Prace i Studia Geograficzne
2014, T. 53, ss. 109–128

Anna Wojciechowska
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
Wydział Biologii i Ochrony Środowiska
ankawoj@umk.pl

Anna Wiśniewska
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
Wydział Biologii i Ochrony Środowiska
aaania_w@wp.pl

Adam Barcikowski
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
Wydział Biologii i Ochrony Środowiska
barcik@umk.pl

ZANIECZYSZCZENIE ŚWIATŁEM – EKOLOGICZNY PROBLEM WSPÓŁCZESNEGO MIASTA

Streszczenie: Postępujący rozwój miast oraz nieustanne zwiększanie liczby lamp oświetlających ulice powoduje, że sztuczne oświetlenie staje się nie tylko uciążliwym sąsiadem dla obserwatoriów astronomicznych, lecz także zagrożeniem dla środowiska przyrodniczego. Nadmiar światła sztucznego przekształca dobowy rytm funkcjonowania licznych gatunków zwierząt, wywołuje zmiany hormonalne, morfologiczne i behawioralne u wielu grup zwierząt bezkręgowych i kręgowych, także człowieka. Również rośliny nie pozostają obojętne na wpływ nadmiaru światła, ponieważ są organizmami najbardziej wrażliwymi na zmiany jego natężenia i czasu utrzymywania się. W wyniku zaistnienia problemów ekologicznych związanych z „zanieczyszczeniem światłem" zrodziła się potrzeba ilościowej oceny tej swoistej anomalii. Celem prezentowanej publikacji jest przedstawienie aktualnego stanu badań i wiedzy dotyczących zmian w zachowaniu wybranych grup organizmów pod wpływem nadmiernego oświetlenia.

Słowa kluczowe: fotozanieczyszczenie, ekologia, ssaki, ptaki, gady, płazy, stawonogi, rośliny

WSTĘP

W momencie gdy Thomas Edison w 1886 r. wynalazł żarówkę, przed ludzkością otworzyły się nowe perspektywy. Dzięki sztucznemu światłu możemy

funkcjonować nie tylko od świtu do zmierzchu, ale też w nocy. Niechęć człowieka do ciemności wynika z tego, że postrzegamy świat wzrokiem. „Pozbycie się" nocy wydawało się zatem idealnym rozwiązaniem. Jednak nadmiar sztucznego oświetlenia prowadzi do powstania nowego typu zagrożenia – „zanieczyszczenia światłem" (ang. *photopollution*). Pojęcie to pojawiło się w astronomii w latach 70. XX w. i dotyczyło rozjaśnienia tła nocnego nieba, będącego efektem rozpraszania światła, którego źródła znajdowały się na Ziemi. Do nauk biologicznych pojęcie *photopollution* zostało wprowadzone przez Verheijena w 1985 r. (Ściężor i in. 2010) na określenie zmniejszającej się widoczności gwiazd na nocnym niebie. Wspomniane zagadnienie, należące do zawodowych problemów astronomów, dotyczy zdrowia całej populacji ludzkiej i kondycji pozostałych elementów biotycznych środowiska przyrodniczego terenów zurbanizowanych. Skutki sztucznego rozjaśnienia nocnego nieba bada się od prawie stu lat. Jednakże nadal nie ma wystarczająco dużo informacji na temat jakości nocnego nieba w poszczególnych miejscach na Ziemi ani metod ilościowej oceny tego zjawiska. Badania, które mają na celu określenie wielkości zanieczyszczenia światłem zależnie od warunków pogodowych, również nie są zbyt powszechne.

Celem niniejszego tekstu jest przedstawienie aktualnego stanu badań i wiedzy dotyczącej zmian w zachowaniu wybranych grup organizmów pod wpływem nadmiernego oświetlenia.

HISTORIA BADAŃ NAD ZANIECZYSZCZENIEM ŚWIATŁEM

Gdy w latach 70. XX w. pojawiły się informacje o negatywnych skutkach nadmiernego, sztucznego oświetlenia, podjęto pierwsze próby pomiarów tego zjawiska. Używano do tego celu instrumentów, które wykorzystywały działanie fotopowielaczy elektronicznych, oraz wykonywano obserwacje wizualne. Wyniki jasności powierzchniowej nocnego nieba zbierano w centrach dużych miast (Berry 1976; Walker 1973). W latach 80. w Japonii prowadzono pomiary z użyciem dwóch metod: wizualnej i fotograficznej. Pierwsza polegała na liczeniu widocznych gwiazd w określonym obszarze nieba, a druga na robieniu zdjęć rejonu nieba wokół zenitu aparatem fotograficznym (Isobe i Kosai 1998). Podobne pomiary wykonywano również w Holandii i na Sycylii (Schreuder 2001).

Urządzeniem używanym obecnie do mierzenia jasności nocnego nieba jest *Sky Quality Meter* (od niedawna występujące też w komercyjnym obiegu). W 2007 r. miernik ten posłużył do określenia jasności nocnego nieba na terenie węgierskiego parku ochrony ciemnego nieba Zselic Landscape Protection Area. Efektem wspomnianych pomiarów była mapa jakości nocnego nieba, nałożona na mapę topograficzną obszaru parku (Kolláth 2010). W 2011 r. powstała

kolejna mapa zanieczyszczenia światłem dla miasta Perth w Australii (Biggs i in. 2011). Podobne pomiary wykonano w 2008 i 2009 r. dla Hong Kongu, zbierając dane aż z 2000 punktów w mieście i okolicy (Pun i So 2010).

Ważnym źródłem informacji w określaniu zanieczyszczenia świetlnego są zdjęcia satelitarne Ziemi, wykonywane przez powietrzne siły zbrojne w ramach programu *Defence Meteorological Satellite Program* (DMSP) na zlecenie Stanów Zjednoczonych. Umożliwiają one wygenerowanie obrazów ilustrujących nocną emisję świetlną z powierzchni Ziemi (Elvidge i in. 1997). Dane satelitarne posłużyły też do stworzenia atlasu zanieczyszczenia światłem (Cinzano i in. 2001a, 2001b).

EKOLOGICZNE I BIOLOGICZNE KONSEKWENCJE ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM DLA ZWIERZĄT

Ssaki

Zwierzęta przez lata ewolucji przystosowywały się do funkcjonowania w określonej porze doby: w dzień lub w nocy. Ssaki drapieżne wykształciły doskonały węch i smak, co wiąże się z ich zasadniczo nocnym trybem życia. Większość ptaków z kolei orientuje się w przestrzeni dzięki bardzo dobremu wzrokowi, umożliwiającemu im polowanie za dnia (Kurek 2001). Wszystkie gatunki nietoperzy, borsuki, niemal wszystkie mniejsze zwierzęta mięsożerne, większość gryzoni, 20% naczelnych i 80% torbaczy to zwierzęta aktywne nocą. Wiele innych wykazuje aktywność zarówno w nocy, jak i w dzień. Nic więc dziwnego, że obecność lub brak światła odgrywa zasadniczą rolę w ich funkcjonowaniu. Sztuczne światło może zaburzać dobowe, miesięczne i roczne cykle zwierząt. To, jak zwierzęta reagują na światło, zależy głównie od budowy ich oka. Ważny jest w tym wypadku rodzaj fotoreceptorów w siatkówce. Istnieją dwa rodzaje fotoreceptorów: czopki i pręciki (Beier 2006). Zwierzęta nocne mają ogromne oczy o dużych źrenicach, co daje dostęp znacznej ilości światła, są też wyposażone w duże soczewki, a w ich siatkówce nie ma w zasadzie czopków, za to występują liczne pręciki. Przyjmuje się, że właśnie pręciki odpowiadają za widzenie nocne. Pozwalają na odbiór kształtu i ruchu, ale nie umożliwiają widzenia barw. Pręciki odznaczają się dużą czułością. Jasne światło oślepia nocne zwierzęta, ponieważ pręciki w ich oczach przestają być wrażliwe na bodźce powyżej 120 candeli/m^2, czyli wartości w przybliżeniu odpowiadającej świtowi. W siatkówce zwierząt aktywnych za dnia z kolei występują liczne czopki odpowiedzialne za rozróżnianie barw. Zwierzęta aktywne w ciągu dnia (np. wiewiórki) mają siatkówkę oka tak ubogą w pręciki, że nocą stają się praktycznie ślepe (Beier 2006).

