

STRESZCZENIE

Migracje i dyspersja należą do najważniejszych procesów ekologicznych, jakie wpływają na funkcjonowanie ekosystemów, a także na naszą gospodarkę, zdrowie i bezpieczeństwo. Przeloty ptaków, nietoperzy i owadów odbywają się w dużej skali przestrzennej – regionalnej, kontynentalnej lub międzykontynentalnej. Badania tego zjawiska prowadzone klasycznymi metodami zazwyczaj są ograniczone do skali lokalnej. Zmianę tego stanu rzeczy przyniósł rozwój technologii radarowej, która umożliwiła badania przemieszczania się zwierząt w atmosferze w dużej skali przestrzennej. Celem niniejszego artykułu przeglądowego jest przedstawienie metody obrazowania radarowego, stosowanej w badaniach przelotów ptaków, nietoperzy i owadów. Opisano rodzaje radarów stosowanych w badaniach. Na przykładach omówiono zastosowanie radarów w badaniach podstawowych i w ochronie zwierząt. Radary stosuje się w badaniach wpływu warunków meteorologicznych na przebieg wędrówek ptaków, w badaniach dynamiki przelotów ptaków i owadów w czasie i przestrzeni, a także w badaniach mechanizmów orientacji ptaków i owadów. W aspekcie aplikacyjnym radary używa się w monitoringu zagrożonych gatunków ptaków i nietoperzy, w monitoringu ptaków na lotniskach, a także w ocenie oddziaływania wysokich budowli na ptaki i nietoperze.

WPROWADZENIE

Ekologia jest ściśle dziedziną biologii, badającą zależności między organizmami i ich środowiskiem [1]. Jej dorobek naukowy i narzędzia badawcze szeroko wykorzystuje praktyczna ochrona przyrody [2]. Ogromny postęp, jaki w ostatnich dekadach dokonał się w obu tych dziedzinach, był możliwy dzięki rozwojowi technologii pozwalających badać procesy ekologiczne z coraz większą precyzją. Część tych procesów zachodzi w dużej skali przestrzennej – regionalnej, kontynentalnej lub międzykontynentalnej. Klasyczne metody badawcze ekologii pozwalają badać te zjawiska w skali lokalnej. Rozszerzenie skali przestrzennej badań długo było niemożliwe albo bardzo ograniczone z powodów finansowych, osobowych i/lub logistycznych. Ograniczenia te w dużej mierze udało się przełamać dzięki rozwojowi technologii, takich jak obrazowanie radarowe lub systemy teledetekcji wykorzystujące technologię satelitarną. Pozwalają one śledzić przebieg badanych zjawisk w czasie rzeczywistym lub bliskim rzeczywistemu i w dużej skali przestrzennej [3-6]. Dane uzyskane dzięki metodzie obrazowania lub teledetekcji zwykle są bardziej precyzyjne niż te uzyskane za pomocą klasycznych metod. Pozwoliły one zweryfikować powszechnie uznawane modele badanych zjawisk; w wielu przypadkach potwierdziły je, w innych zaś doprowadziły do ich korekty lub do przełomowych odkryć.

Celem niniejszego artykułu jest zaprezentowanie metody obrazowania za pomocą radarów, wykorzystywanej w badaniach migracji i dyspersji zwierząt latających. Migracje i dyspersja to jedne z najbardziej spektakularnych zjawisk ekologicznych. Należą do najważniejszych czynników kształtujących funkcjonowanie ekosystemów, wpływają również na naszą gospodarkę, zdrowie i bezpieczeństwo [4-5,7]. Migrujące zwierzęta przenoszą patogeny, pasożyty, nasiona i pyłki roślin, a także pierwiastki biogenne. Migracje kształtują dynamikę w czasie i przestrzeni kluczowych procesów ekologicznych, takich jak drapieżnictwo, pasożytnictwo, roślinożerność i konkurencja. Wpływają na gospodarkę rybacką i rolnictwo. Efektem dyspersji jest przepływ genów między lokalnymi populacjami, zmiany zasięgów gatunków i kolonizacja przez nie nowych terenów [7]. Nieraz migracje i dyspersja mają charakter masowy – w jednej chwili nad danym obszarem mogą przelatywać tysiące ptaków, nietoperzy lub owadów. W miejscach noclegu lub odpoczynku podczas wędrówki mogą zbierać się setki tysięcy lub miliony ptaków. Lecące ptaki mogą zagrażać bezpieczeństwu ruchu lotniczego. Wszystko to sprawia, że przemieszczanie się zwierząt znajduje się w centrum uwagi ekologów.

Piotr Matyjasiak✉

Zakład Biologii Ewolucyjnej, Wydział Biologii i Nauk o Środowisku, Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie

✉ Zakład Biologii Ewolucyjnej, Wydział Biologii i Nauk o Środowisku, Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, ul. Wóycickiego 1/3, 01-938 Warszawa, e-mail: p.matyjasiak@uksw.edu.pl

Artykuł otrzymano 5 lutego 2017 r.
Artykuł zaakceptowano 8 lutego 2017 r.

Słowa kluczowe: dyspersja zwierząt, metody, migracje zwierząt, obrazowanie, radar, wizualizacja

Podziękowania: Praca została wykonana w ramach działalności statutowej Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie (dotacja UmoPBBNS-1/16).

Migracje charakteryzują się regularnością w czasie i przestrzeni [8,9]. Zwierzęta migrują w poszukiwaniu pokarmu lub partnerów do rozrodu, bądź w celu uniknięcia nieprzyjających warunków meteorologicznych (np. mroźnej zimy), drapieżników lub pasożytów. Niektóre gatunki odbywają krótko- lub długodystansowe sezonowe wędrówki między miejscami rozrodu i zimowania. Inne codziennie pokonują krótsze lub dłuższe trasy łączące miejsca rozrodu lub odpoczynku z miejscami żerowania. Istotą dyspersji jest przemieszczanie się młodych zwierząt opuszczających okolice rodzinne w poszukiwaniu miejsca do osiedlenia się na czas dorosłości [7,9]. W zakresie tego zjawiska mieści się również okresowe zmienianie przez dorosłe osobniki miejsc rozrodu, postoju podczas wędrówki lub zimowania.

KLASYCZNE METODY BADANIA MIGRACJI I DYSPERSJI ZWIERZĄT

Klasyczny warsztat badań migracji i dyspersji zwierząt obejmuje dwie metody: obserwacje wizualne, połączone z liczeniem migrujących osobników, oraz odłowy, znakowanie nieszkodliwymi trwałymi znacznikami i wypuszczanie, a następnie kolejne odłowy lub obserwacje znakowanych osobników [8,9]. Dzięki obserwacjom z udziałem wielu obserwatorów, rozstawionych na dużym obszarze, można było poznać terminy, szlaki i kierunki migracji oraz zmienność w czasie i przestrzeni liczebności migrantów należących do wielu gatunków zwierząt. Wiele gatunków ptaków migruje wyłącznie w nocy – te obserwuje się na tle tarczy księżycy lub przeszukując niebo za pomocą silnych reflektorów parabolicznych.

Odłowy prowadzone regularnie i połączone ze znakowaniem osobników stosuje się w badaniach dynamiki liczebności zwierząt przemierzających dany obszar podczas wędrówki. Znakowanie pozwoliło też dokładniej poznać trasy migracji osobników z różnych populacji, rozmieszczenie miejsc postoju podczas wędrówki i arealów zimowania. Ptaki znakuje się za pomocą numerowanych metalowych obrączek zakładanych na nogi. U nietoperzy stosuje się analogiczne znaczniki zakładane na skrzydło.

