

prof. dr hab. inż. ADAM LIPOWCZAN

Przewodniczący Komitetu Naukowego  
Noise Control 2016

Kontakt: lipowczan@neostrada.pl

DOI: 10.5604/01377043.1201786

# Akustyka środowiska – stan obecny i perspektywy

Fot. Mas3r/Bigstockphoto



W artykule przedstawiono stan obecny i perspektywy rozwoju wydzielonego i integralnego nurtu badawczego, jakim jest akustyka środowiska. Nurt ten ukształtował się po II wojnie światowej w następstwie rozwoju aparatury elektronicznej, umożliwiającej pomiarowe określenie wielkości opisujących fale i pola akustyczne. Początek rozwoju tego kierunku dała akustyka środowiska pracy, wiążąca oddziaływanie hałasów tego środowiska z reakcją organizmu narażonego pracownika. W dalszej kolejności uwzględniono wpływy zewnętrznego środowiska człowieka jako składnika ogólnego bilansu narażenia.

Koncentracja badań na hałasach środowiska zewnętrznego powoduje pojawienie się nowych obszarów badań objętych pojęciem „akustyka ekologiczna”. W artykule postawiono tezę, że koncentracja badań na akustyce ekologicznej spowodowała znaczące wyhamowanie postępu w akustyce środowiska pracy, co jest źródłem znaczących strat ekonomicznych.

*Słowa kluczowe: akustyka, środowisko, historia akustyki, hałas*

## The environment and ecological acoustic – the current state and perspectives

Paper presents the current state and prospects for the development of a dedicated and integral research trends what is the environment and ecological acoustics. This trend formed after World War II, following the development of an electronic apparatus which permits determination of the measuring volume describing waves and acoustic fields. The beginnings of the development of this trend is the work acoustics environment, binding on the impact of the noise of the environment with the reaction of the body exposition. Subsequently, account has been taken of the external influences the human environment, as a component of the overall balance of exposure. Concentration studies on external environment noises, causes the emergence of new areas of research covered by the notion of research environmental acoustics (acoustic landscapes). In the final part of the paper was that, the concentration in field of environmental acoustics caused in many countries significant stopping progress in work environment acoustics, which continuously to be a source of economic losses.

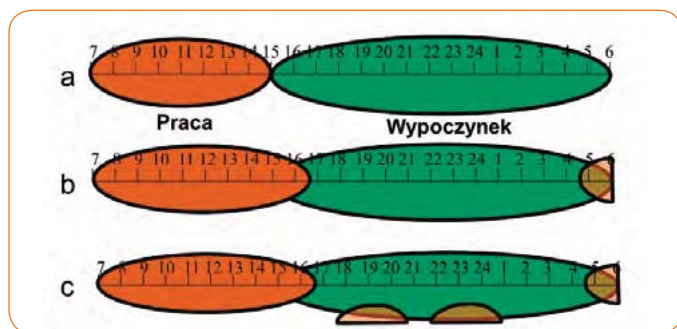
*Keywords: acoustics, environment, history of acoustics, noise*

## Wstęp

Akustyka środowiska, jako wydzielony i integralny nurt badawczy akustyki fizycznej pojawiła się po zakończeniu II wojny światowej. Nagły skok technologiczny w elektronice, który dokonał się w tamtym czasie, umożliwił konstrukcję przyrządów pomiarowych wielkości fizycznych, charakteryzujących pola akustyczne w szeroko rozumianym środowisku życia człowieka. Do ukształtowania się tego nurtu istotny wkład wniosły nauki fizjologiczno-medyczne w części zajmującej się badaniami narządu słuchu i mechanizmów słyszenia. Także w tych dyscyplinach rozwój elektroniki miał istotne znaczenie, dostarczając przyrządów do ilościowej oceny stanu narządów słuchu – audiometrów – i wykształcenie się specjalności badawczej, jaką jest audiologia. Synergiczne współdziałanie tego nurtu akustyki fizycznej oraz audiologii złożyło się na powstanie obszaru badawczego nazwanego akustyką środowiska.