Siatkówka zwierząt zdolnych do aktywności zarówno za dnia, jak i nocą składa się z pręcików i z czopków (umożliwiających widzenie w dzień), przy czym te pierwsze występują w zdecydowanej przewadze. Kiedy ssak, zaopatrzony w oko zdolne do widzenia w dzień i w nocy, przechodzi z ciemności w jasność, pręciki w jego oku ulegają nasyceniu i stają się nieaktywne. Przystosowanie się do widzenia za pomocą czopków trwa około dwóch sekund. Znacznie dłużej zajmuje przystosowanie się do widzenia podczas przejścia z jasności w ciemność. Czułość pręcików wzrasta stukrotnie w ciągu 10 minut po znalezieniu się w ciemności. Kolejny, dziesięciokrotny wzrost czułości następuje w okresie od 10 do 40 minut. W oku wielu ssaków zdolnych do aktywności za dnia i nocą oraz części ssaków nocnych za fotoreceptorami umiejscowiona jest warstwa błoniasta, która odbija światło. Zwiększa to efektywność docierania światła do fotoreceptorów (Beier 2006).

Znaczna część procesów życiowych u zwierząt i roślin przebiega cyklicznie jako przystosowanie do warunków panujących na Ziemi (Zawilska i Nowak 2002). Głównym przejawem synchronizacji organizmów ze środowiskiem jest obecność pór snu (odpoczynku) i aktywności (czuwania), które następują po sobie w sposób ciągły, oraz istnienie sezonowych procesów fizjologicznych, do których należy m.in. cykl rozrodu (Skwarło-Sońta i Majewski 2007). Dzięki wewnętrznemu zegarowi biologicznemu organizmy są aktywne w najkorzystniejszych dla siebie warunkach (Bębas 2010). Rytmy dobowe mają zdolność do samopodtrzymywania się przez kilka dni, co oznacza, że mechanizm wewnętrznego zegara działa przez jakiś czas od zaprzestania odbioru sygnału (np. świetlnego) z zewnątrz (Elliot 1976). Jeśli stan ten utrzymuje się dłużej, następuje rozregulowanie zegara. Ponowne przystosowanie się organizmu do zmienionych warunków świetlnych występuje z pewnym opóźnieniem i polega na przesunięciu fazowym obserwowanych rytmów, zgodnie z nowym fotoperiodem (Zawilska i Nowak 2002; Bębas 2010).

Działanie zegara biologicznego najlepiej poznano w wypadku ssaków. Główne miejsce kontroli rytmu dobowego znajduje się u nich w podwzgórzu – aktywność tzw. jąder nadskrzyżowaniowych (SCN) dopasowuje się do zewnętrznych warunków (Skwarło-Sońta i Majewski 2007). Informacja świetlna, odebrana przez komórki światłoczułe oka, dociera do owych jąder szlakiem nerwowym siatkówkowo-podwzgórzowym. Drogami wyjścia są szlak nerwowy i neurohormonalny. Przekazują one informację do mózgu (głównie szyszynki) lub tkanek. Ostatnim etapem jest wydzielanie hormonów z obszarów stymulowanych i dostarczanie tych substancji do narządów oraz tkanek, co prowadzi do regulacji procesów fizjologicznych (Bębas 2010).

Światło wpływa również na syntezę melatoniny. Hormon ten jest produkowany w szyszynce, która zachowuje aktywność jedynie w nocy. Ekspozycja szczurów na 15-minutowe działanie sztucznego światła podczas snu powodowała

niemal natychmiastową inhibicję syntezy melatoniny: zwiększona aktywność neuronów wpływała na zaprzestanie wydzielania noradrenaliny z zakończeń nerwowych w szyszynce, co prowadziło do zahamowania jej aktywności (Beier 2006). Analizy rytmu rocznego kilku gatunków ssaków potwierdziły, że to światło było najważniejszym czynnikiem synchronizującym cykl roczny tych zwierząt. Badane gryzonie (chomik syryjski – *Mesocricetus auratus*, oraz suseł – *Spermophilus lateralnis*) pozbawione SCN wykazywały znacznie zmieniony rytm aktywności i rozrodu. Dodatkowo, w wypadku patologicznych zmian SCN zaobserwowano duże zaburzenia rocznego cyklu zmiany ciężaru ciała (Bronson 1989). Wyniki badań nad zegarem biologicznym innych ssaków także dają podstawy do przyznania światłu podstawowej roli w regulacji rytmów biologicznych. Poważne konsekwencje ekologiczne mają np. zaburzenia wydzielana melatoniny. Z doświadczenia przeprowadzonego na szczurach w 1997 r. przez Dauchy'ego wynika, że nawet niewielka ilość światła zaburzająca sen szczurów laboratoryjnych chorych na nowotwory powodowała znaczący wzrost guzów u tych gryzoni (Dauchy i in. 1997). Co prawda nie da się bezpośrednio przełożyć wniosków z doświadczenia laboratoryjnego na procesy zachodzące u populacji żyjących na swobodzie, lecz można się spodziewać wystąpienia podobnych zaburzeń u wolno żyjących zwierząt (Beier 2006). Doświadczenia tego typu wykonywano również w Stanach Zjednoczonych na assapanie (*Glaucomys volans*) – gryzoniu prowadzącym nocny tryb życia. Gryzonie miały do wyboru ciemne gniazdo, w którym mogły się znaleźć w dowolnej chwili, i większe pomieszczenie oświetlone sztucznym światłem. Budząc się w gnieździe z zamiarem rozpoczęcia swej nocnej aktywności, napotykały światło w większym pomieszczeniu, co skłaniało je do powrotu do gniazda. Takie zachowanie opóźniło zegar biologiczny assapanów o 40 minut (DeCoursey 1986).

