articles, and meta-analyses that were published in 1971–2022. It has been focused on the results of epidemiological studies concerning the annoyance related to infrasound and low frequency noise, as well as their impact on the cardiovascular system and sleep disorders. Particular attention was also paid to the latest research results and specific sources of IS and LFN, i.e., wind turbines. *Med Pr Work Health Saf.* 2023;74(5):409–23.

**Key words:** occupational exposure, environmental exposure, infrasound, low frequency noise, effects of exposure, epidemiological studies

Autorka do korespondencji / Corresponding author: Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska,  
Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi, Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych, ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź,  
e-mail: małgorzata.pawlaczyk@imp.lodz.pl  
Nadesłano: 15 maja 2023, zatwierdzono: 12 września 2023

## WSTĘP

Infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy (HNcz) ze względu na wszechobecność oraz słabe tłumienie niskich częstotliwości przez ściany i inne elementy konstrukcyjne budynków mogą mieć istotne znaczenie dla zdrowia oraz samopoczucia ludzi w miejscu zarówno zamieszkania, jak i pracy [1]. Dotychczas stosunkowo niewiele – w porównaniu z liczbą artykułów na temat hałasu słyszalnego – prac koncentrowało się wyłącznie na wpływie infradźwięków lub HNcz. Tymczasem wraz z rozwojem energetyki wiatrowej pojawiły się sugestie, że to infradźwięki i HNcz mogą być odpowiedzialne za złe samopoczucie i niekorzystne skutki zdrowotne u osób mieszkających w sąsiedztwie farm wiatrowych, co spowodowało wzrost zainteresowania badaniami na ten temat.

Przegląd wyników badań eksperymentalnych dotyczących wpływu infradźwięków i HNcz na człowieka przedstawiono w innym artykule autorów [2]. W niniejszej pracy podsumowano natomiast wyniki dotychczasowych badań epidemiologicznych.

## METODY PRZEGLĄDU

Podstawę niniejszego narracyjnego przeglądu piśmiennictwa stanowiły wybrane, głównie recenzowane prace badawcze, artykuły pogładowe i metaanalizy dotyczące oddziaływania infradźwięków oraz HNcz, opublikowane w latach 1971–2022. Analizie poddano ponad 200 artykułów polsko- i angielskojęzycznych z baz Web of Science i PubMed.

Uwagę skoncentrowano na wynikach badań epidemiologicznych dotyczących przypisywanej infradźwiękom i HNcz dokuczliwości, a także ich wpływowi na układ sercowo-naczyniowy, zaburzenia snu i samopoczucie. Podobnie jak w części pierwszej, która stanowiła przegląd badań / prac eksperymentalnych, szczególną uwagę poświęcono ostatnim wynikom badań oraz infradźwiękom i HNcz towarzyszącym pracy turbin wiatrowych.

## WYNIKI PRZEGLĄDU

### Skutki ekspozycji na hałas niskoczęstotliwościowy

Głównym i najczęściej opisywanym skutkiem ekspozycji na umiarkowane i niskie poziomy HNcz występujące w miejscu pracy i zamieszkania ludzi jest dokuczliwość [3–7]. Stąd też znaczna część dotychczasowych badań dotyczyła subiektywnej oceny do-

kuczliwości HNcz, a także związku pomiędzy dokuczliwością a jakością snu, trudnościami z koncentracją uwagi i bólami głowy zgłaszanymi przez osoby mieszkające w pobliżu źródeł HNcz. W wielu badaniach sugerowano związek pomiędzy HNcz a różnymi reakcjami fizjologicznymi i psychologicznymi, takimi jak upośledzenie procesów poznawczych i pogorszenie nastroju, a także rozwój chorób układu krążenia i nadciśnienia tętniczego. Ponadto obserwowano niekorzystny wpływ ekspozycji zawodowej na HNcz na pamięć wydajność pracy i pojawianie się rozdrażnienia [3–7].

### Dokuczliwość hałasu niskoczęstotliwościowego

Dokuczliwość to uczucie niezadowolenia związane z występowaniem jakiegoś czynnika lub warunków uznawanych lub uważanych przez osoby lub grupy osób za niekorzystnie na nie wpływające [8]. Stopień dokuczliwości lub zakłócającego działania hałasu jest trudny do przewidzenia, gdyż zależy od jego cech fizycznych i czynników psychologicznych związanych z odbiorcą. Ten sam hałas może być odbierany w zupełnie inny sposób przez różne osoby w zależności od czynników kulturowych, aktywności, pory ekspozycji, nastawienia do źródła hałasu i wrażliwości na hałas, a także wielu innych cech indywidualnych [4].

Hałas niskoczęstotliwościowy jest uznawany za istotne zanieczyszczenie środowiska o niekorzystnym działaniu na ludzi, zwłaszcza wrażliwych, w miejscu ich zamieszkania [5]. Hałas ten w przeciwieństwie do hałasu z udziałem wyższych częstotliwości nie powoduje natychmiastowego problemu. Typową reakcją na ten rodzaj hałasu (np. niskoczęstotliwościowy hałas wentylatorowy) jest uczucie ulgi, gdy zanika, nawet przy wcześniejszym braku świadomości jego obecności [9,10]. Potwierdzeniem występowania tego typu reakcji są np. wyniki badań przekrojowych przeprowadzonych wśród 155 pracowników biurowych przez Landstroma i wsp. [9]. Wykazano w nich, że 65% badanych odczuwało ulgę po wyłączeniu wentylacji w porze nocnej, podczas gdy jedynie 16% – nie zauważało żadnej różnicy.

Wrażliwość na hałas jest jednym z wielu indywidualnych czynników różnicujących skutki działania hałasu i odbiór jego dokuczliwości. Istnieją dowody, że osobom uważającym się za wrażliwe na hałas przeszkadza on w większym stopniu i wywołuje u nich silniejszą reakcję fizjologiczną [10,11].

W badaniach przekrojowych dotyczących dokuczliwości HNcz w miejscu zamieszkania wykazano, że

u osób, dla których jest on dokuczliwy, rozwija się swoista wrażliwość na ten rodzaj hałasu, choć one same rzadko uważają się za ogólnie wrażliwe na hałas [10].

Wielokrotnie zwracano uwagę na różnice w odbiorze HNcz i hałasów o innym składzie widmowym (średnio- i wysokoczęstotliwościowych). Hałas niskoczęstotliwościowy wywołuje inne subiektywne odczucia i często jest oceniany jako dokuczliwszy niż hałas bez dominującego udziału niskich składowych w widmie. Dokuczliwość HNcz bywa stwierdzana już przy względnie niskich poziomach dźwięku (niewiele wyższych od progu słuchu) i rośnie znacząco wraz ze wzrostem ciśnienia akustycznego [4,5].

Różnice w ocenie dokuczliwości hałasów o różnym składzie widmowym analizowano nie tylko w warunkach laboratoryjnych, ale również w warunkach terenowych. Przykładowo Landstrom i wsp. [12] przeprowadzili badania terenowe ukierunkowane na ocenę dokuczliwości hałasu w miejscu pracy z zastosowaniem 100-punktowej skali graficznej. Badaniami objęto osoby zatrudnione na różnych stanowiskach pracy zlokalizowanych w przemysłowych pomieszczeniach sterowniczych (N = 57) i biurowych (N = 34) oraz w pomieszczeniach biurowych administracji publicznej (N = 37). Hałas występujący w pomieszczeniach sterowniczych (o średnim poziomie dźwięku 59,4 dBA i 76,8 dBLIN) miał monotony charakter i zawierał dominujące składowe niskoczęstotliwościowe, podczas gdy hałas występujący w pomieszczeniach biurowych (o średnim poziomie dźwięku 53,3 dBA i 60,4 dBLIN) cechował się zróżnicowanym udziałem niskich częstotliwości i bardziej zmiennym charakterem w czasie. Badacze stwierdzili, że wyższą dokuczliwość przypisywano hałasowi występującemu w pomieszczeniach sterowniczych niż biurowych (średnio 32,8 pkt vs 8,8 pkt). Wychodząc z założenia, że im większa jest wartość różnicy dBLIN–dBA, tym większy udział składowych niskoczęstotliwościowych w widmie hałasu, stwierdzenie to jest równoznaczne z wnioskiem, że wyżej oceniano dokuczliwość hałasu z dominującym udziałem niskich częstotliwości w porównaniu z hałasem bez dominujących składowych niskoczęstotliwościowych (17,2 dB vs 7,1 dB) [12].

W wielu pracach wskazywano, że podstawowa wielkość charakteryzująca ekspozycję na hałas, tj. poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową A (poziom dźwięku A), nie doszacowuje dokuczliwości HNcz [4,5,13–15]. Przykładowo Kjellberg i Goldstein [13] wykazali, że charakterystyka częstotliwościowa A (filtr korekcyjny A) zaniża

o ok. 5 dB i 8 dB dokuczliwość związaną z ekspozycją na HNcz o poziomach równych, odpowiednio, 80 dBA i 86 dBA.

Niejednokrotnie podejmowano próby zastąpienia poziomu dźwięku A inną miarą, która pozwalałaby lepiej przewidywać dokuczliwość HNcz. Vercammen [16] zaproponował np. stosowanie do tego celu tzw. niskoczęstotliwościowego poziomu dźwięku A ( $L_{pA,LF}$ ) wyznaczanego na podstawie wyników analizy widmowej w pasmach tercjowych według wzoru (1):

$$L_{pA,LF} = 10 \times \log \sum_{f=10\text{ Hz}}^{160\text{ Hz}} 10^{0,1 \times (L_n + K_{Af})} \quad (1)$$

gdzie:

$L_n$  – wartości poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych 10–160 Hz, w dB,  
 $K_{Af}$  – wartości częstotliwościowej charakterystyki korekcyjnej A w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych 10–160 Hz, w dB.