Obie metody mają istotne ograniczenia [8,9]. Obserwacje wizualne są mniej efektywne w warunkach gorszej widoczności podczas niepogody. Całkowicie zawodzą w przypadku ptaków i owadów migrujących na większych wysokościach, a także ptaków podróżujących w okresach, gdy nocą są bezksiężycowe, bądź lecących nad morzem daleko od brzegu. Większość gatunków ptaków podczas wędrówki leci wysoko, a obniża lot wówczas, gdy napotyka silny przeciwny wiatr. Natomiast gatunki migrujące nad morzem pojawiają się w pobliżu brzegu, w zasięgu wzroku obserwatorów, głównie w czasie silnych wiatrów wiejących od morza. Z kolei metoda odłowów rejestruje tylko te osobniki, które pojawiły się w miejscu wystawienia pułapek. W przypadku ptaków będą to osobniki, które zatrzymały się na postój w miejscu odłowów. Metoda ta nie rejestruje osobników lub gatunków, które przelatują nad badanym obszarem bez zatrzymania. Pomimo ograniczeń, obie metody badawcze są z powodzeniem stosowane do dziś. Prawdziwy przełom w badaniach przyszedł dopiero wraz z zastosowaniem ra-

darów, które pozwoliły stosunkowo niewielkim kosztem badać przemieszczenia zwierząt latających niezależnie od wysokości przelotu, pory doby i pogody, na dużym obszarze i w czasie rzeczywistym lub niemal rzeczywistym.

OBRAZOWANIE Z WYKORZYSTANIEM RADARÓW

Radar (ang. *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *RAN*ging) emituje krótkie pulsy lub ciągle wiązki promieniowania elektromagnetycznego i rejestruje echa odbite od różnych obiektów. Początkowo zastosowano go do wykrywania nieprzyjacielskich samolotów, ale rejestrował też inne obiekty latające. Podczas II Wojny Światowej operatorzy radarów brytyjskich Królewskich Sił Powietrznych często obserwowali na ekranach „anioły”. Jak stwierdzili, niejednokrotnie były one stadami ptaków [10]. Po tym odkryciu poczyniono pierwsze kroki by wykorzystać radar do obserwacji przelotów ptaków, a regularne badania w tym zakresie rozpoczęto w latach 60. XX wieku [11]. Od tamtej pory radary, coraz bardziej unowocześniane, wykorzystuje się w badaniach podstawowych nad przelotami ptaków [9], do monitoringu ptaków i nietoperzy w celu ochrony biologicznej [12] oraz monitoringu ptaków i nietoperzy w strefach operacji lotniczych [11]. Okazało się również, że radaru można użyć do obserwacji lotów owadów, np. sezonowych migracji motyli lub owadów wyrządzających szkody w uprawach rolnych [13].

RADARY STOSOWANE W BADANIACH BIOLOGICZNYCH

W obrazowaniu przelotów zwierząt znalazło zastosowanie kilka rodzajów radarów, różniących się zasięgiem, trybem pracy (skanowanie przestrzeni lub śledzenie obiektów), możliwością rejestracji zjawiska przesunięcia dopplera, zastosowaniem technik polaryzacyjnych i długością emitowanej fali promieniowania. Poniżej przedstawiono charakterystykę radarów stosowanych w badaniach ekologicznych [11-15].

Długą historię stosowania w badaniach ornitologicznych mają posiadające dużą moc i zasięg **radary kontroli ruchu lotniczego** – radary kontroli zbliżania (ASR, ang. *air*port *sur*veillance *radars*) mające zasięg (dla ptaków) 120 km, oraz radary kontroli obszaru powietrznego (ARSR, ang. *air* route *sur*veillance *radars*) o zasięgu 250 km. Są one przydatne do badań przemieszczania się ptaków w dużej skali przestrzennej. Rozdzielczość tych radarów zazwyczaj jest zbyt mała, by uzyskać zadowalające namiary lokalizacji pojedynczych ptaków lub małych ich stad. Natomiast wystarczy do lokalizowania dużych stad ptaków podrywających się z noclegowisk lub miejsc odpoczynku, bądź chmar nietoperzy opuszczających kolonie lub kryjówki. Z uwagi na to radary te wykorzystywano do tworzenia dwuwymiarowych obrazów, a następnie map, miejsc koncentracji ptaków lub nietoperzy w okresie wędrówek lub rozrodu. Obecnie są rzadko stosowane w badaniach biologicznych.

W ostatnich dwóch dekadach, w badaniach migracji i dyspersji organizmów w dużej skali przestrzennej ogromną karierę zrobiły **radary pogodowe** (meteorologiczne, WSR, ang. *weather surveillance radars*), mające dużą moc, dużą czu-

łość i zasięg dla obiektów biologicznych wynoszący, zależnie od pogody, od 120 do 250 km. W Europie Zachodniej i Środkowej oraz w Ameryce Północnej radary te tworzą spójne sieci. Emitując wąską wiązkę antenową skanują przestrzeń w kilku sektorach wysokości, pozwalając na określenie pułapu namierzonych obiektów. Swój sukces zawdzięczają systematycznej rozbudowie sieci i wyposażeniu ich w coraz nowocześniejsze urządzenia charakteryzujące się bardzo wysoką czułością oraz możliwością rejestrowania efektu przesunięcia dopplerowskiego wywołanego ruchem obiektów, od których następuje odbicie wiązki. Analiza częstotliwości sygnału odbieranego przez dopplerowskie radary pogodowe pozwala określić szybkość lotu obiektów biologicznych względem ziemi oraz kierunek ich ruchu. Dysponując danymi o prędkości i kierunku wiatru na różnych wysokościach, uzyskiwanymi z radiosondażu atmosfery [16] lub z radarów pogodowych, można określić szybkość obiektów biologicznych względem powietrza (ich rzeczywistą szybkość). Od pewnego czasu instalowane są urządzenia emitujące wiązkę spolaryzowaną, co przyczynia się do zwiększenia precyzji identyfikowania zarejestrowanych przez nie obiektów, w tym biologicznych. Radary pogodowe pozwalają analizować zmiany w czasie i przestrzeni zagęszczenia obiektów przyrodniczych w atmosferze, kierunki ich lotu na różnych wysokościach, wykrywać i mapować miejsca koncentracji ptaków, w tym miejsca postoju ptaków podczas wędrówek, kolonie nietoperzy, a także miejsca rójek owadów. Wykorzystuje się je do analizy zmienności liczebności migrujących ptaków w skali regionalnej lub kontynentalnej. Wieloletnie dane uzyskiwane z radarów pogodowych są archiwizowane przez krajowe służby meteorologiczne, od których można uzyskać te dane do badań.

Radary pogodowe pozwalają uzyskać satysfakcjonujące biologów oszacowania zagęszczeń zwierząt znajdujących się powietrzu [17]. Jednak przetwarzanie generowanych przez nie bardzo obfitych strumieni danych, jest nie lada wyzwaniem. Dane te obejmują szybkość i kierunek przemieszczania się różnych obiektów, w tym biologicznych, ich pozycję geograficzną oraz czas. Często zasięgi radarów pogodowych dla obiektów biologicznych są nieciągłe. Tworzenie obrazu wymaga zintegrowania różnorodnych danych i wypełnienia luk. By temu zaradzić opracowuje się i stale udoskonala cyfrowe systemy algorytmicznego przetwarzania sygnału radarowego, pozwalające identyfikować echa pochodzące od obiektów biologicznych, rozróżniać echa pochodzące od różnych kategorii zwierząt (owady, ptaki, nietoperze), wyliczać wskaźniki ilościowe (np. zagęszczenie ptaków na kilometr sześcienny) i tworzyć pionowe profile zagęszczeń obiektów biologicznych [18-22]. Aktualnie rozwijane są ogólnie dostępne algorytmy, które na podstawie danych z radarów pogodowych tworzą wizualizacje ruchu obiektów biologicznych w atmosferze [22,23]. W przystępny i łatwy do interpretacji biologicznej sposób obrazują one dynamikę migracji badanych organizmów nad rozległymi obszarami.