Pewne rodzaje sztucznego oświetlenia utrudniają zwierzętom, w szczególności dużym ssakom, przekraczanie dróg. Spowodowane jest to kłopotami z adaptacją do nagłej zmiany poziomu oświetlenia. Większość nocnych zwierząt orientuje się w przestrzeni na podstawie informacji płynących od pręcików, a jasne światło wywołuje ich unieczynnienie. Oczy wielu owych gatunków są zaopatrzone dodatkowo w szczątkowy zestaw czopków, uaktywniający się w razie potrzeby w ciągu kilku sekund. Jednakże przez te kilka sekund zwierzęta nic nie widzą. Gdy system czopków jest aktywny, obszary gorzej oświetlone pozostają dla owych zwierząt czarne – to właśnie jest przyczyną dezorientacji po przejściu przez drogę. Problem dotyczy nie tylko zwierząt z przewagą pręcików w siatkówce, lecz również tych, których siatkówka zdominowana jest przez czopki. System czopków staje się nieefektywny, gdy pewna część pola widzenia jest wielokrotnie jaśniejsza od pozostałej. Powstaje w ten sposób efekt oślepienia. Jeśli zwierzę pozostaje w oświetlonym obszarze przez czas wystarczający na całkowite nasycenie czopków, musi upłynąć od 10 do 40 minut,

zanim w pełni odzyska zdolność widzenia po powrocie do ciemniejszego obszaru (Beier 2006).

Nietoperze

Nietoperze to zwierzęta nocne – odpoczywają one w ciągu dnia, a w nocy żerują (Rydell 2006). Od dawna obserwuje się nietoperze polujące na ofiary, głównie owady, zwabiane przez sztuczne światło. Włączenie światła ultrafioletowego, zamontowanego na potrzeby eksperymentu w miejscach naturalnie ciemnych, powoduje niemal natychmiastowe pojawienie się nietoperzy, znęconych wizją owadów, które przyciągnęło światło. Nawyk żerowania nietoperzy przy sztucznym świetle jest tak częstym zjawiskiem, że zaczyna być rozpatrywany jako normalne zachowanie wielu gatunków. Część populacji nietoperzy pozyskuje prawie całe pożywienie przy sztucznym świetle. Żerowanie w takich warunkach nie jest zjawiskiem, do którego nietoperze przystosowywały się przez lata ewolucji. Jest to zjawisko nowe, trwające dopiero od stulecia (Rydell i Racey 1995).

Wiele gatunków nietoperzy uznaje się za zagrożone. Często przyczyną ginięcia tych zwierząt jest degradacja środowiska naturalnego oraz fragmentaryzacja krajobrazu, które znacznie ograniczają nietoperzom dostęp do kryjówek (Hutson i in. 2001). W związku z tym, że nietoperze żywią się owadami przyciąganymi przez światło, jest bardzo prawdopodobne, że światło pośrednio wpływa na możliwości przetrwania tych zwierząt, a co za tym idzie na ich status ochronny. Z tego względu współzależność między nietoperzami i owadami a światłem ma ważne znaczenie z ochronnego punktu widzenia (Rydell 2006).

Wielkość owadożernych nietoperzy ma związek z ich poruszaniem się w powietrzu. Niewielkie rozmiary ciała, będące cechą wspólną wszystkich nietoperzy owadożernych, ułatwiają tym zwierzętom sprawne manewrowanie. Ogólnie rzecz ujmując, większe nietoperze latają szybciej, ale mają mniejsze zdolności manewrowania niż drobniejsze osobniki. Różnice między nietoperzami owadożernymi dotyczą przede wszystkim rozmiarów i kształtu skrzydeł oraz zakresu sygnału echolokacyjnego (Rydell 2006). Nietoperze o długich skrzydłach latają szybciej, choć nie są tak zwrotne jak te o skrzydłach szerokich. Wspomniane odmienności sprawiają, że poszczególne obszary przestrzeni wokół źródeł światła zajmują różne gatunki nietoperzy. Nietoperze duże (30–100 g) i szybko latające, zwykle należące do rodziny molosowatych (*Molossidae*), często szukają kryjówek w miejskich budynkach i polują na dużych wysokościach, ponad lub poza miastem (Bowles i in. 1990). Pojawiają się w dobrze oświetlonych miejscach, np. na boiskach sportowych czy lotniskach (Avila-Flores 2002). Nietoperze te prawie nigdy nie latają wystarczająco nisko, by widać je było z ziemi, więc ich obecność wykrywa się detektorami ultradźwiękowymi. Gatunki szybko latają-

ce średniej wielkości (ok. 10–30 g), należące np. do rodziny mroczkowatych (*Vespertilionidae*), zwykle poruszają się wzdłuż rzędów latarni. Ponieważ stają się widoczne jedynie w momencie „nurkowania" w kierunku ofiary znajdującej się w kręgu padania światła, ich obecność również wykrywa się za pomocą detektorów ultradźwiękowych. Owo nurkowanie jest najbardziej rozpowszechnionym zachowaniem wśród nietoperzy, które polują na owady w zasięgu sztucznego światła (Rydell 2006). Najmniejsze gatunki nietoperzy (mniej niż 10 g), poruszające się najszybciej i mające dobrze rozwiniętą zdolność manewrowania, zwykle ograniczają żerowanie do obszaru wokół jednej latarni. Do tej grupy nietoperzy należą żyjący na półwyspie Jukatan przedstawiciele takich rodzajów, jak: *Rhogessa sp.*, *Eptesicus sp.* i *Pipistrellus sp.* Na Jukatanie wyróżniono również czwartą grupę, reprezentowaną tam tylko przez jeden gatunek – gołogrzbietnika ciemnoskrzydłego (*Pteronotus parnelli*). Zwierzę to żeruje w otoczeniu roślinności, jednak jest czasem widywane w oświetlonych miejscach, gdzie prawdopodobnie poszukuje pokarmu. Ten gatunek należy do licznej grupy wolno latających, lecz bardzo zwrotnych nietoperzy (Rydell i Racey 1995).

Zastosowanie nadajników radiowych i tzw. wykrywaczy nietoperzy w Europie i Ameryce Północnej dowiodło, że wiele gatunków szybko latających nietoperzy znacznie częściej poluje w okolicach lamp ulicznych niż w innych miejscach. O wzroście zagęszczenia nietoperzy w obrębie miejskich latarni decyduje głównie przyciąganie tych zwierząt przez światło, a nie preferowanie kryjówek w pobliskich budynkach. Na podstawie badań przeprowadzonych w Skandynawii stwierdzono, że zagęszczenie mroczka pozłacanego (*Epteesicus nilssonii*) oraz mroczka posrebrzanego (*Vespertilio murinus*) jest 3–20 razy większe na oświetlonych odcinkach dróg niż na podobnych odcinkach pozbawionych latarni (Rydell i Racey 1995). Zasadniczo zagęszczenie nietoperzy wokół latarni ulicznych jest najwyższe w wiejskich i podmiejskich okolicach, a stopniowo maleje wraz ze zbliżaniem się do centrów miast. Prawdopodobnie jest to wynik małej liczebności owadów w miastach, spowodowanej występowaniem niewielkiej ilości roślin (Rydell 2006).

Nietoperze nie mają trudności ze zlokalizowaniem źródeł światła, ponieważ z daleka je dostrzegają, a informacji o miejscu bogatym w pożywienie dostarczają im sygnały echolokacyjne wysyłane przez inne osobniki (Balcombe i Fenton 1988). Agresywne zachowanie wobec siebie przedstawicieli poszczególnych gatunków, będące przejawem współzawodnictwa o pokarm, może prowadzić do wykluczenia pewnych gatunków z korzystnych miejsc żerowania (Rydell 2006). Przykładem takiego wykluczenia z obszarów oświetlonych jest drastyczny spadek liczebności podkowca małego (*Rhinolophus hipposideros*) na obszarze Szwajcarii. Jest to gatunek, który nie korzysta z obszarów oświetlonych latarniami. Zaobserwowano, że w górskich dolinach, gdzie zainstalowano oświetlenie, populacja podkowca małego spadła do zera, a pojawili się tam przedstawiciele

karlika malutkiego (*Pipistrellus pipistrellus*), uznawanego za gatunek inwazyjny. Ponieważ osobniki obu tych gatunków mają podobne rozmiary, a dodatkowo żywią się tymi samymi rodzajami owadów, wydaje się, że przyczyną drastycznego spadku liczebności podkowca małego było właśnie konkurencyjne „świetlne" wykluczenie (Rydell 2006).