Dziesięciolecia II połowy wieku XX w. to okres bardzo dynamicznego rozwoju akustyki środowiska. Prowadzone wtedy badania dotyczyły przede wszystkim środowiska pracy, w którym nagromadzenie maszyn, będących źródłami fal akustycznych (hałasu), bardzo szybko rosło, doprowadzając do wystąpienia różnorodnych zaburzeń w organizmach narażonych ludzi – pracowników przemysłu. Zaburzenia te w krańcowych przypadkach doprowadzały do powstania tzw. zawodowego uszkodzenia słuchu. W zależności od stopnia uszkodzenia tego narządu, pracownik odczuwał różny poziom dyskomfortu życia do wystąpienia wysokiego procentu niepełnosprawności włącznie. Wyniki pomiarów parametrów akustycznych środowiska pracy i audiometrycznych pomiarów skutków oddziaływania hałasu na narząd słuchu pozwalały (po przejściu postępowania sądowego) na orzeczenie choroby zawodowej, a w konsekwencji prowadziły do odszkodowań, które w niektórych gałęziach gospodarki stanowiły znaczące obciążenie ekonomiczne.

Skutki finansowe i społeczne spowodowały powstanie ścieżki legislacyjnej w prawodawstwie pracy oraz normalizacji, opisującej to środowisko. Równoległy postęp w badaniach nad fizjologią słuchu pozwolił na sformułowanie kryteriów oceny hałasu w aspekcie oddziaływania na organizm człowieka, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu na stan narządu słuchu. Opracowane w 1933 r. przez Fletchera i Munsona tzw. krzywe równej głośności, wiążące subiektywne wrażenie słyszenia dźwięków o różnych częstotliwościach w całym przedziale dy-



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie czasu oddziaływania hałasu w ciągu 8 godzin przebywania w środowisku pracy i 16 godzin odpoczynku w warunkach komfortu akustycznego. Na osi odciętych odłożono kolejne godziny doby

Fig. 1. A schematic of time of noise impact during the 8 hour stay in the work environment and the 16 hour rest in the acoustically comfortable surroundings. The further hours of the day and night time have been put on the abscissa

namiki narządu słuchu (od progu słyszenia do progu bólu), wykazały mocno nieliniowy przebieg tego wrażenia [1]. W wykreśleniu krzywych równej głośności przyjęto odniesienie wrażenia słuchowego dźwięku danej częstotliwości do wrażenia słyszenia dźwięku o częstotliwości  $f = 1000$  Hz. Na tej podstawie opracowano szereg zasad i kryteriów wartościowania hałasu w środowisku pracy [1,2,3,4]. Coraz bardziej złożone i rozbudowane metody oceny hałasu oraz konieczność dostosowania do nich możliwości aparatury pomiarowej wymusiły szereg uproszczeń. Przykładem może być wprowadzony w latach 60. ub. w. podział krzywych równej głośności na trzy grupy, aproksymowane krzywymi, oznaczonymi jako A, B i C, które kształtowały charakterystykę przenoszenia mierników poziomu dźwięku. Dalsze badania mechanizmów słyszenia wykazały istotny wpływ czasu oddziaływania hałasu na krótko- i długoterminową reakcję narządu słuchu [2, 3]. Schematycznie tok tego rozumowania przedstawiono na rys.1. Schemat „a” przedstawia prawidłowo dobraną relację między czasem działania (kolor pomarańczowy), a czasem odpoczynku (kolor zielony). Schemat „b” przedstawia mały ubytek czasu odpoczynku, a schemat „c” – znaczące zmniejszenie się czasu odpoczynku narządu słuchu.

Odkryto wtedy również mechanizm obrony narządu słuchu, polegający na podniesieniu progu słyszenia zależnego nie tylko od poziomu ciśnienia akustycznego hałasu, ale także wspomnianego już czasu oddziaływania. Powrót progu słyszenia do wartości wyjściowej wymaga określonego czasu, i to tym dłuższego, im wyższy jest poziom hałasu powodującego narażenie. Ilustruje to rys. 2.

Opisane odkrycie spowodowało wprowadzenie nowych pojęć i wielkości pomiarowych tj. poziom równoważny (ekwiwalentny)  $L_{eq}$ , poziom ekspozycyjny  $L_{SEL}$ , dawka hałasu mierzona specjalnymi przyrządami – dozymetrami itp. [3].