Z kolei w publikacji Światowej Organizacji Zdrowia [17] poświęconej hałasowi środowiskowemu można znaleźć stwierdzenie, że „skoro poziom dźwięku A nie doszacowuje hałasu z udziałem niskich częstotliwości, to lepszym sposobem oceny szkodliwych skutków zdrowotnych wydaje się być stosowanie charakterystyki częstotliwościowej C [...]”.

W ostatnich kilkudziesięciu latach przeprowadzono wiele badań przekrojowych ukierunkowanych na ocenę dokuczliwości HNcz [5]. W przytoczonych badaniach pracowników biurowych wykazano, że niskoczęstotliwościowy hałas wentylatorowy o poziomie dźwięku 33,5–35,3 dBA był oceniony jako mniej dokuczliwy niż ten sam rodzaj hałasu o wyższym poziomie, tj. 38,5–39,2 dBA. Ponadto 14% ankietowanych zgłaszało problemy z koncentracją uwagi, a 19% twierdziło, że hałas wentylatorowy wpływa negatywnie na ich zdolność do pracy [9].

Zainteresowanie dokuczliwością HNcz w środowisku pracy nasiliło się w latach 90. XX w. Pawlaczyk-Łuszczynska i wsp. [18] przeprowadzili badania przekrojowe w grupie 276 pracowników w wieku 26–62 lat zatrudnionych na stanowiskach pracy w pomieszczeniach biurowych, laboratoryjnych lub sterowniczych. Celem tych badań była subiektywna ocena dokuczliwości hałasu w miejscu pracy (na 100-punktowej skali graficznej) oraz analiza indywidualnej wrażliwości na hałas i stanu zdrowia psychicznego pracowników.

Wykazano, że HNCz o umiarkowanych poziomach dźwięku A (41–66 dB) jest zjawiskiem dość powszechnym w przemysłowych pomieszczeniach sterowniczych, laboratoryjnych i biurowych, gdzie często są zlokalizowane stanowiska wymagające zwiększonego wysiłku umysłowego i koncentracji uwagi. Hałas tego typu występował prawie na co 5 badanym stanowisku pracy. Stwierdzono różnice w ocenie dokuczliwości hałasu o różnym składzie widmowym. Dokuczliwość HNCz była oceniana przez pracowników wyżej niż dokuczliwość hałasu bez dominującego udziału (lub z mniej dominującym udziałem) składowych niskoczęstotliwościowych o zbliżonym poziomie dźwięku A. Ponadto osoby wrażliwsze na HNCz wyżej oceniały dokuczliwość tego rodzaju hałasu. Parametrem hałasu najsilniej skorelowanym z subiektywną oceną dokuczliwości w miejscu pracy był równoważny niskoczęstotliwościowy poziom dźwięku A [18].

Badania dokuczliwości obejmowały różne źródła HNCz, w tym klimatyzację, pompy ciepła, wentylatory lub systemy wentylacji, sprężarki, układy chłodzenia powietrzem, samoloty, drogi szybkiego ruchu, tłocznie gazu i farmy wiatrowe [7].

Boyle i wsp. [19] przeprowadzili pilotażowe pomiary hałasu w kilkunastu budynkach mieszkalnych zlokalizowanych w Wirginii Zachodniej w sąsiedztwie tłoczni gazu. Pomiary te miały na celu ustalenie, czy mierzone poziomy hałas różni się w zależności od pory dnia, lokalizacji punktów pomiarowych (wewnątrz i na zewnątrz budynków, w dalszej lub bliższej odległości od tłoczni) i weryfikację obecności HNCz. Okazało się, że średnie poziomy dźwięku mierzone zarówno wewnątrz (53 dBA), jak i na zewnątrz budynków (60 dBA) położonych blisko tłoczni (<300 m), osiągały wyższe wartości niż w domach położonych w odległości >300 m. Poziom hałas w ciągu dnia był wyższy niż w nocy. Potwierdzono występowanie HNCz w domach położonych w odległości <300 m od tłoczni gazu.

Huang i wsp. [20] analizowali komfort akustyczny w wieżowcu, bazując na wynikach pomiarów hałasu zewnętrznego, głównie drogowego. Badacze zauważyli, że komfort akustyczny nie poprawia się wraz ze wzrostem odległości od źródła hałasu, czyli nie jest wyższy na najwyższych piętrach budynków. Ich zdaniem HNCz może stanowić istotne źródło dokuczliwości i dyskomfortu dla mieszkańców.

Van Kamp i wsp. [21] przedstawili wyniki dużych badań przekrojowych, w których pytano mieszkańców 3 holenderskich miast, czy bucący dźwięk, np. wentylatora, jest dla nich dokuczliwy. W analizie uwzględniano

m.in. indywidualną wrażliwość na hałas i stopień zadowolenia z warunków mieszkaniowych respondentów oraz zastosowane w ich mieszkaniach rozwiązania ograniczające hałas (np. podwójne szyby, wypełnienie szczelin w ścianach, pochłaniające kratki wentylacyjne). Okazało się, że ok. 7% z blisko 4000 osób, które wypełniły ankietę, oceniło ten rodzaj hałasu jako bardzo dokuczliwy. Hałas powodowany przez inne źródła (ruch drogowy, prace budowlane, motorowery i sąsiadów) był odbierany przez większą liczbę osób (13–22%) jako dokuczliwy niż hałas kolejowy lub przemysłowy (ok. 4%). Osoby niezadowolone ze swojej sytuacji mieszkaniowej i wrażliwe na hałas przypisywały HNCz większą dokuczliwość w porównaniu z osobami zadowolonymi ze swojej sytuacji mieszkaniowej i niewrażliwymi na hałas. Odsetek osób oceniających HNCz jako bardzo dokuczliwy był wyższy w ciągu dnia, gdy poziom hałasu tła komunikacyjnego był wyższy. Odwrotna sytuacja miała miejsce w nocy. Nie stwierdzono natomiast związku pomiędzy dokuczliwością HNCz a izolacyjnością akustyczną pomieszczeń mieszkalnych.

Blair i wsp. [22] monitorowali poziomy hałas słyszalnego i HNCz występujące podczas budowy oraz odwiertów w dzielnicy mieszkalnej w Kolorado. Badacze stwierdzili, że średnie poziomy hałas podczas tego typu prac były wyższe od 50 dBA lub 60 dBC. Na tej podstawie wnioskowali, że ekspozycja na hałas, w tym HNCz, związana z wydobywaniem ropy i gazu może być źródłem dokuczliwości, powodować zaburzenia snu i wpływać niekorzystnie na układ krążenia.

Tao i wsp. [23] przeprowadzili pomiary poziomu dźwięku i analizę dokuczliwości hałasu w zajezdni metra oraz jego oddziaływania na mieszkańców sąsiadujących z zajezdnią budynków. Okazało się, że 96% respondentów odczuwało zaniepokojenie hałasem, a 31% uważało, że wpływ hałasu na ich zdrowie i samopoczucie jest bardzo istotny. Ponadto badacze potwierdzili istnienie problemu dokuczliwości HNCz i stwierdzili, że hałas emitowany przez wentylatory umieszczone na ścianach budynków jest jednym z dominujących źródeł dokuczliwości w sąsiednich budynkach, przy czym im były one bliżej, tym silniejszy był jego wpływ [23].

Alves i Silva [24] przeprowadzili analizę narażenia na HNCz generowany przez słupy i linie energetyczne, bazując na wynikach badań przeprowadzonych wśród osób „narażonych” (mieszkających w pobliżu tego typu obiektów) i „nienarażonych” (mieszkających w odległości >250 m od autostrady i bez linii przesyłowych w pobliżu). Wyniki pomiarów hałasu (w pasmach tercjowych 10–160 Hz) porównano ze stosowanymi w niektórych

państwach europejskich krzywymi referencyjnymi w odniesieniu do pomieszczeń mieszkalnych i szwedzkimi zaleceniami dotyczącymi środowiska pracy. Okazało się, że niezależnie od odległości od źródła, „blisko źródła” ( $\leq 50$  m) i „dalej od źródła” ( $> 250$  m), poziomy ciśnienia akustycznego przekraczały wartości referencyjne stosowane m.in. w Wielkiej Brytanii. Stwierdzono, że populacja „narażona” była nie tylko eksponowana na wyższe poziomy dźwięku niż populacja nienarażona (69,9 dB vs 63,3 dB), ale również odczuwała większy dyskomfort, co w konsekwencji mogło powodować częściej problemy zdrowotne (np. choroby układu krążenia, bezsenność lub depresję). Okazało się także, że populacja „narażona” była mniej podatna na niskie częstotliwości niż populacja „nienarażona”. W konsekwencji grupa „narażona” zwracała uwagę na HNcz o wyższym poziomie dźwięku, podczas gdy grupa „nienarażona”, mieszkająca na obszarze oddalonym od źródła emisji dostrzegła hałas o niższym poziomie [24].