Przed opuszczeniem swojej kryjówki nietoperze sprawdzają warunki oświetleniowe panujące na zewnątrz. Dopiero gdy stanie się wystarczająco ciemno, decydują się wyruszyć na żer (Swift 1980). Sztuczne oświetlenie w pobliżu miejsca schronienia nietoperzy powoduje zaburzenie normalnego cyklu życia tych zwierząt, skraca czas ich żerowania, a nawet może sprowokować je do zmiany stanowisk (Boldogh i in. 2007). Ponadto nietoperze żerujące w świetle latarni są narażone na ataki drapieżników. Nocą w obrębie latarni zlokalizowanych na autostradach zauważono polujące pustułki. Wydaje się, że niektóre gatunki nietoperzy unikają sztucznych źródeł światła w ramach strategii obronnej przed atakiem drapieżników (Rydell 2006).

Ptaki migrujące

Wiele gatunków ptaków migruje w nocy na znaczne odległości (Tomiałojć 1990). Od lat było wiadomo, że ptaki zbaczają z obranego kursu na widok sztucznych świateł, szczególnie w mgliste, deszczowe noce. Już w 1800 r. latarnicy informowali o zderzeniach ptaków z latarniami morskimi podczas pochmurnych nocy (Gauthreaux Jr. i Belser 2006). W XIX w. i w pierwszej połowie XX w. latarnie morskie zbierały wśród morskich ptaków śmiertelne żniwo, ale pod koniec XX stulecia sytuacja zaczęła się zmieniać. Gdy w 1989 r. zwężono strumień światła latarni morskiej w Long Point w Kanadzie, a samo światło ściemniono, zanotowano spadek śmiertelnych wypadków z udziałem ptaków. W latach 1960–1989 średnia roczna śmiertelność wynosiła 200 ptaków wiosną i 393 jesienią, w latach 1990–2002 wartości te zmalały odpowiednio do 18,5 i 9,6 (Jones i Francis 2003).

Dla migrujących ptaków problemem są ponadto wieże nadawcze. W latach 70. oszacowano liczbę ptaków ginących w wyniku kolizji z oświetlonymi wieżami nadawczymi w Stanach Zjednoczonych (Banks 1979). Wzięto wówczas pod uwagę sytuację na 1010 wieżach. Okazało się, że rocznie w kolizjach z tymi obiektami ginęło przeszło 1,3 miliona ptaków. Z obserwacji prowadzonych wokół wieży nadawczej w Tallahassee na Florydzie wynikało, że w ciągu 25 lat wystąpiło tam 42 000 śmiertelnych kolizji, a ptaki, które zginęły, należały do 189 gatunków (Crawford i Engstrom 2000).

Również reflektory mogą wpływać na zachowania ptaków w czasie lotu. Aby zweryfikować tę hipotezę, przeprowadzono eksperyment, podczas którego

włączano i wyłączano silny strumień światła umiejscowiony równolegle do radaru namierzającego lecące ptaki. Badacze wykonujący doświadczenie zaobserwowali duże zmiany kierunku lotu ptaków (średnio o 8 stopni w ciągu pierwszych 10 sekund i 15 stopni w ciągu trzech 10-sekundowych interwałów). Średnia prędkość lotu ptaków zmniejszała się o 2–3 metry na sekundę (co stanowi 15–30% prędkości lotu), a wysokość lotu wzrastała w niewielkim stopniu (Bruderer 1999).

Kolejnym urządzeniem emitującym światło, które ma negatywny wpływ na ptaki, jest ceilometr. Jest to narzędzie meteorologiczne, powszechnie stosowane na lotniskach, które służy do mierzenia dolnej podstawy chmur. W latach 1948–1964 w czasie zachmurzonych, mglistych nocy ceilometry były przyczyną śmierci dużej liczby ptaków. Jeden z najwcześniejszych raportów na temat takich skutków działania ceilometrów pochodzi z Nashville w Tennessee z nocy 9–10 września 1948 r. W czasie pochmurnej nocy znaczna liczba migrujących ptaków zebrała się przy oświetlonej przez ceilometr dolnej podstawie chmur. Część ptaków powpadała na siebie, część zaś pikowała ku ziemi. Największą śmiertelność ptaków w związku z działaniem ceilometru zanotowano jednak w bazie lotniczej Warner Robins w Georgii. W ciągu dwóch nocy we wrześniu 1954 r. naliczono tam 50 000 martwych ptaków przyciągniętych światłem ceilometru. Niekorzystny wpływ ceilometru udało się zminimalizować przez zastosowanie filtrów eliminujących dłuższe fale świetlne, a przepuszczających głównie ultrafiolet, który nie przyciąga ptaków w tak znacznym stopniu (Gauthreaux Jr. i Belser 2006).

Od wielu lat naukowcy zastanawiają się, dlaczego światło przyciąga ptaki (Gauthreaux Jr. i Belser 2006). Jedna z teorii głosi, że ptak wlatujący w oświetlony obszar traci horyzont z zasięgu wzroku i jego punktem odniesienia staje się źródło światła, co prowadzi do dezorientacji. W ostatnich latach przybywa dowodów na to, że za dezorientację ptaków odpowiada polaryzacja światła. Zwykła latarnia uliczna emituje niezbyt mocno spolaryzowane światło. Jednak światła miast mogą ulec polaryzacji wskutek rozproszenia w atmosferze. Płaszczyzna polaryzacji jest ważnym źródłem wiadomości dla zwierząt. Światło, które dociera do Ziemi, jest spolaryzowane, a jego polaryzacja w wybranym punkcie nieba zależy od położenia tego punktu względem Słońca. Polaryzacja pomaga zwierzętom zorientować się w położeniu Słońca, a co za tym idzie, informacja o niej jest niezbędna podczas nawigacji. Z badań przeprowadzonych w Berlinie w 2011 r. wynika, że światła dużego miasta przekształcają sygnał polaryzacyjny do tego stopnia, że uniemożliwiają zwierzętom posługującym się informacjami zawartymi w spolaryzowanym świetle korzystanie z tych informacji (Kyba i in. 2011). Światła łuny miejskiej rozchodzą się na duże odległości, co nadaje ekologicznym konsekwencjom miejskiego zanieczyszczenia światłem znacznie większy zasięg, niż można by przypuszczać. W miejscach, które człowiek uważa

za ciemne, płaszczyzna polaryzacji nadal może być modyfikowana przez światła miast. Przywabianie ptaków przez światła latarni morskich czy wież nadawczych, głównie podczas pochmurnych nocy, jest również efektem poszukiwania spolaryzowanych źródeł światła w sytuacji braku spolaryzowanej informacji pochodzącej od światła Księżyca (Kyba i in. 2011).