Przytoczony opis mechanizmu obronnego ucha i wynikające z niego wielkości metrologiczne, charakteryzujące hałas, miały wpływ na przesunięcie obszaru badawczego na środowisko poza stanowiskami pracy, prowadząc do utworzenia obszaru badawczego „akustyka środowiska zewnętrznego” (naturalnego). Zbiegło się to z rozwojem mechanicznych środków komunikacji drogowej, lotniczej i kolejowej oraz, w mniejszym stopniu, morskiej. Szybki wzrost liczebności środków komunikacji nastąpił zwłaszcza w transporcie drogowym, w którym trasy, po których poruszają się pojazdy, w większości

przebiegają w pobliżu osiedli i budynków mieszkalnych, powodując powstanie istotnego zagrożenia dla zdrowia mieszkańców. Jego powszechność, jako następstwo rosnącej liczby pojazdów oraz ich gabarytów i ciężaru (jako że pojazdy ciężkie są bardziej hałaśliwe), a także zmiany w budownictwie drogowym (drogi wielopasmowe, wiadukty i wielopoziomowe skrzyżowania), w tym zwłaszcza ich aktualny stan, spowodowały lawinowy wzrost skarg mieszkańców i przesunięcie tematyki badań naukowych na zagadnienia hałasów drogowych. Do ilościowej oceny tych zjawisk akustycznych wprowadzono nowe wielkości: najpierw poziom hałasu dziennie-nocnego ( $L_{dn}$ , w Polsce:  $L_{DN}$ ), potem wielkość dziennie-wieczorowo-nocną ( $L_{den}$ , w Polsce:  $L_{DWN}$ ), [3]. To podejście miało zapewnić lepszą i dokładniejszą ocenę narażenia na działanie hałasu drogowego przez uwzględnienie dużych fluktuacji jego poziomu w wymienionych porach doby [3].

Drugą istotną grupą hałasów komunikacyjnych są hałasy lotnicze. W ostatnich kilkunastu latach nastąpił bardzo gwałtowny rozwój komunikacji lotniczej, w większości krajów zbudowano sieci lotnisk komunikacji cywilnej. Jeżeli dodać do tego wzrost liczby lotnisk wojskowych, to oczywiste jest, że emisja hałasu z tych obiektów do środowiska znacząco wzrosła. Wielkość tej emisji i wynikowe obciążenie hałasem środowiska zależą oczywiście od lokalizacji tych obiektów. Szczególnie istotnym źródłem narażenia są lotniska położone w i na obrzeżach aglomeracji miejskich. Dotyczy to zwłaszcza wcześniej budowanych lotnisk, które najczęściej są rozbudowywane zarówno poprzez powiększanie powierzchni zajmowanego terenu, jak i instalowanie tam infrastruktury.

Liczby startów i lądowań, będących najbardziej hałaśliwymi operacjami w ruchu lotniczym, a także rosnąca moc silników obsługiwanych samolotów (mimo że w ostatnich latach nastąpiło znaczące zmniejszenie poziomów emitowanych przez nie dźwięków), powoduje wzrost zagrożenia hałasem, w pierwszej kolejności w odniesieniu do budynków położonych w pobliżu lotnisk (w przypadku starych lotnisk znajdują się one często w tzw. strefach ochronnych), co w konsekwencji pociąga za sobą spadek ich wartości handlowej. Metodami pomiarów i oceny hałasów lotniczych poświęcona jest obszerna literatura, której złożoność wykracza poza ramy tego artykułu.

Kolejną grupą źródeł hałasów środowiskowych o złożonej strukturze jest komunikacja szynowa (kolejowa, tramwajowa i metro na powierzchni terenu). Lokalizacja dworców kolejowych i przystanków

dobierana jest tak, aby zapewnić ich dostępność dla mieszkańców i przyjezdnych, dlatego objekty te znajdują się w centrach miast, a przystanki w pobliżu osiedli mieszkaniowych lub obiektów użyteczności publicznej [4].

Struktura hałasów jest w tym przypadku wypadkową geometrii i stanu trakcji szynowych i elektrycznych (zasilających pojazdy), rodzajem i stanem pociągów, prędkości i częstotliwości przejazdów itp. Większość z wymienionych czynników jest w naszym kraju daleka od doskonałości, mimo zintensyfikowania w ostatnich latach modernizacji traktów komunikacyjnych i taboru. Stan ten powoduje znaczące uciążliwości dla osób mieszkających w pobliżu trakcji szynowych, chociaż trzeba też zauważyć, że likwidacja wielu połączeń kolejowych w ostatnich dziesięcioleciach spowodowała spadek liczby miejscowości, w których one występowały. W obszarze badań nad hałasem kolejowym, po okresie zastoju, nastąpił w ostatnich latach widoczny wzrost aktywności badawczo-technicznej [4,5,6].