Od wielu lat w badaniach ptaków stosuje się przejmowane od wojska małe, mobilne **radary śledzące** (ang. *tracking radars*) o zasięgu, w przypadku ptaków, do kilkunastu kilometrów. Są one przydatne w badaniach przemieszczania się

zwierząt latających w skali lokalnej. Emitują wąską wiązkę antenową i śledzą namierzone obiekty (pojedynczego ptaka lub stado ptaków) w atmosferze. Otrzymane dane pozwalają zobrazować trajektorię lotu ptaków w trójwymiarowej przestrzeni i na jej podstawie analizować kierunek wędrówek ptaków, szybkość lotu lub reakcje ptaków wobec zbliżających się samolotów. Pracując w trybie przeszukiwania przestrzeni radar ten pozwala mierzyć zagęszczenie i rozmieszczenie obiektów biologicznych w wybranych sektorach wysokości.

Będące obowiązkowym wyposażeniem każdego statku **radary morskie** (ang. *marine surveillance radars*), szczególnie modele wysokiej rozdzielczości, znalazły zastosowanie w monitoringu ptaków w małej skali przestrzennej, na lotniskach lub w badaniach kolizji latających zwierząt z wysokimi budowlami (np. z turbinami elektrowni wiatrowych). Radar morski wykrywa pojedyncze ptaki w odległości do 5 km i stada ptaków w odległości do 15 km. W celu uzyskania możliwości określania wysokości, na której przemieszczają się obserwowane obiekty biologiczne, łączy się dwa urządzenia, z których jedno skanuje przestrzeń w płaszczyźnie poziomej (obecnie stosuje się w tym celu radar dopplerowski), a drugie w pionowej.

Powyższe rozwiązanie zastosowano projektując często używane na lotniskach, mobilne **radary „ptasie”** (takie jak system Merlin [24]). Innym rozwiązaniem konstrukcyjnym „ptasich” radarów jest zastosowanie do radaru morskiego anteny parabolicznej, emitującej wąską wiązkę „olówkową”. Urządzenie takie, skanując przestrzeń w płaszczyźnie poziomej przy różnych kątach wzniesienia anteny, pozwala otrzymać dla każdego echa dane o odległości i wysokości namierzonych obiektów biologicznych (przykładem jest system Accipiter [25]). Obrazy uzyskane za pomocą radarów morskich lub „ptasich” nie są dość precyzyjne, by dokładnie określić trajektorie lotu ptaków lub nietoperzy na bardzo małej przestrzeni w bezpośrednim sąsiedztwie obiektów infrastruktury (np. turbin wiatrowych lub linii przesyłowych wysokiego napięcia). Ponadto, obrazy te nie pozwalają identyfikować gatunków zaobserwowanych ptaków. Dlatego w czasie skanowania (szczególnie nocnego, gdy migruje wiele gatunków ptaków), jako uzupełnienie stosuje się obrazowanie za pomocą kamer termowizyjnych [26]. Kamery te rejestrują wysokiej rozdzielczości obrazy zwierząt lecących w odległości sięgającej 2-3 km. Nowe modele „ptasich” radarów to dopplerowskie radary cyfrowe, wyposażone w algorytmy pozwalające odróżnić echa ptaków od ech innych obiektów (np. owadów) i tworzące dwu lub trójwymiarowe obrazy trajektorii lotu ptaków [27]. Ostatnie lata przyniosły rozwój systemów algorytmicznych pozwalających automatycznie i w czasie rzeczywistym identyfikować namierzone obiekty biologiczne na podstawie takich charakterystyk, jak profil (pole przekroju) echa radarowego, trajektoria i szybkość lotu oraz częstotliwość uderzeń skrzydeł [28,29]. Obecnie rozwijane są algorytmy, w tym oparte na sztucznej inteligencji systemy uczące się, pozwalające w czasie rzeczywistym odróżniać echa ptaków od ech innych obiektów, klasyfikować namierzone ptaki do grup gatunków, wykreślać trajektorie lotu i obliczać prędkość lotu [21,23].

Osiągnięciem ostatnich lat są specjalistyczne **radary entomologiczne**, pozwalające na prowadzenie bezpośrednich i precyzyjnych obserwacji owadów o masie powyżej 10 mg, migrujących na wysokości do 1500 metrów [30,31]. Są to małe urządzenia emitujące wąską wiązkę antenową skierowaną pionowo do góry. Zastosowanie w tych radarach wiązki o zmiennej polaryzacji pozwoliło określać wielkość i kształt ciała oraz kierunek lotu owadów. Radary te stosuje się w badaniach migracji owadów i do monitoringu owadów wyrządzających szkody w rolnictwie. Pozwalają one określić zagęszczenia owadów migrujących na różnych wysokościach. Radarów tych można również użyć do monitorowania migrujących ptaków. W celu monitorowania przemieszczania się w dużej skali przestrzennej owadów-szkodników rolniczych (w tym tych o masie ciała poniżej 10 mg, np. mszyc zbożowych) stosuje się również dopplerowskie radary skanujące, np. odpowiednio przystosowane radary morskie.

ZASTOSOWANIA W BADANIACH MIGRACJI ZWIERZĄT

Od początku swego stosowania w podstawowych badaniach biologicznych radary były wykorzystywane w przede wszystkim do badania przelotów ptaków. Przegląd badań wędrówek ptaków z zastosowaniem radaru przedstawia Newton w monografii *The migration ecology of birds* [9]. Między innymi wykazano, że przeloty ptaków odbywają się przeważnie na dużej wysokości, poza zasięgiem wzroku obserwatorów (nawet uzbrojonych w lornetki). Na mniejszej wysokości ptaki lecą podczas gorszej pogody, szczególnie wtedy, gdy wieje silny przeciwny wiatr. Dowodzi to, że klasyczna metoda wizualnej obserwacji wędrujących ptaków raczej nie daje realistycznych wyników. Inne badania prowadzone za pomocą obu metod wykazały jednak, że w czasie silnego przeciwnego wiatru część ptaków leci na pułapie poniżej horyzontu radarów dalekiego zasięgu. Wynika stąd, że w pewnych sytuacjach również do wyników obserwacji radarowych należy podchodzić z ostrożnością.

Dysponując danymi na temat zmienności liczebności migrujących ptaków w dużej skali czasowej i przestrzennej, uzyskanymi m.in. dzięki sieciom radarów pogodowych, przeanalizowano wpływ warunków meteorologicznych na przebieg migracji ptaków [9]. Dowiedziono, że czynnikiem sprzyjającym wędrówce jest ładna pogoda wyżowa z wiatrem z tyłu oraz rosnąca temperatura wiosną i spadająca jesienią. Małe zachmurzenie w dzień i w nocy sprzyja nawigacji i orientacji według położenia ciał niebieskich. Ptaki wybierają do lotu pułap ze sprzyjającym wiatrem. W razie wzrostu zachmurzenia niektóre gatunki ptaków wzbijają się powyżej pułapu chmur, gdzie mogą orientować się według nieba.