Gady

Kolejną grupą zwierząt narażoną na wpływ sztucznego światła są żółwie. Główny problem, z jakim borykają się samice żółwi morskich, wiąże się ze znalezieniem odpowiedniej plaży na złożenie jaj. Linia brzegowa jest bowiem najgęściej zaludnionym obszarem Ziemi. Samice żółwi morskich co roku wybierają te same plaże, aby złożyć jaja. Zwykle składają jaja w nocy, kiedy temperatura jest niższa, a samicę oraz jaja trudniej wykryć drapieżnikom. Złożywszy do 100 jaj, samica powraca do morza. Jeśli jaja uchowają się przed atakiem drapieżników, po 45–75 dniach (zależnie od temperatury) wykluwają się młode (Salmon 2006). Jak tylko rozsadzą skorupkę, wykopują się z gniazda. Jeśli wyczują, że piasek na powierzchni jest gorący, poczekają do zmierzchu, aż się ochłodzi. Po wydostaniu się na powierzchnię, natychmiast, w ciągu najwyżej dwóch minut, rozpoczynają wędrówkę ku morzu. Młode żółwie odnajdują drogę do wody, przemieszczając się z dala od ciemnych lub wysokich obiektów, które mogą być wydmami bądź roślinnością. Udają się w kierunku jaśniejszego horyzontu, a gdy dotrą do wody, płyną nieprzerwanie przez 24–36 godzin (Salmon 2003). Każda niezaplanowana strata energii podczas całej tej operacji może przeważyć o porażce żółwi.

Sztuczne światło, jak potwierdzają wyniki badań, negatywnie wpływa na opisany proces rozrodu. Oddziałuje ono na zachowanie zarówno dorosłych samic poszukujących miejsc do złożenia jaj, jak i młodych szukających drogi do wody. Zauważono, że samice niechętnie składają jaja na plażach, w których pobliżu znajdują się źródła sztucznego światła. Przeprowadzono też eksperyment, który polegał na oświetleniu lampami rtęciowymi atrakcyjnej dla żółwi plaży. Po zamontowaniu latarni zainteresowanie plażą niemal całkowicie znikło. Gdy jednak światło zamieniono na niskoprężne lampy sodowe, sytuacja powróciła do stanu sprzed doświadczenia.

Sztuczne światło zaburza również orientację w terenie młodych żółwi (Salmon 2003, 2006). Nie mogąc znaleźć naturalnych punktów odniesienia, nowo wyklute zwierzęta przemieszczają się okrężną drogą. Niektóre jako punkt odniesienia obierają źródło sztucznego światła i do niego się kierują. Bezcelowo poruszając się po plaży, tracą energię potrzebną na podróż w głąb oceanu. Jeśli nawet trafią do wody, straty energii znacznie zmniejszają ich szanse na przeżycie.

Ponadto niektóre zmylone światłem żółwiki pokonują pas roślinności wzdłuż plaży i wydostają się na drogi, gdzie giną pod kołami samochodów bądź gromadzą się pod najbliższym źródłem światła. Zdezorientowane, osłabione i odwodnione osobniki stanowią łatwy cel ataku drapieżników. Po wschodzie słońca giną z powodu wystawienia na działanie wysokiej temperatury.

Na dezorientacyjny wpływ światła najbardziej narażone są młode osobniki. Pierwszoplanowe znaczenie zyskują tym samym wszelkie działania mające na celu zapobieganie niekorzystnemu wpływowi sztucznego światła na te gady, np. przenoszenie jaj żółwi do innych miejsc, montowanie filtrów na lampach czy zmiany w planach zagospodarowania przestrzennego miast.

Niektóre gady, a dokładniej niektóre jaszczurki, podobnie jak nietoperze, wykorzystały możliwości żerowania, jakie daje im obecność sztucznego światła. Dotyczy to np. gekonów, które żywią się owadami zwabianymi przez światło. Zaobserwowano, że zagęszczenie gekona wachlarzopalcego (*Ptyodactylus guttatus*) w okolicy zabudowań jest 200-krotnie wyższe niż w naturalnym środowisku jego występowania. Innym gatunkiem gekona, który zmienił swoje zachowanie wskutek zmiany reżimu świetlnego, jest gekon toke (*Gekko gecko*). Osobniki należące do tej grupy wydają zawołania godowe o zmierzchu. Zmiana reżimu świetlnego odbierana jest przez te gekony jako wydłużenie dnia, skracając czas nawoływania samic (Perry i Fisher 2006).

Ustalono, że 20% jaszczurek (67 gatunków) i 11% węży (18 gatunków) występujących w zachodnich Indiach jest powiązanych, przynajmniej przez jakiś czas, z ludzkimi siedliskami. Wśród nich dziewięć gatunków jaszczurek i jeden gatunek węża, normalnie aktywnych tylko za dnia, wydłużyły swoją aktywność do nocy, żyjąc w pobliżu źródeł sztucznego światła (Perry i Fisher 2006).

Płazy bezogonowe

Na całym świecie obserwuje się spadek wielkości populacji i liczby gatunków płazów bezogonowych (głównie żab i ropuch). U źródeł tej sytuacji leżą rozmaite czynniki antropogeniczne, takie jak: niszczenie siedlisk, kwaśne deszcze, obecność substancji toksycznych w środowisku. Wprowadzenie sztucznego oświetlenia, którego natężenie i spektrum są inne niż naturalne, również może być dla płazów wyniszczające (Buchanan 2006).

Płazy bezogonowe wyraźnie podlegają oddziaływaniu sztucznego światła. Większość gatunków żab i ropuch bowiem to zwierzęta częściowo lub całkowicie nocne. Nocne żaby i ropuchy są pokarmem innych nocnych zwierząt oraz same żywią się organizmami aktywnymi w nocy, a sztuczne światło może powodować zmiany zachowań i zagęszczenia zarówno drapieżników, jak i ofiar. Dodatkowo płazy bezogonowe są mniej mobilne niż inne grupy zwierząt,

a z powodu powolnego przemieszczania się i ścisłej zależności od środowiska wilgotnego mają niewielką zdolność zmiany miejsca występowania. Zaobserwowano, że młode osobniki ropuchy szarej (*Bufo bufo*) gromadzą się pod latarniami ulicznymi prawdopodobnie w celu żerowania na owadach przywabionych obecnością światła. Przebywanie w tych miejscach naraża jednak wspomniane zwierzęta na atak drapieżników, jak również zwiększa ryzyko śmierci pod kołami samochodów (Buchanan 2006).

Niektóre nocne żaby mają wysoko wyspecjalizowaną zdolność widzenia w ciemności. Gatunki, które przystosowały się do funkcjonowania w warunkach niskiego natężenia światła, z trudnością uczą się żyć w jaśniej oświetlonej przestrzeni. Żaby występujące w pobliżu punktowych źródeł światła muszą przemieszczać się pomiędzy jasno oświetlonymi miejscami a ciemniejszymi obszarami porośniętymi przez roślinność. Przystosowanie wzroku do gwałtownych zmian natężenia oświetlenia przysparza im trudności. Sztuczne światło w efekcie sprawia, że stają się mniej ruchliwe (Buchanan 2006). Stała zmiana warunków świetlnych może doprowadzić do długoterminowych konsekwencji w behawiorze płazów. W przypadku żaby tungara (*Engystomops pustulosus*) sztuczne oświetlenie wpływa na wybór partnerów. Metodami doświadczalnymi dowiedziono, że samice są bardziej wybredne podczas wyboru samca, gdy zapewni im się ciemniejsze warunki. Gdy oświetlenie było mocniejsze, żaby szybko dobierały się w pary, być może w obawie przed atakiem drapieżników. Dodatkowo oświetlenie decydowało też o sposobie lokowania przez nie gniazda. W sytuacji braku sztucznego oświetlenia żaby wybierały miejsca przypadkowo, a gdy stworzono im jaśniejsze warunki, ukrywały gniazda pomiędzy roślinnością (Buchanan 2006).

