

Małgorzata Romanowska
Uniwersytet Warszawski
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
Zakład Geoekologii
e-mail: malgorzata.romka@gmail.com

KOMPOZYCJA DŹWIĘKOWA JAKO PRZEDMIOT BADAŃ EKOLOGII KRAJOBRAZU

Soundscape studies within the framework of landscape ecology

Słowa kluczowe: krajobraz dźwiękowy, ekoakustyka, kompozycja dźwiękowa krajobrazu
Key words: soundscape, ecoacoustics, sound in the landscape

WPROWADZENIE

Niniejszy artykuł stanowi przegląd literatury dotyczącej dźwięku w krajobrazie z perspektywy ekologicznej, obejmującej m.in. dziedzinę ekologii akustycznej (ang. *acoustic ecology*), bioakustyki, ekoakustyki i ekologii dźwięku w krajobrazie (ang. *soundscape ecology*). Istnieje potrzeba analizy oraz syntezy tej wiedzy w ramach jednego interdyscyplinarnego podejścia. Według autorki odpowiednich ram metodologicznych dostarcza ekologia krajobrazu. Celem artykułu jest synteza badań nad warstwą akustyczną środowiska, określenie roli analizy dźwięków jako elementu holistycznych badań krajobrazowych, jej potencjalnego znaczenia w monitorowaniu dynamiki krajobrazu oraz zarządzaniu krajobrazem.

DYSKUSJA POJĘĆ

Pojęciem stosowanym najczęściej do opisu dźwięków w środowisku jest *krajobraz* lub *pejzaż dźwiękowy* (np. Bernat 2015a; Bernat 2015b; Stasiowska 2015; Losiak 2008), będący tłumaczeniem pojęcia *soundscape*, rozpowszechnionego przez R.M. Schafera – twórcę ekologii akustycznej. Powstało ono w wyniku przekształcenia angielskiego słowa *landscape*, oznaczającego krajobraz. Jak opisuje F. Plit (2011), na termin *landscape* składają się dwa słowa: *land* (oznaczający krainę) i *scape* (oznaczający trzon lub rdzeń). Nie jest jednak oczywiste, że takie było znaczenie członu *scape* dla twórcy pojęcia *soundscape*. Na przykład B. Pijanowski i in. (2011) traktują składową *scape* jako odniesienie do obszaru, sceny, przestrzeni lub widoku.

Dla Schafera najważniejsze było stworzenie słowa przez analogię, które odnosiłoby się do percypowania przestrzeni przez człowieka zmysłem słuchu (w kontraście do percepcji wizualnej). Zatem zamienił pierwszą część słowa (*land*) na *sound*, ponieważ to dźwięk był w centrum jego zainteresowań. Gdyby chcieć pokusić się o podobną analogię w języku polskim, słowo zapewne musiałoby brzmieć *krajodźwięk*. Ta gra słów (*landscape* i *soundscape*) odpowiadała koncepcji i ramom metodologicznym Schafera. W jego założeniach centralną rolę stanowił człowiek odbierający bodźce akustyczne. W takim kontekście próba oddzielenia tego co wizualne od tego co słuchowe pozwalała na badanie wrażeń ludzkich wywoływanych przez środowiskowe bodźce akustyczne. Ekologia akustyczna zaczęła funkcjonować jako autonomiczna dyscyplina badawcza (Losiak 2008). Im bardziej rozpowszechniały się badania krajobrazów dźwiękowych, tym częściej też inne dziedziny czerpały z doświadczeń ruchu ekologii akustycznej. Termin *soundscape* rozpowszechnił się poza swoją wąską niszę. Pojawił się m.in. w akustyce, architekturze, ochronie środowiska, psychologii, socjologii czy urbanistyce (Kang i in. 2016).

W Polsce krajobrazy dźwiękowe są przedmiotem badań geografów (Bernat 2015a; Lewandowski i Szumacher 2008), kulturoznawców i muzykologów (Losiak 2016), a także akustyków (Wiciak i in. 2015). Termin *krajobraz (pejzaż) dźwiękowy* ugruntował się w środowisku naukowym, choć budzi kontrowersje wśród części geografów. Słowo *krajobraz* stanowi znaczące pojęcie nauk przyrodniczych i jest pojmowany całościowo, jako system, a nie jego część subiektywnie odbierana jednym ze zmysłów. Dźwięk jest elementem tego systemu,

jego warstwą lub wąskim strumieniem energii układu, a nie bytem równorzędnym klasycznemu krajobrazowi. F. Plit (2011) określa termin *krajobraz dźwiękowy* nadużyciem. W. Lewandowski i I. Szumacher (2008) stwierdzają, że „... bardziej uzasadnione jest mówienie o dźwięku w krajobrazie, niż o krajobrazach dźwiękowych”.

W większości definicji określenie *krajobraz dźwiękowy* (*soundscape*) odnosi się wyłącznie do subiektywnych odczuć człowieka (Bernat 2015b). S. Bernat (2015a) wprowadza do definicji element przestrzenny („...fragment przestrzeni złożony z elementów przyrodniczych oraz elementów wprowadzonych przez człowieka,...”), ale w jego rozumieniu wciąż istotny pozostaje podmiot percypujący („...będący źródłem postrzeganych dźwięków”).

