

WPŁYW ZANIECZYSZCZENIA SZTUCZNYM ŚWIATŁEM NA PTAKI – PODSUMOWANIE BADAŃ

DOI 10.34658/9788366741461.4

Karolina Skorb

Zespół Ekologii Krajobrazu, Instytut Systematyki i Ewolucji Zwierząt
Polskiej Akademii Nauk
skorb@isez.pan.krakow.pl

Streszczenie: Sztuczne oświetlenie jest jednym z najczęściej nadużywanych dóbr cywilizacyjnych, które w znacznym stopniu oddziałuje na środowisko naturalne. Ptaki są organizmami, których funkcjonowanie zarówno w ciągu doby, jak i roku jest istotnie regulowane naturalnymi cyklami światła. Posiadają fotoreceptory zlokalizowane nie tylko w siatkówce, ale także w różnych częściach mózgu, co czyni je szczególnie wrażliwymi na światło. Z tego względu zanieczyszczenie sztucznym światłem jest czynnikiem istotnie zaburzającym prawidłowe funkcjonowanie ptaków. Badania udowadniają, że ekspozycja na światło w nocy znacząco wpływa na sen, lęgi, kondycję, metabolizm, odporność, stres, migracje oraz wiele innych aspektów życia ptaków. Światło jest także jednym z czynników znacząco zwiększających śmiertelność ptaków, a także ograniczającym zasięgi ich występowania. Wyniki te udowadniają jak istotne jest ograniczanie emisji zanieczyszczenia sztucznym światłem, które jest jednym z największych zagrożeń dla bioróżnorodności na świecie.

Słowa kluczowe: ptaki, zanieczyszczenie światłem, rytmy dobowe, rytmy roczne, śmiertelność

1. Wstęp

Rytm życia na Ziemi od milionów lat jest regulowany przez światło słoneczne. Większość organizmów wyewoluowała molekularne zegary dobowe kontrolowane przez naturalne cykle dnia i nocy. Zegary te mają istotny wpływ na metabolizm, rozwój i zachowanie zwierząt [1]. Dobrym przykładem – ilustrującym jak kluczową rolę odgrywa światło w regulacji wzorców zachowań, zarówno w cyklu dobowym, jak i rocznym – są ptaki [2]. Kręgowce te, podobnie jak wiele innych organizmów, nie tylko

reagują na bodźce świetlne, ale wykształciły także endogenne mechanizmy, zwany rytmem dobowym, który pomaga im śledzić i przewidywać zmiany w środowisku na podstawie regularnych cykli światła. W podobny sposób funkcjonują rytmy roczne, będące odpowiedzią organizmu na cykliczne zmiany długości dnia w tym czasie [3]. Z tego względu zanieczyszczenie światłem, zaburzające percepcję naturalnych cykli światła, może w istotnym stopniu wpływać na rytmy funkcjonowania ptaków.

Pierwsze przesłanki mówiące o negatywnym oddziaływaniu światła w nocy na ptaki pochodzą sprzed ponad stu lat. Latarnicy z kalifornijskiego wybrzeża zgłaszali liczne kolizje ptaków z latarniami morskimi, szczególnie wiosną i jesienią, czyli w okresie sezonowych migracji [4]. Kolejne duże zdarzenia relacjonowano w latach 50. XX wieku, gdy dziesiątki tysięcy ptaków rozbiło się o oświetlone lotnisko sił powietrznych Warner Robins w Stanach Zjednoczonych, najprawdopodobniej myląc jasną powierzchnię lotniska z taflą wody [5]. Obecnie w dobie zwiększającej się z roku na rok emisji światła na całym świecie, zanieczyszczenie sztucznym światłem ALAN (ang. *Artificial Light at Night*) stało się jednym z głównych czynników antropogenicznych, odpowiedzialnych za wiele zaburzeń w środowisku naturalnym [6]. Dzięki nowym technologiom wiadomo, że oddziałuje nie tylko na kolizje ptaków z elementami architektury, ale także wpływa na elementarne funkcje wielu organizmów. Niniejsze opracowanie zawiera podsumowanie badań naukowych dotyczących wpływu zanieczyszczenia światłem na różne aspekty życia ptaków.

2. Wpływ światła na funkcjonowanie ptaków

2.1. Fotorecepcja u ptaków

Światło jest jednym z najważniejszych czynników środowiskowych wpływających na rytm i sezonowość funkcjonowania ptaków, zarówno w cyklu rocznym, jak i dobowym. Z tego względu ta grupa zwierząt jest szczególnie wrażliwa na zmiany światła, a jego subtelne różnice pomaga im wychwycić szeroka gama fotoreceptorów zlokalizowanych w siatkówce oka oraz różnych narządach ośrodkowego układu nerwowego. Do wykrywania światła i przesyłania informacji o nim wykorzystują one fopigmenty bazujące na opsynach [7]. Opsyny to grupa receptorów błonowych sprzężonych z białkami G (GPCR, *G Protein-Coupled Receptor*), które mogą zmieniać swoją aktywność ze stanu spoczynkowego do stanu aktywnego, sygnalizującego absorpcję światła. Aktywacja białka G przez światło prowadzi do powstania sygnału neurochemicznego, znanego jako fototransdukcja [8].

Najbardziej znanymi fotoreceptorami są pręciki i czopki, które zlokalizowane są w siatkówce oka. Pręciki są bardzo wrażliwe na bodźce świetlne, dlatego uczestniczą w reakcji wzrokowej przy słabych warunkach oświetleniowych, zapewniając tworzenie obrazu w niskiej rozdzielczości. Czopki natomiast uczestniczą w tworzeniu obrazów przy dużych mocach promieniowania, dlatego są mniej wrażliwe na niewielkie zmiany jego poziomu, pośrednicząc w generowaniu obrazów o wysokiej

rozdzielczości. Informacje zebrane przez pręciki i czopki, zanim dotrą do mózgu przez nerw wzrokowy, są przetwarzane przez komórki zwojowe siatkówki RGC (ang. *retinal ganglion cell*). Część RGC jest również światłoczuła i określa się je jako światłoczułe komórki zwojowe siatkówki ipRGC (ang. *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*). Komórki ipRGC oddziałują na główne części mózgu i są szczególnie ważne przy odpowiedziach niewzrokowych, takich jak ekspresja rytmów okołodobowych [9]. Innym ważnym miejscem fotorecepcji u ptaków jest szyszynka. W przeciwieństwie do ssaków, gdzie pełni ona jedynie funkcję wydzielniczą i nie jest światłoczuła, szyszynka ptasia zawiera własną opsyne, pinopsynę (P-opsynę), z maksimum przypadającym przy długości fali z zakresu 460–470 nm, będąc szczególnie czułą na światło niebieskie [10]. Ze względu na wrażliwość na światło, szyszynka odgrywa kluczową rolę w regulacji ptasich rytmów okołodobowych [2].

W niedawnych badaniach scharakteryzowano także zestaw fotoreceptorów w mózgu u kur, których istnienie od dawna sugerowano, jednak ich struktura i właściwości były wciąż nieuchwytnie. VA-opsyna została znaleziona w podwzgórzku kurcząt, z maksimum przypadającym przy długości fali około 460 nm. Fotoreceptory te są najprawdopodobniej zaangażowane w regulację biologii sezonowej i wyjaśniają, dlaczego wczesne badania wykazały, że oślepienie ptaki są w stanie przejść pełne sezonowe rytmy wzrostu i regresji gonad [11].

2.2. Światło i cykl dobowy ptaków

Tak jak wiele innych organizmów, tak też ptaki w toku ewolucji dopasowały swoje cykle aktywności i odpoczynku w zależności od światła słonecznego, które nazywamy rytmem okołodobowym. Rytmy te funkcjonują prawidłowo, jeśli są zsynchronizowane z warunkami środowiska. Jak u większości organizmów, tak też u ptaków, światło jest najsilniejszym synchronizatorem cykli dobowych [7].

Ptaki posiadają zaangażowane w ekspresję i regulację rytmów okołodobowych fotoreceptory zlokalizowane w oczach, podwzgórzku i szyszynce. Z tego powodu system dobowy u ptaków jest bardziej złożony niż u ssaków. Szyszynka działa jako kluczowe miejsce transdukcji sygnału świetlnego, przekształcając informację świetlną w sygnał chemiczny, który ulega rozproszeniu poprzez produkcję i wydzielanie melatoniny bezpośrednio do krwi i płynu mózgowo-rdzeniowego [12]. Szyszynka uwalnia melatoninę w nocy, ale jej wytwarzanie jest hamowane w ciągu dnia przez światło słoneczne, co nadaje melatoninie ważną rolę nadrzędnego hormonu dobowego sterującego cyklami aktywności i snu.

2.3. Światło i cykl roczny ptaków

Podobnie jak aktywność dobową ptaków zależy od zmieniających się cykli światła i ciemności, stymulujących wydzielanie melatoniny, tak też cykl roczny ptaków w dużej mierze zależy od ekspozycji na światło. Na skutek wydłużającego się wiosną dnia ptaki rozpoczynają wędrówkę wiosenną, przystępują do lęgów, a gdy dzień jest

zauważalnie krótszy, ptaki podejmują jesienną migrację [13, 14]. Są to zjawiska fenologiczne, występujące cyklicznie w ciągu roku, których terminy są także dostosowane do zmieniających się warunków klimatycznych i środowiskowych.