Większość płazów cechuje widzenie trójchromatyczne i tetrachromatyczne, umożliwiające postrzeganie około miliona odcieni barw oraz widzenie w ultrafiolecie (Wilkie i in. 1998). Dodatkowo płazy wykazują silną zależność względem różnych spektrów światła, co może pociągać za sobą wystąpienie konkretnej fototaksji. Przyjmuje się, iż płazy preferują niebieskie światło (430–480 nm), gdyż ułatwia im ono unikanie drapieżników. Ta fototaksja ma odpowiadać za odruch skoku w kierunku wody w momencie ataku drapieżnika. Obecność światła, które zmienia kolory widziane przez płazy, może więc wpływać na kierunek tej fototaksji, ale także może prowadzić do zaburzeń w wyborze partnerów. W wypadku monochromatycznych źródeł światła zacierają się różnice pomiędzy osobnikami obu płci (Buchanan 2006).

Stawonogi w ekosystemach słodkowodnych

Ekosystemy wodne od dawna były narażone na wpływ działalności człowieka. Oddziaływanie postępującej urbanizacji, zanieczyszczeń chemicznych

i biologicznych, rozwijającej się turystyki, zaburzeń w obiegu materii czy skutki wprowadzania gatunków inwazyjnych dostrzeżono ponad pięćdziesiąt lat temu. Już w roku 1961 uchwalono ustawę o ochronie wód przed zanieczyszczeniem (Dz.U. Nr 5, poz. 33). Jednakże dane o wpływie antropogenicznego oświetlenia na słodkowodne ekosystemy zbiera się od niespełna 10 lat (Perkin i in. 2011). Choć istnieje wiele publikacji na temat wpływu sztucznego światła na ekosystemy lądowe, to nadal mało wiadomo o oddziaływaniu tego światła na ekosystemy wód śródlądowych, mimo że zamieszkuje je około 9,5% wszystkich znanych gatunków zwierząt, a same te ekosystemy nie zajmują więcej niż 0,8% powierzchni Ziemi (Perkin i in. 2011).

Sztuczne oświetlenie może wpływać na dyspersję owadów wokół zbiornika wodnego oraz całościowe funkcjonowanie tego ekosystemu. Istnieją dowody na to, że oświetlenie zlokalizowane w pobliżu ekosystemów wodnych oddziałuje również na sposób rozprzestrzeniania się owadów wodnych nad terenami lądowymi. U owadów pojawia się efekt fiksacji, zniewolenia, a nawet występuje bezpośrednia śmierć. Osobniki znajdujące się w pobliżu źródła światła lecą wprost do niego, co prowadzi do ich natychmiastowej śmierci, bądź krążą chaotycznie w jego pobliżu aż do śmierci z wyczerpania, ciepła czy wskutek ataku drapieżnika. Część owadów pod wpływem światła nieruchomieje, co czyni je łatwym łupem dla innych zwierząt. Owadom zagraża też bariera świetlna: osobniki, które napotykają na swojej drodze rząd latarni, nie są w stanie dalej się przemieszczać. Źródło światła przywabia owady ze znacznej odległości, wywołując tzw. efekt odkurzacza (Perkin i in. 2011).

Negatywny wpływ sztucznego oświetlenia na owady wodne można by zmniejszyć, montując latarnie na odpowiedniej wysokości. Większość owadów lata bowiem dość nisko (Perkin i in. 2011). W odróżnieniu od latarni ulicznych, które umiejscawia się na takiej wysokości, aby zapewnić jak największy komfort jazdy kierowcom, latarnie służące do celów dekoracyjnych mogłyby być montowane na różnych wysokościach (powyżej 11 m).

Są jednak i takie owady, które, podobnie jak nietoperze czy gekony, czerpią korzyści pokarmowe z dodatkowego oświetlenia nocnego. Mowa tu o pewnych gatunkach pająków chętnie budujących sieci w bliskim sąsiedztwie światła (Perkin i in. 2011).

Adaptacja do nowych warunków świetlnych, znacznie zmieniających dotychczasowy cykl dobowy organizmów, istotnie wpływa na funkcjonowanie ekosystemów wodnych. W normalnych warunkach świetlnych zooplankton wykazuje dobowe migracje. W ciągu dnia duże gatunki zooplanktonu, szczególnie dafnia (*Daphnia*), przebywają przy dnie zbiornika wodnego, ukrywając się w ten sposób przed rybami. W nocy zooplankton przemieszcza się ku powierzchni, gdzie niewidoczny dla ryb, żeruje na fitoplanktonie (Dawidowicz 1999).

EKOLOGICZNE I BIOLOGICZNE KONSEKWENCJE ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM DLA ROŚLIN

Większość prac poświęconych wpływowi światła na rośliny skupia się na rozpatrywaniu roli światła w przebiegu ich wzrostu i rozwoju. Mniej analiz dotyczy odd ziaływania sztucznego, nocnego oświetlenia na rośliny w naturalnych warunkach.

U roślin telomowych zidentyfikowano i scharakteryzowano cztery rodziny fotoreceptorów: fitochromy, kryptochromy, fototropiny i fotoreceptory światła UV (Briggs 2006; Yu i in. 2010). Pierwszym odkrytym i opisanym fotoreceptorem był fitochrom, wrażliwy na natężenie oraz jakość światła z zakresu czerwonej części widma elektromagnetycznego (Kopcewicz i in. 1992). Główną formą fitochromu jest absorbująca światło czerwone forma P_R. Maksimum jej absorpcji przypada na długość fali ok. 660 nm. Forma P_R, po pochłonięciu kwantów światła czerwonego, podlega zjawisku fotokonwersji, przechodząc w formę P_{FR}, której maksimum absorpcji w zakresie dalekiej czerwieni wynosi ok. 730 nm. Fitochrom reguluje reakcje, które są związane z cyklem dobowym. Część białkową tych fotoreceptorów kodują geny tworzące niewielką rodzinę. U rzodkiewnika pospolitego (*Arabidopsis thaliana*) zidentyfikowano pięć genów oznaczanych jako *phy* (*A*, *B*, *C*, *D* i *E*). Białkowe produkty genów nazywa się odpowiednio PHY (A, B, C, D, E). Formę P_R ogólnie uznaje się za nieaktywną. Akumuluje się ona w dużych ilościach u roślin rosnących w ciemności. Po naświetleniu forma ta przekształca się w wyniku fotokonwersji w P_{FR}. Jednakże u badanych roślin stwierdzono również występowanie formy P_R, cechującej się wysoką trwałością. Doprowadziło to do wniosku, iż fitochrom występuje w dwu formach: stabilnej i labilnej. W wyniku badań prowadzonych na *A. thaliana* ustalono, że apoproteiny kodowane przez wspomniane powyżej geny nadają fitochromom specyficzne właściwości fizykochemiczne. Poza zmianami w maksimum absorpcji najważniejszą z nich jest trwałość fotoreceptora w formie aktywnej P_{FR}. Białko fitochromu labilnego, krótkotrwałego, kodowane jest przez gen *phyA*. Pozostałe cztery kodują fitochromy stabilne podlegające powolnej degradacji na świetle (Król 2011).