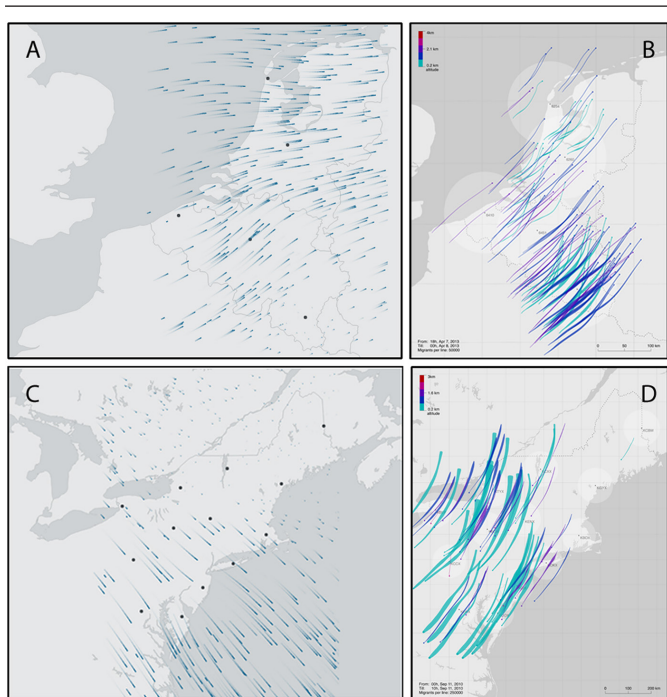
Obserwacje radarowe przelotów ptaków w zależności od kierunku wiatru dostarczyły ciekawych danych dotyczących optymalizacji wydatków energetycznych podczas wędrówki [9]. Mając wiatr w ogon ptaki lecą wolniej (względem powietrza) niż w warunkach bezwietrznych, natomiast mając wiatr w nos lecą szybciej. Wynik ten sugeruje, że w warunkach sprzyjających wędrówce ptaki oszczędzają energię.

Lecąc z wiatrem ptaki często robią mniejsze postępy niż można by oczekiwać w oparciu o analizy aerodynamiczne.

Badania z użyciem radarów dalekiego zasięgu przyczyniły się do weryfikacji i pogłębienia naszej wiedzy na temat mechanizmów orientacji u migrujących ptaków [9]. Na przykład stwierdzono, że ptaki lecące nad morzami lub oceanami często zwracają się mniej więcej w tę samą stronę. Dotyczy to osobników lub stad lecących nad rozległym obszarem i daleko od siebie, a w związku z tym nie widzących się nawzajem. To zjawisko „wspólnej orientacji” (ang. *common orientation*) sugeruje, że ptaki lecące nad morzami orientują się za pomocą kompasu (magnetycznego, gwiazdowego lub słonecznego). Z kolei ptaki migrujące nad lądami wykazują znaczne zróżnicowanie kierunków lotu – sugeruje to, że do orientacji wykorzystują szczegóły topograficzne (linie wybrzeża, doliny rzek, duże, rozświetlone nocą miasta itp.). Stwierdzono również, że podczas znoszenia z kursu przez boczny wiatr korekta kierunku lotu jest bardziej kompletna u migrantów podróżujących na mniejszej wysokości, w dzień lub nad lądem, niż u tych lecących wyżej, w nocy lub nad oceanem. Potwierdza to opinię, że przy kompensacji znoszenia bardziej pomocna jest orientacja według szczegółów topograficznych niż orientacja za pomocą kompasu.

Zdolność ptaków do orientowania się za pomocą kompasu (magnetycznego, słonecznego lub gwiazdowego) jest znana od dawna [9]. Jednak przez długi czas badacze nie potrafili wykazać empirycznie, który z tych kompasów ptaki wykorzystują w określonych warunkach. Thomas Alerstam (Uniwersytet w Lund, Szwecja) z zespołem postanowił rozstrzygnąć, czy ptaki siewkowe (Charadriiformes) migrujące w dalekiej Arktyce kanadyjskiej posługują się kompasem słonecznym czy magnetycznym [32]. W tym celu wybrali się w podróż lodołamaczem przez Przełęcz Północno-Zachodnie, gdzie w różnych miejscach za pomocą radaru śledzącego określali kierunek lotu ptaków siewkowych migrujących na dużej wysokości. System nawigacji ptaków migrujących w dalekiej Arktyce jest interesujący, ponieważ panuje tam dzień polarny, a nawigacja za pomocą kompasu magnetycznego jest utrudniona z uwagi na bliskość ziemskiego bieguna magnetycznego. Część siewkowców migruje z północnej Syberii nad Oceanem Arktycznym na wschodnie wybrzeża Ameryki Północnej i dalej nad Atlantykiem do Ameryki Południowej. Lecąc nad Oceanem Arktycznym ptaki te powinny korzystać z kompasu słonecznego, a nie magnetycznego. Przecinając kolejne południki powinny systematycznie zmieniać kurs na coraz bardziej południowy (jest to skutkiem rosnącego niedopasowania zegara biologicznego ptaków do czasu lokalnego w trakcie podróży na kierunku wschód-zachód). W efekcie, trasa ich lotu powinna być zbliżona do ortodromy (wycinka wielkiego koła, którego środek leży w środku Ziemi). Zespół Alerstama wykazał, że siewkowce faktycznie lecą wzdłuż ortodromy. Sugeruje to, że podczas przelotu nad Oceanem Arktycznym orientują się tylko za pomocą kompasu słonecznego.

Zastosowanie radarów pogodowych zrewolucjonizowało badania przebiegu migracji ptaków w dużej skali



Rycina 1. Wizualizacja nocnego przelotu ptaków wróblowych (*Passeriformes*) nad obszarem Europy Zachodniej i północno-zachodnimi stanami USA. We wszystkich panelach duże czarne kropki oznaczają lokalizacje radarów meteorologicznych, z których uzyskano dane do analizy. A. Wizualizacja wiosennego przelotu ptaków wróblowych nad obszarem Belgii i Holandii w dniu 7 kwietnia 2013 roku około godziny 5:00 czasu Greenwich. Długość wektorów jest proporcjonalna do szybkości lotu ptaków. Można zaobserwować dwa strumienie migrujących ptaków, pierwszy z nich napływa z Wielkiej Brytanii kierując się na wschód, a drugi z Francji kierując się na północny wschód. B. Wizualizacja przedstawiająca sześciogodzinny wędrowkę na pięciu poziomach wysokości nad Belgią i Holandią, która rozpoczęła się o godzinie 18:00 czasu Greenwich w dniu 7 kwietnia 2013 roku. Kropki na końcu wektorów pokazują kierunek, w jakim leciały ptaki. Intensywny przelot w całym profilu wysokości miał miejsce nad południowo-wschodnią Belgią, gdzie ptaki leciały bardzo szybko. C. Wizualizacja jesiennej wędrowki ptaków wróblowych nad północno-zachodnimi stanami USA o godzinie 3:45 czasu Greenwich w dniu 9 września 2010 roku. Południowo-wschodni kierunek przelotu sugeruje początkową fazę wędrowki nad wodami Atlantyku w kierunku Ameryki Południowej. D. Wizualizacja przedstawiająca dziesięciogodzinny wędrowkę na pięciu poziomach wysokości nad północno-wschodnimi stanami USA, która zaczęła się o północy czasu Greenwich w dniu 11 września 2010 roku. Każda trajektoria reprezentuje około 250 000 ptaków. Południowo-zachodni kierunek przelotu jest typowy dla wędrowki jesiennej w tym rejonie USA. Warto zwrócić uwagę na nieznaczny korektę kierunku w czasie trwania przelotu na coraz bardziej zachodni [22].

przestrzennej. Jednym z pionierów na tym polu jest Sidney Gauthreaux (Uniwersytet w Clemson, USA), który wykorzystał istniejącą w USA sieć radarów pogodowych do badań nad dynamiką migracji ptaków w skali kontynentu. Wraz ze współpracownikami wykazał on [33], że wiosenna migracja ptaków przebiega intensywniej nad terenem wschodnich niż zachodnich stanów. Główne szlaki migracji ciągną się od Teksasu po Minnesotę (wzdłuż Wielkich Równin i Doliny Missisipi) oraz od Wirginii po Nową Anglię (tędy wędrują ptaki lądujące na wybrzeżu USA po przelocie nad Atlantykiem w drodze z Ameryki Południowej).