Pohl i wsp. [25] przeprowadzili badanie podłużne w odstępach 2 lat (tj. w latach 2012 i 2014) wśród osób mieszkających w pobliżu farmy wiatrowej oraz porównali postrzeganie przez nie hałasu tej farmy i hałasu drogowego. Okazało się, że oba rodzaje hałasu były oceniane jako nieznacznie dokuczliwe. Dokuczliwość hałasu była słabo skorelowana z odległością od najbliższej turbiny i poziomem ciśnienia akustycznego. W badaniu analizowano 12 objawów kojarzonych z narażeniem na hałas. Respondenci skarżyli się częściej na fizyczne i psychiczne dolegliwości związane z hałasem powodowanym przez ruch uliczny (16%) niż turbiny wiatrowe (10% i 7%, odpowiednio, w latach 2012 i 2014). Więcej objawów było zgłaszanych w na początku obserwacji niż na jej końcu. Okazało się, że po 2 latach poprawił się ogólny stan zdrowia osób, którym najbardziej dokuczał hałas w pierwszej fazie badań, i obniżyła się ich ocena dokuczliwości hałasu, podczas gdy ocena ta pozostawała na stosunkowo niskim lub niezmiennym poziomie w pozostałych grupach. Hałas drogowy i hałas turbin wiatrowych (HTW) były oceniane jako nieznacznie dokuczliwe przez, odpowiednio, 35% i 21% respondentów. Ponadto wykazano, że główną przyczyną dokuczliwości hałasu farm wiatrowych była jego modulacja amplitudowa (MA). Stwierdzono także, że czynny udział ludności w procesie planowania i budowy farmy miał zasadniczy, korzystny wpływ na nastawienie do farm, a w konsekwencji na ocenę hałasu towarzyszącego pracy turbin wiatrowych jako mniej dokuczliwego [25].

Zdaniem Hansena i wsp. [26] obecność MA w hałasie farm wiatrowych jest również przyczyną jego

większej dokuczliwości i ewentualnych zakłóceń snu. Dlatego badacze podjęli się oceny częstości występowania tej cechy hałasu na terenach zamieszkałych w pobliżu farm wiatrowych w Południowej Australii. Okazało się, że w odległości 2,4 km niskoczęstotliwościowy ton modulowany amplitudowo (z częstotliwością przejścia łopaty) jest słyszany wewnątrz pomieszczeń przez 20% czasu pracy farm wiatrowych. Zjawisko to było obserwowane przez podobny odsetek czasu w pomieszczeniach, gdy prędkość wiatru na wysokości piasty wynosiła 11–14 m/s, a procentowa wartość mocy była rzędu 40–85%. Chociaż wpływ MA malał wraz z oddalaniem się od farmy, to w odległości  $\leq 3,5$  km modulacja ta była słyszana na zewnątrz i wewnątrz pomieszczeń przez, odpowiednio, 24% i 16% czasu. Modulacja amplitudowa występowała najczęściej w porze nocnej, w osiedlach położonych w odległości  $\leq 3,5$  km od farmy wiatrowej i była obecna w nocy aż przez 22% czasu. Badacze uznali, że – zasadniczo – w odległości 7,6–8,8 km MA nie powinna być słyszana przez osoby z prawidłowym słuchem, a co za tym idzie nie powinna powodować u nich zakłóceń snu [26].

### **Problemy zdrowotne u osób narażonych na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy**

Zarówno w badaniach terenowych, jak i eksperymentalnych wskazywano na związek pomiędzy dokuczliwością infradźwięków i HNcz a koncentracją uwagi, sennością, zmęczeniem, odczuwaniem ucisku na błonę bębenkową i ucisku w głowie, a także różnymi reakcjami fizjologicznymi i psychologicznymi, w tym czasowym przesunięciem progu słyszenia (*temporary threshold shift* – TTS) i gorszą jakością snu. Sugerowano także rozwój chorób układu krążenia i nadciśnienia tętniczego [3–7,27].

Wyniki niezbyt licznych wczesnych badań epidemiologicznych i studiów przypadków wskazywały, że HNcz wpływa na jakość snu, a w szczególności powoduje wydłużenie czasu potrzebnego do zaśnięcia i zmęczenie poranne [4].

W latach 1998–1999 Møller i Lydolf [28] przeprowadzili badania ankietowe wśród mieszkańców Danii dotyczące skarg na infradźwięki i HNcz. Łącznie zebrali 198 ankiet. Okazało się, że najczęstsze były skargi na bezsenność (67,5%) i problemy z koncentracją (67%). Wielu respondentów narzekało również na bóle głowy i kołatanie serca, a część odczuwała drgania w ciele lub w pomieszczeniu. Dźwięki występujące w mieszkaniach były opisywane jako głębokie, buczące, dudniące lub pochodzące z oddalonego, pracującego na biegu jałowym

silnika ciężarówki lub pompy. Przeszkadzały i były dokuczliwe podczas większości czynności, a dla wielu ankietowanych osób sama ich obecność była uciążliwa [28].

Verzini i wsp. [29] prowadzili badania wśród 98 osób mieszkających na terenach zurbanizowanych, gdzie występował HNcz pochodzący od wyposażenia technicznego budynków, urządzeń klimatyzacyjnych, procesów przemysłowych i ruchu drogowego w tunelach. Badacze stwierdzili, że zawartość składowych z przedziału 20–160 Hz w widmie hałasu była istotnie statystycznie skorelowana z odczuwaną dokuczliwością, lękiem, zmęczeniem, zaburzeniami snu i trudnościami z koncentracją [29].

W innym badaniu przekrojowym obejmującym łącznie 279 osób nie wykryto wprawdzie znaczących różnic w samoocenie jakości snu wśród osób narażonych w swoich domach na hałas szerokopasmowy o płaskim widmie (i poziomie dźwięku 24–33 dBA oraz 41–49 dBC) w porównaniu z samooceną osób narażonych na HNcz pochodzący z wentylacji lub pomp ciepła (o poziomie 26–36 dBA i 49–60 dBC) [30]. Stwierdzono jednak, że zmęczenie, trudności z zasypianiem, uczucie ospałości i napięcia rano były zgłaszane istotnie częściej przez osoby, które oceniały HNcz jako dokuczliwe. Odnotowano także istotnie statystycznie zależności dawka-odpowiedź pomiędzy subiektywną oceną dokuczliwości hałasu i zakłóceniami snu a udziałem niskich częstotliwości w widmie hałasu [30].

Z kolei Mirowska [31] porównała wyniki ankiety zebranej wśród 30 osób skarżących się na HNcz w ich domach z wynikami takiej samej liczby osób (tej samej płci i w tym samym wieku) mieszkających w tym samym bloku, ale nieeksponowanych na HNcz. Okazało się, że wśród skarżących odnotowano częstsze występowanie przewlekłych zaburzeń snu i depresji.

Persson Wayne i wsp. [32] analizowali dokuczliwość i zaburzenia snu w grupie osób (N = 41) narażonych na HNcz pochodzący od wyposażenia technicznego budynków (mieszkania od strony podwórka) lub na hałas uliczny (mieszkania od strony ulicy). Badacze stwierdzili, że wśród osób mających sypialnię od strony podwórka (31 dBA, 50 dBC) odsetek osób oceniających HNcz jako bardzo (lub skrajnie) dokuczliwy i skarżących się na zakłócenia snu wynosił, odpowiednio, 44% i 53%. Wśród osób mieszkających od strony ulicy (21–31 dBA) analogiczne reakcje obserwowano natomiast u, odpowiednio, 26% i 30% z nich. W obu podgrupach zgłaszano tak samo często i tego samego typu zaburzenia snu, za wyjątkiem „poczucia zmęczenia rano”, na które częściej skarżyły osoby mające sypialnię od strony ulicy.

Interesujące badanie przekrojowe przeprowadzili Ising i Ising [33], którzy przebadali 56 dzieci w wieku 7–10 lat, w tym połowę mieszkających przy ruchliwej drodze z całodobowym ruchem ciężarówek (średnio co 2 min obok domu przejeżdżała ciężarówka), eksponowanych na hałas o maksymalnych poziomach dźwięku 26–53 dBA i 55–57 dBC. Grupę porównawczą stanowiły dzieci mieszkające w cichych miejscach (eksponowane na hałas o maksymalnych poziomach dźwięku rzędu 20–43 dBA i 30–54 dBC). Badacze stwierdzili istotną statystycznie korelację między maksymalnym poziomem dźwięku C a stężeniem kortyzolu w moczu pobranym w pierwszej połowie nocy, ale nie odnotowali takiego związku między narażeniem na hałas a wydalaniem kortyzolu w moczu w drugiej połowie nocy. Wzrost stężenia kortyzolu w pierwszej połowie nocy był również istotnie skorelowany z zaburzeniami snu, pamięci i koncentracji. Na tej podstawie badacze uznali, że długotrwała ekspozycja na przerywany HNcz powoduje u dzieci przewlekły wzrost wydzielania wolnego kortyzolu w pierwszej połowie nocy, a tym samym zaburzenie okołodobowego rytmu jego wydzielania [33].

Ostatnio problem zaburzeń snu spowodowanych ekspozycją środowiskową na HNcz był analizowany głównie w kontekście farm wiatrowych, gdyż towarzyszący im pracy hałas szczególnie w nocy rozprzestrzenia się na duże odległości i dociera do mieszkań, potencjalnie wpływając na sen. Badania przekrojowe ukierunkowane na ocenę wpływu hałasu, w tym HNcz i infradźwięków, powodowanych przez turbiny wiatrowe przeprowadzili m.in. Abbasi i wsp. [34], Ishitake [35], Pohl i wsp. [25] oraz Poulsen i wsp. [36]. Stosowali oni różne metody oceny jakości snu, w tym polisomnografię, i różne kwestionariusze.

Abbasi i wsp. [34] analizowali wpływ HTW na ogólny stan zdrowia pracowników farmy wiatrowej oceniany za pomocą *Kwestionariusza ogólnego stanu zdrowia (General Health Questionnaire – GHQ-28)*. Służy on do szacowania stopnia rozpowszechnienia chorób w określonej populacji i wykrywania niewielkich zaburzeń stanu psychicznego związanych ze stresem psychologicznym, które mogą mieć charakter przejściowy. Kwestionariusz ten składa się z 28 pozycji dotyczących takich objawów jak zaburzenia snu, trudności z podejmowaniem decyzji i napięcie. Tworzą one 4 skale: 1) *Objawy somatyczne*, 2) *Niepokój i bezsenność*, 3) *Zaburzenia funkcjonowania*, 4) *Objawy depresji*.