Kolejnymi fotoreceptorami są kryptochromy (Cry1, Cry2). Ich maksimum absorpcji mieści się w zakresie 330–500 nm, co odpowiada światłu niebieskiemu oraz UV (Yu i in. 2010). Pośredniczą one w kontroli wzrostu pędu, fotoperiodycznej indukcji kwitnienia, regulacji rozwoju liści i funkcjonowaniu zegara okołodobowego. Następne fotoreceptory, czyli fototropiny – czułe na światło niebieskie – kontrolują otwieranie i zamykanie aparatów szparkowych. Hamują razem z fitochromami wzrost wydłużeniowy pędu oraz ruchy cytoplazmatyczne m.in. chloroplastów (Brewczyński i Fronk 2004; Briggs 2006). Ostatnią grupą fotoreceptorów roślinnych są flawoproteiny wrażliwe na światło UV oraz niebieskie. Odgrywają one rolę regulatorów zegara okołodobowego, współdziałają

z fitochormami i kryptochromami w regulacji stabilności i aktywności białek wchodzących w jego skład. Znane są informacje na temat fitochromów występujących u rzodkiewnika pospolitego. Na podstawie wyników dotychczasowych badań stwierdzono, iż występują u niego trzy rodzaje fotoreceptorów. W każdym z nich część białkowa kodowana jest przez inne geny. Pomimo różnic wszystkie powstające na ich matrycy peptydy (ZTL, FKF1 i LKP) pełnią podobne funkcje (Brewczyński i Fronk 2004).

Wyniki badań prowadzonych od wielu lat na roślinach modelowych dowodzą, że w regulacji całego zbioru mechanizmów fotomorfogenetycznych bierze udział wiele fotoreceptorów. Niejednokrotnie kontrola tych przemian wymaga współdziałania co najmniej dwóch grup receptorów. Dobrym przykładem takich oddziaływań jest nie tylko kontrola kwitnienia, lecz także regulacja kiełkowania nasion. Mechanizmy tego etapu rozwoju u nasion fotoblastycznie dodatnich (zależnych od światła) wymagają współdziałania fitochromów A i B. W zależności od tego, jakiego natężenia światła potrzebują nasiona, i tego, jakie natężenie jest dostępne aktualnie dla nasienia, funkcję dominującą przejmuje jeden ze wspomnianych fotoreceptorów. Do kiełkowania nasion na świetle wymagany jest PhyB, natomiast nasiona kiełkujące w glebie kumulują w cytoplazmie nieaktywną formę PhyA, która charakteryzuje się większą wrażliwością na światło. Forma PhyA może występować nawet w 50-krotnie większej ilości niż PhyB. W przypadku nasion kiełkujących w glebie proces ten indukują minimalne ilości światła, powodując fotokonwersję fitochromu labilnego i w konsekwencji jego aktywację (Briggs 2006).

Innym przykładem współdziałania fotoreceptorów jest hamowanie wzrostu elongacyjnego hipokotylu przez światło. Proces ten zależy od aktywności co najmniej jednego z pięciu fitochromów i równoczesnej kontroli niektórych faz elongacji przez kryptochromy (cry1, cry2) oraz prawdopodobnie przez jedną z fototropin (Briggs 2006).

Niezwykle istotne dla regulacji wzrostu i rozwoju rośliny są odpowiednie warunki fotomorfogenetyczne oraz skotomorfogenetyczne. Siewki rosnące w ciemności wykorzystują zmagazynowane związki zapasowe na potrzeby przemian metabolicznych koniecznych do intensywnego wzrostu elongacyjnego. Brak światła powoduje biosyntezę oraz utrzymywanie się fitochromów w formie nieaktywnej P_R. Pojawiający się impuls światła czerwonego, inicjujący zahamowanie wzrostu elongacyjnego, wywołuje także cały ciąg przemian (m.in. biosyntezę chlorofili, rozwój chloroplastów), pozwalających w konsekwencji na rozpoczęcie fotosyntezy oraz na pełną autotrofię. W mechanizmach tych, podobnie jak i we wcześniej opisanych, funkcje towarzyszące pełnią także kryptochromy i fototropiny.

Światło i ciemność stanowią dla rośliny ważne źródło informacji. Rośliny wykazują fotoperiodyzm, czyli reakcję na zmiany dobowe dnia i nocy (Pilarski 2005). Na podstawie wrażliwości świetlnej występującej w procesie kwitnienia

wyróżniono trzy typy roślin: rośliny dnia długiego (LDP – ang. *long day plant*), które kwitną, gdy w ciągu doby przeważa faza jasna, krótkiego (SDP – ang. *short day plant*), które kwitną, gdy dominuje faza ciemna, oraz neutralne, niewrażliwe na fotoperiod. Sztuczne zmiany długości dnia wprowadzane w warunkach laboratoryjnych powodowały wyraźny efekt w postaci zahamowania lub wcześniejszej indukcji kwitnienia. Przerwanie indukcyjnej nocy, nawet krótkim błyskiem światła czerwonego, u roślin SDP hamuje kwitnienie. Przerwanie krótkiej nocy, czyli de facto wydłużenie fazy jasnej w cyklu dobowym o jedną lub dwie godziny, stymuluje indukcję kwitnienia w przypadku roślin dnia długiego. Zjawisko to już niemal od 100 lat znajduje zastosowanie w ogrodnictwie. Kwiaciarze wykorzystują ten efekt, aby powstrzymać rośliny dnia krótkiego (np. chryzantemy) przed kwitnięciem (Briggs 2006).

Niewiele jest informacji, jak sztuczne światło wpływa na wzrost roślin w naturze. Można jednak przypuszczać, że zaburza ono równowagę rozwojową, przenosząc nacisk z rozwoju skotomorfogenetycznego na fotomorfogenezę. W 1975 r. badano wpływ pięciu typów sztucznych świateł – żarówki, wysokoprężnej lampy sodowej, metalohalogenkowej, fluorescencyjnej i rtęciowej – na rośliny. Podczas eksperymentu rośliny przez 16 godzin wystawiano na działanie tych źródeł światła o natężeniu jednego fotokandela (około 10 luksów). Przebadano reakcję roślin dnia krótkiego i dnia długiego oraz osobników trzech gatunków drzew: brzozy papierowej, klonu norweskiego i wiązu amerykańskiego. W wyniku eksperymentu wykazano opóźnione kwitnienie u roślin dnia krótkiego, a przyspieszone u roślin dnia długiego. W przypadku drzew przyspieszony został wzrost wegetatywny. Niektóre gatunki nie wykazały żadnej mierzalnej reakcji na naświetlania. Siła reakcji roślin na różnego typu światło była w kolejności malejącej największa dla: żarówki, wysokoprężnej lampy sodowej, lampy metalohalogenkowej, białego światła fluorescencyjnego i lampy rtęciowej (Briggs 2006).