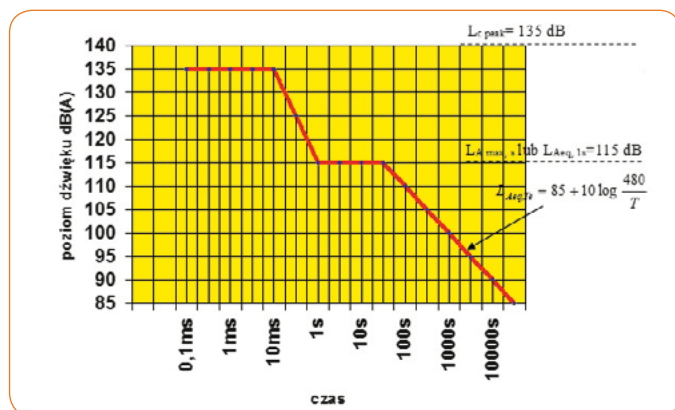
W rozważaniach pominięto zagadnienia akustyczne w komunikacji morskiej, zarówno ze względu na specyfikę i metodologię ich badania (poza hałasami wewnątrz statków i okrętów, które wchodzi w zakres środowiska pracy) oraz oddziaływanie w środowisku wodnym, zwłaszcza na faunę, jako że jest to odrębna problematyka.

## Nowe zagadnienia oddziaływania hałasu w środowisku

Przedstawione we wstępie, w koniecznym skrócie, zagadnienie hałasu komunikacyjnego jako głównego składnika akustycznego oddziaływania na człowieka w środowisku zewnętrznym (poza pracą), wchodzącego ogólny bilans narażenia (zagrożenia) dobowego, od końca XX w. jest poszerzane o źródła uciążliwości, które – ze względu na szybko rosnący zasięg oddziaływania – wymagały podjęcia koniecznych badań. Do źródeł tych zaliczyć należy:

- hałas ulotu wysokonapięciowych linii energetycznych, których trasy (często kilkusetkilometryowe), przechodząc przez tereny zurbanizowane, powodują odczuwalny dyskomfort mieszkańców [7]

- hałas elektrowni wiatrowych [8,9]. Rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE), w tym najliczniejszej grupy – elektrowni wiatrowych, jest powodem częstych protestów i akcji społecznych. Spowodowane to jest bardziej doniesieniami mediów, tworzących wokół tych miejsc atmosferę ta-



Rys. 2. Zależność między poziomem dźwięku „A” (w dB) a dopuszczalnym czasem działania  
Fig. 2. A dependence between the A noise level (in dB) and the admissible time of operation



jemniczości i podejrzeń, niż rzeczywistymi skutkami ich oddziaływania na środowisko [10]. W pierwszym okresie budowy urządzeń tej infrastruktury, kiedy prędkość obrotowa śmigieł zależała jedynie od prędkości wiatru, hałas aerodynamiczny powstający na łopatach rzeczywistie powodował odczuwalne uciążliwości, potęgowane niskoczęstotliwościowym przebiegiem widma hałasu (wchodzącym w zakres infradźwiękowy) i wynikającym z tego dużym zasięgiem jego oddziaływania. Nowe konstrukcje, w których stosuje się śmigła o zmiennym kącie ustawienia łopaty, uniezależniają w dużym stopniu liczbę obrotów w jednostce czasu od prędkości wiatru. Tym samym powstała możliwość określenia minimalnej odległości wiatraków od zabudowań mieszkalnych, powyżej której zanika odczuwanie dyskomfortu.

Pomiary wielkości akustycznych, charakteryzujących obydwie omówione grupy źródeł hałasu, nie są proste. Poziomy dźwięku hałasu są zbliżone do poziomów tła akustycznego i przez to, po pierwsze – są często zakłócone przypadkowymi, najczęściej krótkotrwałymi hałasami otoczenia (śpiewy ptaków, szczenie psów, przejazdy pojedynczych samochodów itp.), a po drugie, silnie zależą od warunków meteorologicznych w miejscu pomiaru, w szczególności wilgotności powietrza (zwłaszcza hałas ulotu) i prędkości wiatru (w odniesieniu do obydwu źródeł), [10,11,12].