Grupą narażoną na najwyższe poziomy hałasu (średnio 83 dBA) była ekipa konserwatorów. Uzyskali

oni także gorsze (wyższe) wyniki w porównaniu z pracownikami administracyjnymi (60 dBA) i ochrony (66 dBA) w badaniu GHQ-28. Negatywny wpływ ekspozycji na HTW o poziomie dźwięku równym 60 dBA lub 66 dBA na ogólny stan zdrowia był, odpowiednio, ok. 6 i 4 razy mniejszy niż w przypadku ekspozycji na hałas o poziomie 83 dBA. Ujemny wpływ hałasu o poziomie 60 dBA w części kwestionariusza dotyczącej lęku i bezsensowności był natomiast 1,6 razy mniejszy niż w grupie narażonej na hałas o poziomie 83 dBA.

Stwierdzono, że narażenie na hałas było istotnie statystycznie skorelowane ze wszystkimi podskalami GHQ-28 za wyjątkiem objawów depresji. Zdaniem autorów HNCz towarzyszący pracy turbin wiatrowych może powodować szkodliwe skutki dla zdrowia w przypadku pracowników przebywających blisko turbin i w konsekwencji ekspozowanych na względnie wysokie poziomy ciśnienia akustycznego [34].

Ishitake [35] podjął natomiast próbę odpowiedzi na pytanie, czy długotrwała ekspozycja na HNCz generowany przez turbiny wiatrowe wiąże się z ryzykiem zaburzeń snu. Okazało się, że częstość występowania tych zaburzeń była (ok. dwukrotnie) większa wśród respondentów mieszkających w odległości 1500–2000 m. Zakłócenia snu były również istotnie częściej (ok. dwukrotnie) zgłaszane przez osoby, które zwracały uwagę na hałas, w porównaniu z tymi, którego go nie dostrzegały. Nastawienie mieszkańców do elektrowni wiatrowych istotnie wpływało na ich odpowiedzi dotyczące zaburzeń snu. Badacz uznał, że hałas słyszalny, a nie niskoczęstotliwościowy, jest czynnikiem ryzyka zaburzeń snu. Akceptacja ze strony osób, które mają mieszkać w sąsiedztwie farm wiatrowych przed ich instalacją, sprzyja ich przychylnemu nastawieniu do takich obiektów [35].

Poulsen i wsp. [36] przeanalizowali liczbę wystawionych recept na leki nasenne i przeciwdepresyjne dla mieszkańców, którzy mieli problemy z powodu długotrwałego narażenia na HTW. Badacze zidentyfikowali wszystkie mieszkania w sąsiedztwie farm wiatrowych i wyznaczyli prognozowane dla pory nocnej poziomy HNCz (wewnątrz pomieszczeń) i hałasu słyszalnego (na zewnątrz pomieszczeń). Analizą objęto okres od 1996 r. do 2013 r. Okazało się, że w tym czasie w populacji liczącej ok. 585 tys. osób prawie 12% (69 tys.) z nich stosowało leki nasenne, a ponad 14% (82 tys.) – leki przeciwdepresyjne. Nie stwierdzono związku pomiędzy ekspozycją na HNCz a kupowanymi lekami. Wykazano natomiast, że konsekwencje narażenia na HTW występowały u osób >65 roku życia. W przypadku osób starszych narażonych na najwyższe poziomy hałasu

słyszalnego ( $\geq 42$  dBA) współczynnik ryzyka wynosił 1,68 i 1,23 dla leków, odpowiednio, nasennych i przeciwdepresyjnych. Ten sam współczynnik w przypadku seniorów narażonych na HNCz (o poziomie  $\geq 15$  dBA), wyniósł 1,37 i 1,34 dla leków, odpowiednio, nasennych i przeciwdepresyjnych. Na tej podstawie wnioskowano, że ekspozycja na HTW powoduje zaburzenia snu, co skutkuje wzrostem częstości przyjmowania leków nasennych [36].

Wyniki niektórych badań wskazywały, że ekspozycja na HNCz wiąże się z występowaniem chorób układu krążenia [37,38]. Przykładowo Pawlas i wsp. [39] przeprowadzili badania, których celem była ocena skutków ekspozycji zawodowej na infradźwięki lub HNCz w porównaniu z ekspozycją na hałas słyszalny. Grupę porównawczą stanowiły osoby w ogóle nienarażone na hałas. Badaniami objęto 307 osób z 12 zakładów pracy, a analizie poddano m.in. ich stan słuchu, ciśnienie tętnicze oraz wyniki badań posturograficznych i palestezjometrycznych, a także wyniki badań poziomu stresu oksydacyjnego.

Okazało się, że ciśnienie skurczowe i rozkurczowe były wyższe w obu grupach narażonych na hałas względem grupy porównawczej (134/89 vs 128/86 mm Hg). Nie stwierdzono natomiast różnic między osobami narażonymi na infradźwięki lub HNCz (podgrupa 1) a narażonymi na hałas słyszalny (podgrupa 2) (135/90 mm Hg vs 134/89 mm Hg) [39].

Wpływ hałasu o różnym składzie widmowym na ciśnienie tętnicze analizowali także Khosravipour i wsp. [40]. Przeprowadzili oni badania w grupie 518 pracowników, których podzielono na 4 kategorie. Wyróżniono grupy pracowników:

- 1) biurowych (z dzienną ekspozycją na hałas  $L_{EX,sh} < 65$  dBA),
- 2) średniej ekspozycji ( $L_{EX,sh} < 78$  dBA, z różnicą pomiędzy częstotliwościami średnimi i wysokimi  $< 1$  dBA),
- 3) wysokiej ekspozycji A ( $L_{EX,sh} > 90$  dBA, z różnicami pomiędzy częstotliwościami niskimi i średnimi  $\leq 3$  dBA oraz średnimi i wysokimi  $< 1$  dBA),
- 4) wysokiej ekspozycji B ( $L_{EX,sh} > 90$  dB, z różnicami pomiędzy częstotliwościami niskimi i średnimi  $\leq 3$  dBA oraz średnimi i wysokimi  $> 10$  dBA).

Odnotowano różnice pomiędzy badanymi grupami w zakresie średniego ciśnienia skurczowego, tętna, średniego ciśnienia tętniczego oraz częstości występowania nadciśnienia tętniczego ( $p < 0,05$ ). Stwierdzono także różnice w ciśnieniu rozkurczowym, ale na poziomie trendu ( $p < 0,10$ ). Oszacowano, że iloraz szans

wystąpienia nadciśnienia tętniczego w grupach średniej, wysokiej A i wysokiej B ekspozycji w porównaniu z pracownikami biurowymi wynosił, odpowiednio, OR = 1,66 (95% CI: 0,45–6,10), OR = 2,34 (95% CI: 0,80–6,89) i OR = 4,02 (95% CI: 1,63–9,96), a największa szansa występowała w przypadku grupy wysokiej ekspozycji B. Na tej podstawie wnioskowano, że skład widmowy (częstotliwość) hałasu może odgrywać istotną rolę w kształtowaniu ryzyka nadciśnienia tętniczego związanego z ekspozycją na hałas [40].

Poulsen i wsp. [41] przeprowadzili badanie, którego celem było sprawdzenie, czy długotrwała ekspozycja na HTW zwiększa ryzyko zawału mięśnia sercowego i udaru mózgu. Dla wszystkich duńskich mieszkań w promieniu 20-krotnej wysokości turbiny wiatrowej i 25% losowo wybranych mieszkań w promieniu >20–40-krotnej wysokości turbiny wyznaczono prognozowane dla pory nocnej poziomy HNCz (wewnątrz pomieszczeń) i hałasu słyszalnego (na zewnątrz pomieszczeń). Badacze zidentyfikowali również wszystkie przypadki zawału mięśnia sercowego (N = 19 145) i udaru mózgu (N = 18 064) wśród dorosłych w wieku 25–85 lat (N = 717 453) mieszkających co najmniej przez rok w latach 1982–2013 w jednym z ww. mieszkań, jednak nie znaleźli przekonujących dowodów na związek między hałasem, a w szczególności HNCz, a zawałem serca i udarem mózgu [41].

Ostatnio negatywne reakcje układu sercowo-naczyniowego w odpowiedzi na HNCz generowany przez turbiny wiatrowe stwierdzili Chiu i wsp. [42]. Ich badanie miało na celu ocenę ekspozycji na HNCz i reakcji autonomicznego układu nerwowego ocenianą z zastosowaniem analizy zmienności rytmu serca. Badaniem objęto grupę 30 osób mieszkających w promieniu 500 m od turbin wiatrowych. Stwierdzono, że średni poziom dźwięku A wewnątrz i na zewnątrz pomieszczeń zlokalizowanych w odległości rzędu 124–330 m od najbliższej turbiny wynosił, odpowiednio, 35 i 43 dBA. Odnotowano także związek pomiędzy zmiennością rytmu serca a narażeniem na hałas w postaci zmniejszenia całkowitej zmienności rytmu serca o 0,43% przy wzroście o 1 dB równoważnego poziomu dźwięku A HNCz [42].

Wiadomo, że turbiny wiatrowe generują hałas szerokopasmowy, który obejmuje składowe infradźwiękowe i niskie słyszalne. Infradźwięki towarzyszące pracy tych urządzeń uznaje się za niesłyszalne, ponieważ ich poziomy są za niskie w stosunku do wrażliwości ucha człowieka [43,44]. Z kolei dźwięki niskoczęstotliwościowe są częścią słyszalnego HTW i przyczyniają się

do powodowanych przez niego skutków. Najgłośniejsza część dźwięków emitowanych przez turbinę obejmuje zakres średnich częstotliwości (250–1600 Hz) [43,45]. Badanie izolowanego wpływu niskich częstotliwości nie jest łatwe, ponieważ zakresy częstotliwości niskich i wyższych łączą się ze sobą.