Dźwięk w krajobrazie może być badany obiektywnie, nie tylko jako zjawisko percypowane przez jednostkę, stanowiące o atrakcyjności krajobrazu. Problem umiejscowienia terminu *soundscape* w ekologii krajobrazu będzie powracał, ponieważ powstały narzędzia pozwalające na wskaźnikowy zautomatyzowany monitoring warstwy dźwiękowej. Zatem ruch, który stał w opozycji do ilościowego badania dźwięków (Brown, Muhar 2004; Dubois i in. 2006; Romanowska 2016), zatoczył swoiste koło i powstały metody umożliwiające zobiiektywizowanie badań akustycznych krajobrazu (Towsey i in. 2014). Zapoczątkowało to nowe kierunki badań, a także powstanie nowej dyscypliny naukowej, ukonstytuowanej m.in. specjalnym wydaniem czasopisma *Landscape Ecology* w 2011 roku oraz publikacją podręcznika autorstwa A. Farina pt. *Soundscape ecology: principles, patterns, methods and applications* (2014).

W listopadzie 2011 roku pojawiło się wydanie *Landscape ecology* pod tytułem *Soundscape ecology*. Znamienne jest zestawienie nazwy czasopisma z tytułem tego wydania. B. Pijanowski ze współpracownikami (2011) w artykule z tego numeru podsumowali badania ekologii akustycznej, bioakustyki i ekologii krajobrazu oraz połączyli je pod hasłem *soundscape ecology*. Stworzyli podwaliny teoretyczne i tym samym podstawy metodologiczne do badań kompozycji dźwiękowych krajobrazu osadzone w ramach klasycznej nauki o krajobrazie. Zrezygnowali z kluczowej roli człowieka jako podmiotu percypującego otaczającego dźwięki. *Soundscape* stał się u nich zjawiskiem realnym, istniejącym obiektywnie i definiowanym następująco (Pijanowski i in. 2011, tłum. własne):

„Zbiór biologicznych, geofizycznych i antropogenicznych dźwięków, emitowanych w krajobrazie, różniących się w przestrzeni i czasie, odzwierciedlających ważne procesy w ekosystemie oraz ludzkie aktywności.”

Autorka przyjmuje powyższą definicję terminu *soundscape*, jednak proponuje użycie terminu *kompozycja dźwiękowa*. Gdy podany jest w definicji kontekst krajobrazowy, przetłumaczenie tego terminu na *krajobraz dźwiękowy* lub *dźwięk w krajobrazie* mogłoby spotkać się z zarzutem błędu *idem per idem*. Dlatego bardziej trafnym wydaje się termin *kompozycja dźwiękowa*, rozumiana jako jedna z cech krajobrazu.

WPROWADZENIE DO EKOLOGII KOMPOZYCJI DŹWIĘKOWYCH

B. Pijanowski i in. (2011) traktują ekologię kompozycji dźwiękowych (z ang. *soundscape ecology*) jako naukę łączącą w sobie ekologię, badania nad zachowaniem zwierząt (w kontekście bioakustyki) oraz dziedziny związane z percepcją dźwięków przez człowieka – psychoakustykę i ekologię akustyczną. W niniejszym artykule nacisk zostanie położony na elementy związane z bioakustyką oraz ekologią w celu określenia roli kompozycji dźwiękowych w strukturze i dynamice krajobrazu.

Współczesna technologia umożliwia długotrwałe nagrywanie dźwięków w wybranych lokalizacjach. Niemożliwe jest wysłuchanie i przeanalizowanie wszystkich powstałych w ten sposób nagrań, dlatego niezbędne jest stosowanie zautomatyzowanych analiz. B. Krause (2008) dokonał kategoryzacji dźwięków na biofonię (odgłosy organizmów żywych), geofonię (odgłosy wynikające z procesów abiotycznych) i antropofonię (dźwięki produkowane przez człowieka i jego wytwory). Dźwięki biofonii zazwyczaj obejmują zakres częstotliwości średnich i wysokich (między 2 a 11 kHz), odgłosy antropogeniczne – niskich (1-2 kHz), a dźwięki geofoniczne pojawiają się w całym spektrum od 1 do 11 kHz (Gage, Axel 2014). Podział ten pozwala na przyporządkowanie danych akustycznych do odpowiednich źródeł na podstawie częstotliwości fali akustycznej podczas analiz wskaźnikowych. M. Towsey i in. (2014) dzielą dostępne w tej chwili wskaźniki służące do analiz nagrań na trzy grupy: wskaźniki związane z kształtem fali, wskaźniki częstotliwościowe, wskaźniki drugiego rzędu. Podsumowanie wybranych z nich zawarto w tabeli 1.

Tabela 1. Przykłady wskaźników akustycznych stosowanych w badaniach kompozycji dźwiękowych krajobrazu**Table 1.** Examples of acoustic indices used in soundscape studies