Ptaki, odbierając bodźce świetlne o wydłużającym się dniu, rozpoczynają łańcuch reakcji stymulowanych hormonalnie, który ma przygotować ich ciało do rozmnażania. Neurony światłoczułego podwzgórza zaczynają uwalniać gonadoliberynę do przysadki mózgowej. Pobudzona przysadka syntetyzuje gonadotropiny, stymulując gonady do dojrzewania, wytwarzania gamet oraz wydzielania hormonów płciowych [15]. W ciągu ostatnich lat stwierdzono, że również melatonina może wpływać na rozmnażanie u ptaków. Jej receptory zidentyfikowano w jądrze kontroli śpiewu, co potwierdza, że może bezpośrednio wpływać na plastyczność systemu kontroli śpiewu [16, 17]. Czułość receptorów melatoniny jest blokowana podczas lęgów i podwyższana zimą, kiedy stymuluje ją wydłużający się dzień [16]. Potwierdzono także, że melatonina stymuluje uwalnianie gonadostatyny GnIH (ang. *gonadotropic-inhibitory hormone*) z podwzgórza ptaków, czyli hormonu hamującego rozmnażanie sezonowe [18]. Wyniki te wskazują, że melatonina może odgrywać ważną rolę w regulacji cykli lęgowych u ptaków. Uwalnianie melatoniny z szyszynki jest bezpośrednio zależne od światła, dlatego wydłużający się wiosną dzień ma silny wpływ na jej produkcję, zatem także pośrednio na stan dojrzałości do rozrodu [7].

3. Wpływ zanieczyszczenia sztucznym światłem na ptaki

Zależność cykli dobowych i rocznych u ptaków od zmian poziomu natężenia oświetlenia, którego źródłem jest światło dzienne sprawia, że zanieczyszczenie sztucznym światłem stanowi czynnik, który może w znacznym stopniu zaburzać naturalne procesy. Ze względu na złożoność zjawiska zdecydowano się oddzielnie omówić wpływ oddziaływania światła w nocy na różne aspekty życia ptaków.

3.1. Cykl dobowy

Światło jest najważniejszym synchronizatorem ptasiego zegara dobowego, a niezliczona liczba procesów fizjologicznych jest pod jego kontrolą [19], dlatego zmiany w środowisku świetlnym w nocy wpływają na wiele funkcji biologicznych tych organizmów.

Modyfikacja dobowego rytmu ptaków jest jednym z najbardziej znanych ekologicznych skutków zanieczyszczenia światłem. Odkryto, że w różnych regionach świata kilka gatunków ptaków śpiewających modyfikuje czas rozpoczęcia śpiewu na obszarach zanieczyszczonych światłem. Efekt jest najsilniejszy w przypadku niektórych naturalnie wcześniej śpiewających gatunków [7]. Badania nad wpływem zanieczyszczenia światłem na ptaki przeprowadzone w Niemczech na sześciu pospolitych gatunkach ptaków (kos *Turdus merula*, rudzik *Erithacus rubecula*, śpiewak *Turdus philomelos*, bogatka *Parus major*, modraszka *Cyanistes caeruleus*, zięba *Fringilla coelebs*), w których uwzględniono także hałas drogowy, wykazały, że aż pięć

z nich rozpoczyna swój poranny śpiew wcześniej. Jedynym gatunkiem, dla którego nie wykazano wpływu ALAN na godzinę rozpoczęcia aktywności głosowej była zięba [20]. W innych badaniach, gdzie śpiewak nie był brany do analizy, wyniki były bardzo zbliżone [21], co podkreśla, że efekt ten jest silniejszy u gatunków naturalnie wcześniej śpiewających. Kontynuacja niemieckich badań wykazała, że ALAN wpływa nie tylko na dobowe zmiany w aktywności ptaków, ale także na rozpoczęcie śpiewu w cyklu rocznym [22].

Nie tylko badania nad śpiewem ptaków udowadniają istotny wpływ zanieczyszczenia światłem na cykle aktywności dobowej ptaków. W budkach lęgowych, gdzie zamontowano sztuczne oświetlenie wykazano, że samice modraszek znacząco przyspieszają swój poranny początek aktywności w sezonie lęgowym [23]. Wyniki te potwierdzają także badania na innych gatunkach ptaków. Badano aktywność miejskich i leśnych kosów wyposażonych w czujniki światła i nadajniki radiotelemetryczne. Wyniki pomiarów udowadniały, że ptaki eksponowane późnym wieczorem na światło wykazywały wcześniejszą aktywność o poranku. Ponadto indywidualna ekspozycja na światło w nocy była związana nie tylko z początkiem aktywności o poranku, ale także jej zakończeniem wieczorem: im bardziej kosy były narażone na zanieczyszczenie światłem, tym miały większą tendencję do wydłużania okresu dziennej aktywności [24]. Kolejne badania potwierdziły, że miejskie kosy są wystawione średnio na o 49 minut dłuższy dzień niż ptaki żyjące w lasach [25].

Ważnym aspektem wpływu zanieczyszczenia światłem na rytm dobowy ptaków jest zaburzenie snu. Sen jest podstawową potrzebą wszystkich organizmów, którego funkcji upatruje się w „oczyszczaniu” mózgu z toksycznych metabolitów nagromadzonych podczas jego aktywności [26]. U ptaków sen jest stymulowany za pomocą melatoniny, którą wydziela szyszynka w sposób rytmiczny: nocne okresy ciemności stymulują do jej uwalniania, zaś ekspozycja na światło tłumi jej wydzielanie [27]. Wciąż jednak miało wiadomo o dokładnym poziomie światła, który zmienia dobową amplitudę rytmu melatoniny. U wielu gatunków ptaków śpiewających wydzielanie i tłumienie melatoniny jest niezbędne do utrzymania rytmów dobowych w stałych warunkach oraz do synchronizacji zegara dobowego z cyklem dzień/noc [12].

Ponieważ rytm dobowy, sen i światło są ze sobą silnie powiązane, zanieczyszczenie światłem może potencjalnie mieć duży wpływ na wzorce snu dzikich ptaków. Badania eksperymentalne na kosach trzymanyh w niewoli w warunkach stałego zanieczyszczenia światłem w nocy na poziomie 0,3 lx ujawniły średnio o dwie godziny wcześniejszą poranną aktywność ptaków w porównaniu do grupy kontrolnej pozbawionej ALAN. Zmiana pory aktywności była powiązana na poziomie osobniczym ze stężeniem melatoniny w osoczu [28]. Badania eksperymentalne na bogatkach wykazały ponadto silną zależność między intensywnością światła w nocy a poziomem uwalnianej melatoniny. Wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia zwiększała się aktywność ptaków w nocy, a znacząco spadał poziom melatoniny [29]. Wyniki te sugerują, że wraz ze wzrostem poziomu zanieczyszczenia światłem stany aktywności i odpoczynku u ptaków mogą ulegać znacznym zaburzeniom.

Badania wskazują także wpływ sztucznego światła w nocy bezpośrednio na zachowanie ptaków w trakcie snu. Przy użyciu kamer monitorowano zachowanie modraszek i bogatek w budkach lęgowych, gdzie wcześniej umieszczono źródła światła. Wyniki porównano z nagraniami z nocy, kiedy oświetlenie w budkach było wyłączone. Zachowanie obu gatunków podczas snu nie różniło się w warunkach naturalnych, stwierdzono jednak różnice przy nocnym doświetlaniu budek. Światło zakłóciło sen obu gatunkom sikor, jednak bogatki silniej na nie reagowały – później wchodziły do budek lęgowych i później zasypiały, wcześniej się budziły i wcześniej opuszczały budki, a całkowita długość snu uległa znaczącemu zmniejszeniu [30]. Eksperyment ten udowadnia, że nawet blisko spokrewnione gatunki ptaków mogą cechować się różną wrażliwością na światło w nocy.

Inne badania nad bogatkami w budkach wykazały, że ptaki cierpiące na deficyt snu z powodu zanieczyszczenia światłem, muszą go nadrobić. W okresie lęgowym przez kilka nocy monitorowano zachowanie samic w budkach, w których umieszczono emitujące światło diody. Przez pierwszą noc rejestrowano zachowanie ptaków w ciemnych warunkach, kolejnej nocy w sztucznym oświetleniu, a ostatniej ponownie bez światła. Badania wykazały, że bogatki w warunkach zanieczyszczenia światłem spały ponad 50% krócej. Ostatniej nocy natomiast ich sen wydłużył się o 25% w porównaniu do pierwszej nocy, jednocześnie ptaki zwiększyły częstość epizodów snu [31]. Wyniki te dowodzą, że niedobór snu u ptaków spowodowany oddziaływaniem światła w nocy w istotny sposób wpływa na ich zachowanie. Dług senny może negatywnie rzutować na kondycję ptaków, zmuszając je do nadrobienia deficytu, co może w znaczący sposób zaburzyć ich dobowy rytm funkcjonowania, jednocześnie potencjalnie zwiększając ryzyko narażenia na ataki drapieżników.

