

WPŁYW INFRADŹWIĘKÓW I HAŁASU NISKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO NA ZDROWIE I SAMOPOCZUCIE CZŁOWIEKA. CZĘŚĆ I: PRZEGLĄD BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

IMPACT OF INFRASOUND AND LOW FREQUENCY NOISE
ON HUMAN HEALTH AND WELL-BEING.
PART I: REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES

Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczynska¹, Adam Dudarewicz¹, Iryna Myshchenko², Alicja Bortkiewicz³

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

² 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

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

STRESZCZENIE

Praca podsumowuje dostępną wiedzę na temat wpływu infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego (HNcz) na zdrowie i samopoczucie ludzi. Podstawą narracyjnego przeglądu piśmiennictwa były wybrane, głównie recenzowane prace badawcze, artykuły poglądowe oraz metaanalizy opublikowane w latach 1973–2022. Uwagę skoncentrowano na wynikach badań eksperymentalnych dotyczących percepcji infradźwięków oraz przypisywanej im i hałasowi niskoczęstotliwościowemu dokuczliwości, a także ich wpływowi na układ sercowo-naczyniowy i zaburzenia snu. Szczególną uwagę poświęcono także ostatnim wynikom badań i specyficznym źródłom infradźwięków i HNcz, tj. turbinom wiatrowym. Med Pr Work Health Saf. 2023;74(4):317–32.

Słowa kluczowe: infradźwięki, hałas niskoczęstotliwościowy, ekspozycja zawodowa i środowiskowa, badania eksperymentalne, skutki słuchowe, skutki pozasłuchowe

ABSTRACT

This paper summarizes the currently available knowledge on the impact of infrasound 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 1973–2022. It has been focused on infrasound perception, annoyance attributed to infrasound and low-frequency noise, as well as their effects on the cardiovascular system and sleep disorders. Particular attention was also paid to the latest research results and specific sources of infrasound and LFN, i.e., wind turbines. Med Pr Work Health Saf. 2023;74(4):317–32.

Key words: infrasound, low-frequency noise, occupational and environmental exposure, experimental studies, auditory effects, non-auditory effects

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: 14 lutego 2023, zatwierdzono: 12 września 2023

WSTĘP

Infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy (HNcz) są zjawiskami dość powszechnymi zarówno w środowisku pracy, jak i w środowisku komunalnym. Ich źródłem są niektóre maszyny i urządzenia przemysłowe (np. sprężarki, kotły energetyczne, piece hutnicze, wentylatory, transformatory), turbiny wiatrowe, środki transportu oraz urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne. Obecność infradźwięków i HNcz w budynkach mieszkalnych, pomieszczeniach biurowych i laboratoryjnych oraz przemysłowych pomieszczeniach sterowniczych i kabinach dyspozytorskich jest w znacznej mierze uwarunkowana obecnością zewnętrznych źródeł hałasu i niewystarczającym tłumieniem niskich częstotliwości przez ściany, podłogi i okna, a także stosowaniem urządzeń wentylacyjno-klimatyzacyjnych i sprzętu informacyjnego [1–3].

Z fizycznego punktu widzenia infradźwięki to fale akustyczne o częstotliwościach 0,1–20 Hz, natomiast w świetle normy PN-ISO 7196:2002 to dźwięki lub hałas o widmie 1–20 Hz [4]. Pojęcie „hałas niskoczęstotliwościowy” odnosi się do hałasu, w którego widmie występują zarówno składowe infradźwiękowe (<20 Hz), jak i niskie słyszalne (≥ 20 Hz). Górna i dolna granica zakresu częstotliwości nie są jednoznacznie określone ze względu na brak międzynarodowych ustaleń normatywnych. Zwykle przyjmuje się, że HNcz to hałas, w którego widmie dominują składowe z przedziału częstotliwości 10–250 Hz [5], jednak często wyraźnie oddziela się HNcz od infradźwięków (1–20 Hz) – wówczas przypisywany mu zakres częstotliwości ogranicza się do pasm 20–200 Hz [2] lub 20–500 Hz [6].

Przy identyfikacji HNcz znajduje zastosowanie tzw. wskaźnik oceny widma, czyli różnica pomiędzy poziomem dźwięku C i A ($L_C - L_A$). Im wyższa wartość tej różnicy, tym większy udział składowych niskoczęstotliwościowych w widmie hałasu. Zwykle przyjmuje się, że wskaźnik oceny widma > 15 dB jest wyróżnikiem HNcz [2].

Cechą charakterystyczną infradźwięków i HNcz są znaczne długości fal (od 1,4 m dla 250 Hz do 34 m dla 10 Hz), dzięki czemu mogą się one swobodnie rozprzestrzeniać na znaczne odległości, są słabo tłumione przez przegrody (ściany, sufity, okna i podłogi) i z łatwością przenikają do pomieszczeń. Co więcej, zwłaszcza HNcz może ulegać wzmocnieniu wskutek zjawiska rezonansu pomieszczeń i elementów konstrukcyjnych budynków [3,5].

Pierwszy eksperyment dotyczący infradźwięków przeprowadzono na początku XX w. (1907 r.) – polegał

na wyznaczeniu ich progu słyszenia dla częstotliwości 12–30 Hz za pomocą specjalnego kamertonu [7]. Jednakże prawdziwe zainteresowanie wpływem infradźwięków i dźwięków niskiej częstotliwości na zdrowie i samopoczucie człowieka zaczęło się na przełomie lat 60. XX w. wraz z rozpoczęciem badań związanych z realizacją amerykańskiego programu kosmicznego Apollo [1,5]. Pierwsze prace badawcze dotyczyły skutków ekspozycji na bardzo wysokie poziomy ciśnienia akustycznego (140–150 dB) i były ukierunkowane na zweryfikowanie ich potencjalnego szkodliwego działania.

W kolejnych latach zaczęto analizować wpływ infradźwięków i HNcz o umiarkowanych i niskich poziomach spotykanych w rzeczywistych warunkach w miejscu pracy i zamieszkania ludzi – w ostatnich ok. 10 latach, w związku z rozwojem energetyki wiatrowej i nieustającymi obawami ludzi o potencjalny wpływ turbin wiatrowych na zdrowie i samopoczucie, nastąpił ponowny wzrost zainteresowania infradźwiękami i HNcz [8].

Ostatni polski przegląd piśmiennictwa dotyczący oddziaływania infradźwięków i HNcz opublikowany został w 2009 r. [9]. W związku z rozwojem badań na ten temat przygotowany został niniejszy przegląd narracyjny, który podsumowuje dostępną wiedzę o wpływie infradźwięków i HNcz na zdrowie i samopoczucie ludzi. Ze względu na znaczną liczbę prac i różne modele stosowanych badań przegląd podzielony został na 2 części. W pierwszej omówiono badania eksperymentalne, w drugiej – badania epidemiologiczne.

METODY PRZEGLĄDU

Podstawę tego narracyjnego przeglądu piśmiennictwa stanowiły wybrane, głównie recenzowane, prace badawcze, artykuły poglądowe oraz metaanalizy opublikowane w latach 1973–2022. Uwzględniono w nim ponadto pełne teksty doniesień konferencyjnych publikowane w materiałach pokonferencyjnych.

Analizie poddano 386 publikacji w językach polskim i angielskim z baz Web of Science i Pubmed, wybranych na podstawie słów kluczowych: „infrasound”, „low frequency noise”, „health effects”, „annoyance”, „cardiovascular system”, „sleep disturbances”, z których ostatecznie uwzględniono 69 publikacji.

Uwagę skoncentrowano na percepcji infradźwięków, dokuczliwości przypisywanej im i HNcz, a także ich wpływowi na układ sercowo-naczyniowy oraz zaburzenia snu i samopoczucie. Szczególną uwagę poświęcono ostatnim wynikom badań oraz infradźwiękom i HNcz towarzyszącemu pracy turbin wiatrowych.

WYNIKI PRZEGLĄDU

Percepcja infradźwięków i skutki słuchowe

Najbardziej powszechnym błędnym wyobrażeniem dotyczącym infradźwięków jest założenie, że nie są słyszalne, choć tezę tę zweryfikowano już w latach 30. XX w. Percepcja infradźwięków polega na słyszeniu oraz odczuwaniu drgań. Progi percepcji słuchowej infradźwięków gwałtownie wzrastają wraz ze spadkiem częstotliwości, np. od 65 dB dla 32 Hz do 95 dB dla 16 Hz, 100 dB dla 3 Hz i 140 dB dla 1 Hz. Stwierdza się przy tym różnice między odbiorem tonów a szumu pasmowego, a także znaczną zmienność osobniczą progów słyszenia, zwłaszcza w zakresie niższych częstotliwości [1,3,10–12]. Progi percepcji drganiowej w zakresie częstotliwości infradźwiękowych są ok. 20–40 dB wyższe od progów percepcji słuchowej infradźwięków, a mechanizm odczuwania drgań jest taki sam jak odbioru drgań wywołanych mechanicznie [11,12]. Najistotniejsze znaczenie w percepcji mają proprioreceptory w mięśniach, ścięgnach i stawach oraz mechanoreceptory w skórze [7].

Infradźwięki i HNCz są zwykle opisywane jako „pulsujące”, „buczące” lub „dudniące”, a ekspozycji na nie często towarzyszą subiektywne odczucia: bóle głowy, nadmierne zmęczenie, uczucie rozdrażnienia, niepokój, stres, problemy z koncentracją, mdłości, zawroty głowy, uczucie pulsowania w uszach lub ucisku na błonę bębenkową. Ten ostatni objaw jest jednym z charakterystycznych skutków ekspozycji na infradźwięki i HNCz [1–3,14–16].

Badania doświadczalne z udziałem ochotników wykazały, że uczucie bezbolesnego ucisku na błonę bębenkową w przypadku ekspozycji na infradźwięki pojawia się przy poziomach 127–132 dB. Efekt ten uwidacznia się krótko po rozpoczęciu ekspozycji i utrzymuje się zarówno w jej trakcie, jak i przez pewien czas po jej zakończeniu. W przypadku wyższych częstotliwości (>20 Hz) łagodniejsza postać tego uczucia występuje już przy znacznie niższych poziomach ciśnienia akustycznego [1,2,17].