## Normy, dyrektywy i przepisy prawne

Jak już wspomniano, przyczyną wprowadzenia norm i różnorodnych przepisów prawnych w obszarze akustyki środowiska było stwierdzenie negatywnych skutków oddziaływania hałasu na organizmy żywe w ogólności, a organizm człowieka w szczególności. W latach 60. i 70. ub. w. opracowano szereg metod wartościowania hałasu w środowisku pracy. W efekcie powstały wielkości kryterialne, określające dopuszczalne lub zalecane wartości opisujące hałas, których przekroczenie powodowało lub zwiększało ryzyko wystąpienia skutków zdrowotnych w narażonych organizmach. Mnogość metod i zasad oceny hałasu, które pojawiły się w tym okresie, poważnie skomplikowały i utrudniały badania na stanowiskach pracy, których potrzeba lawinowo rosła. Sytuację skomplikowały bowiem badania wskazujące na istotne znaczenie czynnika czasu trwania hałasu o określonym poziomie na wielkość obciążenia organizmu.

Efektem tych stwierdzeń było wspomniane już wprowadzenie wielkości poziomu równoważnego  $L_{eq}$ , a niedługo później – poziomu równoważnego, skorygowanego charakterystyką A  $L_{Aeq}$  [2,3]. Powszechnie znana wartość  $L_{Aeq} = 85$  dB przyjęta została w wielu krajach jako graniczna wartość dopuszczalna w środowisku pracy, w którym czas oddziaływania hałasu to  $t \leq 8$  godz. w odniesieniu do pięcio- lub sześciodniowego tygodnia pracy, o ile nie występują inne ograniczenia oraz przy założeniu, że w pozostałej części doby człowiek przebywa w warunkach komfortu akustycznego (poziomy hałasu  $L = 20-40$  dB). Przytoczone wartości wskazują, że ich spełnienie, zwłaszcza w części doby poza pracą, jest praktycznie niemożliwe.

Wprowadzanie do praktyki norm leżało w gestii krajowych komitetów normalizacyjnych (w naszym kraju był to Polski Komitet Normalizacyjny), które – najczęściej we współpracy z jednostkami naukowymi, przygotowywały projekty norm, aby,

po szerokiej ankietyzacji, ustanowić je najczęściej do obligatoryjnego stosowania. Normy w interesującym nas obszarze były zwykle tłumaczeniami dokumentów międzynarodowych (ISO – International Organization for Standardization utworzonej w 1946 r).

Po transformacji polityczno-gospodarczej w 1989 r., a zwłaszcza około 2000 r., kiedy rozpoczęto działania akcesyjne do Unii Europejskiej (UE), przeprowadzono powszechną harmonizację norm krajowych (PN) z normami UE, nadając im oznaczenia PN-EN. Równolegle zmieniono zasady stosowania norm w praktyce z obligatoryjnych na dobrowolne. Zmiany te wprowadziły głęboki chaos, na który nałożyła się konieczność dostosowania krajowego systemu prawno-normalizacyjnego do dyrektyw Unii Europejskiej, które chociaż dość ogólnikowe, wymusiły uwzględnianie ich postanowień nie tylko w normach, ale przede wszystkim w zasadach i metodach ich stosowania.

W ocenie autora najważniejszym skutkiem tego stanu było instytucjonalne rozdzielenie tworzenia i wprowadzania przepisów pomiędzy obecne Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej (przepisy dotyczące środowiska pracy) i Ministerstwo Środowiska (dotyczące środowiska zewnętrznego). Najpoważniejszym skutkiem tego podziału jest wydane nagle w 2012 r. rozporządzenie Ministra Środowiska, w którym podwyższono wartości kryterialne oceny hałasu w środowisku zewnętrznym o  $3-7$  dB [12]. Łatwo można zauważyć głębokie odejście od zasady bilansowania narażenia w środowisku pracy i środowisku zewnętrznym. Działanie to jest tym bardziej zaskakujące, że zamiary UE, a także indywidualnie kilku krajów członkowskich przewidują obniżenia wartości kryterialnych w odniesieniu do hałasu w środowisku zewnętrznym.

## Działania ograniczające hałas w środowisku zewnętrznym

Publikacje dotyczące metody ograniczenia hałasu w środowisku zewnętrznym [12] wyróżniają dwie ich główne grupy: 1) administracyjno-zarządcze, polegające na wydawaniu przez władze krajowe i samorządowe zarządzeń i regulacji ograniczających poziom hałasu na określonym terenie do wartości normatywnych (te metody pominięto w artykule); 2) 9 grup metod techniczno-inwestycyjnych wymienionych w układzie hierarchii skuteczności w tabeli [19].

Jak widać, powszechnie występująca i właściwie jedyna stosowana w Polsce metoda ograniczenia hałasu w środowisku – ekrany akustyczne – wymieniona jest w tabeli dopiero na 6. miejscu [13].