Badania aktywności mózgu dzierzbowronów *Cracticus tibicen tyrannica* wystawionych na światło w nocy o luminacji typowej dla obszarów miejskich wykazały, że światło białe w porównaniu do żółtego istotnie zaburza przebieg snu, zmniejszając jego ciągłość oraz znacząco zwiększając długość fazy NREM względem fazy REM [32]. Natomiast badania nad nocną aktywnością zeberek *Taeniopygia guttata* przeprowadzone z wykorzystaniem źródeł LED o cieplej (3000 K) i chłodnej (5000 K) barwie światła, potwierdziły zwiększoną aktywność ptaków przy ekspozycji na światło o wyższej temperaturze barwowej [33]. Co ciekawe wyników tych nie potwierdzono w badaniach nad gołębiami skalnymi *Columba livia*, u których zarówno światło niebieskie, jak i żółte w podobnym stopniu zaburzało przebieg snu [32]. Podobne badania przeprowadzono na łabędziach czarnych *Cygnus stratus*, u których także wykazano brak istotnej różnicy w reakcji organizmu na światło z większym i mniejszym udziałem promieniowania krótkofalowego (światła niebieskiego) – oba rodzaje źródeł światła istotnie zaburzały przebieg snu u ptaków [34]. Badania te wskazują, że warto ograniczać emisję światła niebieskiego, jednak rozwiązanie to nie jest uniwersalne, by zmniejszyć oddziaływanie zanieczyszczenia sztucznym światłem na wszystkie gatunki ptaków.

3.2. Rozwój i stres

Zaburzenia snu i wydzielania melatoniny związane z emisją światła w nocy niosą ze sobą oddziaływanie także na inne funkcje organizmu. Badania nad papużkami falistymi *Melopsittacus undulatus* przeprowadzone pod kątem reakcji na światło w nocy z dodatkową próbą, w której ptakom podawano melatoninę wykazały, że ALAN wpłynęło na przyrost masy ciała, spożycie pokarmu i wody oraz drastycznie zmniejszyło zdolność rozrodczą poprzez kilkukrotnie mniejszą liczbę składanych jaj, z których wykuło się znacznie mniej piskląt. U ptaków testowano także odpowiedź na stres poprzez badanie zawartości kortykosteronu w odchodach, gdzie wykazano, że ALAN znacząco zwiększyło wydzielanie tego hormonu. Stymulacja ptaków melatoniną unormowała spożycie pokarmu i wody do poziomu kontrolnego, jednak spowodowała spadek masy ciała i nie zdołała utrzymać prawidłowej zdolności rozrodczej [35]. Wyniki te sugerują, że negatywne skutki wywołane przez ALAN zaburzą wiele czynności życiowych u ptaków, których kontrola nie zależy w pełni od supresji melatoniny bądź nasilonych reakcji na stres. Światło oddziałuje na ptaki w sposób złożony, stymulując wiele elementów szlaku fotoperiodycznego, tym samym wpływając na różne narządy wydzielania wewnętrznego.

Warto jednak dokładniej przyjrzeć się wywołanemu przez zanieczyszczenie światłem poziomowi stresu u ptaków, który często jest ważnym czynnikiem fizjologicznym, wpływającym na funkcjonowanie całego organizmu. Z badań, zarówno nad ptakami wolnożyjącymi narażonymi na zanieczyszczenie światłem [36], jak i w badaniach eksperymentalnych [33] wykazano, że ALAN koreluje z wyższym poziomem kortykosteronu, który jest hormonalnym wskaźnikiem stresu fizjologicznego. W przypadku ptaków trzymanyh w niewoli sprawdzono także, jak temperatura barwowa wpływa na poziom stresu. W przytaczanych już badaniach, zeberki narażone na światło o wyższej temperaturze barwowej, najbliższej 5000 K, poza wzmożoną nocną aktywnością, wykazywały podwyższony poziom kortykosteronu w porównaniu z wartościami sprzed eksperymentu oraz względem ptaków eksponowanych na światło o temperaturze barwowej najbliższej 3000 K, oraz grupą kontrolną [33].

Przebadano także, jak zanieczyszczenie sztucznym światłem wpływa na stres i kondycję piskląt. W budkach lęgowych, gdzie gniazdowały bogatki umieszczono załączane nocą diody LED, emitujące białe światło. U piskląt eksponowanych na ALAN wykazano wyższy poziom kortykosteronu niż u ptaków z grupy kontrolnej [37]. W tych samych badaniach sprawdzano także kondycję piskląt narażonych na światło w nocy. Jako miernik kondycji przyjęto stosunek długość skoku (nogi) do masy ciała. Pisklęta wystawione na działanie ALAN w stosunku do ptaków z grupy kontrolnej wykazywały większy stosunek wzrostu skoku wobec masy ciała, świadczący o pogarszającej się kondycji, co na tym etapie rozwoju może w znacznym stopniu obniżyć szanse na przeżycie. Ptaki spędzające noce w ciemnych warunkach charakteryzowały się bardziej równomiernym przyrostem masy ciała względem rozwoju szkieletu oraz większym sukcesem lęgowym [37].

3.3. Układ nerwowy

Sztuczne światło w nocy nie tylko wpływa na rozwój młodych ptaków. Może zaburzać zdolności poznawcze i umiejętności dostosowania się do zmieniających się warunków otoczenia dorosłych ptaków, wpływając na funkcjonowanie ośrodkowego układu nerwowego. W badaniach na samicach zeberek *Taeniopygia guttata* wykazano, że ALAN intensyfikuje proliferację komórek nerwowych w strefie komorowej VZ (ang. *ventricular zone*). U ptaków wiele nowych komórek powstających w VZ, migruje do kresomózgowia, różnicuje się w odpowiednie neurony i osadza w różnych obszarach mózgu, zastępując starsze komórki. Dlatego proliferacja komórek nerwowych w VZ przyczynia się do większej plastyczności mózgu i umożliwia ptakom przystosowanie się do zmian środowiskowych. Wyniki te wskazywałyby na to, że światło w pozytywny sposób stymuluje układ nerwowy ptaków. Niestety wraz z powstawaniem nowych komórek stwierdzono obumarcie części neuronów przejawiające się jako zmniejszenie ich gęstości w dwóch regionach mózgu ptaków [38, 39].

3.4. Metabolizm i wydatek energetyczny

Jak przedstawiono powyżej, zanieczyszczenie światłem wpływa na poziomy aktywności u wielu gatunków ptaków, zatem może mieć także wpływ na ich dzienny wydatek energetyczny DEE (ang. *daily energy expenditure*) oraz metabolizm. DEE jest silnym wskaźnikiem kompromisów ekologicznych i kondycji osobnika, więc może być ważnym aspektem przy badaniu potencjalnych długoterminowych skutków ekologicznych ekspozycji na zanieczyszczenie światłem.

W badaniach laboratoryjnych nad zmianami w mózgu u dorosłych zeberek przedstawiono również wyniki wskazujące na związek między ekspozycją na światło w nocy a zaburzeniami metabolizmu u ptaków, przejawiające się zwiększeniem masy ciała [38]. Wyniki te zostały potwierdzone w innych badaniach na tym samym gatunku, gdzie poza wzrostem masy ciała dodatkowo wykazano odkładanie podskórnej tkanki tłuszczowej i akumulację lipidów w wątrobie [40]. Podobne wyniki uzyskano w przytaczanych już badaniach na papużkach falistych, gdzie ptaki na skutek ekspozycji na ALAN także zwiększyły masę ciała [35]. Wzorzec ten nie jest jednak prawidłowy dla piskląt. Wykazano, że młode bogatki na skutek ekspozycji na światło przestały przybierać na wadze [41]. Natomiast badania na dorosłych ptakach dowodzą, że ptaki, które spały w warunkach zanieczyszczenia światłem, wykazywały zwiększony dzienny wydatek energetyczny w porównaniu z ptakami śpiącymi w ciemnościach [42].

DEE może być także związany ze stanem mikroflory w jelitach, która odpowiada za wydajne trawienie. Przytaczane już badania na zeberkach wskazują, że zaburzenia w przyroście masy u ptaków na skutek narażenia na światło w nocy mogą wynikać z redukcji flory jelitowej [40]. W badaniach laboratoryjnych stwierdzono zmniejszoną populację *Lactobacillus* jako częściową przyczynę negatywnego wpływu ALAN na

metabolizm ptaków. Niekorzystny wpływ zanieczyszczenia światłem na mikroflorę jelitową wykazano także u mazurków *Passer montanus*, u których również stwierdzono zaburzenia rytmu okołodobowego oraz sekrecji melatoniny [43]. Natomiast u młodych przepiórek chińskich *Excalfactoria chinensis* poddawanych ekspozycji na sztuczne światło barwy niebieskiej, o natężeniu oświetlenia 0,3 lx, wykazano, że ALAN zmniejszył wydajność trawienia w okresie najszybszego wzrostu szkieletu [44]. Wyniki te potwierdzają negatywny wpływ sztucznego oświetlenia na metabolizm i wydatek energetyczny u ptaków. Podkreślają także istotną rolę mikrobioty jelitowej w utrzymaniu homeostazy metabolicznej w odpowiedzi na ekspozycje na światło w nocy.