Inne niekorzystne skutki słuchowe związane z ekspozycją na infradźwięki, takie jak czasowe przesunięcie progu słuchu (*temporary threshold shift* – TTS), zakłócenia mowy i ból uszu, pojawiają się przy poziomach o 30–40 dB wyższych od progu percepcji słuchowej [10,18]. Przykładowo, ból uszu wynikający z przemieszczania struktur ucha środkowego pojawia się przy poziomie 140 dB dla częstotliwości 20 Hz i 162 dB dla częstotliwości 2 Hz oraz 175–180 dB dla ciśnienia statycznego [1]. Z kolei TTS w przypadku infradźwięków

występuje przy poziomach >140 dB, a w przypadku dźwięków niskich częstotliwości (pasma oktaawowe 63, 125 i 250 Hz) – przy poziomie 84–90 dB [7,10,18,19]. Najbardziej znaczące przesunięcia stwierdzano w zakresie częstotliwości >1000 Hz, przy czym TTS, zwykle <10 dB, szybko zanikał po zakończeniu ekspozycji [1,3,7].

W przypadku bardzo wysokich poziomów ciśnienia akustycznego infradźwięków możliwe jest uszkodzenie błony bębenkowej. Krótkotrwałe, ciągłe i przerywane ekspozycje szynszylki na infradźwięki o poziomie ciśnienia akustycznego 150–170 dB wywoływały perforację błony bębenkowej oraz liczne zmiany strukturalne w obrębie ucha środkowego i wewnętrznego [10,20]. Natomiast u ludzi poddanych krótkotrwałemu działaniu infradźwięków o ekstremalnych poziomach – 172 dB (1–8 Hz) przez 30 s, 160 dB (8 Hz) przez 1 min i 155 dB (8 Hz) przez 7 min – nie stwierdzono ani uszkodzeń błony bębenkowej, ani ucha środkowego [10]. Jednak w rzeczywistych warunkach narażenia na infradźwięki i HNCz mogły pojawić się uszkodzenia – bliźny na błonie bębenkowej obserwowano u niemieckich marynarzy pływających na łodziach podwodnych podczas II wojny światowej [1].

Subiektywne wrażenia wywoływane przez infradźwięki o umiarkowanych poziomach zmieniają się wraz z ich częstotliwością [21]. Dźwięki o częstotliwościach >20 Hz są opisywane jako gładkie i tonalne, a infradźwięki z przedziału 5–15 Hz – jako szybkie serie trzasków (puknięć); mniej tonalne i bardziej chropowate. Pojedyncze cykle infradźwięków <5 Hz są łatwo rozróżniane i charakteryzowane zwykle jako przypominające warkot silnika. W rzeczywistych warunkach (w miejscu zamieszkania i środowisku pracy) infradźwięki o poziomach ciśnienia akustycznego zbliżonych do progu słuchu rzadko opisuje się jako nieprzyjemne, gdyż są maskowane przez dźwięki o wyższych częstotliwościach.

Progi słyszenia infradźwięków i dźwięków niskiej częstotliwości (DNCz) są badane od ponad 80 lat [12], ale żeby zrozumieć w pełni ich wpływ na człowieka, konieczne jest poznanie mechanizmów ich percepcji. Z tego m.in. powodu w drugiej dekadzie XXI w., w ramach realizacji projektów EARS i EARS II, przeprowadzono serie eksperymentów z zastosowaniem metod fizjologicznych i psychoakustycznych w celu poznania tych mechanizmów [22–24].

Marquardt i Jurado [25] badali percepcję 2 tonów (63 lub 125 Hz) modulowanych amplitudowo tonem infradźwiękowym (8 Hz) albo tonu 8 Hz dodanego do dźwięku niemodulowanego. Zmienność amplitudy

dźwięku modulowanego wynosiła 25% lub 37,5% amplitudy oryginalnego dźwięku. W sumie 400 próbek, każda o czasie trwania 1,2 s, było odtwarzanych wielokrotnie w przypadkowej kolejności. Dwanaście osób z prawidłowym słuchem odpowiadało na pytanie, czy próbki zawierały infradźwięki. Odsetek poprawnych odpowiedzi był przypadkowy, o czym świadczy brak istotnych statystycznie różnic między kombinacjami próbek. Autorzy stwierdzili, że kombinacja tonu wraz z infradźwiękiem o stałej częstotliwości 8 Hz przypomina ton z modulacją amplitudy o częstotliwości 8 Hz.

Celem badań Jurado i wsp. [26] była analiza wpływu szybkości fluktuacji na subiektywny odbiór głośności dźwięków niskoczęstotliwościowych (<100 Hz). Dwadzieścia cztery młode osoby z prawidłowym słuchem poproszono o dopasowanie głośności 3 niemodulowanych tonów (40, 63 lub 80 Hz) do głośności kilku ich kombinacji. Każda z tych kombinacji składała się z dwutonów o częstotliwości zbliżonej do jednego z tych tonów, co prowadziło do wahań amplitudy z częstotliwością równą różnicy częstotliwości obu tonów (1, 2, 5 i 12 Hz). Aby sprawdzić, czy zastosowane metody dawały wyniki porównywalne z wynikami uzyskanymi dla średnich częstotliwości, zastosowano dodatkowo bodziec o częstotliwości 1000 Hz. W efekcie przeprowadzono analizę głośności (dudniących) dwutonów o zmiennej amplitudzie w funkcji częstotliwości fluktuacji (≤ 12 Hz). Wyniki analizy wskazywały, że wpływ fluktuacji dla niższych częstotliwości na głośność był niewielki (≤ 2 dB), co było zgodne z modelami głośności opisanymi w literaturze.

Burke i wsp. [27] podjęli próbę kontroli wpływu obecności dźwięków na próg detekcji infradźwięków i odwrotnie. Testowali to w grupie 13 młodych osób z prawidłowym słuchem, używając tonów infradźwiękowych (5 i 12 Hz) i tonów o wyższej częstotliwości (100 i 1000 Hz) oraz szumu różowego (250–4000 Hz) podawanych monofonicznie oddzielnie i w obecności odpowiedniego innego sygnału. Do wyznaczania progów percepcji stosowano specjalną procedurę – metodę adaptacyjną wymuszonego wyboru (3-AFC). Analiza wyznaczonych w ten sposób progów słyszenia infradźwięków wykazała, że nie miały na nie wpływu dźwięki o poziomie odczuwania +5 dB SL (*sensation level* – poziom odniesiony do indywidualnego progu słyszenia badanej osoby). Natomiast progi te znacznie wzrastały w obecności niektórych bodźców dźwiękowych o umiarkowanym poziomie odczuwania (+50 dB SL). Przykładowo, progi percepcji słuchowej infradźwięków wzrastały średnio o ok. 5 dB, gdy jednocześnie

prezentowany był bodziec w postaci szumu różowego. Z kolei obecność infradźwięków o poziomie odczuwania +10 dB SL, tj. o poziomie ciśnienia akustycznego 109 dB (5 Hz) i 92 dB (12 Hz), nie powodowały istotnej zmiany progów słyszenia dźwięków. Zdaniem autorów może to sugerować, że infradźwięki są bardziej dokuczliwe w cichym otoczeniu.

Natomiast Behler i Uppenkamp [28] analizowali głośność i odczucie nieprzyjemności (dokuczliwości) tonów 8 i 32 Hz, podawanych monofonicznie bezpośrednio do ucha, u 20 osób z prawidłowym słuchem. Każdy uczestnik brał udział w 2 sesjach eksperymentalnych. W pierwszej sesji oceniano stopień głośności i dolegliwości, w drugiej powtarzano procedurę skalowania głośności, jednocześnie mierząc aktywność mózgu za pomocą techniki funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (*functional magnetic resonance imaging* – fMRI). Mierzono także aktywność mózgu podczas odpowiednich bodźców prezentowanych na ustalonych poziomach dostosowanych do indywidualnych ocen głośności. Analiza wyników wskazywała, że w przetwarzanie dźwięków niskiej częstotliwości i infradźwięków były zaangażowane te same obszary mózgu, jak w przypadku typowych dźwięków, tj. głównie pierwotna i wtórna kora słuchowa. Obserwowano dużą zmienność ocen stopnia głośności i nieprzyjemności wśród słuchaczy. Aktywacja kory słuchowej w tym badaniu była silniej skorelowana z indywidualnie postrzeganą głośnością niż z rzeczywistym poziomem ciśnienia akustycznego bodźca.

Przydatność elektroencefalografii (EEG) do pomiaru głośności dźwięków niskoczęstotliwościowych była testowana przez Jurado i Marquardta [29]. Za pomocą techniki nazywanej *frequency following response* (FFR) poprzez elektrody umieszczone na głowie rejestrowano aktywność neuronalną mierzoną w funkcji poziomu dźwięku. W ten sposób u 11 młodych prawidłowo słyszających osób zmierzono reakcję mózgu na stały ton o częstotliwościach 11 lub 38 Hz. W przypadku dźwięku o poziomie odpowiadającym progowi percepcji słuchowej mierzony sygnał FFR był zbliżony do poziomu szumów własnych. Wraz ze wzrostem poziomu głośności sygnał wzrastał, a powyżej niskiego lub średniego poziomu głośności pozostawał na stałym poziomie. Ze względu na duże różnice indywidualne autorzy ustalili, że sygnał FFR nie jest skorelowany z indywidualną percepcją głośności i nie jest użyteczną metodą pomiaru. Stwierdzili jednak, że ton o częstotliwości 11 Hz może u niektórych osób wywoływać reakcję mózgu [29].

Działanie rezonansowe infradźwięków i dźwięków niskiej częstotliwości

Infradźwięki i DNCz (10–75 Hz) mogą wywoływać drgania rezonansowe struktur wewnętrznych organizmu człowieka, np. jamy brzusznej, klatki piersiowej i gardła [10,11]. Podstawowa częstotliwość rezonansowa układu klatka piersiowa–jama brzuszna zawiera się w przedziale 40–60 Hz. W tym zakresie częstotliwości drgania rezonansowe pojawiają się już przy poziomach ciśnienia akustycznego 100–105 dB, ale wyraźne odczuwanie wibrowania w obrębie brzucha i klatki piersiowej ma miejsce przy poziomach znacznie wyższych. Dla zakresu częstotliwości 4–20 Hz wrażenia takie rejestrowano przy poziomach 125–132 dB, a wzrost poziomu ciśnienia akustycznego, zwłaszcza >145 dB, nasilał negatywne odczucia, którym często towarzyszyły silne bóle głowy i objawy przemęczenia [10,29]. Przy poziomach ciśnienia akustycznego 130–150 dB drganiem rezonansowym ścian klatki piersiowej może towarzyszyć modulacja amplitudowa głosu oraz uczucie łaskotania i duszenia w gardle prowadzące do kaszlu. Badania prowadzone w USA w ramach kosmicznych projektów badawczych wykazały, że maksymalne dopuszczalne (krótkotrwałe) ekspozycje niskoczęstotliwościowe (do 100 Hz) wynoszą 140–150 dB, co odpowiada granicy tolerancji wymienionych skutków [10,11,18].