W ostatnich latach wielu autorów zalecało przy wyborze rozwiązań ograniczających hałas stosowanie tzw. podejścia hedonistycznego, co w pewnym uproszczeniu oznacza wybór takiego rozwiązania, które zapewni najkorzystniejszy efekt wobec możliwie największej grupy ludzi (narażonych). Wymaga to utworzenia listy rozwiązań w układzie hierarchicznym. Możliwe jest w tym postępowaniu wykorzystanie opisywanych w literaturze wskaźników, takich jak chociażby powszechnie znany wskaźnik „M” [21,22]. Oczywiście jest możliwość zastosowania szeregu wskaźników ekonomicznych (kosztowych), które wspólnie z wskaźnikami akustycznymi utworzą hierarchiczną listę możliwych rozwiązań zapewniających efektywne ograniczenie hałasu.

Tabela. Inwestycyjno-techniczne organizacyjne metody ograniczenia hałasu w środowisku zewnętrznym [19]

Table. Investment and technical organizational methods of noise reduction in the outdoor environment [19]

Lp.	Działanie
1.	Planowanie przestrzenne
2.	Naprawa nawierzchni dróg (nisko hałaśliwe nawierzchnie)
3.	Nisko hałasowe tory tramwajowe i kolejowe
4.	Izolacje budynków (stosowanie dźwiękoszczelnych okien i drzwi)
5.	Renowacja środków transportu kołowego
6.	Ekrany i tunele akustyczne
7.	Rygorystyczna, pomiarowa kontrola hałaśliwości pojazdów
8.	Sterowanie ruchem drogowym (zielona fala)
9.	Nisko hałaśliwe urządzenia odbioru i transportu odpadów

## Perspektywa dla akustyki środowiska

Dotychczas w artykule posługiwano się dwoma pojęciami różnicującymi hałas w środowisku: środowisko pracy i środowisko zewnętrzne (jako określenie wszystkiego poza środowiskiem pracy). Do dalszych rozważań konieczne jest wprowadzenie innych pojęć, istniejących w literaturze anglojęzycznej: *environmental acoustic*, czyli akustyka bezpośredniego otoczenia człowieka/ludzi, którego zasadnicze elementy przedstawiono wcześniej oraz *ecological acoustic* (EA), określająca dalsze otoczenie człowieka, w którym nie przebywa on stale, ale je obserwuje [14,15]. Autorzy cytowanych publikacji wskazują ponadto, że czasami w miejsce pojęcia *ecological acoustic* stosuje się określenie *acoustic landscape* lub, w skrócie – *soundscape* czyli „krajobraz akustyczny/dźwiękowy”.

Pozostawiając wybór i ustalenie właściwego polskiego tłumaczenia tych pojęć językoznawcom, można stwierdzić także pewien chaos w piśmiennictwie obcojęzycznym. Istnieją istotne różnice we wskazaniu twórców pojęcia *ecological acoustic*. Cytowani już autorzy twierdzą, że pojęcie owo jest wynikiem prac Simona Fräsera z Uniwersytetu British Columbia, który już w 1970 r. określił akustykę ekologiczną jako interdyscyplinarną mieszankę filozofii, socjologii i sztuki. Duży udział w jej tworzeniu przypisał kanadyjskiemu kompozytorowi i pisarzowi R.M. Schaferowi, który w książce „The Tuning of the World” (1977) przedstawił swoją koncepcję pojęcia EA, a w pracy pt. „World Soundscape Project” rozwinął tę koncepcję, przyjmując założenie, że wszelkie dźwięki otoczenia – krajobrazu akustycznego – dostarczają nie tylko informacji fizycznych, ale przede wszystkim różnorodnych wrażeń estetycznych. Zaowocowało to pojawieniem się nagrań dźwięków przyrody traktowanych podobnie jak utwory muzyczne, przeznaczone przede wszystkim do słuchania relaksacyjnego, opisywane także w specjalistycznych publikacjach [16].

Tematyka artykułu, ukierunkowana przede wszystkim na zagadnienia fizyko-techniczne, uzasadnia ograniczenie dalszych rozważań do tego właśnie obszaru. Literatura zagadnień EA wyróżnia trzy grupy zjawisk dźwiękowych w krajobrazie akustycznym (KA):

1. antropofony (*anthrophone*) to opisane wyżej dźwięki środowiska bytu człowieka, w tym także sygnały mowy i komunikacji słownej