3.5. Odporność

Kolejnym elementem na jaki może wpływać nocna ekspozycja ptaków na światło jest układ odpornościowy. Zbadano odpowiedź immunologiczną na wstrzyknięcie lipopolisacharydu u piskląt bogatek poddanych ekspozycji przez siedem nocy na światło o natężeniu oświetlenia 3 lx. Przed i po iniekcji zmierzono poziom haptoglobiny i tlenu azotu, które są ważnymi markerami odpowiedzi immunologicznej. Odpowiedni poziom haptoglobiny zapobiega uszkodzeniom oksydacyjnym poprzez wiązanie wolnej hemoglobiny uwalnianej z ulegających lizie krwinek czerwonych. Natomiast tlenek azotu uczestniczy w modulacji procesów zapalnych i niszczeniu patogenów. Odkryto, że ekspozycja na ALAN przed podaniem lipopolisacharydu zmieniła wrodzoną odpowiedź immunologiczną, obniżając poziom haptoglobiny i podwyższając poziom tlenu azotu. Po iniekcji nieoczekiwanie poziom tlenu azotu się obniżył, najprawdopodobniej na skutek oddziaływania niższego aż o 49% poziomu melatoniny [45]. Badanie to dostarcza dowodów na to, że narażenie na światło w nocy wpływa na fizjologię piskląt, co może mieć długofalowe efekty, potencjalnie rzutując na sprawność ptaków przez całe życie.

Zdolność zwierząt, w tym ptaków, do reagowania na zewnętrzne pasożyty i patogeny w dużej mierze zależy od pory dnia. Kiedy rytmy dobowe są zaburzone, niektóre odpowiedzi układu immunologicznego zostają stłumione [46]. W jednych badaniach przetestowano, jak ALAN wpływa na odporność komórkową i intensywność infekcji pasożytem z grupy *Haemosporidia* w cyklu rocznym u junczo zwyczajnego *Junco hyemalis*. Wykazano, że sztuczne światło w nocy nasiliło stan zapalny u ptaków, a liczba leukocytów znacząco wzrosła wczesną wiosną i jesienią, czyli w naturalnym okresie migracji ptaków. Na początku eksperymentu badania mikroskopowe potwierdziły infekcje u niewielkiej liczby ptaków, jednak badanie PCR ujawniło, że większość ptaków przechodziła przewlekłe infekcje. ALAN zwiększyło skalę infekcji pasożytniczych w cyklu rocznym, z silnymi szczytami wiosną i jesienią, których w większości nie stwierdzono u ptaków z grupy kontrolnej. Zwiększona liczba zachorowań u ptaków narażonych na światło w nocy wskazuje na nawrót przewlekłych infekcji, gdyż ptaki przetrzymywano w zamkniętych wolierach, z dala od innych patogenów [47]. Badania te udowadniają, że zaburzenia naturalnych cykli

dobowych mogą oddziaływać na wiele fizjologicznych aspektów życia ptaków, w znaczący sposób obniżając ich naturalną odporność.

Istnieje jeszcze jeden ciekawy aspekt związany z zanieczyszczeniem światłem i odpornością na choroby. Na przykładzie wróbla *Passer domesticus* stwierdzono, że zanieczyszczenie sztucznym światłem wydłuża okres zarażenia Wirusem Zachodniego Nilu WNV (ang. *West Nile Virus*) o 2 dni w okresie ptasich wędrówek. Jednocześnie nie wzrasta śmiertelność tych ptaków, ale zwiększa się potencjał wybuchu epidemii o 41%. Okazuje się, że osiadłe miejskie wróble są jednym z największych miejskich rezerwuarów tego niebezpiecznego dla ludzi patogenu. W dobie licznych chorób wywołanych patogenami odzwierzęcymi i wciąż panującej pandemii COVID-19, należy zwrócić szczególną uwagę na czynniki zwiększające ryzyko przenoszenia infekcji na obszarach skażonych światłem [48].

3.6. Fenologia rozrodu

Termin przystąpienia do lęgów u ptaków jest silnie związany z wydłużającym się wiosną dniem, a co za tym idzie dłuższą ekspozycją na światło słoneczne. Zatem zanieczyszczenie sztucznym światłem może znacząco wpływać na percepcję długości dnia przez ptaki, przyspieszając dojrzewanie płciowe i termin przystąpienia do lęgów.

W Europie kosa są jednym z najlepszych przykładów szybko przystosowującej się do warunków miejskich fizjologii rozrodu. Dwuletnie badania eksperymentalne nad miejskimi i leśnymi osobnikami, trzymanymi w laboratorium i eksponowanymi na zanieczyszczenie światłem wykazały, że w pierwszym roku ptaki rozwinęły swoje gonady o 3 tygodnie wcześniej niż kosa z grupy kontrolnej pozbawionej zanieczyszczenia światłem. Różnica ta została odzwierciedlona również przez wcześniejszy szczyt poziomu testosteronu w osoczu i wcześniejsze rozpoczęcie pierzenia [49]. W drugim roku badań u kosów eksponowanych na światło nie rozwinęły się gonady, poziom testosteronu był niski, a pierzenie zostało przerwane [50]. Natomiast w badaniach terenowych nad tym gatunkiem wykazano, że kosa preferują oświetlone miejsca lęgowe ze względu na ich funkcję antydrapieżniczą. Stwierdzono jednak, że ptaki te przyspieszyły termin przystąpienia do lęgów średnio o 6 dni na 1 lx nocnego oświetlenia [51]. Także u bogatek [52], jak i u junczo zwyczajnego [53] stwierdzono przyspieszone dojrzewanie gonad na skutek ekspozycji na zanieczyszczenie światłem. Badania te udowadniają, jak silnie zanieczyszczenie sztucznym światłem może wpływać na rytmy roczne i termin przystępowania do lęgów, co może być bardzo niekorzystnym zjawiskiem, szczególnie wczesną wiosną, gdy ilość pożywienia jest wciąż niewystarczająca do wykarmienia piskląt.

Zmiany w fizjologii rozrodu na skutek ekspozycji na zanieczyszczenie światłem towarzyszą, choć nie zawsze, zmianom terminu składania jaj. W niemieckich badaniach z 2010 roku wykazano dwudniowe przyspieszenie terminu składania jaj u modraszek, zajmujących terytoria przy latarniach ulicznych [21]. Natomiast eksperyment terenowy przeprowadzony kilka lat później w Holandii, gdzie naukowcy zmienili poziom światła w ośmiu lasach, wykazał 5-dniowe przyspieszenie terminu

składania jaj [54]. W przypadku wpływu ALAN na termin rozpoczęcia zniesienia także barwa światła ma znaczenie. Ze względu na większą wrażliwość ptasich fotoreceptorów na promieniowanie o krótszych długościach fal [55] sugeruje się, że długie fale emitowane z czerwonych diod LED mają mniejszy wpływ na datę składania jaj w porównaniu z diodami niebieskimi i zielonymi [54]. Czasowa rozbieżność między wpływem ALAN na fizjologię rozrodu a terminem składania jaj sugeruje jednak, że podczas gdy dojrzewanie gonad jest w większości modulowane przez światło, a zatem zanieczyszczenie światłem może mieć na nie silny wpływ, tak data składania jaj to złożona decyzja, która jest regulowana nie tylko przez fotoperiodyzm, ale także przez inne czynniki lepiej odzwierciedlające warunki środowiskowe, takie jak temperatura czy obfitość pożywienia [56].

3.7. Sezonowe wędrówki

Cykle fenologiczne u ptaków obejmują również migracje sezonowe, które także są indukowane hormonalnie między innymi poprzez percepcję zmieniającej się długości dnia. Zatem zanieczyszczenie sztucznym światłem, zaburzające ekspozycję ptaków na naturalne cykle światła słonecznego, może być czynnikiem zakłócającym ptasie migracje. W badaniach z użyciem geolokatorów rejestrujących światło udało się określić skalę doświadczania przez ptaki wędrówne – jaskółczaki modre *Progne subis* – zanieczyszczenia światłem na zimowiskach w Ameryce Południowej. Liczbę nocy, gdy ptaki przebywały w warunkach sztucznego oświetlenia zestawiono z terminem rozpoczęcia migracji oraz datą przylotu na lęgowiska. Prawie jedna trzecia ptaków doświadczyła przynajmniej jednej nocy w warunkach zanieczyszczenia światłem. Ptaki, które doświadczyły największej liczby jasnych nocy wylatywały na wiosenną migrację średnio o osiem dni wcześniej i przylatywały na lęgowiska także osiem dni wcześniej w porównaniu z ptakami, które nie doświadczyły ALAN [57]. Przyspieszenie wiosennej migracji na skutek zanieczyszczenia światłem w miejscach zimowania może prowadzić do nieprawidłowego synchronizowania warunków środowiskowych i liczebności owadów na trasie migracji oraz w miejscach rozrodu, potencjalnie wpływając na przeżycie i/lub sukces reprodukcyjny.

Światło ponadto gra istotną rolę w percepcji położenia ptaków w powietrzu. Badania nad ptakami w klatkach wykazały, że kierują się w stronę sztucznego światła, które ma imitować słońce na horyzoncie. Kierowanie się położeniem słońca nad horyzontem jest jedną ze strategii migracyjnych ptaków, dlatego zanieczyszczenie sztucznym światłem jest istotnym czynnikiem zaburzającym prawidłowe wzorce migracyjne. Sugeruje się, że ptak, który nocą wleci w snop światła, traci punkt odniesienia jakim jest horyzont, tracąc orientację w przestrzeni. Przypuszcza się, że ptaki mogą odbierać światło emitowane z budynków, kominów czy turbin wiatrowych jako wskazówkę horyzontu, zmieniając tor i kierunek lotu. Jest również prawdopodobne, że w niektórych przypadkach intensywność światła uszkadza pigmenty wzrokowe, przez co oślepienie ptaki nie mogą dostrzec szczegółów otoczenia, które widzą w warunkach naturalnych [58].