Wywołane wysokimi poziomami infradźwięków drgania klatki piersiowej mogą również prowadzić do zaburzeń oddychania. Zjawisko to było obserwowane w badaniach laboratoryjnych na zwierzętach. Przy poziomie ciśnienia akustycznego 166 dB częstość oddechu uśpionych psów spadała, a przy poziomie 172–173 dB oddech zanikał [10].

Zaburzenia wegetatywne powodowane przez infradźwięki

Niezależnie od drogi działania oprócz specyficznych skutków oddziaływania (słuchowego lub rezonansowego) przy narażeniu na infradźwięki bardzo istotne są objawy świadczące o zaburzeniach wegetatywnych. Obejmują one czynnościowe zaburzenia funkcji układów krążenia, oddechowego, pokarmowego, hormonalnego i nerwowego. Zmiany te nasilają się wraz ze wzrostem poziomu ciśnienia akustycznego. Zgodnie z teorią Grandjeana istnieje ścisła zależność pomiędzy ekspozycją na infradźwięki, ich percepcją oraz skutkami fizjologicznymi i psychologicznymi [30]: poziomy ciśnienia akustycznego muszą być odpowiednio wysokie, aby była możliwa percepcja (słuchowa) indukująca reakcje fizjologiczne [10,30–32].

Hipoteza ta została zweryfikowana doświadczalnie przez Landströma i wsp. [33–36] oraz Danielssona i wsp. [37]. Obniżenie poziomu czuwania (i związane z nim uczucie senności) potwierdzone zmianami ciśnienia tętniczego krwi, zaburzeniami rytmu serca, czynności oddechowej, produkcji niektórych hormonów, obniżeniem wydajności oraz zmianami w zapisie EEG występowały, gdy ekspozycja przekraczała progi percepcji infradźwięków. Fakt, że w analogicznych warunkach nie obserwowano ich u osób głuchych, potwierdzało przyjęte założenie odnośnie do warunku koniecznego do ich wystąpienia.

Obserwowane podczas eksperymentów skutki ekspozycji na umiarkowane poziomy infradźwięków często wskazywały na ogólne pogorszenie stanu psychofizycznego. Obniżenia stanu czuwania i powiązanych z nimi zmian czynnościowych prawdopodobnie nie można traktować jako zjawiska odizolowanego. Należy je raczej rozpatrywać jako wtórne reakcje ze strony ośrodkowego układu nerwowego (OUN), których przyczyną jest ekspozycja na słyszalne infradźwięki [30]. Uważa się, że w procesie tym szczególnie istotny udział ma twór siatkowaty i podwzgórze. Dlatego zmiany czynnościowe przypisuje się nie tylko sygnałom akustycznym o poziomach powyżej progu słyszenia. Reakcje w obrębie OUN (włączając twór siatkowaty, podwzgórze, układ limbiczny i obszary korowe) są prawdopodobnie w istotnym stopniu uwarunkowane cechami hałasu.

Hałas o pewnych częstotliwościach i cechach sprzyja zmęczeniu [7,35]. Odwołując się do wyników badań eksperymentalnych, ton o częstotliwości 6 Hz wydaje się mieć większy wpływ na występowanie zmęczenia w porównaniu z tonem 42 Hz o takiej samej głośności. Natomiast ton 1000 Hz o równej głośności z tonem 6 Hz wywołuje efekt ożywienia. Widocznie zmęczenie wzrasta wraz ze spadkiem częstotliwości, a stres wraz z jej wzrostem.

Dokuczliwość infradźwięków

Powołując się na rezultaty badań eksperymentalnych Møllera [13], przyjmuje się, że infradźwięki stają się dokuczliwe powyżej progu percepcji słuchowej. Wyznaczone krzywe jednakowej względnej dokuczliwości tonów z zakresu częstotliwości 4–31,5 Hz charakteryzują się silnym zwężaniem zakresu dynamicznego w przedziale niskich częstotliwości, co oznacza, że minimalny wzrost poziomu ciśnienia akustycznego powoduje znaczny wzrost dokuczliwości. Z kolei założymy, że infradźwięki nie są dokuczliwe, gdy nie są ani

słyszalne, ani odczuwalne [30], jako próg dokuczliwości przyjęto krzywą percepcji słuchowej.

Badania laboratoryjne dotyczące wpływu infradźwięków na aktywność człowieka koncentrowały się na analizie zależności pomiędzy dokuczliwością a sprawnością poznawczą i psychomotoryczną. W niektórych eksperymentach obserwowano wydłużenie czasu reakcji, upośledzenie umiejętności określenia upływającego czasu, osłabienie kontroli wzrokowej oraz inne reakcje. Natomiast wyniki innych doświadczeń nie wykazały wpływu infradźwięków na sprawność psychomotoryczną [1].

Badania z udziałem 40 osób eksponowanych przez 15–30 min na infradźwięki o częstotliwości 7 Hz i poziomie 125–132 dB na tle szerokopasmowego hałasu o poziomie 65 dB nie potwierdziły niekorzystnego wpływu infradźwięków na zdolność wykonywania zadań testowych [38]. Z kolei wyniki badań prowadzonych u kierowców samochodów wykazały, że infradźwięki o częstotliwości 2–20 Hz i poziomie ciśnienia akustycznego 115–120 dB powodowały wydłużenie o 30–40% czasu reakcji w teście sprawności psychomotorycznej oraz przyczyniały się do powstawania objawów senności [30]. Zatem wcześniejsze badania nie dawały zgodnych wyników i uniemożliwiały określenie wartości progowych poziomu ciśnienia akustycznego, przy których takie działanie występuje, a nieliczne niekorzystne skutki, pomijając zakłócenie mowy, stwierdzono przy poziomach >140 dB [7,10].

Ostatnio Ralaja i wsp. [39] przeprowadzili w grupie 19 osób z prawidłowym słuchem badania audiologiczne obejmujące wyznaczenie progów słyszenia, krzywych jednakowej głośności i dokuczliwości infradźwięków oraz dźwięków (20–20 000 Hz), a także analizę innych odczuć pozasłuchowych. Okazało się, że wyznaczone przez autorów progi słyszenia w zakresie 4–8000 Hz zgadzały się z wcześniejszymi wynikami, co potwierdziło w ten sposób adekwatność stosowanych metod badań. Z kolei krzywe jednakowej głośności (w zakresie częstotliwości 4–1000 Hz i poziomie głośności 20, 40 i 60 wyrażonego w fonach) charakteryzowały się silnym zwężeniem zakresu dynamicznego w przedziale częstotliwości infradźwiękowych. Przyrost głośności dla 4 Hz o 5 dB odpowiadał przyrostom o 10 i 20 dB, odpowiednio, dla 20 i 1000 Hz. Oznacza to, że nawet niewielka zmiana poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości infradźwiękowych znacząco wpływa na spotręganą głośność.

W podobnym zakresie częstotliwości wyznaczono krzywe jednakowej dokuczliwości, ale dla poziomu

głośności 20, 40 i 50 fonów. Potwierdzono przy tym, że nawet niewielki wzrost poziomu dźwięku przy niskich częstotliwościach może drastycznie zwiększyć odczuwaną dokuczliwość [39].

Zauważono, że tony o częstotliwości >16 Hz i poziomie głośności 60 fonów były bardziej dokuczliwe niż tony infradźwiękowe o takim samym poziomie głośności. Sugeruje to, że infradźwięki niekoniecznie są bardziej dokuczliwe niż dźwięki; człowiek jest po prostu bardziej wrażliwy na zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie infradźwięków. Ponieważ różnice w indywidualnych progach słyszenia sięgają nawet 20 dB, ton infradźwiękowy, który nie jest słyszalny dla jednej osoby, może być odbierany jako głośny lub dokuczliwy dla innej. Obserwacja ta może wyjaśniać, dlaczego niektórzy ludzie uważają DNCz za głośniejsze lub bardziej dokuczliwe niż oceniają to inni.

Inne odczucia (poza słyszeniem), takie jak ucisk w uchu, ból głowy i odczuwanie drgań, stwierdzano nie tylko podczas ekspozycji na infradźwięki. Dlatego wnioskowano, że infradźwięki należy traktować podobnie jak dźwięki z zakresu częstotliwości 20–20 000 Hz [39].

Dokuczliwość hałasu niskoczęstotliwościowego i jego wpływ na senność, rozwój zmęczenia oraz funkcje poznawcze

Większość dotychczasowych badań eksperymentalnych ukierunkowanych na ocenę wpływu HNCz na zdrowie i samopoczucie ludzi dotyczyła subiektywnej oceny jego dokuczliwości, a także związku pomiędzy narażeniem na ten rodzaj hałasu a upośledzeniem procesów poznawczych, wydajnością pracy, trudnościami z koncentracją uwagi, pogorszeniem nastroju, a także rozwojem chorób układu krążenia i zaburzeniami snu [1–3,5,40].

Wcześniejsze eksperymenty laboratoryjne dotyczące wpływu dźwięków niskoczęstotliwościowych na procesy poznawcze nie dawały zgodnych wyników i uniemożliwiały ustalenie wartości progowych hałasu, powyżej których takie działanie występuje [3,7,34]. Tylko nieliczne wyniki badań potwierdzały, że HNCz o poziomach spotykanych w środowisku pracy może powodować upośledzenie funkcji umysłowych człowieka.

Późniejsze badania laboratoryjne przeprowadzone przez Persson Waye i wsp. [41] wykazały, że niskoczęstotliwościowy hałas wentylatorowy o poziomie dźwięku ok. 42 dBA może powodować wydłużenie czasu reakcji w teście werbalnym w porównaniu do hałasu wentylatorowego o takim samym poziomie dźwięku A, ale bez dominującego udziału niskich częstotliwości. Kolejne

badania, stanowiące kontynuację wymienionych, potwierdziły spostrzeżenia, że w warunkach ekspozycji na HNCz o względnie niskich poziomach ciśnienia akustycznego może dochodzić do zaburzeń złożonych procesów umysłowych, a szczególnie predysponowane do ich wystąpienia są osoby o dużej wrażliwości na ten czynnik [42].

W innym eksperymencie w czasie wykonywania zadań podczas ekspozycji na HNCz i hałas referencyjny o poziomie 40 dBA nie stwierdzono ani istotnego statystycznie wpływu rodzaju hałasu, ani indywidualnej wrażliwości (ogólnie na hałas i na HNCz w szczególności) na stężenie kortyzolu w ślinie. Obserwowano natomiast wzrost stężenia kortyzolu u osób wrażliwych ogólnie na hałas podczas ekspozycji na HNCz, co oznaczało, że sytuacja ta była dla badanych bardziej stresująca [43].