Nazwa / Name	Symbol	Objaśnienie / Interpretation
1.	2.	3.
Wskaźniki związane z kształtem fali / Waveform indices		
Średnia amplituda drgań / <i>Average signal amplitude</i>	A_{AV}	średnia amplituda obwiedni fali, przeliczana na decybele.
Stosunek sygnału do szumu / <i>Signal-to-noise ratio</i>	SNR	różnica między głośnością [dB] maksymalnej amplitudy obwiedni sygnału w każdej minucie nagrania a głośnością hałasu tła.
Entropia czasowa / <i>Temporal entropy</i>	H[T]	opisuje rozproszenie energii akustycznej w czasie.
Wskaźniki częstotliwościowe / Spectral indices		
Entropia spektralna / <i>Spectral entropy</i>	H[S]	opisuje rozproszenie energii akustycznej w widmie częstotliwościowym.
Liczba pików / <i>Number of peaks</i>	NP	miara złożoności akustycznej, polegająca na zliczaniu głównych szczytów w widmie częstotliwościowym (Gasc i in. 2013).
Wskaźnik złożoności akustycznej / <i>Acoustic complexity index</i>	ACI	charakteryzuje wewnętrzną zmienność natężenia w sygnale; jego opracowanie wynika ze spostrzeżenia, że wewnętrzna zmienność natężenia sygnałów naturalnych (np. śpiew ptaków) jest wyższa od wielu odgłosów pochodzenia antropogenicznego (Pieretti i in. 2011).
Wskaźniki drugiego rzędu / Second order indices		
Wskaźnik entropii / <i>Entropy index</i>	H	iloczyn entropii spektralnej i entropii czasowej.
Wskaźnik akustycznego niepodobieństwa / <i>Acoustic dissimilarity index</i>	D_F	służy do określenia podobieństwa dwóch widm, co pozwala na porównanie bioróżnorodności dwóch różnych ekosystemów.
Bogactwo akustyczne / <i>Acoustic richness</i>	AR	łączy w sobie entropię czasową i medianę obwiedni fali.

1.	2.	3.
Znormalizowany różnicowy wskaźnik kompozycji dźwiękowej / <i>Normalized difference soundscape index</i>	NDSI	NDSI powstał jako analogia do wskaźnika NDVI. Wskaźnik NDSI oblicza się według wzoru: $(b - a) / (b + a),$ gdzie b to energia akustyczna biofonii, a – antropofonii. Wielkość wskaźnika waha się między -1 a +1. Niskie wartości oznaczają większy udział antropofonii, a wysokie wartości o dominacji biofonii, choć należy być ostrożnym w interpretacjach (Gage, Axel 2014).

Źródło: opracowanie własne na podstawie Towsey i in. 2014.

Source: author's own elaboration based on Towsey *et al.* 2014.

Wskaźniki te nie są jednak pozbawione wad, dlatego nie można ufać w pełni zautomatyzowanym analizom, a narzędzia akustyczne wymagają dalszego rozwoju, by można było je z powodzeniem stosować w badaniach w różnych typach krajobrazów (Gasc i in. 2013; Krause, Farina 2016).

KOMPOZYCJA DŹWIĘKOWA A STRUKTURA PRZESTRZENNA KRAJOBRAZU

Przyjmując, że badany system jest w stanie równowagi dynamicznej, można podjąć się badania jego chorostruktury za pomocą analizy akustycznej. Należy przy tym dobrać materiał nagrań tak, by zminimalizować zniekształcenie wyników spowodowane cyklicznością dobową i roczną oraz innymi zmianami przebiegającymi w czasie.

Niemożliwe jest przypisanie dźwięku konkretnie do któregoś z geokomponentów współtworzących wertykalną strukturę krajobrazu. Choć wydaje się, że kompozycja dźwiękowa krajobrazu jest głównie odzwierciedleniem działalności zwierząt, to należy pamiętać o tym, że inne komponenty wpływają na rozprzestrzenianie się sygnałów akustycznych (i są ich źródłem). Na przykład warunki mikroklimatyczne, takie jak temperatura (i gradient temperatury), wilgotność, kierunek wiatru wpływają na przenoszenie się dźwięku, a przez to być może są czynnikami warunkującymi dobową zmienność nadawania sygnałów przez biocenozę (Henwood, Fabrick 1979). Ukształtowanie terenu również tworzy warunki do rozprzestrzeniania się dźwięków i bezpośrednio (poprzez zmianę charakterystyki fali akustycznej) oraz pośrednio (wpływając na zachowania zwie-

rząt) je modyfikuje. Zatem nawet geokomponenty, których elementy rzadko lub w ogóle stają się źródłem fal akustycznych, wpływają na całokształt kompozycji dźwiękowej krajobrazu. Dźwięki są wyrazem klimatu, skały i rzeźby, warunków wodnych i glebowych, roślinności, zwierząt oraz wpływów antropogenicznych. Zmienność przestrzenna struktury krajobrazu i występujących organizmów żywych przyczynia się do wytwarzania charakterystycznych kompozycji dźwiękowych dla każdego typu krajobrazu, a być może nawet dla każdego regionu. Jak wynika z badań, organizmy żywe zamieszkujące dane miejsce tworzą jego niepowtarzalny podpis dźwiękowy (z ang. *acoustic signature*) (Krause i in. 2011; Krause 2013; Pieretti i in. 2015).

B. Krause (2008), analizując spektrogramy ze swoich nagrań dźwiękowych, spostrzegł istnienie współzależności między dźwiękami wytwarzanymi przez zwierzęta i ich odmienność w różnych środowiskach. Odgłosy zwierząt mogą się synchronizować w czasie w ramach jednego gatunku i jednocześnie różnicować między gatunkami. Zwierzęta korzystają także z różnych częstotliwości fali akustycznej, dzięki czemu ograniczone jest wzajemne maskowanie się dźwięków. Na podstawie tych obserwacji Krause stworzył ANH (ang. *Acoustic Niche Hypothesis*), czyli hipotezę niszy akustycznej. Według niej zasada konkurencyjnego wypierania powoduje dostosowywanie sygnałów dźwiękowych jednego gatunku tak, by zminimalizować maskowanie odgłosów przez pozostałe gatunki produkujące dźwięki.