Wieloletnie badania radarowe ptaków migrujących nocą w Stanach Zjednoczonych wykazały, że ptaki istotnie częściej wybierają na miejsce postoju siedliska w pobliżu najjaśniejszych punktów na mapie. Obszary silnie zanieczyszczone światłem reprezentują często siedliska w znacznym stopniu przekształcone przez człowieka, co może wpływać na mniejszą bazę żerowiskową dla ptaków migrujących. Biorąc pod uwagę, że wysokiej jakości siedlisko postoju z bogatymi żerowiskami ma kluczowe znaczenie dla udanej migracji, sztuczne oświetlenie może stanowić znaczący problem dla ochrony populacji ptaków wędrownych [59].

Natomiast analiza zasięgów geograficznych 298 migrujących gatunków ptaków wykazała, że zanieczyszczenie światłem jest największe w obszarach nocnych tras migracyjnych ptaków [60]. Inne badania także wskazują związek między sztucznym oświetleniem a większą liczbą ptaków lecących nocą podczas jesiennej migracji, zarówno nad granicami, jak i centrami miast [61]. Zanieczyszczenie sztucznym światłem ma także wpływ na skład gatunkowy migrujących ptaków. Badania w miastach wykazały, że ALAN latem oraz zimą, czyli w okresach najstabszej migracji, jest związany z mniejszą liczbą gatunków ptaków, natomiast wiosną i jesienią wykazano silną korelację między zanieczyszczeniem światłem a większą liczbą gatunków migrujących [62]. Wyniki te sugerują, że ALAN może wpływać zarówno na intensywność przelotu, jak i na skład gatunkowy ptaków podczas migracji, czyli w trakcie najbardziej krytycznego etapu ich rocznego cyklu.

Nawet w centrach miast leżących na szlaku migracyjnym, miejsca najsilniej oświetlone w istotny sposób zaburzają przelot ptaków. Jednym z najbardziej znanych przykładów jest coroczny memoriał ku czci ofiar zamachu na World Trade Center. Z tej okazji na głównym szlaku migracyjnym wschodniego wybrzeża Stanów Zjednoczonych, przy ujściu rzeki Hudson na Manhattanie, tworzona jest instalacja artystyczna składająca się z kilkudziesięciu reflektorów emitujących niebieskie światło, skierowane pionowo w górę. Badania prowadzone przez 7 lat każdego 11 września wykazały, że instalacja oświetleniowa wpłynęła na zmiany behawioralne około 1,1 mln ptaków. Kiedy reflektory były włączone, ptaki gromadziły się nawet w dwudziestokrotnie większym zagęszczeniu niż w sąsiadującym obszarze. Ponadto, wpadając w snop światła zmniejszały prędkość i zmieniały tor lotu na kołowy oraz znacznie częściej się odzywały. Zaburzenia behawioralne zniknęły po wyłączeniu reflektorów [63]. Wyniki te sugerują, że selektywne wyłączanie opraw oświetleniowych w nocy na szlakach migracji jest realną strategią minimalizowania potencjalnie śmiertelnych skutków oddziaływania zanieczyszczenia sztucznym światłem na ptaki.

Inne badania dowodzą natomiast, że stymulowane sztucznym światłem odzywające się ptaki mogą być ważnym predyktorem ryzyka śmiertelnej kolizji z budynkami. Wykazano, że ptaki komunikujące się ze sobą głosowo w trakcie nocnej migracji zderzają się znacząco częściej z elementami antropogenicznej infrastruktury niż ptaki, które z takiego rodzaju komunikacji nie korzystają. Badacze sugerują, że silniejsza reakcja na światło u ptaków posługujących się głosami kontaktowymi w locie może tłumaczyć różnice w kolizyjności [64]. Głosy kontaktowe wydawane przez lecące ptaki w nocy prawdopodobnie wyewoluowały, aby ułatwić wspólne podejmowanie decyzji

podczas migracji, ale to samo zachowanie społeczne może teraz zwiększać podatność na rozległe antropogeniczne zakłócenia.

W przypadku migracji nie tylko samo światło, ale także jego barwa odgrywa istotną rolę. W Chinach przeprowadzono badania nad wpływem barwy światła na migrujące ptaki, gdzie zastosowano źródła światła o czterech różnych barwach (niebieska, zielona, żółta i czerwona), przy których rozstawiono sieci ornitologiczne do łapania ptaków. Najwięcej ptaków wpadało w sieci wyposażone w lampy o barwie niebieskiej. Efekt ten był potęgowany przy złych warunkach atmosferycznych, takich jak mgła i silny wiatr [65]. W przytoczonych badaniach światło czerwone okazało się mieć najłabsze oddziaływanie na ptaki.

Nie potwierdzają tego jednak wyniki z badań nad kolizyjnością ptaków z wieżami komunikacyjnymi [66]. Wykazano w nich, że stale załączone czerwone światło odpowiadało za największą kolizyjność ptaków w trakcie migracji. Usunięcie go i zastąpienie migającym światłem czerwonym może zmniejszyć śmiertelność od 50% do 71%. W dobie wznoszącego zanieczyszczenia światłem należy rozważyć stosowanie opraw emitujących oświetlenie o dłuższej fali, a w przypadkach ochrony wysokich konstrukcji przed kolizjami z ptakami najlepiej zastosować migające czerwone światło. Takie rozwiązania są już stosowane w wielu miejscach przy oświetlaniu kominów czy elektrowni wiatrowych.

3.8. Śpiew

Wiosenny śpiew ptaków jest ważnym elementem w cyklu rozrodczym, oznajmającym rozpoczęcie sezonu lęgowego. Za jego pośrednictwem ptaki poszukują partnera do rozrodu i oznajmiają zajęcie terytorium. Tak jak dojrzewanie gonad, tak też śpiew godowy jest stymulowany hormonalnie, zatem zanieczyszczenie sztucznym światłem także może wpływać istotnie na termin i godzinę ptasiego chóru. U ptaków naturalnie rozpoczynających śpiew jeszcze przed lub o świcie wykazano, że ALAN istotnie przyspiesza poranną wokalizację [20, 22, 67] jednocześnie znacząco wydłużając aktywność ptaków w ciągu doby, co może przekładać się na ich kondycję [24, 25, 68]. Ponadto wykazano także, że ekspozycja na światło w nocy, może także przyspieszyć rozpoczęcie wiosennego śpiewu w ciągu roku, co także może mieć wpływ na termin przystąpienia do lęgów [22].

3.9. Żerowanie

Zanieczyszczenie sztucznym światłem może także bezpośrednio wpływać na żerowanie. Światło w nocy przyciąga różne grupy organizmów, na czym mogą korzystać także ptaki. Wykazano, że ALAN może w istotny sposób wpływać na sposób i porę żerowania u wielu gatunków tych kręgowców. Zaobserwowano ptaki o typowo dziennej aktywności – mewy południowe *Larus dominicanus* – gromadzące się wieczorami na dachach budynków wokół oświetlonego tartaku. Okazało się, że ptaki żerowały przy latarniach na przyciąganych do światła rojących się chrząszczach

z rodziny kózkowatych [69]. Wykorzystywanie światła do polowania stwierdzono także u ptaków aktywnych o zmierzchu i nocą, tj. uszatki błotnej *Asio flammeus* oraz uszatki *Asio otus*. Sowy te żerowały na wędrujących ptakach nad oświetlonym Fortem Sagres w Portugalii. Punkt ten leży na jednym z najważniejszych szlaków migracyjnych między Europą a Afryką. Światło przyciągając ptaki migrujące mogło intensyfikować przelot w tym miejscu, dodatkowo zwiększając widoczność dla drapieżników [70]. ALAN wpływa także na żerowanie ptaków w mieście. Wykazano, że gołębie miejskie *Columba livia forma urbana* dzięki sztucznemu oświetleniu chętnie żerują nocą [71].

3.10. Kolizje i zaburzenie orientacji przestrzennej

Nocne światło przywabiając ptaki migrujące w tym okresie, naraża je na częstsze kolizje z budynkami i innymi obiektami antropogenicznymi. Badania nad Jeziorem Chicago dowodzą, że oświetlone budynki z dużą liczbą okien istotnie zwiększają odsetek śmiertelnych kolizji ptaków, szczególnie przy silnym wietrze. Wyniki tych badań sugerują, że zmniejszenie oświetlonej powierzchni budynków, szczególnie okolic okien, o połowę może znacząco obniżyć liczbę kolizji ptaków. Natomiast redukcja natężenia oświetlenia do wartości minimalnych stosowanych w przeszłości może zredukować śmiertelność ptaków o 60% [72]. Także badania rozpatrujące osobno oddziaływanie zanieczyszczenia światłem oraz zanieczyszczenia światłem spolaryzowanym PLP (ang. *polarized light pollution*) na kolizyjność ptaków z budynkami i szklanymi powierzchniami wykazały, że to właśnie ALAN w najsilniejszym stopniu odpowiada za śmiertelność ptaków. Dodatkowo jego wpływ był niezależny od rozmiaru szklanych powierzchni. Między PLP a kolizjami ptaków z budynkami nie stwierdzono związku [73].