W kolejnej pracy ten sam zespół autorów podjął próbę oceny wpływu HNCz na poziom zmęczenia [44]. Założywszy, że zmęczenie wiąże się z pogorszeniem wypełniania zadań wymagających koncentracji uwagi i motywacji, porównywano wpływ HNCz i hałasu referencyjnego na wykonywanie tego typu zadań. Jako hałas referencyjny przyjęto hałas szerokopasmowy, o względnie płaskim widmie, bez dominującego udziału składowych niskoczęstotliwościowych i zbliżonym poziomie dźwięku A jak HNCz. Negatywny wpływ HNCz (w stosunku do hałasu referencyjnego o poziomie 45 dBA) widoczny był w przypadku 2 zadań wymagających koncentracji uwagi, podczas gdy wykonywanie zadań ukierunkowanych na ocenę poziomu motywacji i korektę tekstu nie było uzależnione od warunków ekspozycji na hałas [44].

Podobne wnioski wynikały z badań prowadzonych przez Pawlaczyk-Luszczyńską i wsp. [45]. Wykazały one, że HNCz o umiarkowanym poziomie dźwięku (ok. 50 dBA) może być odbierany jako dokuczliwy i niekorzystnie wpływać na spostrzegawczość, koncentrację i ciągłość uwagi, a w konsekwencji prowadzić do pogorszenia jakości pracy, zwłaszcza u osób o zwiększonej wrażliwości na ten rodzaj hałasu.

Alimohammadi i wsp. [46] również analizowali dokuczliwość HNCz i jego wpływ na sprawność umysłową, ale w kontekście cech osobowości (ekstrawersji i neurotyczności) ocenianych za pomocą *Kwestionariusza Osobowości Eysencka*. W grupie 90 studentów (54 mężczyzn i 36 kobiet) porównywali sprawność procesów poznawczych (mierzonych za pomocą komputerowych testów Stroopa i Cognitrona) w warunkach ciszy (tła akustycznego) oraz ekspozycji na HNCz o poziomie

dźwięku 50 i 70 dBA. Nie wykazano istotnych statystycznie różnic pomiędzy wykonaniem testów w warunkach ekspozycji na HNCz o poziomie 50 i 70 dBA, podczas gdy takie różnice obserwowano w odniesieniu do warunków tła akustycznego. Stwierdzono, że ekspozycja na HNCz w porównaniu z tłem akustycznym wpływała pozytywnie na dokładność i szybkość wykonywania testów ($p < 0,01$). Nie odnotowano związku między dokuczliwością hałasu a wydajnością umysłową. Inrowertycy wykonywali testy szybciej niż ekstrawertycy ($p < 0,05$). Stwierdzono, że neurotyczność nie wpływała w tym badaniu na sprawność umysłową, natomiast sugerowano, że ekstrawersja miała istotny wpływ na sprawność umysłową, a HNCz zwiększał poziom pobudzenia uczestników [46].

Ocena fizjologicznych i psychologicznych skutków ekspozycji na HNCz o poziomach dźwięku A typowych dla pomieszczeń biurowych i dyspozytorskich była celem badań Abbasiego i wsp. [47]. Przeprowadzili badania laboratoryjne z udziałem 35 studentów płci męskiej, eksponowanych na HNCz o poziomach 55, 65, 70 i 75 dBA. Do oceny zdolności poznawczych – pamięci roboczej – zastosowano test *N-wstecz (N-back)* o 3 poziomach obciążenia pamięci, tj. niskim ($N = 1$), średnim ($N = 2$) i wysokim ($N = 3$). Dodatkowo przed każdą ekspozycją i po niej rejestrowano czynność elektryczną serca, mózgu i oczu oraz oceniano zmęczenie psychiczne badanych za pomocą wskaźników psychofizjologicznych i psychicznych, takich jak częstość i zmienność rytmu serca (*heart rate* – HR, *heart rate variability* – HRV), aktywność elektryczna mózgu i pamięć robocza. Wyniki badań wskazywały na znaczne pogorszenie się stanu fizjologicznego i psychicznego przy narażeniu na HNCz o poziomie 65–75 dBA. Stwierdzono, że zmęczenie psychiczne znacząco wpływało na częstość rytmu serca, zmienność rytmu serca wyrażoną indeksem niskiej/wysokiej częstotliwości (*low frequency* – LF / *high frequency* – HF), który opisuje równowagę autonomicznego układu nerwowego (*sympathovagal balance*) oraz czynność elektrofizjologiczną mózgu (parametry fal θ i α), a także na aktywność oczu i pamięć roboczą [47].

Wpływ infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na układ krążenia

Układ sercowo-naczyniowy natychmiast reaguje na zmiany czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Zmienność rytmu serca (HRV) jest czułym markerem zmian fizjologicznych, a jej parametry trafnie opisują stopień adaptacji organizmu; mają także znaczenie

prognostyczne oraz mogą dostarczyć informacji na temat patomechanizmu działania hałasu.

Wcześniejsze badania nad wpływem infradźwięków o częstotliwościach 6, 12 i 16 Hz oraz poziomach, odpowiednio, równych 95, 110 i 125 dB na ciśnienie krwi, częstość tętna i poziom kortyzolu we krwi, wykazały wzrost ciśnienia skurczowego i zmniejszenie ciśnienia rozkurczowego przy braku zmian częstości tętna. Wyniki te sugerowały, że infradźwięki indukują zwężenie naczyń obwodowych, co objawia się wzrostem ciśnienia krwi i w przypadku długotrwałej ekspozycji zawodowej może skutkować rozwojem nadciśnienia samoistnego u osób predysponowanych [37].

Walker i wsp. [48] analizowali zmienność rytmu serca i markery stresu u osób narażonych na HNcz o poziomie dźwięku 75 dBA. Autorzy ci odnotowali obniżenie całkowitej zmienności rytmu serca wyrażonej jako odchylenie standardowe od średniej ze wszystkich odstępów R-R rytmu zatokowego (*standard deviation of normal to normal* – SDNN) o 16%. Zaobserwowali także zmniejszenie mocy widma – w zakresie HF, która jest wskaźnikiem aktywności przede wszystkim przywspółczulnej części autonomicznego układu nerwowego o 32% oraz mocy widma w zakresie LF obrazującej aktywność układu współczulnego, modulowanej wpływem układu przywspółczulnego, o 34%. Natomiast podczas ekspozycji na hałas wysokoczęstotliwościowy, w porównaniu do warunków kontrolnych, bez ekspozycji, stwierdzono obniżenie mocy widma LF o 21%. Zmiany w zakresie parametrów HRV wynikające z ekspozycji na HNcz miały tendencję do utrzymywania się. Uzyskane wyniki świadczą o depresyjnym działaniu hałasu, zwłaszcza niskoczęstotliwościowego, na autonomiczny układ nerwowy. Natomiast nie wskazują na istotne zmiany ani ciśnienia tętniczego, ani stężenia kortyzolu i amylazy w ślinie w związku z ekspozycją na HNcz. Autorzy wnioskowali, że HNcz wywiera znacznie bardziej negatywny wpływ na odpowiedź sercowo-naczyniową w porównaniu z ekspozycją na hałas o wysokiej częstotliwości [48].

Rossi i wsp. [49] analizowali wpływ warunków akustycznych na zmienność rytmu serca i procesy poznawcze oceniane za pomocą testu Stroopa. Porównywano rezultaty osiągnięte w czterech różnych warunkach akustycznych: w ciszy (tj. tła akustycznego) oraz ekspozycji na hałas szerokopasmowy, hałas niskoczęstotliwościowy bez modulacji amplitudy i z modulacją amplitudy. Okazało się, że uczestnicy osiągnęli krótszy czas reakcji w każdym z 3 warunków hałasowych w porównaniu z warunkami ciszy, co wskazywało na

rosnący stres. Dzielic grupę uczestników na ekstrawertyków i introwertyków, wykazano, że HNcz w porównaniu z hałasem szerokopasmowym wywoływał silniejszy stres u introwertyków, ale nie miał wpływu na ekstrawertyków. Ponadto częstość rytmu serca u introwertyków znacznie wzrastała podczas wykonywania testu w porównaniu do stanu ciszy, podczas gdy u ekstrawertyków nie stwierdzono żadnych zmian [49].

Wpływ hałasu niskoczęstotliwościowego na jakość snu

Hałas niskoczęstotliwościowy ze względu na słabe tłumienie przez ściany, okna i inne elementy konstrukcyjne budynków rozchodzi się na znaczne odległości – w konsekwencji wiele osób może być ekspozycyjnych na ten rodzaj hałasu w swoich mieszkaniach. A ten z kolei może niekorzystnie wpływać na jakość snu, powodując kłopoty z zasypianiem i poranne zmęczenie, co znajduje potwierdzenie w wynikach badań laboratoryjnych z udziałem ochotników [50].

We wczesnym badaniu przeprowadzonym przez Inabę i Okadę [51] 6 osób poddano ekspozycji na tony o częstotliwości 10, 20, 40 i 63 Hz i poziomie dźwięku 75–105 dB oraz 40 i 63 Hz i poziomie 50–100 dB. Nie stwierdzono istotnych różnic między nocami z opisanymi ekspozycjami na hałas a nocami kontrolnymi (tj. bez narażenia na hałas) w zakresie wskaźnika efektywności snu (czas snu / przebywania w łóżku), liczby zmian fazy snu lub zmian w proporcji każdej fazy snu ocenianej na podstawie zapisów EEG.

Wpływ nocnej ekspozycji na hałas komunikacyjny i niskoczęstotliwościowy hałas wentylacyjny na kortyzolową odpowiedź na przebudzenie i subiektywną ocenę jakości snu był analizowany przez Persson Waye i wsp. [52] w badaniu laboratoryjnym z udziałem 12 mężczyzn. Po jednej nocy adaptacyjnej i jednej referencyjnej uczestnicy byli narażeni przez 3 kolejne dni naprzemiennie na hałas komunikacyjny ($L_{Aeq} = 35$ dB, $L_{Amax} = 50$ dB) lub HNcz ($L_{Aeq} = 40$ dB) z dodatkową nocą referencyjną pomiędzy nimi.