Badania bioakustyków (Pijanowski i in. 2011) wykazują, że dźwięki ptaków różnicują się w zależności od środowiska, w jakim żyją. Zaobserwowano m.in. przestrzenne zróżnicowanie tzw. *kultury śpiewu*. P. Laiolo i J.L. Tell (2006) powiązali zmienności śpiewu w populacjach skowrończyka sierpodziobego (*Lark Chersophilus*) z fragmentacją krajobrazu. Wyniki badań wskazywały, że fragmentacja siedlisk powoduje zubożenie różnorodności melodii w ramach populacji ptaków w danym płacie krajobrazowym. Z kolei odmienność brzmienia pieśni pomiędzy populacjami wzrasta wraz z izolacją pomiędzy nimi. Cechy krajobrazu były lepszym determinantem zróżnicowań w śpiewie niż prosta liniowa odległość pomiędzy osobnikami. Kontynuując swoje badania, P. Laiolo (2008) zainteresował się tym, jak zmienia się kultura śpiewu w przestrzeni. Badał on wewnętrzne zróżnicowanie pieśni różnych wspólnot skowrończyka sierpodziobego w odniesieniu do fragmentów środo-

wiska. Analiza przestrzenna wykazała, że populacje oddalone o zaledwie 5 km od siebie mogły rozwinąć niezależne tradycje śpiewów. Zróżnicowanie indywidualnych śpiewów w zbiorowisku stabilizowało się w płatach o wielkości niecałych 98 ha, tworzonym przez 8-20 samców. Kompozycje w mniejszych płatach były wyraźnie uboższe.

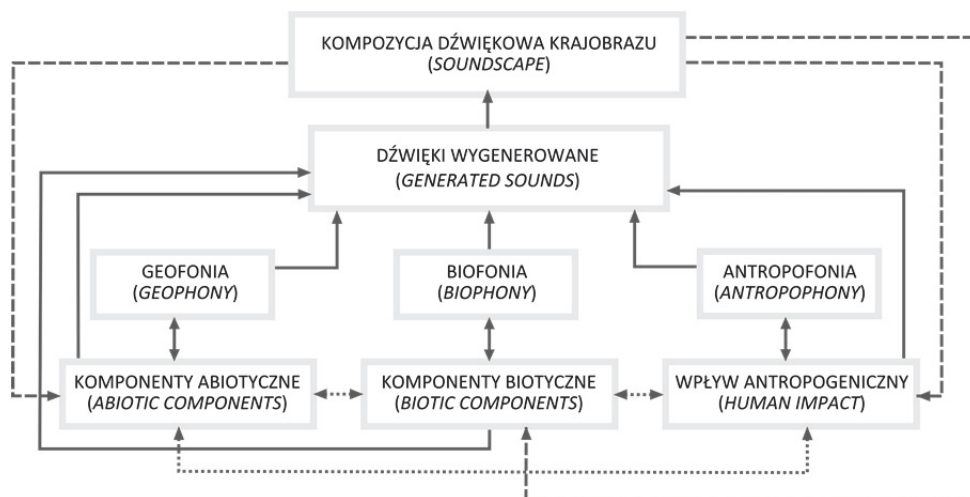
Zatem model systemu płatów i korytarzy krajobrazowych, wedle którego stopień izolacji obszarów korzystnych dla bytowania (płatów) ma wpływ na dynamikę populacji roślin i zwierząt (Richling, Solon 2011), znajduje odzwierciedlenie w zróżnicowaniu kompozycji dźwiękowych. Odmienność warunków środowiskowych płatów, „niekorzystnego” otoczenia i korytarzy oraz idąca za tym odmienność różnorodności gatunkowej tych miejsc, stwarza nadzieje na odnalezienie akustycznych narzędzi do badania roli danych terenów w migracji gatunków i funkcjonowaniu populacji. Ponieważ dźwięki odzwierciedlają bogactwo gatunkowe, mogą być świadectwem rzeczywistych ścieżek migracji i pomóc w poszukiwaniu cech korytarzy wysoce spełniających swoją funkcję. W badaniach D. Tuckera i in. (2014) wielkość płatu i stopień jego izolacji zostały zidentyfikowane jako istotne czynniki wpływające na zmiany w otoczeniu akustycznym. W badaniach S.H. Gage i A.C. Alex (2014) pojawił się wątek możliwości śledzenia tras ptaków wędrownych nad Wielkimi Jeziorami Północnoamerykańskimi dzięki analizie ilości energii akustycznej w przedziale wysokich częstotliwości (czyli takich, w których zwierzęta te wokalizują). Jeśli możliwe będzie zautomatyzowanie rozpoznawania wokalizacji, można będzie również badać rolę poszczególnych płatów i korytarzy, śledząc migrację i lokalizację wybranych gatunków.

Warto również podjąć próbę odnalezienia związków między przestrzenną zmiennością typów krajobrazów a zmiennością kompozycji w warstwie dźwiękowej. B. Krause i A. Farina (2016) podsumowują badania z zakresu ekoakustyki, które wykazują wpływ energetyczności, zoomasy i struktury interakcji społecznych na warstwę akustyczną środowiska. Zatem istnieje pewne powiązanie między warunkami środowiskowymi a kompozycją dźwięków w krajobrazie. Jeśli ta relacja jest wystarczająco silna, analiza nagrań może służyć identyfikacji i porównywaniu typów krajobrazów. Zróżnicowanie warstwy akustycznej w różnych geosystemach zostało potwierdzone licznymi badaniami, które zostaną przytoczone poniżej.