Śmiertelnie niebezpieczne oddziaływanie ALAN nie dotyczy tylko drobnych ptaków w trakcie sezonowych migracji. Zjawisko to dotyka także duże ptaki morskie, zaburzając ich orientację w przestrzeni. Ptaki zdezorientowane zanieczyszczeniem światła, gubią prawidłową trasę lotu, kierując się w głąb lądu, gdzie często tracą życie na skutek śmiertelnej kolizji bądź z wycieńczenia lądują w niebezpiecznym miejscu, padając ofiarą drapieżników [74]. Zjawisko to jest szczególnie niebezpieczne dla młodych i niedoświadczonych ptaków, które po raz pierwszy pokonują trasę [75].

Młode burzyki żółtodziobe *Calonectris diomedea* z Wysp Kanaryjskich są narażone na negatywne konsekwencje zanieczyszczenia światłem także w momencie dyspersji polęgowej, gdy lotne ptaki opuszczają gniazda na lądzie, kierując się w stronę oceanu. Badania z wykorzystaniem nadajników GPS wykazały, że burzyki na skutek zanieczyszczenia światłem mają problem z opuszczeniem najbliższej okolicy gniazda i znalezieniem odpowiedniej drogi ku morzu, gdzie dorosłe ptaki spędzają większość swojego życia. Młode długo błądziły nad lądem, z wycieńczenia lądując w miejscach, gdzie były narażone na ataki drapieżników bądź śmiertelne kolizje. Połowa ptaków nie była w stanie oddalić się powyżej 3 km od kolonii, co w znacznym stopniu może zredukować liczbę ptaków, które osiągną dojrzałość płciową [76].

Natomiast wyniki badań nad burzykiem cienkodziobym *Ardena tenuirostris* przeprowadzonych na wyspie Phillip Island w Australii udowadniają, że redukcja oświetlenia znacząco zmniejszyła liczbę ptaków, które oszołomione lądowały na drodze, często tracąc życie pod kołami pojazdów [77]. Ponadto badania przeprowadzone kilka lat później wykazały, że nie tylko redukcja, ale także zmiana oświetlenia może znacząco zmniejszyć negatywne oddziaływanie ALAN na ptaki morskie. W porównaniu ze źródłami LED oraz wysokoprężnymi lampami metalohalogenkowymi, wysokoprężne lampy sodowe miały najmniejsze negatywne oddziaływanie na młode burzyki cienkodziobe w trakcie dyspersji polęgowej. Badacze zalecają instalowanie opraw oświetleniowych współpracujących z wysokoprężnymi lampami sodowymi w miejscach, gdzie ptaki rurkonose *Procellariiformes* zakładają kolonie lęgowe [78].

3.11. Zmiany zasięgów występowania

Poza bezpośrednim szkodliwym oddziaływaniem zanieczyszczenia światłem na ptaki, ALAN może być także istotnym czynnikiem środowiskowym limitującym zasięgi niektórych gatunków. Doskonałym przykładem jest lelek *Caprimulgus europaeus* – gatunek ptaka o typowo nocnej aktywności, którego populacja w szwajcarskich Alpach w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat znacząco spadła. Lelki są bardzo wrażliwe na światło ze względu na przystosowanie siatkówki do funkcjonowania w półmroku. Badania nad siedliskiem oraz bazą pokarmową wskazują, że głównym powodem ustępowania lelka z obszaru Valais jest rosnąca emisja światła, która już przekroczyła poziom adaptacyjny tego gatunku [79].

Także modelowanie matematyczne przeprowadzone na podstawie wyników Monitoringu Pospolitych Ptaków Polski wskazuje, że dzięcioł czarny *Dryocopus martius* może być kolejnym gatunkiem, którego zasięgi są znacznie ograniczane przez zanieczyszczenie światłem [80]. Wykazano także, że wraz ze wzrostem ALAN spada różnorodność gatunkowa ptaków lęgowych [81]. Natomiast w przypadku zgrupowań ptaków zimujących w mieście, w przeciwieństwie do hałasu, zanieczyszczenie światłem wpływało pozytywnie, zwiększając ptasie zbiorowiska i ich stabilność międzysezonową [82].

4. Podsumowanie

Sztuczne oświetlenie jest jednym z najczęściej nadużywanych dóbr cywilizacyjnych, które w znacznym stopniu oddziałuje na środowisko naturalne. Zanieczyszczenie światłem jest jednym z głównych czynników istotnie zmniejszających bioróżnorodność na świecie [83]. W znacznym stopniu wpływa też na ptaki, zaburzając ich cykle dobowe i roczne, zmieniając terminy rozmnażania, upośledzając odporność organizmu czy zwiększając liczbę śmiertelnych kolizji. Mimo że wiele aspektów oddziaływań zostało zbadanych, wciąż nasza wiedza dotycząca oddziaływania tego czynnika na ptaki jest ograniczona.

Ze względu na rosnącą skalę zjawiska, należy podjąć wszelkie działania, aby w rozsądnym zakresie ograniczyć jego emisję, jednocześnie nie wpływając na bezpieczeństwo ludzi. Pod kątem oddziaływania na ptaki, w pierwszej kolejności redukcję emisji ALAN należy wprowadzić w miejscach newralgicznych dla ptaków, jakimi są korytarze migracyjne oraz obszary sąsiadujące z koloniami lęgowymi szczególnie wrażliwych ptaków. W dobie wprowadzanego na coraz szerszą skalę oświetlenia LED, problem wpływu zanieczyszczenia sztucznym światłem nabiera także innego charakteru. Nowoczesne technologie implementowane w oprawach drogowych coraz częściej wykorzystują diody elektroluminescencyjne emitujące światło białe, ze względu m.in. na lepsze właściwości oddawania barw i dużą skuteczność świetlną. Promieniowanie emitowane przez źródła LED zawiera duży komponent światła niebieskiego, które ze względu na wysoką czułość podwzgórza i szyszynki, może być szczególnie niebezpieczne dla ptaków. Naukowcy sugerują, że zmiana oświetlenia zewnętrznego z białego na bursztynowe może przynieść znaczące korzyści wielu dzikim zwierzętom [84]. Ograniczanie emisji światła w nocy powinno stać się ważnym celem polityki ekologicznej najbardziej rozwiniętych państw na świecie, stając się istotnym narzędziem do poprawy perspektywy ochrony wielu gatunków zwierząt.

Literatura

- [1] Dunlap J.C., *Molecular bases for circadian clocks*, Cell, 1999, 96, s. 271–290.
- [2] Gwinner E., Brandstätter R., *Complex bird clock*, Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2001, 356, s. 1801–1810, DOI: 10.1098/rstb.2001.0959.
- [3] Gwinner E., *Circannual rhythms*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1986, s. 1–9.
- [4] Squires W.A., Hanson H.E., *The Destruction of Birds at the Lighthouses on the Coast of California*, The Condor, 1918, 20(1), s. 6–10, DOI: 10.2307/1362354.
- [5] Johnston D.W., Haines T.P., *Mass bird mortality*, Auk, 1957, 74, s. 447–458.
- [6] Gaston, K.J., Visser, M.E., Holker, F., *The biological impacts of artificial light at night: the research challenge*, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2015, 370(1667), art. 20140133, DOI: 10.1098/rstb.2014.0133.
- [7] Dominoni D.M., *The effects of light pollution on biological rhythms of birds: an integrated, mechanistic perspective*, Journal of Ornithology, 2015, 156(1 Supplement), s. 409–418, DOI:10.1007/s10336-015-1196-3.
- [8] Doyle S., Menaker M., *Circadian photoreception in vertebrates*, Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 2007, 72(1), s. 499–508, DOI: 10.1101/sqb.2007.72.003.
- [9] Bellingham J., Chaurasia S.S., Melyan Z. et al., *Evolution of melanopsin photoreceptors: discovery and characterization of a new melanopsin in nonmammalian vertebrates*, PLoS Biology, 2006, 4(8), s. 1334–1343, DOI:10.1371/journal.pbio.0040254.
- [10] Max M., McKinnon P., Seidenman K. et al., *Pineal opsin: a nonvisual opsin expressed in chick pineal*, Science, 1995, 267, s. 1502–1506, DOI:10.1126/science.7878470.