Chociaż związek między ekspozycją na HTW a samooceną stanu zdrowia był już wielokrotnie badany, to właściwie dotychczas nie analizowano intuicyjnego łączenia przez respondentów objawów z infradźwiękami turbin wiatrowych. Bez względu na to, jaka jest prawdziwa przyczyna objawów, faktem jest to, że określone objawy występują oraz prowadzą do obniżenia jakości życia i pogorszenia stanu zdrowia.

Pierwsze duże badanie przekrojowe, którego celem była analiza objawów intuicyjnie wiązanych z infradźwiękami, przeprowadzono w Finlandii w latach 2015–2016 [46]. Badaniem objęto 4 obszary energetyki wiatrowej w Finlandii, w których zgłaszano problemy związane z infradźwiękami.

Do 4847 dorosłych osób mieszkających w 4 przedziałach odległości ( $\leq 2,5$  km,  $>2,5$ –5 km,  $>5$ –10 km i  $>10$ –20 km od najbliższej turbiny wiatrowej) wysłano pocztą kwestionariusz zawierający m.in. pytania dotyczące występowania, częstotliwości i nasilenia objawów związanych z infradźwiękami turbin wiatrowych, postrzeganego narażenia, dokuczliwości i zaburzeń snu, jakości i środowiska życia, stanu zdrowia, stylu życia, wrażliwości na hałas itp. Kwestionariusz odesłało 28% adresatów. Uczestników badania podzielono na 2 grupy („symptomatyczną” i „niesymptomatyczną”) w zależności od tego, czy badani zgłaszali objawy związane z infradźwiękami turbin wiatrowych czy ich nie zgłaszali.

W strefie najbliższej ( $\leq 2,5$  km) 15% respondentów (34 z 227) zgłosiło objawy intuicyjnie kojarzone z infradźwiękami turbin wiatrowych. Na całym badanym obszarze częstość występowania objawów wyniosła 5% (70 z 1293). Jedna trzecia respondentów z objawami oceniła je jako ciężkie, a zakres objawów był bardzo szeroki i obejmował wiele układów i narządów. Wiadomo, że niektóre objawy, takie jak dolegliwości uszne, zawroty głowy, nudności i zmęczenie, wynikają z narażenia na infradźwięki, ale tylko wtedy, gdy poziomy ciśnienia akustycznego są ekstremalne i wyraźnie przekraczają próg percepcji słuchowej. W modelach wielowymiarowych czynniki, takie jak bliskość turbin wiatrowych, zły stan zdrowia, dokuczliwość i traktowanie turbin wiatrowych jako zagrożenia dla zdrowia, korelowały ze zgłaszanymi objawami.



Chociaż związków przyczynowych nie można ocenić na podstawie przekrojowego badania kwestionariuszowego, to można spekulować, że na zgłaszanie objawów wpływa wiele innych czynników oprócz rzeczywistego hałasu. Spośród osób, które łączyły swoje objawy z infradźwiękami turbin wiatrowych, 45% (N = 30) wiązało swoje dolegliwości również z wibracjami lub polem elektromagnetycznym wytwarzanym przez turbiny wiatrowe. Ponadto 6% (N = 45) respondentów z objawami było zirytowanych w domu m.in. z powodu dokuczliwości słyszalnego dźwięku turbin wiatrowych [46].

Ten sam zespół badaczy fińskich przeprowadził kolejne przekrojowe badanie kwestionariuszowe (N = 2828) w rejonie 5 obszarów produkcji energii wiatrowej [47]. Jego celem była ocena związku między ekspozycją na HTW a zgłaszanymi przez respondentów objawami, występującymi u nich chorobami i przyjmowanymi przez nich lekami.

W każdym obszarze znajdowało się 3–16 turbin o mocy nominalnej 2,4–3,3 MW. Wskaźnik odpowiedzi wyniósł 50% (N = 1411). Poziom emisji hałasu farm wiatrowych można było wiarygodnie prognozować tylko dla najbliższej strefy odległości, gdzie średni i maksymalny roczny poziomy dźwięku wynosiły, odpowiednio, 34 dB i 43 dB. Jako miarę ekspozycji na HTW przejęto odległość (<2,5 km, 2,5–5 km, 5–10 km) między domem respondentów a najbliższą turbiną wiatrową.

Respondentów proszono o podanie informacji na temat objawów (ból głowy, nudności, zawroty głowy, szumy uszne, uczucie pełności w uszach, zaburzenia rytmu serca, zmęczenie, trudności w zasypianiu, zbyt wczesne budzenie się, niepokój, stres), obecnych lub przebytych chorób (nadciśnienie tętnicze, niewydolność serca, cukrzyca) oraz przyjmowanych leków (na ból głowy, ból stawów/mięśni i inne bóle, zaburzenia snu, niepokój i depresję oraz nadciśnienie tętnicze). Analiza statystyczna (regresja logistyczna) uwzględniała takie zmienne jak wiek, płeć, stan cywilny, wykształcenie, sytuacja zawodowa, palenie tytoniu, nawyk używania alkoholu, aktywność fizyczna, wskaźnik masy ciała i problemy ze słuchem [47].

Okazało się, że w sumie 70 z 1351 respondentów (5%) zgłosiło objawy, które przypisywali infradźwiękom pochodzącym z farmy wiatrowej. Średnio „symptomatyczni” respondenci mieszkali bliżej farmy wiatrowej niż osoby bez objawów. Objawy te były skorelowane z występowaniem chorób przewlekłych, dokuczliwością związaną z różnymi aspektami wizualnymi i słuchowymi turbin wiatrowych (np. migotaniem cienia) oraz z uznaniem tych urządzeń za zagrożenie dla zdrowia.

Dziesięć procent uczestników uważało, że infradźwięki turbin wiatrowych stwarzają wysokie ryzyko dla ich zdrowia, a 18% dla zdrowia ogółu populacji [47].

Stwierdzono, że dokuczliwość (rozdrażnienie) i zaburzenia snu spowodowane HTW były odwrotnie proporcjonalne do odległości od najbliższej turbiny wiatrowej. Częstość występowania różnych objawów, chorób i przyjmowanych leków była zasadniczo taka sama we wszystkich zakresach odległości. Poza dokuczliwością i zaburzeniami snu nie zaobserwowano związku między ekspozycją na HTW a zgłaszanymi problemami zdrowotnymi [47].

#### Wpływ infradźwięków na stan czuwania

W badaniach laboratoryjnych i terenowych odnotowano zwiększone ryzyko senności podczas narażenia na infradźwięki z dodatnią korelacją między narażeniem na infradźwięki o poziomach nieznacznie powyżej progu słyszenia a obniżonym poziomem czuwania (większym zmęczeniem) [3,48]. Obniżeniu stopnia czuwania towarzyszyła zmniejszona częstość skurczów serca oraz obniżone ciśnienie skurczowe i rozkurczowe. Reakcje te są normalnymi zmianami fizjologicznymi zachodzącymi podczas zasypiania, które są częściowo kontrolowane przez określone ośrodki w pniu mózgu i stanowią reakcję wtórną pierwotnego wpływu infradźwięków na ośrodkowy układ nerwowy. To, czy skutki te obejmowały również ekspozycję na hałas z zakresu niskich częstotliwości, jest mniej dokładnie zbadane, chociaż niektóre dane z badań terenowych i laboratoryjnych wskazują na podobną tendencję [6].

Obniżenie poziomu czuwania i uwagi może mieć poważne konsekwencje dla zawodów, w których ciągła uwaga ma zasadnicze znaczenie, takich jak kierowcy, piloci i pracownicy dyspozytorni.

Wyniki te potwierdzają zatem potwierdzają związek między percepcją, funkcjami ośrodkowego układu nerwowego i reakcjami fizjologicznymi. Należy jednak pamiętać o zróżnicowaniu indywidualnych progów percepcji słuchowej infradźwięków, a tym samym progów wywoływania skutków fizjologicznych.

Zakres częstotliwości od 20 Hz do 20 kHz jest umownie przyjmowany jako zakres słyszalności człowieka i w tym przedziale normalny próg słyszenia został wystandardyzowany przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO) [49–51]. Jak dotąd jednak nie przeprowadzono tego typu ustaleń dla częstotliwości <20 Hz. Wartości progów słyszenia infradźwięków zaproponowali m.in. Watanabe i Møller [52], Møller

**Tabela 1.** Progi słyszenia infradźwięków wyznaczone dla młodych zdrowych otologicznie osób w wieku 10–25 lat  
**Table 1.** Hearing thresholds of infrasound determined in young otologically normal subjects aged 18–25 years

Częstotliwość Frequency	Próg słyszenia Hearing thresholds [dB]	
	Moller i / and Pedersen [53]	Watanabe i / and Moller [52]
1,6 Hz	124	
2 Hz	122	
2,5 Hz	119	
3,15 Hz	117	
4 Hz	114	107
5 Hz	110	–
6,3 Hz	106	–
8 Hz	102	100
10 Hz	98	97
12,5 Hz	92,7	92
16 Hz	87,7	88
20 Hz	83,5	79

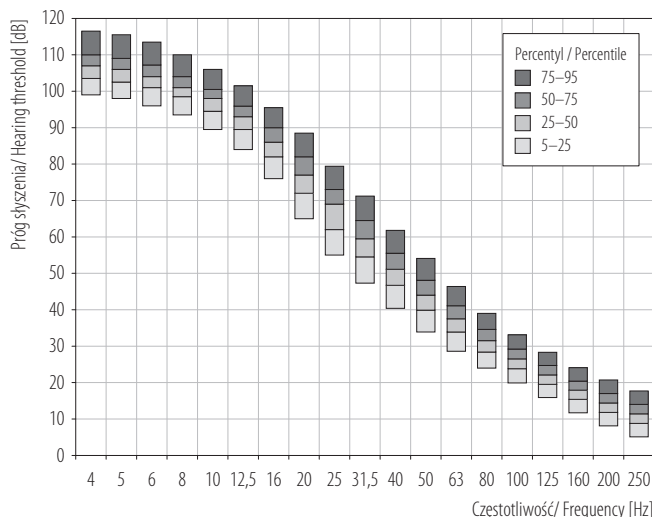
i Pedersen [53] oraz Kurakata i Mizunami [54] (tabela 1, rycina 1). Okazało się, że różnica median progów słyszenia (dla poszczególnych częstotliwości) w grupach wiekowych 20 lat i >60 lat wynosi ok. 10 dB [55]. Świadczy to o tym, że ludzie starsi zachowują dobrą wrażliwość słuchową w zakresie niskich częstotliwości w przeciwieństwie do często znacznie osłabionej wrażliwości dla wyższych częstotliwości.