Badanie migracji zwierząt w oparciu o dane z radarów pogodowych stanowi nie lada wyzwanie. Należy zintegrować dane pochodzące z różnych sensorów i obejmujące dużą skalę przestrzenną i czasową, a następnie wyłuskać z potężnego strumienia danych echa obiektów biologicznych i zidentyfikować te obiekty. Kolejnym kro-

kiem jest przygotowanie czytelnej wizualizacji ukazującej dynamikę migracji w czasie i przestrzeni. Judy Shamoun-Baranes (Uniwersytet Amsterdamski, Holandia) zebrała międzynarodowy zespół ekologów, meteorologów i informatyków, który opracował system wizualizacji migracji ptaków w oparciu o dane z sieci radarów pogodowych [22]. Wizualizacja ta ukazuje trajektorie lotu wirtualnych grup ptaków w zadanym okresie czasu i w kilku przedziałach wysokości. Rycina 1A-D przedstawia obraz nocnej wędrowki ptaków wróblowych (*Passeriformes*) nad obszarem Europy Zachodniej między Anglią i Niemcami oraz nad północno-zachodnimi stanami USA. Kropka na końcu wektorów oznacza kierunek lotu, a długość wektorów odpowiada szybkości lotu wirtualnych ptaków względem powierzchni ziemi. Dane europejskie dotyczą wędrowki wiosennej. Około północy 7 kwietnia 2013 roku można było zaobserwować dwa strumienie ptaków – jeden napływał z Wielkiej Brytanii, a drugi z Francji. Połączyły się one nad obszarem Holandii i Belgii. Ptaki leciały w kierunku wschodnim lub północno-wschodnim (Ryc. 1A). Wizualizacja przedstawiająca intensywność przelotu ptaków późnym wieczorem 7 kwietnia 2013 roku ukazuje intensywny przelot nad południową Belgią, przebiegający z dużą prędkością we wszystkich pięciu strefach wysokości (Ryc. 1B). Dane amerykańskie dotyczą wędrowki jesiennej. Wczesną nocą 9 września 2010 roku trasa wędrowki ptaków z obszaru między stanami Massachusetts i Wirginia w kierunku Ameryki Południowej wiodła nad Atlantykiem (Ryc. 1C). Natomiast w nocy 11 września 2010 ptaki wybrały trasę nad lądem i leciały szybciej niż kilka dni wcześniej (Ryc. 1D). Utworzono interaktywne strony internetowe, gdzie można obejrzeć te wizualizacje również w wymiarze czasowym, wybierając m.in. okres czasu i wysokość przelotu [34,35].

Radary entomologiczne i pogodowe umożliwiły dokonanie ważnych odkryć odnośnie transkontynentalnych sezonowych wędrowek owadów. Zaobserwowano, że zjawisko „wspólnej orientacji” występuje również u migrujących owadów [36,37]. Don Reynolds (Uniwersytet w Greenwich, UK) i Jason Chapman (Uniwersytet w Exeter, UK) z zespołem badają adaptacje behawioralne, umożliwiające owadom orientację podczas lotu na dużej wysokości lub w nocy [38-40]. Stosują radar entomologiczny, emitujący pionową wiązkę „ołówkową” o zmiennej polaryzacji. Pozwala on określić wielkość owadów lecących na różnych wysokościach, kierunek, w jakim zwrócone są ich ciała, oraz rzeczywisty kierunek ich lotu. Badacze wykazali, że migrujące owady pozostają w warstwie granicznej atmosfery, gdzie wybierają pułap z najsilniejszym sprzyjającym wiatrem (mniej więcej w ogon). Wiatr zwykle nie wieje dokładnie z tyłu i często znosi owady z kursu. Okazuje się, że owady przelatujące nad różnymi miejscami, niezależnie od kierunku lokalnego wiatru przemieszczają się w zbliżonym kierunku. Precyzyjne obserwacje radarowe wykazały, że gdy wiatr je znosi, owady zgodnie zwracają ciało pod pewnym kątem do kierunku wiatru, co pozwala im częściowo skompensować znos. Kompensacja ta jest proporcjonalna do stopnia znoszenia. Prawdopodobnie owady wybierając kierunek lotu posługują się wewnętrznym kompasem magnetycznym. Ale jak rozpoznają kierunek wiatru? Ważą tak mało, że

są swobodnie unoszone przez wiatr (podobnie jak dryfujące statki przez prądy morskie). Szybkość wiatru jest przeważnie sporo większa niż szybkość lotu owadów. Jednocześnie, lecąc nocą, w rozproszeniu i na dużej wysokości, nie są w stanie korygować lotu dzięki obserwacji innych osobników lub przesuwającego się niżej terenu. Badacze dowodzą, w oparciu o badania obejmujące obserwacje radarowe, dane meteorologiczne i modelowanie matematyczne, że owady rozpoznają kierunek wiatru po drobnych turbulencjach, które powstają w strudze powietrza na skutek jej tarcia o podłoże. Orientując się owady integrują informacje z receptorów kierunku wiatru i informacje z wewnętrznego kompasu.

Zespół Reynoldsa i Chapmana oszacował też liczbę i biomasę owadów migrujących corocznie nad południowymi rejonami Wielkiej Brytanii [31]. Badacze ekstrapolowali na cały obszar Anglii wyniki kilkuletnich radarowych obserwacji przelotów owadów, prowadzonych w kilku miejscach przez cały sezon wegetacyjny i uzupełnianych o odłowione owadów w podczepione do balonów sieci. Stwierdzili, że corocznie nad badanym terenem przelatuje około 3,5 biliona owadów, których biomasa wynosi około 3200 ton.

ZASTOSOWANIA W OCHRONIE ZWIERZĄT

Obrazowanie radarowe okazało się niezwykle przydatnym narzędziem monitoringu zagrożonych gatunków ptaków i nietoperzy [12,41]. Przykładem jest monitoring liczebności lokalnych populacji zagrożonych gatunków ptaków wodnych, prowadzony za pomocą radarów morskich. Na podstawie wyników skanowania radarowego szacuje się liczebność osobników opuszczających kolonie rozrodcze w drodze na tereny żerowania i z powrotem. Monitoruje się użytkowanie przestrzeni przez ptaki, rozmieszczenie terenów żerowania i trasy przelotów do nich. Przy monitoringu nietoperzy przydatne okazały się sieci radarów pogodowych [42,43]. Na podstawie sygnałów odebranych w czasie wylotu nietoperzy z kryjówek na polowanie określa się rozmieszczenie i wielkość poszczególnych kolonii, szybkość rozprzestrzeniania się zasiedlających je nietoperzy w kierunku terenów żerowania i pionowe profile liczebności polujących osobników.