Noc adaptacyjna miała na celu przyzwyczajenie uczestników do warunków badań laboratoryjnych i była wyłączona z analizy. Podczas nocy referencyjnej (tj. bez narażenia na hałas) i nocy adaptacyjnej uczestnicy spali w warunkach tła akustycznego, powodowanego przez wentylację, o poziomie 24 dBA, który był niższy od normalnego proggu słyszenia w zakresie częstotliwości <160 Hz.

Stężenie wolnego kortyzolu w ślinie oznaczano w próbkach pobranych bezpośrednio po przebudzeniu

oraz w trzech 15-minutowych odstępach po przebudzeniu. Stwierdzono osłabienie odpowiedzi kortyzolowej na przebudzenie (w 30 min) po ekspozycji na HNCz, natomiast odpowiedź po narażeniu na hałas komunikacyjny była umiarkowanie osłabiona i nie różniła się znacząco od cichych nocy referencyjnych. W porównaniu z nocą referencyjną badani potrzebowali więcej czasu, aby zasnąć podczas ekspozycji na HNCz, natomiast ekspozycja na hałas komunikacyjny wywoływała większe rozdrażnienie rano. Niższe poziomy kortyzolu w 30 min po przebudzeniu wiązały się z gorszym nastrojem rano po ekspozycji na HNCz, a także gorszą samooceną jakości snu po ekspozycji na hałas drogowy [52].

Celem badań przeprowadzonych przez Ohrstroma i Skanberga [53] była analiza wpływu różnych rodzajów hałasu, tj. hałasu drogowego ($L_{Aeq} = 39$ dB, $L_{Amax} = 55$ dB), niskoczęstotliwościowego hałasu wentylacyjnego ($L_{Aeq} = 40$ dB) oraz równoczesnej ekspozycji na oba rodzaje hałasów na sen w porównaniu z warunkami referencyjnymi (bez narażenia na hałas). Jakość snu 18 uczestników badań oceniano za pomocą aktygrafu nadgarstkowego i kwestionariuszy.

Wyniki badań aktygraficznych nie wykazały różnic między nocami referencyjnymi (tj. bez narażenia na hałas) a nocami z hałasem drogowym lub łączną ekspozycją na hałas wentylacyjny i drogowy. Stwierdzono natomiast mniejszą liczbę epizodów czuwania, dłuższe średnie epizody snu oraz mniejszą liczbę epizodów snu podczas nocy z hałasem wentylacyjnym w porównaniu z nocą referencyjną. W przeciwieństwie do danych uzyskanych z aktygrafii subiektywne oceny wykazały istotne pogorszenie jakości snu w przypadku wszystkich ekspozycji na hałas, w tym na niskoczęstotliwościowy hałas wentylacyjny. Subiektywna ocena jakości snu była o 22% gorsza podczas narażenia na hałas drogowy w porównaniu do nocy referencyjnej. Równoczesna ekspozycja na hałas wentylacyjny i drogowy powodowała więcej przebudzeń, gorszą jakość snu (o 25%) zgłaszanych w kwestionariuszu. Z kolei jakość snu podczas ekspozycji na niskoczęstotliwościowy hałas wentylacyjny była oceniana o 12% gorzej w porównaniu do nocy referencyjnej, podczas gdy wyniki badań aktygraficznych wskazywały na odwrotną zależność [53].

Smith i wsp. [54] przeprowadzili badanie laboratoryjne oceniające wpływ hałasu kolejowego przenikającego przez tunele podziemne na jakość snu. Podstawę oceny stanowiły wyniki badań polisomnograficznych oraz kwestionariuszowych. Przez 5 kolejnych nocy, w tym podczas 1 nocy adaptacyjnej i 2 nocy kontrolnych, 23 zdrowych ochotników było ekspozowanych na

hałas o 2 różnych widmach (tj. z dominującym i mniej dominującym udziałem niskich częstotliwości) oraz o maksymalnym poziomie dźwięku równym 35, 40 i 45 dBA. Ponieważ rzeczywisty poziom tła akustycznego w pomieszczeniu laboratoryjnym był bardzo niski (≤ 14 dBA), podczas nocy kontrolnych generowano sztuczny hałas zbliżony do tła akustycznego powodowanego przez wentylację o równoważnym poziomie dźwięku A równym 18 dBA.

Okazało się, że podczas nocy testowych z ekspozycją na hałasy o poziomie równym 45 dBA zarówno wyniki badań polisomnograficznych, jak i kwestionariuszowych wskazywały na obecność zaburzeń snu, chociaż liczba i rozmiar efektów były niewielkie. Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy nocami kontrolnymi i nocami testowymi, podczas których osoby badane były ekspozowane na hałas o poziomie równym 35 dBA. Zakłócenia snu powodowane przez hałas kolejowy wzrastały wraz z poziomem dźwięku. Jednak udział składowych niskoczęstotliwościowych w widmie hałasu nie miał wpływu na wyniki badań polisomnograficznych [54].

Ageborg Morsing i wsp. [55] opisali 2 pilotażowe badania mające na celu wskazanie cech hałasu turbin wiatrowych, które mogą decydować o jego wpływie na sen. W obu badaniach 6 ochotników spędziło 5 kolejnych nocy w laboratorium. Podczas 3 nocy uczestnicy byli narażeni na hałas turbiny wiatrowej o zmiennym poziomie ciśnienia akustycznego, głębokości i częstotliwości modulacji amplitudowej, składzie widmowym, częstotliwości obrotowej turbiny i dudnieniach.

Podobnie jak w poprzednich badaniach, aby umożliwić uczestnikom dostosowanie się do nieznanego środowiska i sprzętu do oceny jakości snu, pierwsza noc była nocą adaptacji, bez ekspozycji na hałas turbin wiatrowych. Dane z tej nocy nie zostały wykorzystane w analizach. Druga była nocą kontrolną bez ekspozycji, wykorzystaną do oceny wyjściowej jakości snu. Podczas 3 kolejnych nocy uczestnicy byli narażeni na działanie hałasu turbin wiatrowych. Ze względu na bardzo niski poziom tła akustycznego (≤ 13 dBA) przez cały czas badania, w tym w trakcie nocy referencyjnych, był odtwarzany hałas symulujący tło akustyczne powodowane przez wentylację ($L_{Aeq} = 18$ dBA).

Wpływ hałasu na sen mierzono za pomocą polisomnografii i kwestionariuszy. Podczas nocy z hałasem turbiny wiatrowej u badanych obserwowano częstsze przebudzenia, płytszy sen, mniej ciągłego snu stadium N2 i gorszą subiektywnie ocenianą jakość snu w porównaniu z nocami kontrolnymi. Stwierdzono także, że siła

modulacji amplitudowej, częstotliwość i obecność silnych dudnień mogą być odpowiedzialne za występowanie zaburzeń snu [55].

Wspomniani Smith i wsp. [56] przeprowadzili badanie wpływu hałasu turbin wiatrowych na fizjologiczny sen i samoocenę jego jakości w kontrolowanych warunkach. Przeanalizowali także wpływ długotrwałego narażenia na hałas na reakcję fizjologiczną i samoocenę. Badaniem objęto 50 osób, w tym 24 mieszkające w pobliżu turbin wiatrowych i 26 stanowiących grupę kontrolną. Podstawę oceny stanowiły wyniki badań polisomnograficznych, elektrokardiograficznych, stężenia kortyzolu w ślinie i badań kwestionariuszowych. Osoby badane były ekspozowane przez 3 kolejne noce, z czego po pierwszej adaptacyjnej, następowały w kolejności losowej cicha noc kontrolna (z hałasem tła symulującym wiatr w odległych drzewach o równoważnym poziomie dźwięku A równym 13 dBA) i noc testowa z syntetyzowanym hałasem turbin wiatrowych o równoważnym poziomie dźwięku równym 32 dBA. Hałas w nocy symulował zamknięte i uchylone okna oraz głębokość modulacji o niskiej i wysokiej amplitudzie.

Stwierdzono, że noce z ekspozycją na hałas turbin wiatrowych skutkowały skróceniem czasu snu przy szybkich ruchach gałek ocznych i pogorszeniem jego jakości; wystąpiło opóźnienie fazy REM (+16,8 min) i skrócenie jej czasu trwania (-11,1 min; -2,2%). Nie odnotowano istotnych statystycznie różnic pomiędzy różnymi warunkami akustycznymi w przypadku innych obiektywnych parametrów snu, w tym kluczowych wskaźników zaburzeń snu (wydajność snu, czuwanie śródsenne i liczba przebudzeń) lub kortyzolowej odpowiedzi na przebudzenie. Ogólnie rzecz biorąc, skutki fizjologiczne były niewielkie, a na większość wyników badań hałas turbin wiatrowych nie miał wpływu.

Natomiast jakość snu podczas nocy z ekspozycją na hałas turbin wiatrowych była subiektywnie odbierana jako gorsza. Co więcej, osoby mieszkające w pobliżu turbin wiatrowych oceniały także gorzej niż grupa kontrolna jakość snu zarówno podczas nocy kontrolnej, jak i z hałasem turbin wiatrowych. Wnioskowano, że generowany przez turbiny wiatrowe ciągle HNCz z modulacją amplitudową może wpływać na samoocenę i niektóre aspekty fizjologicznego snu [56].

Wpływ infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na układ przedsionkowy

Prawdopodobne zaburzenia przedsionkowe wywołane działaniem infradźwięków były przedmiotem wielu

eksperymentów, ale nie uzyskiwano zgodnych wyników [2,7,10,57]. Skutki te opisywano jako zaburzenia równowagi, dezorientacja i nudności. W niektórych pracach wyrażano opinie, że spotykane w środowisku poziomy ciśnienia akustycznego infradźwięków nie mają istotnego wpływu na funkcje układu przedsionkowego [7]. Z kolei wyniki innych badań laboratoryjnych z zastosowaniem dźwięków niskoczęstotliwościowych (tonów o częstotliwości 30 Hz, z modulacją amplitudową i bez niej, o poziomie głośności 60 fonów) nie wykluczały jednak takiej możliwości [2].

Założywszy, że układ przedsionkowy może być aktywowany przez głośny dźwięk o średniej lub wysokiej częstotliwości, Jurado i Marquardt [58] postanowili sprawdzić, czy jest to możliwe w przypadku słyszalnych infradźwięków. Mierzili jednak tylko reakcję EMG na pochylenie/wyprost głowy i uzyskali niejednoznaczne wyniki. Wnioskowali, że jest mało prawdopodobne, aby infradźwięki o niższych poziomach ciśnienia akustycznego, takich jak występujące w pobliżu turbin wiatrowych, mogły powodować taką reakcję.