H. Slabbekoorn (2004), wykazał różnice w kompozycji dźwiękowej lasu tropikalnego i ekotonowego. C.W. Bobryk i in. (2016) przeprowadzili badania w systemach rolno-leśnych, gdzie wykazali słabe, ale znaczące relacje pomiędzy wartością wskaźnika ACI a złożonością strukturalną roślinności. Jak wynika z badań W. Joo i współpracowników (2011), akustyczna zmienność biofonii i antropofonii są związane z cechami krajobrazu w gradiencie miejsko-wiejskim. Energia akustyczna biofonii wzrasta od obszaru wysoce zurbanizowanego do obszarów wiejskich. Wzdłuż tego samego gradientu energia akustyczna antropofonii spada. Badanie to wykazało również, że zmienność kompozycji dźwiękowych w znacznym stopniu wyjaśniają cechy krajobrazu (tj. typ pokrycia terenu i odległość od obszarów dużego natężenia ruchu), a nie tylko odległość od centrum miejskiego. Odwrotną korelację antropofonii i biofonii potwierdzili w swoich badaniach D. Tucker i współpracownicy (2014) i wykazali, że antropofonia jest negatywnie skorelowana z kondycją ekologiczną obszaru.

Wyniki badań D. Bormpoudakis i in. (2013) wskazują, że istnieją podpisy dźwiękowe dla typu siedliska. Nawet podobne typy siedlisk (termofilny las dębowy i krawędź lasu termofilnego dębowego) były możliwe do odróżnienia na podstawie kompozycji dźwiękowej. Lasy o podobnej charakterystyce roślinności charakteryzowały się zbliżonymi kompozycjami dźwiękowymi. Wyniki badań D. Tuckera i in. (2014) wykazały, że dla różnorodności kompozycji dźwiękowych charakterystyki roślinności są mniej istotne niż cechy krajobrazu. A. Farina i N. Pieretti (2014) udowodnili, że zmienność kompozycji dźwiękowej może być powiązana ze strukturą roślinności nawet w małej skali, jednak owa zmienność nie może być tłumaczona wyłącznie charakterystyką roślinności.

Próbę podsumowania wzajemnego wpływu elementów krajobrazu i kompozycji dźwiękowej stanowi model przedstawiony na rycinie 1. Komponenty biotyczne, abiotyczne oraz działalność człowieka wpływają na siebie wzajemnie. W danym układzie tych trzech elementów wytwarzane są charakterystyczne dźwięki geofonii, biofonii i antropofonii. Dźwięki wygenerowane ulegają modyfikacjom pod wpływem warunków środowiskowych – w zależności od charakterystyki krajobrazu, odgłosy ulegają różnego rodzaju przekształceniom (np. wyciszenie, odbijanie, maskowanie). Wszystkie te odgłosy razem stanowią kompozycję dźwiękową, która wpływa na komponent biotyczny, działalność człowieka oraz w najmniejszym stopniu na komponent abiotyczny.



Ryc. 1. Model interakcji komponentów krajobrazu i kompozycji dźwiękowej

Fig. 1. Soundscape and landscape components interaction model

Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.

KOMPOZYCJA DŹWIĘKOWA A RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNA

Jednym z kluczowych pojęć związanych ze strukturą przestrzenną krajobrazów jest różnorodność biologiczna. Badania wskaźników akustycznych świadczących o bioróżnorodności mogą służyć do rozpoznania i opisu czynników wpływających na bogactwo fauny, a przy stałym monitoringu również do rozpoznawania i prognozowania zmian.

J. Seur i in. (2008) założyli, że im więcej gatunków znajduje się w zbiorowisku, tym więcej różnych sygnałów będzie przez nie produkowanych, a to spowoduje wzrost heterogeniczności kompozycji akustycznej. Badacze opracowali pierwsze wskaźniki różnorodności na podstawie analizy akustycznej (entropia akustyczna [H] i akustyczne niepodobieństwo [D]). Wykazali, że im więcej gatunków występuje w zbiorowisku, tym bardziej niejednorodne są dźwięki przez nie generowane. Ponadto dowiedli, że prosta analiza sygnału może być miarą bioróżnorodności systemu.

M. Depreatere i in. (2012) testowali użyteczność wskaźników bioróżnorodności opartych na akustycznej analizie porannych i wieczornych śpiewów zwierząt. Średnio wartości różnorodności akustycznej [AR] wzrastały wraz z bogactwem gatunkowym zaobserwowanym poprzez tradycyjną identyfikację foniczną. M. Depreatere i współpracownicy (2012) stwierdzili, że automatyczna procedura może potencjalnie wspierać lub nawet zastąpić obserwacje eksperta. Autorzy zasugerowali, że przyszłe analizy mogłyby porównywać indeks AR do bardziej złożonych wskaźników różnorodności biologicznej. Zaznaczyli, że szczególnie ważne jest określenie, jaki rodzaj różnorodności biologicznej bada dany wskaźnik akustyczny.

W swoich badaniach M. Towsey i in. (2014) potwierdzili, że wskaźniki takie jak entropia czasowa $H [t]$, entropia spektralna $H [s]$ i wskaźnik złożoności akustycznej ACI są użytecznymi miarami różnorodności gatunkowej. Wprowadzili również kilka nowych wskaźników, w tym różnorodność widmową, która przyniosła najbardziej powtarzalne wyniki.

Podsumowując, badania biernego zapisu akustycznego, dzięki swojej nieinwazyjności i możliwości gromadzenia ważnych danych (Krause, Farina 2016), mogą stać się ważnym narzędziem analizy bioróżnorodności w szerokiej skali.