#### Wpływ infradźwięków i hałasu

##### niskoczęstotliwościowego na ostrość słyszenia

Większość badań laboratoryjnych oceniających TTS z powodu ekspozycji na infradźwięki przeprowadzono w latach 60. XX wieku [6]. Badania te pokazują, że wysokie poziomy infradźwięków, przekraczające 125 dB mogą wywoływać TTS. W przeciwieństwie do publikacji dotyczących TTS dostępnych jest niewiele prac na temat trwałego uszkodzenia słuchu spowodowanego przez HNCz, a ocenę ryzyka komplikuje to, że w większości miejsc pracy występuje hałas szerokopasmowy, obejmujący nie tylko dźwięki o niskiej częstotliwości, ale również dźwięki o wyższych częstotliwościach.

Trwałe przesunięcie progu słuchu (*permanent threshold shift* – PTS) wywołane działaniem infradźwięków potwierdzają zaledwie pojedyncze prace. Przykładowo Droschenko i Stepchuk [56] zaobserwowali w grupie



**Rycina 1.** Rozkład progów słyszenia w zakresie częstotliwości 4–250 Hz wyznaczonych wśród młodych zdrowych otologicznie osób w wieku 18–25 lat przez Kurakata i Mizunami [54]

**Figure 1.** Distribution of hearing thresholds in the frequency range 4–250 Hz determined in young otologically normal people, aged 18–25 years, by Kurakata and Mizunami [54]

216 operatorów sprzężarek ekspozowanych na szerokopasmowy hałas (o poziomie dźwięku 84–97 dBA) z dominującym udziałem składowych infradźwiękowych (o poziomie 91–119 dB) istotnie wyższe progi słuchu w stosunku do grupy porównawczej narażonej na hałas bez udziału niskich częstotliwości (o poziomie 93–106 dBA) [56].

W cytowanym wcześniej badaniu Pawlas i wsp. [39] porównano skutki ekspozycji zawodowej na HNCz lub infradźwięki ze skutkami ekspozycji na hałas słyszalny. Stwierdzono, że stan słuchu osób ekspozowanych na HNCz lub infradźwięki oceniany za pomocą audiometrii potencjałów wywołanych z pnia mózgu, audiometrii i emisji otoakustycznych był lepszy niż osób ekspozowanych na hałas słyszalny. Na tej podstawie uznano, że hałas słyszalny jest szkodliwszy niż infradźwięki lub HNCz [39].

Selander i wsp. [57] przeprowadzili populacyjne badanie kohortowe obejmujące >1422 tys. urodzeń w Szwecji w latach 1986–2008, którego celem było sprawdzenie, czy narażenie zawodowe na hałas podczas ciąży wiąże się z dysfunkcjami słuchu u nowonarodzonych dzieci. Badania eksperymentalne zarówno na zwierzętach, jak i z udziałem ludzi wskazują, że tłumienie hałasu przechodzącego przez ścianę jamy brzusznej i macicę jest zależne od jego częstotliwości. Płód jest dobrze chroniony przed hałasem o wysokiej częstotliwości, natomiast HNCz może nawet zostać wzmocniony podczas przechodzenia przez łożysko i warstwę płynu owodniowego. Zatem dzieci

matek narażonych zawodowo w okresie ciąży na hałas są eksponowane w życiu płodowym na hałas HNcz, gdyż hałas o innych (wyższych) częstotliwościach jest tłumiony przez łożysko.

Narażenie matek na hałas w miejscu pracy sklasyfikowano jako dzienny poziom ekspozycji na hałas <75 dBA, 75–84 dBA lub ≥85 dBA, natomiast przypadki dysfunkcji słuchu u dzieci zidentyfikowano na podstawie rejestru specjalistycznej opieki medycznej. Analiza statystyczna wykazała, że ekspozycja zawodowa ciężarnych na hałas wiązała się z ryzykiem uszkodzenia słuchu u dzieci. W przypadku matek zatrudnionych w czasie ciąży w pełnym i niepełnym wymiarze godzin współczynnik ryzyka dla dysfunkcji słuchu związanych z narażeniem matki na hałas zawodowy >85 dBA vs <75 dBA wynosił 1,27 (95% CI: 0,99–1,64). Po ograniczeniu do dzieci, których matki pracowały w pełnym wymiarze godzin i miały <20 dni urlopu w czasie ciąży, HR wynosił 1,82 (95% CI: 1,08–3,08). W tym badaniu wykazano związek między narażeniem zawodowym na hałas podczas ciąży a zaburzeniami słuchu u dzieci. Wyniki te potwierdzają, że ciężarne nie powinny być narażone w miejscu pracy na hałas, w szczególności HNcz, o wysokich poziomach dźwięku [57].

Nguyen i wsp. [58] przeprowadzili analizę rozkładów progów słuchu i wyników pomiarów HTW. Na tej podstawie uznali, że osoby z normalnym słuchem mieszkające w odległości >1 km od farmy wiatrowej nie powinny słyszeć infradźwięków. W badaniach przeprowadzonych na jednej z farm w Południowej Australii wykazano jednak, że modulowane amplitudowo tony niskiej częstotliwości mogą być słyszane w odległości ≤9 km [58].

#### Potencjalne oddziaływanie infradźwięków poniżej progu percepcji słuchowej

Wychodząc z założenia, że infradźwięki o poziomach poniżej progu słyszalności mogą wywoływać skutki fizjologiczne, kilku badaczy powiązało je ze skutkami zdrowotnymi odczuwanymi przez osoby mieszkające w sąsiedztwie farm wiatrowych. Hipotezy te były formułowane pod hasłem „choroby wibroakustycznej” i „zespołu turbiny wiatrowej” [59–61].

Choroba wibroakustyczna (*vibroacoustic disease* – VAD) to jednostka chorobowa wprowadzona w 1999 r. w Portugalii przez Castelo Branco i Alves-Pereira [59]. Wiąże się ona z nieprawidłowym rozrostem tkanki łącznej, a dokładniej substancji międzykomórkowej (kolagenu i elastyny), przy braku stanów zapalnych. Tego typu zmiany strukturalne występują głównie w naczyniach

krwionośnych, strukturach serca, tchawicy, płucach i nerkach, przy czym obserwuje się je u zarówno pacjentów, jak i zwierząt doświadczalnych. Swoiste oznaki tej choroby to zgrubienia zastawki mitralnej i osierdzia przy braku procesów zapalnych i zaburzeń diastolicznych. Na podstawie analizy stanu zdrowia pracowników technicznych lotnictwa wyróżniono 3 stadia kliniczne VAD:

- łagodne – po roku do 4 lat pracy w narażeniu na HNcz – występują zmiany w zachowaniu i nastroju, częste infekcje jamy ustnej, zapalenia gardła i oskrzeli;
- umiarkowane – 4–10 lat narażenia – występują bóle w klatce piersiowej, wyraźne wahania nastroju, bóle pleców, zmęczenie, grybicze, wirusowe i pasożytnicze infekcje skóry, zapalenie błony śluzowej żołądka, krwawienie z dróg moczowych, a także zapalenie spojówek i alergię;
- ostre – 10 lat narażenia – typowe dla tego stadium są zaburzenia psychiczne, krwotoki, żyłaki kończyn górnych i hemoroidy, wrzody dwunastnicy, spastyczne zapalenie okrężnicy, pogorszenie ostrości widzenia, bóle głowy, intensywne bóle mięśni i zaburzenia neurologiczne [59].

Początkowo VAD była wiązana tylko z ekspozycją zawodową na wysokie poziomy infradźwięków i HNcz (0–500 Hz). Rozpoznawano ją głównie wśród pracowników technicznych lotnictwa, pilotów i pozostałych członków załóg samolotów, obsługi statków, pracowników restauracji i dyskdżokejów. Później przypadki tej choroby zaczęto również stwierdzać w miejscu zamieszkania u osób eksponowanych na dużo niższe poziomy HNcz, a w szczególności u tych mieszkających w sąsiedztwie pojedynczych turbin wiatrowych [61].

Dotychczas nie przeprowadzono jednak badań epidemiologicznych na szerszą skalę i nie udało się określić zależności dawka-efekt. Zdefiniowano wprawdzie stadia kliniczne VAD, ale nie powiązano ich z konkretnymi poziomami ekspozycji na infradźwięki i HNcz. Odniesiono je tylko do czasu pracy w narażeniu na hałas (w latach). W cytowanej wcześniej pracy Pawlas i wsp. [39] mimo długiej ekspozycji zawodowej stwierdzone zmiany w stanie zdrowia grupy narażonej na infradźwięki lub HNcz nie wykazywały cech VAD.