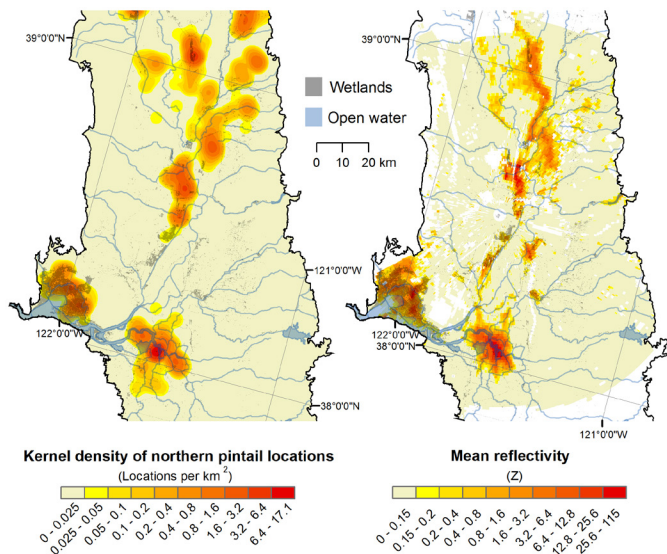
Ważnym obszarem badań jest wielkoskalowy monitoring ptaków w czasie sezonowych wędrówek [12,44]. Klasycznym przykładem są wieloletnie badania ilościowe ptaków wróblowych migrujących wiosną przez rejon Zatoki Meksykańskiej, prowadzone z wykorzystaniem lokalnej sieci radarów pogodowych [45]. Jako jedne z pierwszych badania te dostarczyły sygnałów o niepokojących, spadkowych trendach liczebności szeregu gatunków północnoamerykańskich ptaków, które zimują w tropikach Ameryki Południowej. Aktualnie wdraża się obrazowanie radarowe do monitorowania zmian w fenologii migrujących ptaków oraz w dynamice przelotów, zachodzących w następstwie zmian klimatu [46,47].

Obrazowanie radarowe stosuje się również do mapowania i monitorowania ważnych miejsc postoju ptaków podczas sezonowych wędrówek lub miejsc koncentracji

ptaków w czasie zimowania [12]. Przekształcanie lub dewastacja siedlisk, wykorzystywanych przez ptaki do postoju i odżywiania się podczas wędrówki lub zimowania, należy do najważniejszych przykładów niekorzystnych zmian środowiskowych wywołanych przez człowieka. W miejscach postoju ptaki uzupełniają rezerwy energetyczne, pozwalające im pokonać kolejny etap wędrówki lub przeżyć zimę. Gdy jakość znajdujących się tam siedlisk ulegnie pogorszeniu (np. zmniejszy się ilość pokarmu lub wzrośnie liczba drapieżników), efektem będzie wzrost śmiertelności migrujących ptaków, negatywnie odbijający się na liczebności ich lokalnych populacji lęgowych [9]. Obrazowanie radarowe pozwala pośrednio, poprzez analizę zmian liczebności użytkujących je ptaków, monitorować stan zachowania tych siedlisk i planować adekwatne działania ochronne [48,49]. Monitoruje się też skutki chwilowych zaburzeń w siedliskach, przykładem jest wizualizacja paniki, jaką wśród zimujących w Holandii ptaków wodnych wywołują noworoczne fajerwerki [50].

Siedliska wodne, bagienne i podmokłe należą do najbardziej dewastowanych w efekcie działalności gospodarczej człowieka. Jednocześnie są one użytkowane przez wiele cennych gatunków ptaków w okresie lęgów, sezonowych wędrówek lub zimowania. Jeffrey Buler (Uniwersytet Delaware, USA) z zespołem wykorzystali dane z sieci radarów pogodowych do obrazowania rozmieszczenia miejsc zimowych koncentracji kaczek, gęsi i innych ptaków wodnych w okolicach Sacramento w Kalifornii (USA) [51]. Znajdują się tam najważniejsze zimowiska ptaków wodnych migrujących szlakiem ciągnącym się wzdłuż zachodniego wybrzeża Ameryki Północnej. Dane radarowe pochodziły z godzin wieczornych, gdy ptaki wodne rozlatują się z miejsc dziennego pobytu (zbiorników wodnych lub mokradeł) do okolicznych terenów żerowania. W ramach badań sprawdzono dokładność metody obrazowania radarowego, porównując jej wyniki z wynikami badań rozmieszczenia kaczek oznakowanych za pomocą nadajników radiowych (Ryc. 2). Walidacja ta wykazała, że obrazy radarowe dobrze odwzorowują ilościowo rzeczywiste rozmieszczenie badanych ptaków. W innym projekcie Buler i wsp. zastosowali obrazowanie za pomocą radarów pogodowych do zbadania skuteczności czynnej ochrony siedlisk użytkowanych przez migrujące ptaki wodne i wodno-błotne [52]. Monitorowali oni użytkowanie przez ptaki zastępczych siedlisk, utworzonych specjalnie dla nich w strefie ujściowej rzeki Missisipi i na okolicznych nizinach po katastrofie platformy wiertniczej *Deepwater Horizon* i wycieku ropy naftowej do Zatoki Meksykańskiej w kwietniu 2010 roku. Wykazali, że migrujące ptaki chętnie korzystały z siedlisk zastępczych. Obserwacje radarowe prowadzone w godzinach przed i po zachodzie słońca wykorzystuje się również do lokalizowania miejsc postoju migrujących ptaków lądowych. Podczas wieczornego skanowania przestrzeni radar rejestruje ptaki migrujące w dzień i zapadające wieczorem na nocleg oraz ptaki migrujące w nocy i opuszczające miejsce dziennego odpoczynku [53].

Obrazowanie aktywności ptaków i nietoperzy za pomocą radarów jest pomocne przy planowaniu – sieci ob-



Rycina 2. Mapa rozmieszczenia zimujących ptaków wodnych w okolicach Sacramento w Kalifornii (USA). Lewy panel przedstawia rozmieszczenie kaczek znakowanych za pomocą radionadajników ($n = 3102$ osobniki) w sieci kwadratów o boku 5 km. Prawy panel przedstawia średnie wartości odbiciowości radarowej (Z) dla ptaków w strefie zasięgu lokalnego radaru pogodowego ($n = 18$ dni). Odbiciowość jest miarą zdolności obiektów znajdujących się w atmosferze do odbijania wiązki radarowej. Im więcej jest tych obiektów (np. im bardziej intensywny jest opad atmosferyczny lub im więcej ptaków znajduje się w powietrzu), tym większą energię ma powracający sygnał. Obraz odbiciowości radarowej pozwala z zadowalającą dokładnością oszacować zagęszczenie ptaków w atmosferze, a także jego zmiany w czasie i przestrzeni [51].

szarów ochrony przyrody, przestrzennym i użytkowania przestrzeni powietrznej [49,54]. Jest ono zalecane przy wariantowaniu lokalizacji infrastruktury kolidującej z latającymi zwierzętami – portów lotniczych, farm wiatrowych, masztów radiowych, linii przesyłowych wysokiego napięcia itp. W tym kontekście obrazowanie radarowe często stosuje się w analizie oddziaływania infrastruktury na ptaki i nietoperze [55-59]. Na etapie eksploatacji lotnisk podstawowe znaczenie ma kwestia bezpieczeństwa lotów i minimalizacji ewentualnych kosztów będących następstwem kolizji samolotów z ptakami, kosztów opóźnień lotów i postoju samolotów, napraw i remontów sprzętu lotniczego [60]. Z uwagi na to podejmowane są różnorodne działania minimalizujące kolizje ptaków z samolotami. Radary „ptasie” wykorzystuje się do monitorowania aktywności ptaków w strefie operacji lotniczych, obejmującej najbliższe otoczenie lotnisk [61]. W szerszej skali przestrzennej obrazowanie za pomocą radarów pogodowych tras przelotów i miejsc koncentracji ptaków jest wykorzystywane przy planowaniu lotów [62,63].