- [11] Halford S., Pires S.S., Turton M. et al., *VA Opsin-Based Photoreceptors in the Hypothalamus of Birds*, *Current Biology*, 2009 19(16), s. 1396–1402, DOI: 10.1016/j.cub.2009.06.066.
- [12] Gwinner E., Hau M., Heigl S., *Melatonin: generation and modulation of avian circadian rhythms*, *Brain Research Bulletin*, 1997, 44(4), s. 439–444, DOI:10.1016/s0361-9230(97)00224-4.
- [13] Dunn P.O., Møller A.P., *Changes in breeding phenology and population size of birds*, *Journal of Animal Ecology*, 2014, 83(3), s. 729–739, DOI: 10.1111/1365-2656.12162.
- [14] Cotton P.A., *Avian migration phenology and global climate change*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(21), 12219–12222, DOI: 10.1073/pnas.1930548100.
- [15] Ubuka, T., Bentley, G.E., Tsutsui, K., *Neuroendocrine regulation of gonadotropin secretion in seasonally breeding birds*, *Frontiers in Neuroscience*, 2013, 7(38), s. 1–17, DOI: 10.3389/fnins.2013.00038.
- [16] Bentley, G.E., Van't Hof T.J., Ball G.F., *Seasonal neuroplasticity in the songbird telencephalon: A role for melatonin*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 199996(8), s. 4674–4679, DOI: 10.1073/pnas.96.8.4674.
- [17] Cassone V.M., Bartell P.A., Earnest B.J. et al., *Duration of Melatonin Regulates Seasonal Changes in Song Control Nuclei of the House Sparrow, *Passer domesticus*: Independence from Gonads and Circadian Entrainment*, *Journal of Biological Rhythms*, 2008, 23(1), s. 49–58, DOI: 10.1177/0748730407311110.
- [18] Tsutsui K., Ubuka T., Yin H. et al., *Mode of action and functional significance of avian gonadotropin-inhibitory hormone (GnIH): a review*, *Journal of Experimental Zoology*, 2006, 305A, s. 801–806, DOI: 10.1002/jez.aa.
- [19] Foster R.G., Kreitzmann L., *Rhythms of life: the biological clocks that control the daily lives of every living thing*, Yale University Press, New Haven, 2004.
- [20] Da Silva A., Samplonius J.M., Schlicht E. et al., *Artificial night lighting rather than traffic noise affects the daily timing of dawn and dusk singing in common European songbirds*, *Behavioral Ecology*, 2014, 25(5), s. 1037–1047, DOI:10.1093/beheco/aru103.
- [21] Kempnaers B., Borgström P., Loës P. et al., *Artificial Night Lighting Affects Dawn Song, Extra-Pair Siring Success, and Lay Date in Songbirds*, *Current Biology*, 2010, 20(19), ss. 1735–1739, DOI: 10.1016/j.cub.2010.08.028.
- [22] Da Silva A., Valcu M., Kempnaers B., *Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds*, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 370(1667), art. 20140126, DOI: 10.1098/rstb.2014.0126.
- [23] Schlicht L., Valcu M., Loes P., et al., *No relationship between female emergence time from the roosting place and extrapair paternity*, *Behavioral Ecology*, 2014, 25(3), s. 650–659, DOI: 10.1093/beheco/aru035.
- [24] Dominoni D.M., Carmona-Wagner E.O., Hofmann M. et al., *Individual-based measurements of light intensity provide new insights into the effects of artificial light at night on daily rhythms of urban-dwelling songbirds*, *Journal of Animal Ecology*, 2014, 83(3), s. 681–692, DOI: 10.1111/1365-2656.12150.
- [25] Dominoni D.M., Partecke J., *Does light pollution alter daylength? A test using light loggers on free-ranging European blackbirds (*Turdus merula*)*, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 370(1667), art. 20140118, DOI: 10.1098/rstb.2014.0118.

- [26] Xie L., Kang H., Xu Q. et al., *Sleep Drives Metabolite Clearance from the Adult Brain*, Science, 2013, 342(6156), s. 373–377, DOI:10.1126/science.1241224.
- [27] Pandi-Perumal S.R., Srinivasan V., Maestroni G.J.M., et al., *Melatonin: Nature's most versatile biological signal?*, FEBS Journal, 2006, 273, s. 2813–2838, DOI: 10.1111/j.1742-4658.2006.05322.x.
- [28] Dominoni D.M., Goymann W., Helm B. et al., *Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (Turdus merula): implications of city life for biological time-keeping of songbirds*, Frontiers in Zoology, 2013, 10(1), s. 60, DOI: 10.1186/1742-9994-10-60.
- [29] De Jong M., Jeninga L., Ouyang J. et al., *Dose-dependent responses of avian daily rhythms to artificial light at night*, Physiology & Behavior, 2016, 155, s. 172–179, DOI: 10.1016/j.physbeh.2015.12.0.
- [30] Sun J., Raap T., Pinxten R. et al., *Artificial light at night affects sleep behaviour differently in two closely related songbird species*, Environmental Pollution, 2017, 231, s. 882–889, DOI: 10.1016/j.envpol.2017.08.098.
- [31] Raap T., Pinxten R., Eens M., *Artificial light at night disrupts sleep in female great tits (Parus major) during the nestling period, and is followed by a sleep rebound*, Environmental Pollution, 2016, 215, s. 125–134, DOI: 10.1016/j.envpol.2016.04.100.
- [32] Aulsebrook A.E., Connelly F., Johnsson R.D. et al., *White and Amber Light at Night Disrupt Sleep Physiology in Birds*, Current Biology, 2020, 30, s. 3657–3663, DOI: 10.1016/j.cub.2020.06.085.
- [33] Alaasam V.J., Duncan R., Casagrande S. et al., *Light at night disrupts nocturnal rest and elevates glucocorticoids at cool color temperatures*, Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 2018, s. 1–8, DOI: 10.1002/jez.2168.
- [34] Aulsebrook A.E., Lesku J.A., Mulder R.A. et al., *Streetlights Disrupt Night-Time Sleep in Urban Black Swans*, Frontiers in Ecology and Evolution, 2020, 8, art. 131, DOI: 10.3389/fevo.2020.00131.
- [35] Malek I., Haim A., Izhaki I., *Melatonin mends adverse temporal effects of bright light at night partially independent of its effect on stress responses in captive birds*, Chronobiology International, 2019, s. 1–20, DOI: 10.1080/07420528.2019.16985.
- [36] Russ A., Reitemeier S., Weissmann A. et al., *Seasonal and urban effects on the endocrinology of a wild passerine*, Ecology and Evolution, 2015, 5(23), s. 5698–5710, DOI: 10.1002/ece3.1820.
- [37] Grunst M.L., Raap T., Grunst A.S. et al., *Early-life exposure to artificial light at night elevates physiological stress in free-living songbirds*, Environmental Pollution, 2019, 259, art. 113895, DOI: 10.1016/j.envpol.2019.11389.
- [38] Moaraf S., Vistorovsky Y., Pozner T. et al., *Artificial light at night affects brain plasticity and melatonin in birds*, Neuroscience Letters, 2019, art. 134639, DOI: 10.1016/j.neulet.2019.13463.
- [39] Moaraf S., Heiblum R., Vistorovsky Y. et al., *Artificial Light at Night Increases Recruitment of New Neurons and Differentially Affects Various Brain Regions in Female Zebra Finches*, International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(17), 6140, DOI: 10.3390/ijms21176140.
- [40] Malik I., Batra T., Das S., et al., *Light at night affects gut microbial community and negatively impacts host physiology in diurnal animals: Evidence from captive zebra finches*, Microbiological Research, 2020, art. 126597, DOI: 10.1016/j.micres.2020.12659.

- [41] Raap T., Casasole G., Costantini D. et al., *Artificial light at night affects body mass but not oxidative status in free-living nestling songbirds: an experimental study*, Scientific Reports, 2016, 6(1), DOI: 10.1038/srep35626.
- [42] Ulgezen Z.N., K p yl  T., Meerlo P. et al., *The preference and costs of sleeping under light at night in forest and urban great tits*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2019, 286(1905), art. 20190872, DOI: 10.1098/rspb.2019.0872.
- [43] Jiang J., He Y., Kou H., et al., *The effects of artificial light at night on Eurasian tree sparrow (Passer montanus): Behavioral rhythm disruption, melatonin suppression and intestinal microbiota alterations*, Ecological Indicators, 2020, 108, art. 105702, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.1057.
- [44] Sepp T., Webb E., Simpson R.K., et al., *Light at night reduces digestive efficiency of developing birds: an experiment with king quail*, The Science of Nature, 2021, 108(1), DOI: 10.1007/s00114-020-01715-9.
- [45] Ziegler A.K., Watson H., Hegemann A. et al., *Exposure to artificial light at night alters innate immune response in wild great tit nestlings*, The Journal of Experimental Biology, 2021, 224, DOI: 10.1242/jeb.239350.
- [46] Arjona A., Silver A.C., Walker W.E., *Immunity's fourth dimension: approaching the circadian-immune connection*, Trends in Immunology, 2012, 33(12), s. 607-612, DOI: 10.1016/j.it.2012.08.007.
- [47] Becker D.J., Singh D., Pan Q. et al., *Artificial light at night amplifies seasonal relapse of haemosporidian parasites in a widespread songbird*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2020, 287(1935), art. 20201831, DOI: 10.1098/rspb.2020.1831.
- [48] Kernbach M.E., Newhouse D.J., Miller J.M. et al., *Light pollution increases West Nile virus competence of a ubiquitous passerine reservoir species*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2019, 286(1907), 20191051, DOI: 10.1098/rspb.2019.1051.
- [49] Dominoni D.M., Quetting M., Partecke J., *Artificial light at night advances avian reproductive physiology*, Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2013280(1756), art. 20123017, DOI: 10.1098/rspb.2012.3017.
- [50] Dominoni D.M., Quetting M., Partecke J., *Long-Term Effects of Chronic Light Pollution on Seasonal Functions of European Blackbirds (Turdus merula)*, PLoS ONE, 2013, 8(12), e85069, DOI: 10.1371/journal.pone.008506.
- [51] Russ A., Lu eni ov  T., Klenke R., *Altered breeding biology of the European blackbird under artificial light at night*, Journal of Avian Biology, 2017, 48(8), s. 1114-1125, DOI: 10.1111/jav.01210.
- [52] Dominoni D.M., de Jong M., Bellingham M., et al., *Dose-response effects of light at night on the reproductive physiology of great tits (Parus major): Integrating morphological analyses with candidate gene expression*, Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 2010, a. 1-15, DOI: 10.1002/jez.2214.
- [53] Singh D., Montoure J., Ketterson E.D., *Exposure to artificial light at night accelerates but does not override latitude-dependent seasonal reproductive response in a North American songbird*, Environmental Pollution, 2021, 279, art. 116867, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.11686.
- [54] De Jong M., Ouyang J.Q., Da Silva A. et al., *Effects of nocturnal illumination on life-history decisions and fitness in two wild songbird species*, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2015, 370(1667), art. 20140128, DOI: 10.1098/rstb.2014.0128.