Krahé i wsp. [59] oceniali zmysł równowagi, w tym utrzymywanie równowagi statycznej, wykonywanie ukierunkowanych ruchów, występowanie oczopląsu (powtarzalnych, niekontrolowanych ruchów gałek ocznych) i fiksacji wzroku u uczestników podczas 4 różnych scenariuszy półgodzinnej ekspozycji na infradźwięki oraz w warunkach ciszy (tj. tła akustycznego). Stosowane w trakcie ekspozycji poziomy infradźwięków były zbliżone do progu słyszenia dla tonu 3 Hz (105 dB) modulowanego amplitudowo tonem o częstotliwości 1 Hz i niemodulowanych tonów 5 Hz (105 dB) i 10 Hz (95 dB) oraz były o 10 dB wyższe od progu słyszenia dla tonu 18 Hz. Testy nie wykazały różnic między odmiennymi scenariuszami ekspozycji na infradźwięki i ciszą, ani różnic w recepcji u uczestników predysponowanych (tj. mających problem w domu z infradźwiękami) i pozostałych.

Oddziaływanie eksperymentalnych infradźwięków turbin wiatrowych

Jedno z pierwszych badań eksperymentalnych dotyczących oddziaływania infradźwięków towarzyszących pracy turbin wiatrowych dotyczyło ich wpływu na nastroj [60]. Grupę 35 osób (w wieku 19–23 lat) ekspozowano przez 20 min na odfiltrowany (>20 Hz) sygnał akustyczny o poziomie 92 dBLIN / 39 dBA, który zarejestrowano wcześniej w odległości 750 m od turbiny wiatrowej. Osoby te wykonywały dwukrotnie, tj. przed ekspozycją i po niej, test Taylera, który umożliwia ocenę

nastroju w 4 podskalach: ogólnej aktywacji, wysokiej aktywacji, dezaktywacji ogólnej i dezaktywacji sennej. Stwierdzono istotny statystycznie wpływ 20-minutowej ekspozycji na sygnał infradźwiękowy o widmie charakterystycznym dla turbiny wiatrowej w postaci wzrostu aktywacji typu napięciowego, tj. miary psychologicznej, której można przypisać określenia takie jak: roztrzęsiony, pełen lęku, spięty, napięty. Nie stwierdzono natomiast istotnych statystycznie zmian w innych skalach aktywacji [60].

W innym badaniu eksperymentalnym analizowano wpływ różnych bodźców dźwiękowych, w tym zarejestrowanego hałasu aerodynamicznego turbiny wiatrowej i syntetycznego dźwięku okresowego, na fale mózgowe mierzone z zastosowaniem EEG [61]. Główny wniosek dotyczył narażenia na infradźwięki: okazało się, że fala α , która wskazuje na stan zrelaksowania i koncentracji, była najniższa dla sztucznie stworzonego pasma częstotliwości 20 Hz, a dla fali β , która wskazuje na stan napięcia, była dla niego najwyższa. Dlatego uznano infradźwięki za dokuczliwe dla osób przebywających w pobliżu nowoczesnych turbin wiatrowych.

W eksperymentach laboratoryjnych dotyczących infradźwięków towarzyszących pracy turbin wiatrowych osoby, które przed ekspozycją informowano o ich działaniu terapeutycznym, czuły się mniej poirytowane niż osoby, które poinformowano o ich działaniach niepożądanym [62]. Oczekiwania dotyczące oddziaływania infradźwięków miały wpływ na występowanie objawów fizycznych i zaburzeń afektywnych, co oznacza, że negatywne oczekiwania zwiększały, a pozytywne zmniejszały objawy i poprawiały nastrój [63]. Wobec przekonania, że infradźwięki powodują negatywne skutki zdrowotne, określone symptomy obserwowano zarówno podczas rzeczywistej, jak i pozorowanej ekspozycji na infradźwięki. Natomiast w przypadku braku takich oczekiwań nie stwierdzono żadnych objawów podczas pozorowanej i rzeczywistej ekspozycji na infradźwięki. Wykazano, że oczekiwania odnośnie do skutków zdrowotnych ekspozycji na infradźwięki, a nie sam poziom ekspozycji na infradźwięki, miały statystycznie istotny wpływ na liczbę i intensywność występowania objawów.

Ostatnio Dunbar i wsp. [64] przeprowadzili badanie laboratoryjne, którego celem było porównanie wpływu hałasu turbiny wiatrowej i hałasu drogowego na sen z zastosowaniem analizy spektralnej mocy sygnału EEG. Podczas snu 23 ochotników było eksponowanych, w losowej kolejności, na 3-minutowe próbki hałasu turbiny wiatrowej i hałasu drogowego o 3 poziomach dźwięku A (33, 38

i 43 dBA). Badano ostre (0–30 s) i odległe (30–180 s) skutki prezentacji hałasu podczas stadiów snu płytkiego (N2) i głębokiego (N3). Stwierdzono, że hałas turbin wiatrowych powodował znaczące obniżenie aktywności fal mózgowych δ , θ i β natychmiast po jego pojawieniu się w porównaniu z hałasem ruchu drogowego. Jednakże w stadium snu N2 aktywność α była wyższa dla hałasu turbin wiatrowych odtwarzanego przy niższych poziomach ciśnienia akustycznego (33 i 38 dBA) w porównaniu z hałasem drogowym. Wyniki te wskazują na bardzo subtelny wpływ hałasu na sen. Zdaniem autorów konieczne są dalsze badania w celu ustalenia, czy zmiany encefalograficzne związane z niewielką ekspozycją na hałas środowiskowy mają znaczący wpływ na jakość snu i funkcjonowanie podczas następnego dnia [64].

Kolejne badanie laboratoryjne dotyczące wpływu infradźwięków na percepcję, dokuczliwość i reakcje fizjologiczne wywoływane przez hałas towarzyszący pracy turbin wiatrowych zostało przeprowadzone przez fińskich naukowców [65]. Uczestników badania podzielono na 2 grupy (symptomatyczną i niesymptomatyczną) w zależności od zgłaszanych lub niezgłaszanych objawów związanych z infradźwiękami turbin wiatrowych. Bodźce użyte w badaniach zostały wybrane z próbek dźwięku zarejestrowanych w ramach długoterminowych pomiarów w 2 niezamieszanych mieszkaniach w odległości 1,5 km od farmy wiatrowej – wybrano nagrania o najwyższych poziomach infradźwięków i modulacji amplitudowej.

Stwierdzono, że osoby zgłaszające objawy związane z infradźwiękami turbin wiatrowych nie wykazywały zwiększonej wrażliwości na infradźwięki. Obecność infradźwięków nie miała m.in. wpływu na subiektywną ocenę dokuczliwości, częstość i zmienność rytmu serca oraz przewodność skóry (fizjologiczne miary stresu). Nie zaobserwowano różnic między obiema grupami. Na tej podstawie wnioskowano, że infradźwięki o poziomach stosowanych w tym badaniu, a więc odpowiadających akustycznie rzeczywistym obszarom okolic elektrowni wiatrowych, nie wpływały na percepcję, odczucie dokuczliwości lub reakcje autonomicznego układu nerwowego [65].

Oddziaływanie infradźwięków i dźwięków niskiej częstotliwości na mózg człowieka

Opublikowano dotychczas bardzo niewiele prac dotyczących potencjalnego wpływu infradźwięków na mózg człowieka. W pierwszym badaniu przeprowadzonym przez Dommesa i wsp. [66] z zastosowaniem fMRI,

ekspozycja na infradźwięki i DNCz była związana ze zmienioną odpowiedzią zależną od poziomu wysycenia krwi tlenem (*blood oxygenation level dependent* – BOLD) w pierwotnej korze słuchowej i górnym zakręcie skroniowym, tj. obszarze w dużej mierze odpowiedzialnym za przetwarzanie słuchowe wyższego rzędu, takie jak np. rozumienie mowy. Wyraźny sygnał aktywacji mózgu w przypadku słyszalnych infradźwięków i DNCz z przedziału częstotliwości 12–500 Hz uzyskano przy poziomie ciśnienia akustycznego 90–110 dB.

Inne badanie pilotażowe przeprowadzone przez ten sam zespół badawczy wykazało, że infradźwięki o częstotliwości ≥ 8 Hz i poziomie ciśnienia akustycznego powyżej progu słyszenia wywołują aktywność mózgu w obszarze kory słuchowej [22].

Weichenberger i wsp. [67] wykorzystali fMRI do zbadania wpływu infradźwięków i dźwięków niskiej częstotliwości na aktywność mózgu w stanie spoczynku. Badaniem objęto 14 młodych ochotników z prawidłowym słuchem. Dla każdego wyznaczono audiometryczne progi słyszenia (8–125 Hz) oraz ustalono umiarkowanie głośny poziom tonu infradźwiękowego o częstotliwości 12 Hz, a następnie w skanerze fMRI eksponowano ich przez 200 s na „ciszę”, umiarkowanie głośny ton 12 Hz lub ton 12 Hz o 2 dB niższym poziomie od progu słyszenia (używano bodźców o poziomie ciśnienia akustycznego 79–96 dB). Okazało się, że aktywność mózgu w stanie spoczynku była znacząco zmieniona przez niesłyszalne infradźwięki o częstotliwości 12 Hz i poziomie o 2 dB niższym od progu słyszenia. Zdaniem autorów sugerowało to możliwość prowokacji zmian fizjologicznych i reakcji stresowej przez niesłyszalne infradźwięki [67].

We wcześniejszym badaniu realizowanym przez ten sam zespół [68] wykorzystano technikę fMRI do oceny wpływu infradźwięków na funkcje poznawcze (pamięć roboczą) z zastosowaniem testu *N-wstecz*. Podczas wykonywania tego testu 13 młodych ochotników eksponowano na krótkie, 3-sekundowe impulsy tonowe o częstotliwości 12 Hz i średniej głośności ustalonej indywidualnie podczas sesji skalowania głośności przed eksperymentem fMRI. Stwierdzono, że wykonanie zadania wiązało się z istotną aktywacją kory przedczołowej i ciemieniowej, a także striatum (prążkowie) i mózdzku. Analiza odwrotnego kontrastu (*N-wstecz* z tonem vs *N-wstecz* bez tonu) ujawniła znaczącą aktywację dwustronnej pierwotnej kory słuchowej. Ponadto wbrew oczekiwaniom stwierdzono poprawę wydajności pamięci roboczej pod wpływem słyszalnego tonu infradźwiękowego o częstotliwości 12 Hz (na poziomie trendu, $p < 0,10$) [68].