ZAKOŃCZENIE

Obrazowanie radarowe zrewolucjonizowało badania podstawowe nad migracjami i dyspersją ptaków, nietoperzy i owadów. Okazało się również bardzo użytecznym narzędziem wspomagającym monitoring chronionych gatunków ptaków i nietoperzy, a także prace planistyczne i zarządzanie w takich dziedzinach jak ochrona przyrody, bezpieczeństwo lotów czy planowanie przestrzenne i proces inwestycyjny. Użyteczność obrazowania radarowego w badaniach naukowych i ochronie przyrody będzie rosła wraz z rozwojem technologii radarowej. Ak-

tualnie duży wysiłek jest wkładany w rozwój cyfrowych systemów algorytmicznego przetwarzania obrazów radarowych, pozwalających coraz precyzyjniej identyfikować echa obiektów przyrodniczych, lepiej interpretować uzyskane obrazy i uzyskiwać z nich więcej informacji o znaczeniu biologicznym (szczególnie dotyczy to radarów pogodowych). Prowadzone są również prace nad rozwojem modelowania matematycznego, które pozwoli włączyć coraz bardziej precyzyjne i łatwiej dostępne dane meteorologiczne do modelowania zachowania się zwierząt migrujących w powietrzu [64]. Rozwijana jest koordynacja współpracy międzynarodowej, pozwalająca efektywniej wykorzystać krajowe sieci radarów pogodowych do badań przelotów zwierząt [65].

PIŚMIENNICTWO

- Weiner J (2006) *Życie i ewolucja biosfery*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- Pullin A (2007) *Biologiczne podstawy ochrony przyrody*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- Bridge ES, Thorup K, Bowlin MS, Chilson PB, Diehl RH, Flérou RW, Hartl P, Kays R, Kelly JF, Robinson WD, Wikelski M (2011) Technology on the move: recent and forthcoming innovations for tracking migratory birds. *BioScience* 61: 689-698
- Hussey NE, Kessel ST, Aarestrup K, Cooke SJ, Cowley PD, Fisk AT, Harcourt RG, Holland KN, Iverson SJ, Kocik JF, Mills Fleming JE, Whoriskey FG (2015) Aquatic animal telemetry: a panoramic window into the underwater world. *Science* 348: 1255642
- Kays R, Crofoot MC, Jetz W, Wikelski M (2015) Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. *Science* 348: aaa2478
- Pettorelli N, Ryan S, Mueller T, Bunnefeld N, Jędrzejewska B, Lima M, Kausrud K (2011) The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Clim Res* 46: 15-27
- Jønsson KA, Tøttrup AP, Borregaard MK, Keith SA, Rahbek C, Thorup K (2016) Tracking animal dispersal: from individual movement to community assembly and global range dynamics. *Trends Ecol Evol* 31: 204-214
- Dingle H (1996) *Migration: the biology of life on the move*, Oxford University Press, New York, Oxford
- Newton I (2008) *The migration ecology of birds*, Academic Press, London
- Lack D, Varley GC (1945) Detection of birds by radar. *Nature* 156: 446
- Gauthreaux Jr SA, Schmidt PM (2013) Radar technology to monitor hazardous birds at airports, W: DeVault TL, Blackwell BF, Belant JL (red) *Wildlife in airport environments: preventing animal-aircraft collisions through science-based management*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, str. 141-151
- Gauthreaux Jr SA, Belsler CG (2003) Radar ornithology and biological conservation. *Auk* 120: 266-277
- Gürbüz SZ, Reynolds DR, Koistinen J, Liechti F, Leijnse H, Shamoun-Baranes JZ, Dokter AM, Kelly J, Chapman JW (2015) Exploring the skies: technological challenges in radar aeroecology. W: 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), IEEE, str. 817-822
- Diehl RH, Larkin RP (2005) Introduction to the WSR-88D (NEXRAD) for ornithological research, W: Ralph CJ, Rich TD (red) *Bird Conservation Implementation and Integration in the Americas*, Proceedings of the Third International Partners in Flight Conference, 2002 March 20-24, Asilomar, California, Volume 2 Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-191, Albany, CA, USDA, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, str. 876-888
- Bruderer B (2003) The radar window to bird migration, W: Berthold P, Gwinner E, Sonnenschein E (red) *Avian migration*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, str. 347-358
- University of Wyoming, atmospheric sounding, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>