CHRONOSTRUKTURA

Analiza kompozycji dźwiękowej krajobrazu daje duże nadzieje na badanie zmian ekosystemu w czasie (chronostruktury). Odpowiedni dobór próbek dźwiękowych (długość trwania pojedynczego nagrania, częstotliwość rejestrowania, długość trwania całego badania) pozwala na zaprojektowanie badania umożliwiającego poznanie zmienności cyklicznej dobowej i rocznej (co wynika z aktywności owadów, żab, ptaków), a także zmian ewolucyjnych i nagłych w krajobrazie (Dabelsteen, Mathevon 2002; Krause i in. 2011; Farina i in. 2011; Gage, Axel 2014; Pieretti i in. 2015; Henwood, Fabrick 1979).

Na wagę informacji akustycznej w ocenie funkcjonowania krajobrazu niejednokrotnie zwracał uwagę B. Krause (2008, 2013, 2015). B. Pijanowski i in. (2011) stwierdzają, że kompozycja dźwięków w krajobrazie odzwierciedla wiele procesów ekologicznych, a jednocześnie sama tworzy struktury i wzorce. S.H. Gage i A.C. Axel (2014) oraz B. Krause i A. Farina (2016) uważają,

że monitoring akustyczny może służyć badaniom z zakresu wpływu zmian klimatycznych oraz antropopresji na zoocenozę między innymi poprzez możliwość określenia miejsca i czasu tak ważnych zdarzeń, jak kopulacja, reprodukcja lub migracja.

Badania kompozycji dźwiękowej dają nadzieję na opracowanie wskaźników akustycznych, które będą użyteczne w ocenie stabilności, a w szczególności ekwifinalności (czyli *osiągania tego samego stanu końcowego podczas rozwoju przy odmiennych warunkach początkowych i w różny sposób* – Richling, Solon 2011), stałości, bezwładności lub elastyczności jednostki krajobrazowej. D.D. Dunn i J.P. Crutchfield (2009) przypomnieli interesującą hipotezę, że procesy kawitacyjne u drzew generują ultradźwięki słyszalne dla owadów roślinożernych (np. *Ips confuses*), co je przyciąga do żerowania. Zatem potencjalnie analiza ultradźwięków może stać się cenna w badaniu stanu zbiorowisk roślinnych.

Z kolei M. V. Lomolino ze współautorami (2015) sugerują możliwość badania długotrwałych zmian ewolucyjnych na podstawie badań akustycznych. Proponują, by dokonać prób odtworzenia pradawnych kompozycji dźwiękowych dla uzyskania nowej wiedzy paleontologicznej i filogenetycznej.

Odwracając nieco perspektywę, z punktu widzenia dynamiki systemu należy traktować dźwięk jako potencjalny czynnik zakłócający. Dotyczy to w największym stopniu śledzenia skutków zmian w antropofonii, ale również migracji do ekosystemu gatunków allochtonicznych (których dźwięki mogą maskować odgłosy gatunków rodzimych). Różne badania wykazały, że zwierzęta zmniejszają poziom maskowania dźwięków zakłócających (biofonii lub antropofonii) poprzez zmianę charakterystyki akustycznej swojej wokalizacji – np. zmianę częstotliwości (Slabbekom, Boer-Visser 2006; Both, Grant 2012) lub poprzez unikanie nakładania się w czasie z sygnałem maskującym (Brumm 2006; Stanley 2016; Fuller i in. 2007).

Lokalna kompozycja dźwiękowa może być też czynnikiem ułatwiającym lub utrudniającym ekspansję gatunków inwazyjnych. A. Farina i in. (2013) podsumowując badania gatunku inwazyjnego (pekińczyka czerwonodziobego, *Leiothrix lutea*) we wschodniej części Ligurii (Włochy), gdzie stworzył on wyjątkowo dużą społeczność, postawili hipotezę, że sukces kolonizacyjny ptaka na tym terenie wynika z jego dominacji akustycznej.

Badanie kompozycji dźwiękowej w krajobrazie pozwala na uchwycenie niuansów trudnych do zbadania innymi metodami. B. Krause (2013, 2015) wspo-

mina badania akustyczne w krajobrazie lasów iglastych gór Sierra Nevada, gdzie dokonano selektywnej wycinki drzew. Przed i po tym wydarzeniu były robione zarówno fotografie, jak i nagrania dźwiękowe okolicy. Okazało się, że pomimo braku znaczących zmian w sferze wizualnej, dokonała się ogromna zmiana w widmie czasowym i częstotliwościowym nagrań, świadcząca o spadku zarówno liczebności, jak i różnorodności zwierząt.

Podsumowując, zmiana struktury i funkcjonowania krajobrazu może powodować znaczącą zmianę w kompozycji dźwiękowej. Posiadając wiedzę na temat zmian cyklicznych i stosując zautomatyzowany monitoring, można wychwycić anomalie w występujących zmiennościach, które mogą świadczyć o występowaniu zmian w środowisku.

PODSUMOWANIE

W badaniach nad dźwiękiem w krajobrazie rozwinął się nie tylko wątek percepcji ludzkiej, ale także wskaźnikowych badań, które mogą być źródłem cennych informacji o krajobrazie. Istnieje potrzeba rozwoju narzędzi i poznawania zależności przestrzennych oraz czasowych zmienności charakterystyk akustycznych jako podwalin do tworzenia metod oceny struktury i dynamiki systemów. Należy jednak zaznaczyć, że do tej pory opracowania są wybiórcze. Świadczą o pewnych zależnościach, jednak wciąż brakuje danych, które pozwoliłyby na uogólnianie wniosków i uniwersalizację badań. Potencjał tej dziedziny daje jednak nadzieje na uzyskanie miarodajnych i łatwych w analizie metod monitoringu i oceny funkcjonowania krajobrazów w wymiarze czasoprzestrzennym.