W cytowanym niemieckim badaniu Krahego i wsp. [59] uczestnicy eksponowani przez 0,5 godz. na 4 różne poziomy infradźwięków i tło akustyczne zostali poddani kilku testom fizjologicznym. Obejmowały one pomiary ciśnienia tętniczego krwi, analizę częstości rytmu serca i rejestrację EEG – nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic ani pomiędzy różnymi ekspozycjami, ani w porównaniu do warunków ciszy, a także pomiędzy predysponowanymi (mającymi problem z infradźwiękami w domu) a pozostałymi uczestnikami.

Istnieją wprawdzie pewne dowody potwierdzające potencjalny wpływ infradźwięków na zdrowie (psychiczne) i funkcje poznawcze człowieka, ale praktycznie do niedawna nie było badań, które bezpośrednio oceniałyby (w sposób randomizowany i kontrolowany) wpływ niesłyszalnych infradźwięków na ludzkie zachowanie oraz na strukturę i funkcje mózgu.

Próbę wypełnienia tej luki stanowiło jedno z ostatnich badań Ascone i wsp. [69]. Było ono ukierunkowane na ocenę wpływu miesięcznej ekspozycji na infradźwięki na mózg – na regionalną objętość istoty szarej (*regional gray matter volume* – rGMV) i zachowanie. W sypialniach 38 ochotników zainstalowano specjalnie zaprojektowane urządzenia generujące pozorowane i rzeczywiste infradźwięki (6 Hz, 80–90 dB), działające przez 28 nocy. Badanie prowadzono przed rozpoczęciem ekspozycji i po miesięcznej ekspozycji. Dobór uczestników do warunków badania (ekspozycja pozorowana vs rzeczywista) był randomizowany; była to pojedyncza ślepa próba (uczestnicy nie byli świadomi, w jakich warunkach przebywają).

Dotychczas większość projektowanych eksperymentów wykorzystywało jako bodźce krótkie sygnały, które nie odpowiadają rzeczywistej sytuacji narażenia na infradźwięki w życiu codziennym. To badanie było pierwszym randomizowanym badaniem efektów względnie długiej ekspozycji (trwającej miesiąc) ludzi na niesłyszalne infradźwięki w porównaniu z tłem akustycznym. Analizowano wpływ niesłyszalnych infradźwięków na zdrowie psychiczne człowieka (ogólne objawy psychiczne, niepokój, depresja, stres), objawy somatyczne (zaburzenia snu, zmiany rytmu serca i ciśnienia tętniczego), funkcje poznawcze (czujność, elastyczność, podzielność uwagi, przerzutność uwagi) oraz strukturę mózgu.

Wyniki tego eksperymentu sugerują, że niesłyszalny ton infradźwiękowy (6 Hz) nie wpływa na zachowanie człowieka, w tym na czujność, ciągłą uwagę, elastyczność poznawczą, podzielność uwagi, przerzutność uwagi. Natomiast wyniki analizy strukturalnej mózgu sugerują, że narażenie na infradźwięki wiąże się ze

spadkiem masy istoty szarej w obszarach mózgu związanych z funkcjami somatomotorycznymi i poznawczymi, takimi jak pamięć robocza (obustronny mózdzek VIIIA) i wyższe przetwarzanie słuchowe (zakręt kątowy, BA39), obejmujące funkcje takie jak: zrozumiałość mowy, przetwarzanie i czytanie semantyczne/leksykalne [69].

WNIOSKI

Powszechnym błędnym wyobrażeniem na temat infradźwięków było przekonanie, że są one niesłyszalne. Tymczasem przy odpowiednio wysokich poziomach ciśnienia akustycznego infradźwięki są nie tylko odbierane klasyczną drogą słuchową – ich percepcja polega także na odczuwaniu drgań (poprzez mechanoreceptory i proprioreceptory).

Wyniki wczesnych badań doświadczalnych, prowadzonych głównie w latach 60. XX w., wskazywały, że ekspozycja na infradźwięki o odpowiednio wysokich poziomach ciśnienia akustycznego wiąże się z wieloma specyficznymi i nieprzypadkowymi odczuciami w uchu, takimi jak uczucie bezbolesnego ucisku w uchu środkowym, czasowe przesunięcie progu słuchu i ból uszu. Jednak ryzyko uszkodzenia słuchu spowodowane ekspozycją na infradźwięki o poziomach ciśnienia akustycznego występujących na co dzień w środowisku jest bardzo małe. Co więcej, infradźwięki, podobnie jak i DNCz, mogą wywoływać drgania rezonansowe struktur wewnętrznych organizmu człowieka (np. gardła, jamy brzusznej i klatki piersiowej).

Tuż po przekroczeniu progu percepcji słuchowej infradźwięki stają się dokuczliwe, a ich dokuczliwość wzrasta wraz ze wzrostem poziomu ciśnienia akustycznego. Próg ten jest równocześnie progiem reakcji fizjologicznych i psychologicznych, gdyż warunkiem ich wystąpienia jest ekspozycja na infradźwięki o poziomach ciśnienia akustycznego powyżej progu słyszenia. Badania eksperymentalne wykazały również zwiększone ryzyko senności podczas narażenia na infradźwięki. Obniżenie stanu czuwania i skorelowane z nim reakcje fizjologiczne nie są zjawiskami izolowanymi, a zmiany fizjologiczne uważa się za reakcje wtórne do pierwotnego wpływu infradźwięków na OUN.

W późniejszym okresie analiz koncentrowano się głównie na ekspozycji środowiskowej, natomiast badania skutków ekspozycji zawodowej są nieliczne. Najnowsze badania na temat wpływu infradźwięków i HNCz w większości dotyczyły aktywności mózgu w odpowiedzi na infradźwięki, często w porównaniu z innymi dźwiękami, w tym dźwiękami o niskiej

częstotliwości. Ich wyniki w znacznej mierze potwierdzają wcześniejsze obserwacje. Nie ma twardych dowodów wskazujących na to, że infradźwięki o poziomach ciśnienia akustycznego znacznie poniżej progu słyszalności mogą wpływać negatywnie na zdrowie i samopoczucie ludzi.

Co więcej, wyniki ostatnich badań wskazują, że infradźwięki o poziomach odpowiadających akustycznie rzeczywistym obszarom okolic elektrowni wiatrowych nie wpływają na percepcję, dokuczliwość lub reakcje autonomicznego układu nerwowego.

Obecna wiedza na temat wpływu infradźwięków i dźwięków niskoczęstotliwościowych opiera się w znacznej mierze na wynikach badań eksperymentalnych. Wskazana jest więc nie tylko ich kontynuacja, ale przede wszystkim rozpoczęcie badań podłużnych z uwzględnieniem różnych źródeł ekspozycji.

Wkład autorów

Koncepcja badań: Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczczyńska, Alicja Bortkiewicz

Metodyka badań: Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczczyńska

Zbieranie materiału: Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczczyńska, Adam Dudarewicz, Iryna Myshchenko

Interpretacja wyników:

Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczczyńska, Alicja Bortkiewicz, Iryna Myshchenko

Piśmiennictwo: Małgorzata Pawlaczyk-Łuszczczyńska, Adam Dudarewicz

PIŚMIENNICTWO

1. Broner N. The effects of low frequency noise on people. *J Sound Vib.* 1978;58:483–500.
2. Persson Wayne K. On the effects of environmental low frequency noise [PhD dissertation]. Gothenburg: Sweden University;1995.
3. Berglund B, Hassmen P, Job RF. Sources and effects of low-frequency noise. *J Acoust Soc Am.* 1996;99(5):2985–3002.
4. PN-ISO 7196:2002. Akustyka – Charakterystyka częstotliwościowa filtru do pomiarów infradźwięków. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002.
5. Leventhall G, Pelmear P, Benton S. A review of published research on low frequency noise and its effects. Department for Environment. Food and Rural Affairs. Crown copyright, London 2003 [cited 2023 Feb 10]. Available from: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20130822074033/> <http://www.defra.gov.uk/environment/quality/noise/research/lowfrequency/documents/lowfreqnoise.pdf>.