17. Horton KG, Shriver WG, Buler JJ (2015) A comparison of traffic estimates of nocturnal flying animals using radar, thermal imaging, and acoustic recording. *Ecol Applic* 25: 390-401
18. Dokter AM, Liechti F, Stark H, Delobbe L, Tabary P, Holleman I (2011) Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. *J R Soc Interface* 8: 30-43
19. Chilson PB, Frick WF, Stepanian PM, Shipley JR, Kunz TH, Kelly JF (2012) Estimating animal densities in the aerosphere using weather radar: To Z or not to Z? *Ecosphere* 3: 72.10.1890/ES12-00027.1
20. Stepanian PM, Chilson PB, Kelly JF (2014) An introduction to radar image processing in ecology. *Methods Ecol Evol* 5: 730-738
21. Rosa D, Isabel M, Marques AT, Palminha G, Costa H, Mascarenhas M, Fonseca C, Bernardino J (2016) Classification success of six machine learning algorithms in radar ornithology. *Ibis* 158: 28-42
22. Shamoun-Baranes J, Farnsworth A, Aelterman B, Alves JA, Azijn K, Bernstein G, Branco S, Desmet P, Dokter AM, Horton K, Kelling S, Kelly JF, Leijnse H, Rong J, Sheldon D, Van den Broeck W, Van Den Meersche JK, Van Doren BM, van Gasteren H (2016) Innovative visualizations shed light on avian nocturnal migration. *PLoS ONE* 11: e0160106
23. Farnsworth A, Sheldon D, Geevarghese J, Irvine J, Van Doren B, Webb K, Dietterich TG, Kelling S (2014) Reconstructing velocities of migrating birds from weather radar - a case study in computational sustainability. *AI Magazine* 35: 31-48
24. MERLIN aircraft bird strike avoidance radar, <http://www.detect-inc.com/merlin.html>
25. ACCIPITER bird strike prevention radar, <http://www.accipiterradar.com/page/home>
26. Desholm M, Fox AD, Beasley PDL, Kahlert J (2006) Remote techniques for counting and estimating the number of bird-wind turbine collisions at sea: a review. *Ibis* 148 (suppl): 76-89
27. Nohara TJ, Weber P, Premji A, Krasnor C, Gauthreaux S, Brand M, Key G (2005) Affordable avian radar surveillance systems for natural resource management and BASH applications, W: 2005 IEEE Radar Conference (RadarCon), IEEE, str. 10-15
28. Schmaljohann H, Liechti F, Bächler E, Steuri T, Bruderer B (2008) Quantification of bird migration by radar—a detection probability problem. *Ibis* 150: 342-355
29. Bruderer B, Peter D, Boldt A, Liechti F (2010) Wing-beat characteristics of birds recorded with tracking radar and cine camera. *Ibis* 152: 272-291
30. Lang TJ, Rutledge SA, Stith JL (2004) Observations of quasi-symmetric echo patterns in clear air with the CSU-CHILL polarimetric radar. *J Atmos Oceanic Technol* 21: 1182-1189
31. Hu G, Lim KS, Horvitz N, Clark SJ, Reynolds DR, Sapir N, Chapman JW (2016) Mass seasonal bioflows of high-flying insect migrants. *Science* 354: 1584-1587
32. Alerstam T, Gudmundsson GA, Green M, Hedenström A (2001) Migration along orthodromic sun compass routes by arctic birds. *Science* 291: 300-303
33. Gauthreaux Jr SA, Belser CG, van Blaricom D (2003) Using a network of WSR-88D weather surveillance radars to define patterns of bird migration at large spatial scales, W: Berthold P, Gwinner E, Sonnenschein E (red) *Avian migration*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, str. 335-346
34. ENRAM bird migration flow visualizations, <http://enram.github.io/bird-migration-flow-visualization/viz/>
35. TIMAMP time integrated multi-altitude migration patterns, <http://timamp.github.io/>
36. Riley JR (1975) Collective orientation in night-flying insects. *Nature* 253: 113-114
37. Hu G, Lim KS, Reynolds DR, Reynolds AM, Chapman JW (2016) Wind-related orientation patterns in diurnal, crepuscular and nocturnal high-altitude insect migrants. *Front Behav Neurosci* 10: 32
38. Chapman JW, Nesbit RL, Burgin LE, Reynolds DR, Smith AD, Middleton DR, Hill JK (2010) Flight orientation behaviors promote optimal migration trajectories in high-flying insects. *Science* 327: 682-685
39. Chapman JW, Nilsson C, Lim KS, Bäckman J, Reynolds DR, Alerstam T, Reynolds AM (2015) Detection of flow direction in high-flying insect and songbird migrants. *Curr Biol* 25: R751-R752
40. Reynolds AM, Reynolds DR, Sane SP, Hu G, Chapman JW (2016) Orientation in high-flying migrant insects in relation to flows: mechanisms and strategies. *Philos Trans R Soc B* 371: 20150392
41. Chilson PB, Frick WF, Kelly JF, Howard KW, Larkin RP, Diehl RH, Westbrook JK, Kelly TA, Kunz TH (2012) Partly cloudy with a chance of migration: weather, radars, and aeroecology. *Bull Am Meteorol Soc* 93: 669-686
42. Horn JW, Kunz TH (2008) Analyzing NEXRAD doppler radar images to assess nightly dispersal patterns and population trends in Brazilian free-tailed bats (*Tadarida brasiliensis*). *Integr Comp Biol* 48: 24-39
43. Frick WF, Chilson PB, Fuller NW, Brodge ES, Kunz TH (2013) *Aeroecology*, W: Adams RA, Pedersen SC (red) *Bat evolution, ecology and conservation*, Springer Science+Business Media, New York, str. 149-167
44. Farnsworth A, Van Doren BM, Hochachka WM, Sheldon D, Winner K, Irvine J, Geevarghese J, Kelling S (2016) A characterization of autumn nocturnal migration detected by weather surveillance radars in the northeastern USA. *Ecol Applic* 26: 752-770
45. Gauthreaux Jr SA (1992) The use of weather radar to monitor long-term patterns of trans-Gulf migration in spring, W: Hagan III JM, Johnston DW (red) *Ecology and conservation of neotropical migrant landbirds*, Smithsonian Institution Press, Washington DC, str. 96-100
46. Kelly JF, Shipley JR, Chilson PB, Howard KW, Frick WF, Kunz TH (2012) Quantifying animal phenology in the aerosphere at a continental scale using NEXRAD weather radars. *Ecosphere* 3: 16.10.1890/ES11-00257.1
47. Kelly JF, Horton KG, Stepanian PM, Beurs KM, Fagin T, Bridge ES, Chilson PB (2016) Novel measures of continental scale avian migration phenology related to proximate environmental cues. *Ecosphere* 7: e01434.10.1002/ecs2.1434
48. Bonter DN, Gauthreaux SA, Donovan TM (2009) Characteristics of important stopover locations for migrating birds: Remote sensing with radar in the Great Lakes basin. *Conserv Biol* 23: 440-448
49. Desholm M, Gil, R, Bøvith T, Fox AD (2014) Combining spatial modeling and radar to identify and protect avian migratory hot-spots. *Curr Zool* 60: 680-691
50. Shamoun-Baranes J, Dokter AM, van Gasteren H, van Loon EE, Leijnse H, Bouten W (2011) Birds flee en mass from New Year's Eve fireworks. *Behav Ecol* 22: 1173-1177
51. Buler JJ, Randall LA, Fleskes JP, Barrow Jr WC, Bogart T, Kluver D (2012) Mapping wintering waterfowl distributions using weather surveillance radar. *PLoS ONE* 7: e41571
52. Buler JJ, Sieges ML, Smolinsky JA (2013) Assessment of bird response to the NRCS Migratory bird habitat initiative using weather surveillance radar: final report. Department of Entomology and Wildlife Ecology. University of Delaware, Newark
53. Buler JJ, Dawson DK (2014) Radar analysis of fall bird migration stopover sites in the northeastern US. *Condor* 116: 357-370
54. Ruth JM (ed) (2007) *Applying radar technology to migratory bird conservation and management: strengthening and expanding a collaborative*, Fort Collins, Colorado, USGS, Biological Resources Discipline, Open-File Report 2007: 1361
55. Harmata AR, Podruzny KM, Zelenak JR, Morrison ML (1999) Using marine surveillance radar to study bird movements and impact assessment. *Wildl Soc Bull* 27: 44-52
56. Desholm M, Kahlert J (2005) Avian collision risk at an offshore wind farm. *Biol Lett* 1: 296-298
57. Hüppop O, Dierschke J, Exo KM, Fredrich E, Hill R (2006) Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis* 148: 90-109
58. Baisner AJ, Andersen JL, Findsen A, Granath SWY, Madsen KØ, Desholm M (2010) Minimizing collision risk between migrating raptors and marine wind farms: development of a spatial planning tool. *Environ Manage* 46: 801-808

59. Plonczkier P, Simms IC (2012) Radar monitoring of migrating pink-footed geese: behavioural responses to offshore wind farm development. *J Appl Ecol* 49: 1187-1194
60. Matyjasiak P (2008) Methods of bird control at airports, W: Uchmański J (ed.) Theoretical and applied aspects of modern ecology, Wydawnictwo Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego, Warszawa, str. 171-203
61. Geringer MB, Lima S, DeVault TL (2016) Evaluation of an Avian Radar System in a Midwestern Landscape. *Wildl Soc Bull* 40: 150-159
62. Shamoun-Baranes J, Bouten W, Buurma L, DeFusco R, Dekker A, Sierdsema H, Sluiter F, Van Belle J, Van Gasteren H, Van Loon E (2008) Avian information systems: developing Web-based bird avoidance models. *Ecol Soc* 13.2: 38
63. Dinevich L, Leshem Y (2010) Radar monitoring of seasonal bird migration over central Israel. *Ring* 32: 31-53
64. Shamoun-Baranes J, Bouten W, van Loon EE (2010) Integrating meteorology into research on migration. *Integr Comp Biol* 50: 280-292
65. Shamoun-Baranes J, Alves JA, Bauer S, Dokter AM, Hüppop O, Koistinen J, Leijnse H, Liechti F, van Gasteren H, Chapman JW (2014) Continental-scale radar monitoring of the aerial movements of animals. *Mov Ecol* 2-9

Radar as imaging tool in ecology and conservation biology

Piotr Matyjasiak 

Department of Evolutionary Biology, Faculty of Biology and Environmental Sciences, Cardinal Stefan Wyszyński University in Warsaw, 1/3 Wóycickiego St., PL-01-938 Warsaw, Poland

 e-mail: p.matyjasiak@uksw.edu.pl

Key words: animal dispersal, animal migrations, imaging, methods, radar, visualization

ABSTRACT

Migrations and dispersal are among the most important ecological processes that shape ecosystems and influence our economy, health and safety. Movements of birds, bats and insects occur in a large spatial scale – regional, continental, or intercontinental. However, studies of these phenomena using classic methods are usually local. Breakthrough came with the development of radar technology, which enabled researchers to study animal movements in the atmosphere in a large spatial and temporal scale. The aim of this article was to present the radar imaging methods used in the research of aerial movements of birds, bats and insects. The types of radars used in research are described, and examples of the use of radar in basic research and in conservation biology are discussed. Radar visualizations are used in studies on the effect of meteorological conditions on bird migration, on spatial and temporal dynamics of movements of birds, bats and insects, and on the mechanism of orientation of migrating birds and insects. In conservation biology research radars are used in the monitoring of endangered species of birds and bats, to monitor bird activity at airports, as well as in assessing the impact of high constructions on flying birds and bats.