- [55] Davies W.I.L., Turton M., Peirson S.N. et al., *Vertebrate ancient opsin photopigment spectra and the avian photoperiodic response*, *Biology Letters*, 2011, 8(2), s. 291–294, DOI: 10.1098/rsbl.2011.0864.
- [56] Caro S.P., Schaper S.V., Hut R.A. et al., *The Case of the Missing Mechanism: How Does Temperature Influence Seasonal Timing in Endotherms?*, *PLoS Biology*, 2013, 11(4), e1001517, DOI: 10.1371/journal.pbio.100151.
- [57] Smith R.A., Gagné M., Fraser K.C., *Pre-migration artificial light at night advances the spring migration timing of a trans-hemispheric migratory songbird*, *Environmental Pollution*, 2020, art. 116136, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.11613.
- [58] Gauthreaux S., Belser C.G., *Effects of artificial night lighting on migrating birds*, *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, 2006, s. 67–93.
- [59] McLaren J.D., Buler J.J., Schreckengost T. et al., *Artificial light at night confounds broad-scale habitat use by migrating birds*, *Ecology Letters*, 2018, 21(3), s. 356–364, DOI: 10.1111/ele.12902.
- [60] Cabrera–Cruz C., Smolinsky S., *Artificial Light at Night is Related to Broad–Scale Stopover Distributions of Nocturnally Migrating Landbirds along the Yucatan Peninsula, Mexico*, *Remote Sensing*, 2020, 12(3), 395, DOI: 10.3390/rs12030395.
- [61] La Sorte F.A., Fink D., Buler J.J. et al. *Seasonal associations with urban light pollution for nocturnally migrating bird populations*, *Global Change Biology*, 2017, 23(11), s. 4609–4619, DOI: 10.1111/gcb.13792.
- [62] La Sorte F.A., Horton K.G., *Seasonal variation in the effects of artificial light at night on the occurrence of nocturnally migrating birds in urban areas*, *Environmental Pollution*, 2020, art. 116085, DOI:10.1016/j.envpol.2020.11608.
- [63] Van Doren B.M., Horton K.G., Dokter A.M. et al., *High–intensity urban light installation dramatically alters nocturnal bird migration*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(42), s. 11175–11180, DOI:10.1073/pnas.1708574114.
- [64] Winger B.M., Weeks B.C., Farnsworth A. et al., *Nocturnal flight–calling behaviour predicts vulnerability to artificial light in migratory birds*, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2019, 286(1900), art. 20190364, DOI: 10.1098/rspb.2019.0364.
- [65] Zhao X., Zhang M., Che X., et al., *Blue light attracts nocturnally migrating birds*, *The Condor*, 2020, DOI: 10.1093/condor/duaa002.
- [66] Gehring J., Kerlinger P., Manville A.M., *Communication towers, lights, and birds: successful methods of reducing the frequency of avian collisions*, *Ecological Applications*, 2009, 19(2), s. 505–514, DOI: 10.1890/07–1708.1.
- [67] Da Silva A., Valcu M., Kempenaers B., *Behavioural plasticity in the onset of dawn song under intermittent experimental night lighting*, *Animal Behaviour*, 2016, 117, s. 155–165, DOI: 10.1016/j.anbehav.2016.05.001.
- [68] Dominoni D.M., Smit J.A.H., Visser M.E. et al., *Multisensory pollution: Artificial light at night and anthropogenic noise have interactive effects on activity patterns of great tits (*Parus major*)*, *Environmental Pollution*, 2019, art. 113314, DOI: 10.1016/j.envpol.2019.11331.
- [69] Pugh A., Pawson S., *Artificial light at night potentially alters feeding behaviour of the native southern black–backed gull (*Larus dominicanus*)*, *Notornis*, 2016, 63.
- [70] Canário F., HespanholLeitão A., Tomé R., *Predation Attempts by Short–eared and Long–eared Owls on Migrating Songbirds Attracted to Artificial Lights*, *Journal of Raptor Research*, 2012, 46(2), s. 232–234, DOI: 10.3356/jrr–11–15.

- [71] Leveau LM., *Artificial Light at Night (ALAN) Is the Main Driver of Nocturnal Feral Pigeon (Columba livia f. domestica) Foraging in Urban Areas*, *Animals*, 2020, 10(4), s. 554, DOI: 10.3390/ani10040554.
- [72] Van Doren B.M., Willard D.E., Hennen M. et al., *Drivers of fatal bird collisions in an urban center Benjamin*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118 (24) e2101666118, DOI: 10.1073/pnas.2101666118.
- [73] Lao S., Robertson B.A., Anderson A.W. et al., *The influence of artificial night at night and polarized light on bird–building collisions*, *Biological Conservation*, 2020, 241, 108358, DOI: 10.1016/j.biocon.2019.108358.
- [74] Rodríguez A., Rodríguez B., Curbelo Á.J. et al., *Factors affecting mortality of shearwaters stranded by light pollution*, *Animal Conservation*, 2012, 15(5), s. 519–526, DOI: 10.1111/j.1469–1795.2012.00.
- [75] Atchoi E., Mitkus M., Rodríguez A., *Is seabird light-induced mortality explained by the visual system development?*, *Conservation Science and Practice*, 2020, 2(6), DOI: 10.1111/csp2.195.
- [76] Rodríguez A., Rodríguez B., Negro J.J., *GPS tracking for mapping seabird mortality induced by light pollution*, *Scientific Reports*, 2015, 5(1), DOI: 10.1038/srep10670.
- [77] Rodríguez A., Burgan G., Dann P. et al., *Fatal Attraction of Short–Tailed Shearwaters to Artificial Lights*, *PLoS ONE*, 2014, 9(10), e110114, DOI: 10.1371/journal.pone.011011.
- [78] Rodríguez A., Dann P., Chiaradia A., *Reducing light–induced mortality of seabirds: High pressure sodium lights decrease the fatal attraction of shearwaters*, *Journal for Nature Conservation*, 2017, 39, s. 68–72, DOI: 10.1016/j.jnc.2017.07.001.
- [79] Sierro A, Erhardt A., *Light pollution hampers recolonization of revitalised European Nightjar habitats in the Valais (Swiss Alps)*, *Journal of Ornithology*, 2019, DOI: 10.1007/s10336–019–01659–6.
- [80] Kosicki J.Z., *Anthropogenic activity expressed as “artificial light at night” improves predictive density distribution in bird populations*, *Ecological Complexity*, 2020, 41, 100809, DOI: 10.1016/j.ecocom.2019.100809
- [81] Kosicki J.Z., *The impact of artificial light at night on taxonomic, functional and phylogenetic bird species communities in a large geographical range: A modelling approach*, *Science of The Total Environment*, 2021, 780, 146434, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146.
- [82] Ciach M., Fröhlich A., *Habitat type, food resources, noise and light pollution explain the species composition, abundance and stability of a winter bird assemblage in an urban environment*, *Urban Ecosystems*, 2016, 20(3), s. 547–559, DOI: 10.1007/s11252–016–0613–6.
- [83] Hölker F., Wolter C., Perkin E.K. et al., *Light pollution as a biodiversity threat*, *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(12), s. 681–682, DOI: 10.1016/j.tree.2010.09.007.
- [84] Longcore T., Rodríguez A., Witherington B. et al., *Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night*, *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 2018, 1–11, DOI: 10.1002/jez.2184.

THE EFFECTS OF LIGHT POLLUTION ON BIRDS

Abstract: Artificial lighting is one of the most abused benefits of civilization, which significantly affects the natural environment. Birds' daily and annual activities are strongly regulated by sunlight. They possess a wide range of photoreceptors located in several tissues in the brain, not only in the retina, which makes them particularly sensitive to light. For this reason, ecological light pollution significantly disrupts their natural rhythms. Research provides that exposure to light at night affects sleeping behaviour, breeding, fitness, metabolism, immunity, stress, migration, and many other aspects of birds' life. Light is also one of the factors significantly increasing bird mortality, as well as limiting the ranges of their occurrence. This proves how important it is to reduce the emission of artificial light pollution, which is one of the greatest threats to biodiversity in the world.

Keywords: birds, light pollution, circadian rhythms, annual rhythms, mortality