6. Castelo Branco NAA, Rodriguez E. The vibroacoustic disease — an emerging pathology. *Aviat Space Environ Med.* 1999;70(3, Cz. 2):A1–A6.
7. Landström U. Human exposure to infrasound. In: Cheremisinoff PN, editor. *Encyclopedia of Environmental Control Technology*. Vol. 7. High Hazard Pollutants. Gulf Publication, Huston 1995, p. 431–53.
8. Freiberg A, Scheffer C, Girbig M, Murta VA, Seidler A. Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review. *Environ Res.* 2019; 169:446–63. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.032>.
9. Pawlas K. Wpływ infradźwięków i hałasu o niskich częstotliwościach na człowieka — przegląd piśmiennictwa. *Podst Met Oceny Środ Pr.* 2009;2(60):27–64. Polish.
10. Johnson DL. The effects of high level infrasound. In: Møller H, Rubak P, editors. *Proceedings of Conference on Low Frequency Noise and Hearing; 1980 May 7–9; Aalborg, Denmark*. Aalborg: Aalborg University Press; p. 47–60.
11. Landström U, Palmear PL. Infrasound – a short review. *J L F Noise Vib.* 1993;12(3):72–4.
12. Møller H, Pedersen CS. Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise Health.* 2004;6(23):37–57.
13. Møller H. Annoyance of audible infrasound. *J L F Noise Vib.* 1987;6(1):1–17.
14. Tokita Y. Low frequency noise pollution problems in Japan. In: Moller H, Rubak P, editors. *Proceedings of Conference on Low Frequency Noise and Hearing; 1980 May 7–9; Aalborg, Denmark*. Aalborg: Aalborg University Press; 1980. p.189–96.
15. Nagai N, Matsumoto M, Yaasumi Y, Shiraiishi T, Nishimura K, Matsumoto K. et al. Process and emergence on the effects of infrasonic and low frequency noise on inhabitants. *J.L.F. Noise Vib.* 1989;8(3):87–99.
16. Persson Wayne K, Rylander R. The extent of annoyance and long term effects among persons exposed to low frequency noise in the home environment. *J. Sound Vib.* 2001;240:483–97.
17. Slarve RN, Johnson DL. Human whole-body exposure to infrasound. *Aviat Space Environ Med* 1975;46(4 Sec 1): 428–31.
18. von Gierke HE, Nixon CW. Effect of infrasound on man. In: Tempest W, editor. *Infrasound and Low Frequency Vibration*. Great Britain: London Academic Press, 1976. p. 114–50.
19. Mills JH, Osguthorpe D, Burdick CK, Patterson JH, Mozo B. Temporary threshold shift produced by exposure to low frequency noises. *J Acoust Soc Am.* 1983;73:918–23.
20. Lim DJ, Dunn DE, Johnson DL, Moore TJ: Trauma of the ear from infrasound. *Acta Otoaryngol.* 1982;94(3–4): 213–31.
21. Evans MJ. Physiological and psychological effects of infrasound at moderate intensities. In: Tempest W, editor. *Infrasound and Low Frequency Vibration*. Great Britain: London Academic Press, 1976. p. 97–113.
22. Koch C. Hearing beyond the limit: measurement, perception and impact of infrasound and ultrasonic noise. [cited 2023, Feb 10], Available from: www.icben.org/2017/ICBEN2017Papers/Keynote02_Koch_4163.pdf.
23. van Kamp I, van den Berg F. Health effects related to wind turbine sound, including low-frequency sound and infrasound. *Acoust Aust.* 2018;46:31–57. <https://doi.org/10.1007/s40857-017-0115-6>.
24. Van Kamp I, van den Berg F. Health effects related to wind turbine sound: An update. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(17):9133. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179133>.
25. Marquardt T, Jurado C. Amplitude modulation may be confused with infrasound. *Acta Acust United Acust.* 2018;104:825–29. <https://doi.org/10.3813/AAA.919232>.
26. Jurado C, Gordillo D, Moore BCJ. On the loudness of low-frequency sounds with fluctuating amplitudes. *J Acoust Soc Am.* 2019;146:1142–1149. <https://doi.org/10.1121/1.5121700>.
27. Burke E, Hensel J, Fedtke T, Uppenkamp, S, Koch C. Detection thresholds for combined infrasound and audio-frequency stimuli. *Acta Acust United Acust.* 2019;105. (6):1173–82. <https://doi.org/10.3813/AAA.9193941173-82>.
28. Behler O, Uppenkamp S. Activation in human auditory cortex in relation to the loudness and unpleasantness of low-frequency and infrasound stimuli. *PLoS ONE.* 2020;15:e0229088. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229088>.
29. Jurado C, Marquardt T. Brain's frequency following responses to low-frequency and infrasound. *Arch Acoust.* 2020, 45, 313–319. <https://doi.org/10.24425/aoa.2020.133151>.
30. Borredon P. Physiological effects of infrasound in our everyday environment. In: Moller H, Rubak P, editors. *Proceedings of Conference on Low Frequency Noise and Hearing; 1980 May 7–9; Aalborg, Denmark*. Aalborg: Aalborg University Press; 1980, p. 61–76.
31. Møller H. Physiological and psychological effects of infrasound on humans. *J L F Noise Vib.* 1984;3(1):1–17.
32. Yamada S, Watanabe T, Kosaka T, Neigishi H, Watanabe H. Physiological effects of low frequency noise. *J L F Noise Vib.* 1986;5(1):14–25.
33. Landstrom U, Liszka L, Danielsson A, Linsmark A, Lindqvist M, Soderberg L. Changes in wakefulness during exposure to infrasound. *J Low Freq Noise Vib.* 1982;1(2):79–87.
34. Landstrom U, Lundstrom R, Bystrom M. Exposure to infrasound — perception and changes in wakefulness. *J Low Freq Noise Vib.* 1983;2(1):1–11.

35. Landstrom U, Bystrom M. Infrasonic threshold levels of physiological effects. *J Low Freq Noise Vib.* 1984;3(4):167–73.
36. Landstrom U, Bystrom M, Nordstrom B. Changes in wakefulness during exposure to noise at 42 Hz, 1000 Hz and individual EEG frequencies. *J Low Freq Noise Vib.* 1985;4(1):27–33.
37. Danielsson A, Landstrom U. Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. An experimental study. *Acta Medica Scandinavica.* 1985;217(5):531–5.
38. Harris CS, Johnson DL. Effects of infrasound on cognitive performance. *Aviat Space Environ Med.* 1978;49(4):582–6.
39. Rajala V, Hakala J, Alakoivu R, Koskela V, Hongisto V. Hearing threshold, loudness, and annoyance of infrasonic versus non-infrasonic frequencies. *Appl Acoust.* 2022;198:108981. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108981>.
40. 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> adźwięków.
41. Persson Waye K, Rylander R, Benton S. Effects on performance and work quality due to low frequency ventilation noise. *J. Sound Vib.* 1997;205:467–74.
42. Persson Waye K, Bengtsson J, Kjellberg A, Benton S: Low frequency noise pollution interferes with work performance. *Noise Health.* 2001;4:33–49.
43. Persson Waye K, Bengtsson J, Rylander R, Hucklebridge F, Evans P, Clow A. Low frequency noise cortisol among noise sensitive subjects during work performance. *Life Sci.* 2001;70:745–58.
44. Bengtsson J, Persson Waye K, Kjellberg A. Evaluation of effects due to low frequency noise in a low demanding work situation. *J. Sound Vib.* 2004;278(1/2):83–99.
45. Pawlaczyk-Łuszczynska M, Dudarewicz A, Wszkowska M., Szymczak W, Sliwiska-Kowalska, The impact of low frequency noise on human mental performance. *Int J Occup Med Environ Health.* 2005,18(2):185–98.
46. Alimohammadi I, Sandrock S, Gohari MR. The effects of low frequency noise on mental performance and annoyance. *Environ Monit Assess.* 2013;185(8):7043–51. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3084-8>.
47. Abbasi AM, Motamedzade M, Aliabadi M, Golmohammadi R, Tapak L. Study of the physiological and mental health effects caused by exposure to low-frequency noise in a simulated control room. *Build Acoust.* 2018;25:233–48.
48. Walker ED, Brammer A, Cherniack M, Laden F, Cavallari JM. Cardiovascular and stress responses to short-term noise exposures — A panel study in healthy males. *Environ Res.* 2016;150:391–97. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.016>.
49. Rossi L, Prato A, Lesina L, Schiavi A. Effects of low-frequency noise on human cognitive performances in laboratory. *Build Acoust.* 2018;25:17–33.
50. Persson Waye K. Effects of low frequency noise on sleep. *Noise Health.* 2004;6(23):87–91.
51. Okada A, Inaba R. Comparative study of the effects of infrasound and low frequency sound with those of audible sound on sleep. *Environ Int.* 1990;16(4–6):483–90.
52. Persson Waye K, Clow A, Edwards S, Hucklebridge F, Rylander R. Effects of low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality. *Life Sci.* 2003;72:863–75.
53. Ohrstrom E, Skanberg A. Sleep disturbance from road traffic and ventilation noise — laboratory and field experiments. *J. Sound Vib.* 2004;271:279–96.
54. Smith, M.G.; Ögren, M.; Ageborg Morsing, J.; Persson Waye, K. Effects of ground-borne noise from railway tunnels on sleep: A polysomnographic study. *Build Environ.* 2019, 149, 288–96.
55. Ageborg Morsing J, Smith MG, Ögren M, Thorsson P, Pedersen E, Forssén J, Persson Waye K. Wind turbine noise and sleep: Pilot studies on the influence of noise characteristics. *Int J Environ Res Public Health.* 2018;15(11):2573. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112573>.
56. Smith MG, Ögren M, Thorsson P, Hussain-Alkhateeb L, Pedersen E, Forssén J, Ageborg Morsing J, Persson Waye K. A laboratory study on the effects of wind turbine noise on sleep: results of the polysomnographic WITNES study. *Sleep.* 2020;43(9):zsaa046. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa046>.
57. Johnson DL. Various aspects of infrasound. In: Pimonow L. editor. *Proceedings of Colloquium on Infrasound.* Centre National de la Recherche Scientifique, Paris 1973, p. 337–56.
58. Jurado C, Marquardt T. On the effectiveness of airborne infrasound in eliciting vestibular-evoked myogenic responses. *J Low Freq Noise Vib Act Control.* 2020;39:3–16.
59. Krahé D, Alaimo Di Loro A, Müller U, Elmenhorst E, De Giannini R, Schmitt S, et al. Noise effects from infrasound immersions. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau, Germany, 2020. German. [cited 2023 Feb 12]. Adres: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/laermwirkungen-von-infraschallimmissionen>.
60. Kasprzak C, Skrodzka E, Wiciak J. The effect of Wind Turbine Infrasound Emission on Subjectively Rated Activation Level. *Acta Physica Pol A.* A–48. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.123.980>. 2014;125(4):A-45.
61. Inagaki T, Li Y, Nishi Y. Analysis of aerodynamic sound noise generated by a large-scaled wind turbine and its

- physiological evaluation. *Int J Environ Sci Technol*. 2015; 12:1933–44. <https://doi.org/1.1007/s13762-014-0581-4>.
62. Crichton F, Dodd G, Schmid G, Gamble G, Petrie K. Can expectations produce symptoms from infrasound associated with wind turbines. *Health Psychol*. 2014;33(4): 360–64. <https://doi.org/10.1037/a0031760>.
63. Crichton F, Dodd G, Schmid G, Gamble G, Petrie K. Framing sound: Using expectations to reduce environmental noise annoyance. *Environ Res*. 2015;142:609–614. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.08.016>.
64. Dunbar C, Catcheside P, Lechat B, Hansen K, Zajamsek B, Liebich T, et al. EEG power spectral responses to wind farm compared with road traffic noise during sleep: A laboratory study. *J Sleep Res*. 2022;31(3):e13517. <https://doi.org/10.1111/jsr.13517>.
65. Maijala PP, Kurki I, Vainio L, Pakarinen S, Kuuramo C, Lukander K i wsp. Annoyance, perception, and physiological effects of wind turbine infrasound. *J Acoust Soc Am*. 2021;149(4):2238. <https://doi.org/10.1121/10.0003509>.
66. Dommes E, Bauknecht HC, Scholz G, Rothemund Y, Hensel J, Klingebiel R. Auditory cortex stimulation by low-frequency tones - an fMRI study. *Brain Res*. 2009;1304: 129–37. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.09.089>.
67. Weichenberger M, Bauer M, Kühler R, Hensel J, Forlim CG, Ihlenfeld A, et al. Altered cortical and subcortical connectivity due to infrasound administered near the hearing threshold - Evidence from fMRI. *PLoS One*. 2017; 12(4):e0174420. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174420>.
68. Weichenberger M, Kühler R, Bauer M, Hensel J, Brühl R, Ihlenfeld A, et al. Brief bursts of infrasound may improve cognitive function--an fMRI study. *Hear Res*. 2015;328: 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2015.08.001>.
69. Ascone L, Kling C, Wieczorek J, Koch C, Kühn S. A longitudinal, randomized experimental pilot study to investigate the effects of airborne infrasound on human mental health, cognition, and brain structure. *Sci Rep*. 2021; 11(1):3190. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82203-6>.