Literatura

- Bernat S., 2015a, *Dźwięk w krajobrazie. Podejście geograficzne*, Lublin.
- Bernat S., 2015b, Wokół pojęcia soundscape. Dyskusja terminologiczna, *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*, 30, 45-57.
- Bobryk C.W., Rega-Brodsky C.C., Bardhan S., Farina A., He H.S., Jose S., 2016, A rapid soundscape analysis to quantify conservation benefits of temperate agroforestry systems using low-cost technology, *Agroforestry Systems*, 90, 997-1008.
- Bormpoudakis D., Sueur J., Pantis J.D., 2013, Spatial heterogeneity of ambient sound at the habitat type level: ecological implications and applications, *Landscape Ecology*, 28, 495-506.

- Both C., Grant T., 2012, Biological invasions and the acoustic niche: the effect of bullfrog calls on the acoustic signals of white-banded tree frogs, *Biology Letters*, 8, 714-716.
- Brown A. L., Muhar A., 2004, An Approach to the Acoustic Design of Outdoor Space, *Journal of Environmental Planning and Management*, 47(6), 827-842.
- Brumm H., 2006, Signalling through acoustic windows: nightingales avoid interspecific competition by short-term adjustment of song timing, *Journal of Comparative Physiology A*, 192, 1279-1285
- Dabelsteen T., Mathevon N., 2002, Why do songbirds sing intensively at dawn?, *Acta Ethologica*, 4(2), 65-73.
- Depraetere M., Pavoine S., Jiguet F., Gasc A., Duvail S., Sueur J., 2012, Monitoring animal diversity using acoustic indices: Implementation in a temperate woodland, *Ecological Indicators*, 13, 46-54.
- Dubois D., Guastavino C., Raimbault M., 2006, A Cognitive Approach to Urban Soundscapes: Using Verbal Data to Access Everyday Life Auditory Categories, *Acta Acustica united with Acustica*, 92, 865-874.
- Dunn D.D., Crutchfield J.P., 2009, Entomogenic Climate Change: Insect Bioacoustics and Future Forest Ecology, *LEONARDO*, 42(3), 239-244.
- Farina A., 2014, *Soundscape ecology: principles, patterns, methods and applications*, Springer.
- Farina A., Pieretti N., Morganti N., 2013, Acoustic patterns of an invasive species: the Redbilled Leiothrix (*Leiothrix lutea* Scopoli 1786) in a Mediterranean shrubland, *Bioacoustics*, 22(3), 175-194.
- Farina A., Pieretti N., 2014, Sonic environment and vegetation structure: A methodological approach for a soundscape analysis of a Mediterranean maqui, *Ecological Informatics*, 21, 120-132.
- Farina A., Pieretti N., Piccioli L., 2011, The soundscape methodology for long-term bird monitoring: A Mediterranean Europe case-study, *Ecological Informatics*, 6, 354-363.
- Fuller R.A., Warren P.H., Gaston K.J., 2007, Daytime noise predicts nocturnal singing in urban robins, *Biology Letters*, 3, 368-370.
- Gage S.H., Axel A.C., 2014, Visualization of temporal change in soundscape power of a Michigan lake habitat over a 4-year period, *Ecological Informatics*, 21, 100-109.
- Gasc A., Sueur J., Pavoine S., Pellens R., Grandcolas P., 2013, Biodiversity sampling using a global acoustic approach: contrasting sites with microendemics in New Caledonia, *PLoS ONE*, 8(5), e65311.
- Henwood K., Fabrick A., 1979, A Quantitative Analysis of the Dawn Chorus: Temporal Selection for Communicatory Optimization, *The American Naturalist*, 114(2), 260-274.