Zespół turbiny wiatrowej to grupa objawów, które pojawiają się z chwilą uruchomienia w sąsiedztwie turbin wiatrowych, a ustępują, gdy turbiny nie działają lub osoba zgłaszająca objawy nie przebywa w ich pobliżu. Pojęcie to wprowadziła na podstawie wyników własnych badań amerykańska lekarka Nina Pierpont [60].

Jej zdaniem infradźwięki turbin wiatrowych mogą powodować chorobę trzewno-wibracyjną, wpływając na układ przedsionkowy, który zapewnia utrzymanie równowagi. Charakterystyczne dla tego zespołu jest uczucie wewnętrznego pulsowania, drżenia lub rozedrgania, któremu towarzyszy nerwowość, niepokój, strach, mdłości, ucisk w klatce piersiowej i tachykardia oraz chęć ucieczki lub sprawdzania otoczenia pod kątem bezpieczeństwa.

Podstawą badań Pierpont były skargi 38 osób z 10 rodzin, które mieszkały w odległości 300–1500 m od turbiny lub większej ich liczby w Stanach Zjednoczonych, Wielkiej Brytanii, Irlandii i Kanadzie lub we Włoszech [61]. W kilku publikacjach zwrócono uwagę, że procedura selekcji Pierpont polegała na znalezieniu osób, które cierpią najbardziej i nie udowodniono, że to rzeczywiście obecność turbiny wiatrowej / turbin wiatrowych jest przyczyną tych objawów. Tymczasem zauważono, że objawy zespołu są typowymi objawami stresu w zaburzeniach adaptacyjnych, panicznych i lękowych uogólnionych. Zespół turbiny wiatrowej może więc nie być nowym zjawiskiem, ale wyrazem stresu, jaki odczuwają ludzie, który może mieć związek z ich obawami lub dokuczliwością przypisywaną istniejącej lub planowanej farmy wiatrowej [62].

Salt i Hullar [63] przedstawili kilka możliwych mechanizmów, poprzez które infradźwięki i HNcz poniżej progu słyszenia mogą wpływać na funkcjonowanie ucha wewnętrznego i prowadzić do stymulacji neuronalnej, która może – ale nie musi – być odbierana jako dźwięk.

Z kolei zdaniem Salta i Kaltenbacha [64] normalny słuch jest wynikiem działania komórek słuchowych w uchu wewnętrznym przesyłających sygnały elektryczne do mózgu w odpowiedzi na odbierany dźwięk. Infradźwięki i dźwięki niskiej częstotliwości (do 100 Hz) mogą również przesyłać sygnały z zewnętrznych komórek słuchowych, a próg tego zjawiska jest niższy niż w przypadku wewnętrznych komórek słuchowych. Oznacza to, że niesłyszalne poziomy infradźwięków i HNcz mogą także wywoływać reakcję. W przypadku zewnętrznych komórek słuchowych wartości progów dla 10 Hz i 20 Hz wynoszą, odpowiednio, 48 dB i 60 dB. Poziomy infradźwięki powodowane przez turbiny wiatrowe mogą po prostu przekroczyć te wartości progowe. Na tej podstawie wnioskowano, że możliwy jest wpływ tych infradźwięków na zdrowie i samopoczucie ludzi mieszkających w pobliżu. Nie jest jednak jasne, do jakich reakcji prowadziłyby te sygnały i czy mogłyby być szkodliwe, jeśli tylko przekraczają wartość progową dla zewnętrznych komórek słuchowych.

Idąc tropem Salta i Kaltenbacha [64], jeśli taki niesłyszalny dźwięk mógłby mieć znaczenie, to nie jest jasne, dlaczego nigdy nie zaobserwowano tego w przypadku codziennych źródeł (innych niż turbiny wiatrowe), które wytwarzają infradźwięków i HNcz, takie jak silne wiatry, środki transportu oraz ruch drogowy i lotniczy lub w przypadku infradźwięków fizjologicznych związanych z biciem serca, przepływem krwi itp.

Tymczasem zdaniem Leventhalla [65] normalne zmiany ciśnienia w organizmie, związane z biciem serca i oddychaniem, skutkują wyższym poziomem infradźwięków w uchu wewnętrznym niż w przypadku turbin wiatrowych.

## WNIOSKI

- Mimo, że zainteresowanie infradźwiękami i HNcz trwa od ponad połowy wieku, to w tym czasie przeprowadzono bardzo niewiele badań epidemiologicznych poświęconych ich wpływowi na zdrowie i samopoczucie ludzi.
- Głównym skutkiem ekspozycji na HNcz o poziomach spotykanych na co dzień w domu i pracy jest dokuczliwość.
- Hałas niskoczęstotliwościowy wywołuje inne niż hałas bez dominującego udziału niskich częstotliwości subiektywne odczucia i często jest oceniany jako dokuczliwszy, a wrażliwość na hałas jest jednym z czynników różnicujących subiektywny odbiór tego rodzaju hałasu.
- Niezbyt liczne badania epidemiologiczne, głównie przekrojowe, wskazują na związek pomiędzy HNcz a różnymi reakcjami fizjologicznymi i psychologicznymi, w tym gorszą jakością snu i problemami z koncentracją uwagi.
- Wraz z rozwojem energetyki wiatrowej pojawiły się sugestie, że to infradźwięki i HNcz są odpowiedzialne za złe samopoczucie i niekorzystne skutki zdrowotne. Dowody naukowe na poparcie tezy o szkodliwości HNcz i infradźwięków są jednak nieliczne. Poziomy infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe są porównywalne z poziomem dźwięków powstających wewnątrz ciała.
- Nie ma także niepodważalnych podstaw, aby powiązać chorobę wibroakustyczną i zespół turbiny wiatrowej z ekspozycją na infradźwięki towarzyszące pracy turbin wiatrowych.
- Z ostatnich badań nad możliwym oddziaływaniem słyszalnych infradźwięków i HNcz wynika,

że przyczyną większej dokuczliwości przypisywanej HTW może być całkowity poziom dźwięku turbiny wiatrowej i MA, a nie infradźwięki.

- Konieczne są więc dalsze badania zanim zostaną sformułowane wiążące wnioski dotyczące wpływu infradźwięków i HNCz na zdrowie i samopoczucie człowieka.

#### Wkład autorów

**Koncepcja badań:** Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska, Alicja Bortkiewicz

**Metodyka badań:** Alicja Bortkiewicz

**Zbieranie materiału:** Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska, Adam Dudarewicz, Iryna Myshchenko

**Interpretacja wyników:** Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska, Alicja Bortkiewicz

**Piśmiennictwo:** Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska, Adam Dudarewicz, Iryna Myshchenko

#### PIŚMIENICTWO

1. Moller H. Physiological and psychological effects of infrasound on humans. *J L F Noise Vib.* 1984;3(1):1–17.
2. Pawlaczyk-Łuszczynska M, Dudarewicz A, Myshchenko I, Bortkiewicz A. Wpływ infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na zdrowie i samopoczucie człowieka. Część I: Przegląd badań eksperymentalnych. *Med Pr.* 2023;7(4):317–32. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.01354>
3. Landstrom U. Human exposure to infrasound. In: Cheremisinoff PN, editor. *Encyclopedia of Environmental Control Technology. Vol. 7. High Hazard Pollutans.* Gulf Publication, Huston 1995, p. 431–53.
4. Berglund B, Hassmen P, Job RF. Sources and effects of low-frequency noise. *J Acoust Soc Am.* 1996;99(5):2985–3002.
5. Leventhall HG. Low frequency noise and annoyance. *Noise Health,* 2004;6(23):59–72.
6. Wayne KP. Noise and health — Effects of low frequency noise and vibrations: environmental and occupational perspectives, In: Nriag JO, editor. *Encyclopedia of Environmental Health, Chapter: Vol. 2, Burlington,* 2011. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00245-2>.
7. Araújo Alves J, Neto Paiva F, Torres Silva L, Remoaldo P. Low-frequency noise and its main effects on human health – A review of the literature between 2016 and 2019. *Appl Sci.* 2020; 10(15):5205. <https://doi.org/10.3390/app10155205>.
8. Borsky PN. Sonic boom exposure effects II.4: Annoyance reactions. *J Sound Vib.* 1972;20:527–30. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90676-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90676-1).
9. Landstrom U, Kjellberg A, Soderberg L. Spectral character, exposure levels and adverse effects of ventilation noise in offices. *J Low Freq Noise Vib.* 1991;10(3):83–91.
10. Persson Wayne K. On the effects of environmental low frequency noise [PhD dissertation]. Gothenburg: Sweden University, 1995.
11. Ohrstrom E, Bjorkman M, Rylander R. Noise annoyance with regard to neurophysiological sensitivity and personality variables. *Psychol Med.* 1988;18:605–13.
12. Landstrom U, Kjellberg A, Soderberg L. Noise annoyance at different times of the working day. In: Tempest W, editor. *Proceedings of the 8th International Meeting on Low Frequency Noise & Vibration, 3–5 June 1997, Gothenburg, Sweden.* A Multi-Science Publication 1997, p. 53–61.
13. Kjellberg A, Goldstein M, Gamberale F. An assessment of dB(A) for predicting loudness and annoyance of noise containing low frequency components. *J Low Freq Noise Vib.* 1984;4(1):10–16.
14. Kjellberg A, Goldstein M. Loudness assessment of band noise of varying bandwidth and spectral shape. An evaluation of various frequency networks. *J Low Freq Noise Vib.* 1985;4(1):12–26.
15. Persson K, Bjorkman M, Rylander R. Loudness, annoyance and dBA in evaluating low frequency sounds. *J Low Freq Noise Vib.* 1990;9(1):32–45.
16. Vercammen MLS. Low frequency noise limits. *J Low Freq Noise Vib.* 1992;11(1):7–13.
17. Berglund B, Lindvall T, Schwella D, Goh KT. *Guidelines for Community Noise.* WHO, Geneva 2000.
18. Pawlaczyk-Łuszczynska M, Dudarewicz A, Waszkowska M, Śliwińska-Kowalska M. Annoyance related to low frequency noise in subjective assessment of workers. *J Low Freq Noise Vib Act Control.* 2009;28:1-17.
19. Boyle MD, Soneja SI, Quirós-Alcalá L, Dalemarre L, Sapkota AR, Sangaramoorthy T, et al. A pilot study to assess residential noise exposure near natural gas compressor stations. *PLoS ONE* 2017, 12, e0174310.
20. Huang B, Pan Z, Liu Z, Hou G, Yang H. Acoustic amenity analysis for high-rise building along urban expressway: Modelling traffic noise vertical propagation using neural networks. *Transp Res Part. D Transp. Environ.* 2017;53:63–77.
21. Van Kamp I, Breugelmans O, Van Poll R, Baliatsas C, Van Kempen, E. Determinants of annoyance from humming sound as indicator of low frequency noise. In: *Proceedings of ACOUSTICS 2017, Perth: Sound, Science and Society—2017 Annual Conference of the Australian Acoustical Society AAS, Perth, Australia, 19–22 November 2017;* p. 1–7.
22. Blair BD, Brindley S, Dinkeloo E, McKenzie LM, Adgate JL. Residential noise from nearby oil and gas well