- Joo W., Gage S.H., Kasten E.P., 2011, Analysis and interpretation of variability in soundscapes along an urban-rural gradient, *Landscape and Urban Planning*, 103, 259-276.
- Kang J., Aletta F., Gjestland T.T., Brown L.A., Botteldooren D., Schulte-Fortkamp B., Lercher P., van Kamp I., Genuit K., Fiebig A., Bento Coelho J.L., Maffei L., Lavia L., 2016, Ten questions on the soundscapes of the built environment, *In Building and Environment*, 108, 284-294.
- Krause B., 2008, Anatomy of the Soundscape: Evolving Perspectives, *Journal of the Audio Engineering Society*, 56(1/2), 73-80.
- Krause B., 2013, *The voice of the natural world*, wystąpienie z cyklu "TED Talk", dostępne w internecie: https://www.ted.com/talks/bernie_krause_the_voice_of_the_natural_world, data dostępu: 03.11.2016.
- Krause B., 2015, Człowiek w orkiestrze świata. W poszukiwaniu źródeł muzyki, przeł. Kijowska K. i Bogdańska M., *Glissando*, 26, 46-51.
- Krause B., Farina A., 2016, Using ecoacoustic methods to survey the impacts of climate change on biodiversity, *Biological Conservation*, 195, 245-254.
- Krause B., Gage S.H., Joo W., 2011, Measuring and interpreting the temporal variability in the soundscape at four places in Sequoia National Park, *Landscape Ecology*, 26, 1247-1256.
- Laiolo P., 2008, Characterizing the spatial structure of songbird cultures, *Ecological Applications*, 18(7), 1774-1780.
- Laiolo P., Tell J.L., 2006, Landscape bioacoustics allow detection of the effects of habitat patchiness on population structure, *Ecology*, 87(5), 1203-1214.
- Lewandowski W., Szumacher I., 2008, Dźwięk jako walor krajobrazu, [w:] Bernat, S. (red.) *Dźwięk w krajobrazie jako przedmiot badań interdyscyplinarnych, Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego PTG*, 11, Lublin, 54-62.
- Lomolino M. V., Pijanowski B. C., Gasc A., 2015, The silence of biogeography, *Journal of Biogeography*, 42, 1187-1196.
- Losiak R., 2008, Z badań nad pejzażem dźwiękowym Wrocławia. Muzyka w przestrzeni publicznej miasta, [w:] Bernat, S. (red.) *Dźwięk w krajobrazie jako przedmiot badań interdyscyplinarnych, Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego PTG*, 11, Lublin, 253-264.
- Losiak R., 2016, Pejzaż dźwiękowy jako niematerialne dziedzictwo miasta. Badania, ochrona i rewitalizacja, [w:] Kwiecińska M. (red.) *Niematerialne dziedzictwo miasta. Muzealizacja, ochrona, edukacja*, Wyd. Muzeum Historyczne Miasta Krakowa, Kraków, 62-75.
- Pieretti N., Duarte M.H.L., Sousa-Lima R.S., Rodrigues M., Young R.J., Farina, A., 2015, Determining temporal sampling schemes for passive acoustic studies in different tropical ecosystems, *Tropical Conservation Science*, 8(1), 215-234.

- Pieretti N., Farina A., Morri D., 2011, A new methodology to infer the singing activity of an avian community: the acoustic complexity index (ACI), *Ecological Indicators*, 11, 868-873.
- Pijanowski B., Farina A., Gage S., Dumyahn S., Krause B., 2011, What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. *Landscape Ecology*, 26(9), 1213-1232.
- Plit F., 2011, *Krajobraz kulturowy – czym jest?*, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Warszawa.
- Richling A., Solon J., 2011, *Ekologia krajobrazu*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Romanowska M., 2016, Ekologia akustyczna a zarządzanie hałasem – porównanie metod, [w:] Panfil M. (red.), *Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce – Nauki przyrodnicze, Młodzi Naukowcy*, Poznań, 97-104.
- Slabbekoorn H., 2004, Habitat-dependent ambient noise: Consistent spectral profiles in two African forest types, *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6), 3727-3733.
- Slabbekoorn H., Boer-Visser A., 2006, Cities Change the Songs of Birds, *Current Biology*, 16, 2326-2331.
- Stanley C.Q., Walter M.H., Venkatraman M.X., Wilkinson G.S., 2016, Insect noise avoidance in the dawn chorus of Neotropical birds, *Animal Behaviour*, 112, 255-265
- Stasiowska J., 2015, Przeczyść uszy, przetrzyj oczy, przewietrz mózg – ekologia akustyczna, soundscape studies, sound studies. *Glissando*, 26, 52-55.
- Sueur J., Pavoine S., Hamerlynck O., Duvail S., 2008, Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal, *PLoS ONE*, 3 (12), e4065.
- Towsey M., Wimmer J., Williamson I., Roe P., 2014, The use of acoustic indices to determine avian species richness in audio-recordings of the environment, *Ecological Informatics*, 21, 110-119.
- Tucker D., Gage S.H., Williamson I., Fuller S., 2014, Linking ecological condition and the soundscape in fragmented Australian forests, *Landscape Ecology*, 29, 745-758.
- Wiciak J., Mleczko D., Ozga A., Wszolek G., Wierzbicki J., Piechowicz J., Małecki P., 2015, Quietness in the Soundscape of the Białowieża National Park, *Acta Physica Polonica A*, 1-A (128), 79-84.

Summary

The aim of this paper is to summarize selected studies about the sound in the landscape in the framework of the landscape ecology which gives an interdisciplinary approach. In this context the most essential researches were carried out in bioacoustics, ecoacoustics, acoustic ecology and soundscape ecology.

The article starts with a brief description of how acoustic ecology and concept of soundscape had evolved and spread to various disciplines. The controversy over the term of soundscape is briefly presented: in Polish it has been translated as *krajobraz dźwiękowy* which means the *acoustic landscape* and it is hard to use it in the framework of the landscape ecology. It is suggested that *krajobraz dźwiękowy* should be understood as sound perceived by human (like in most of its definitions). The objective phenomena of the sound in the landscape is called the *sound composition* (*kompozycja dźwiękowa*) and is meant as the landscape feature. The soundscape ecology is described as a new discipline which gives useful acoustic indicators.

Next, results of studies focusing on the sound in relation to the spatial structure of the landscape, (i.e. differentiations of bird songs in relation to patch connectivity and size or variations of soundscapes in relation to landscape characteristics) are discussed. Conclusions include suggestions regarding – future lines of acoustic researches. Some studies about acoustical methods to research the biodiversity are also described.

The last part of the paper is about the soundscape chronostructure in relation to landscape evolution and its cyclic changes. General conclusions about annual and daily variability are described. Studies on ultrasounds and their possible importance in measuring the vegetation condition are described. Observations and experiments focusing on an influence of masking sounds on animal vocalisations give the knowledge about mechanisms of the soundscape change caused by anthropopressure or invasive species. This is potentially useful to monitoring dynamics in the soundscape.