- construction and drilling. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2018;28:538–47.
23. Tao Z, Wang Y, Zou C; Li Q, Luo Y. Assessment of ventilation noise impact from metro depot with over-track platform structure on workers and nearby inhabitants. *Environ Sci Pollut Res*. 2019;26:9203–18.
24. Alves J, Silva LT, Remoaldo P. How Can low-frequency noise exposure interact with the well-being of a population? Some results from a Portuguese municipality. *Appl Sci*. 2019;9:5566.
25. Pohl J; Gabriel J, Hübner G. Understanding stress effects of wind turbine noise – The integrated approach. *Energy Policy*. 2018;112:119–28.
26. Hansen KL, Nguyen P, Zajamšek B, Catcheside P, Hansen CH. Prevalence of wind farm amplitude modulation at long-range residential locations. *J. Sound Vib*. 2019;455:136–49.
27. Waye KP. Effects of low frequency noise on sleep. *Noise Health*. 2004;6:87–91. <https://doi.org/https://www.noiseandhealth.org/text.asp?2004/6/23/87/31661>.
28. Moller H, Lydolf M. A questionnaire survey of complaints of infrasound and low-frequency noise. *J Low Freq Noise Vibr Act Control*. 2002;21:53–64.
29. Verzini AM, Frassoni CA, Skarp AHO. A field research about effects of low frequency noises on man. *Acta Acustica*. 1999;85:S16.
30. Persson Waye K, Rylander R. The extent of annoyance and long term effects among persons exposed to LFN in the home environment. *J Sound Vib*. 2001;240:483–97.
31. Mirowska M. An investigation and assessment of annoyance of low frequency noise in dwellings. *J Low Freq Noise Vib*. 1998;17:119–26.
32. Persson Waye K, Bengtsson J, Agge A, Bjorkman M. A descriptive cross-sectional study of annoyance due to low frequency noise installations in an urban environment. *Noise Health*. 2003;5(20):35–46.
33. Ising H, Ising M. Chronic cortisol increases in the first half of the night caused by road traffic noise. *Noise Health*. 2002;4:13–21.
34. Abbasi M, Monazzam MR, Zakerian SA, Ebrahimi MH, Dehghan SF, Akbarzadeh A. Assessment of noise effects of wind turbine on the general health of staff at wind farm of Manjil, Iran. *J Low Freq Noise Vib Act Control*. 2016;35:91–8.
35. Ishitake T. Wind turbine noise and health effects. *Nihon Eiseigaku Zasshi*. 2018;73:298–304.
36. Poulsen AH, Raaschou-Nielsen O, Peña A, Hahmann AN, Nordsborg RB, Ketznel M, et al. Impact of long-term exposure to wind turbine noise on redemption of sleep medication and antidepressants: A nationwide cohort study. *Environ Health Perspect*. 2019;127:37005.
37. Babisch W. Traffic noise and cardiovascular disease: Epidemiological review and synthesis. *Noise Health*. 2000;2:9–32.
38. Passchier-Vermeer W, Passchier WF. Noise exposure and public health. *Environ Health Perspect*. 2000;108:123–31.
39. Pawlas K, Boroń M, Zachara J, Szłapa P, Kozłowska A, Będkowska K, et al. Porównanie efektów zdrowotnych wywołanych zawodową ekspozycją na hałas niskoczęstotliwościowy i hałas słyszalny. *Med Srod*. 2014;17(1):41–51. Polish.
40. Khosravipour M, Khosravi F, Ashtarian H, Rezaei M, Moradi Z, Mohammadi Sarableh H. The effects of exposure to different noise frequency patterns on blood pressure components and hypertension. *Int Arch Occup Environ Health*. 2020;93(8):975–82. <https://doi.org/10.1007/s00420-020-01545-2>.
41. Poulsen AH, Raaschou-Nielsen O, Peña A, Hahmann AN, Nordsborg RB, Ketznel M, et al. Long-term exposure to wind turbine noise and risk for myocardial infarction and stroke: A nationwide cohort study. *Environ Health Perspect*. 2019;2019:37004.
42. Chiu CH, Lung SCC, Chen N, Hwang J-S, Mark M-C. Effects of low-frequency noise from wind turbines on heart rate variability in healthy individuals. *Sci Rep*. 2021; 11:17817. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97107-8>.
43. Møller H, Pedersen CS. Low-frequency noise from large wind turbines. *J Acoust Soc Am*. 2011;129(6):3727–44.
44. Berger RG, Ashtiani P, Ollson CA, Aslund MW, McCallum LC, Leventhall G, et al. Health-based audible noise guidelines account for infrasound and low-frequency noise produced by wind turbines. *Front Public Health*. 2015;3:31.
45. Søndergaard B. Low frequency noise from wind turbines: Do the Danish regulations have any impact? An analysis of noise measurements. *Int J Aeroacoust*. 2015;14(5–6): 909–15. <https://doi.org/10.1260/1475-472X.14.5-6.909>.
46. Turunen AW, Tiittanen P, Yli-Tuomi T, Taimisto P, Lanki T. Symptoms intuitively associated with wind turbine infrasound. *Environ Res*. 2021;192:110360. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110360>.
47. Turunen AW, Tiittanen P, Yli-Tuomi T, Taimisto P, Lanki T. Self-reported health in the vicinity of five wind power production areas in Finland. *Environ Int*. 2021;151:106419. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106419>.
48. Fecci R, Barthelemy R, Bourgoin J, Mathias A, Eberle H, Moutel A, et al. L'action des infra-sons sur l'organisme. *La Medicina de Lavoro*. 1971;62:2-3:130–50. French.
49. ISO 226:2003 Acoustics – Normal equal-loudness-level contours. International Organization for Standardization, Geneva, 2003.

50. ISO 389-7:2005 Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
51. ISO 28961:2012 Acoustics – Statistical distribution of hearing thresholds of otologically normal persons in the age range from 18 years to 25 years under free-field listening conditions. International Organization for Standardization, Geneva, 2012.
52. Watanabe T, Møller H. Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field. *J Low Freq Noise Vib Act Control*. 1990; 9(3):106–15. <https://doi.org/10.1177/026309239000900303>.
53. Møller H, Pedersen CS. Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health*. 2004;6:37–57.
54. Kurakata K, Mizunami T. The statistical distribution of normal hearing thresholds for low-frequency tones. *J Low Freq Noise Vib Act Control*. 2008;27(2):97–104.
55. Kurakata K, Mizunami T, Sato H, Inukai Y. Effect of ageing on hearing thresholds in the low frequency region. *J Low Freq Noise Vib Act Control*. 2008;27(3):175–84.
56. Doroshenko P N, Stepchuk ID. Health related assessment of combined effect of infrasound and low frequency noise on the acoustic and vestibular analyser of compressor operators. *Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniya*. 1983;1:35–8. [English translation in *Noise and Vibration Bulletin*. 1983;192–4].
57. Selander J, Albin M, Rosenhall U, Rylander L, Lewné M, Gustavsson P. Maternal occupational exposure to noise during pregnancy and hearing dysfunction in children: A nationwide prospective cohort study in Sweden. *Environ Health Perspect*. 2016;124:855–60.
58. Nguyen PD, Hansen KL, Lechat B, Hansen C, Catcheside P, Zajamsek B. Audibility of wind farm infrasound and amplitude modulated tonal noise at long-range locations. *Appl Acoust*. 2022;201:09106. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109106>.
59. Castelo Branco NAA, Rodriguez E. The vibroacoustic disease — an emerging pathology. *Aviat Space Environ Med*. 1999;70(3, Part 2):A1–6.
60. Pierpont N. Wind Turbine Syndrome: A Report on a Natural Experiment. K-Selected Books, Santa Fe 2009.
61. Alves-Pereira M, Branco NA. Vibroacoustic disease: biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling. *Prog Biophys Mol Biol*. 2007;93(1):256–79.
62. van Kamp I, van der Berg F. Health effects related to wind turbine sound, including low-frequency sound and infrasound. *Acoust Aust*. 2018; 46:31–57.
63. Salt AN, Hullar TE. Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hear Res*. 2010; 268(1–2):12–21. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2010.06.007>.
64. Salt AN, Kaltenbach JA. Infrasound from wind turbines could affect humans. *Bull Sci Technol Soc*. 2011;31(4): 296–302.
65. Leventhall G. What is infrasound? *Prog Biophys Mol Biol*. 2007;93(1-3):130–7. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.006>.