Obserwacje przyrodnicze prowadzi się też niezależnie od realizowanych badań naukowych. Zauważono np., że gałęzie klonu jaworu rosnącego w kampusie Uniwersytetu Kalifornii w pobliżu latarni ulicznych często utrzymują liście do późnej jesieni i zimy, podczas gdy liście drzew tego samego gatunku rosnących dalej znacznie wcześniej opadają (Briggs 2006). Tak samo rzecz się miała z ambrowcem (drzewem z rodzaju *Liquidambar*) rosnącym w kampusie Uniwersytetu Stanforda. W lutym 2002 r. drzewo od strony latarni ulicznej miało komplet liści (częściowo kolorowo zabarwionych), podczas gdy po drugiej stronie już od dawna pozostawało bezlistne (Briggs 2006). Podobnie na nocne oświetlenie reagują kasztanowce białe w parku miejskim w Toruniu (obserwacje własne). Zauważono również, że platany wystawione na działanie wysokoprężnej lampy sodowej wykazywały gwałtowny wzrost pod koniec sezonu, lecz później przeważnie obumierały w trakcie zimy, w przeciwieństwie do drzew osłoniętych przed światłem lamp (Briggs 2006).

PODSUMOWANIE

Ze względu na istotny wpływ światła na organizmy problemu zanieczyszczenia świetlnego nie możemy pomijać ani lekceważyć. Biorąc pod uwagę rosnącą presję terenów zurbanizowanych na naturalne elementy biotyczne ekosystemów, należy poszerzyć zakres badań reakcji organizmów na zanieczyszczenie nocnego nieba światłem. Już nawet skąpe informacje, jakie zebrano dotychczas na ten temat, wskazują, że nadmierne oświetlenie nocne mocno zmienia fizjologię i zachowanie organizmów, co przekłada się bezpośrednio na modyfikację skomplikowanych powiązań biocenotycznych, np. na zmiany w funkcjonowaniu łańcuchów pokarmowych.

Wyniki przeprowadzonych oraz przyszłych badań należy upowszechnić i spopularyzować, aby zmotywować gospodarzy miast do szybszego wdrożenia opracowanych już rozwiązań technicznych osłabiających negatywny wpływ nocnego światła na organizmy. Częściowym wyjściem z sytuacji może być zastosowanie niższego natężenia światła np. w lampach ulicznych. Najlepsze byłyby niskoprężne lampy sodowe, które zapewniają mieszkańcom wystarczającą widoczność i w zdecydowanie mniejszym stopniu ingerują w zachowania przyrody ożywionej. Wobec perspektywy dalszej intensyfikacji procesów urbanizacyjnych modernizacja oświetlenia powinna być priorytetem polityki leżącej u podstaw organizacji życia miejskiego, opartej na zasadach zrównoważonego rozwoju.

PHOTOPOLLUTION – ECOLOGICAL PROBLEMS OF THE MODERN CITY

Abstract: The progressing growth of cities and increasing number of streetlamps has made artificial lightning not only an annoying neighbor to astronomical observatories but also a factor impacting the environment. It modifies the circadian rhythm of many animal species, and it causes hormonal, morphological and behavioral changes in many invertebrate and vertebrate animals, including humans. Plants do not remain indifferent to excess light either as they are the organisms most sensitive to changes in light intensity and length of exposition. The ecological problems connected with light pollution necessitate quantitative evaluation of this peculiar anomaly. The aim of this publication is to show the current research and state of knowledge concerning behavioral changes in selected groups of organisms exposed to excessive lighting.

Keywords: photopollution, ecology, mammals, birds, reptiles, amphibians, arthropods, plants

Literatura

Avila-Flores R. (2002), *Habitat use by insectivorous bats in a mega-urban environment*, [w:] *32nd Annual North America Symposium on Bat Research*, Burlington, Vermont.

Balcombe J.P. i Fenton M.B. (1988), *The communication role of echolocation calls in vespertilionid bats*, [w:] P.E. Nachtigall i P.W.B. Moore (red.), *Animal sonar*, Plenum Press, New York: 625–628.

Banks R.C. (1979), *Human-related mortality of birds in the United States*, [w:] *U.S. Department of Interior, Fish and Wildlife Service, Special Scientific Report – Wildlife*, No. 215, Washington D.C.

Beier P. (2006), *Effects of artificial night lighting on terrestrial mammals*, [w:] C. Rich i T. Longcore (red.), *Ecological consequences of artificial night lighting*, California, Island Press: 19–42.

Berry R.L. (1976), *Light Pollution in Southern Ontario*, „The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada", 70(3): 97–115.

Bębas P. (2010), *O złożoności zegara biologicznego owadów, czyli jak narządy odmierzają czas*, „Kosmos", 59(3–4): 497–511.

Biggs J.D., Fouche T., Bilki F. i Zadnik M.G. (2011), *Measuring and mapping the night sky brightness of Perth, Western Australia*, „Monthly Notices of Royal Astronomical Society", 421(2): 1450–1464.

Boldogh S., Dobrosi D. i Samu P. (2007), *The efects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences*, „Acta Chiropterologica", 9(2): 527–534.

Bowles J.B., Heideman P.D. i Erickson K.R. (1990), *Observations on six species of free-tailed bats (Molossidae) from Yucatan, Mexico*, „Southwestern Naturalist", 35: 151–157.

Brewczyński K. i Fronk J. (2004), *Zielone białko fluorescencyjne GFP struktura i właściwości*, „Postępy Biologii Komórki", 31: 399–419.

Briggs W.R. (2006), *Blue/UV-A receptors: historical overview*, [w:] E. Schafer i F. Nagy (red.), *Photomorphogenesis in plants and bacteria: function and signal transduction mechanisms*, Springer, Dordrecht: 171–197.

Bronson F.H. (1989), *Mammalian reproductive biology*, University of Chicago Press, Chicago.

Bruderer B. (1999), *Three decades of tracking radar studies on bird migration in Europe and the Middle East*, [w:] Y. Leshem, Y. Mandelik i J. Shamoun-Baranes (red.), *Migrating birds know no boundaries*, International Center for the Study of Bird Migration, Latrun, Israel.

Buchanan B.W. (2006), *Observed and potential effects of light pollution on anuran amphibians*, [w:] C. Rich i T. Langcore (red.), *Ecological consequences of artificial night lighting*, Island Press, Washington D.C.

Cinzano P., Falchi F. i Elvidge C.D. (2001a), *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*, „Monthly Notices of Royal Astronomical Society", 328: 689–707.

Cinzano P., Falchi F. i Elvidge C.D. (2001b), *Naked eye star visibility and limiting magnitude mapped from DMSP-OLS satellite data*, „Monthly Notices of Royal Astronomical Society", 323: 34–46.

Crawford R.C. i Engstrom R.T. (2000), *Lights, towers, and avian mortality: where is the science? Transcripts of Proceedings of the Workshop on Avian Mortality at Communications Towers*, Cornell University, Ithaca, NY.

Dauchy R.T., Sauer L.A., Blask D.E. i Vaughan G.M. (1997), *Light contamination during the dark phase in „photoperiodically controlled" animal rooms: effect on tumor growth and metabolism in rats*, „Laboratory Animal Science", 45: 511–518.

Dawidowicz P. (1999), *Koszty behawioralnej obrony przed drapieżnictwem: model dobowych migracji pionowych zwierząt planktonowych*, „Wiadomości Ekologiczne", 45: 3–16.

DeCoursey P.J. (1986), *Light-sampling behaviour in photoentrainment of a rodent circadian rhythm*, „Journal of Comparative Physiology A", 159: 161–169.

Elliott J.A. (1976), *Circadian rhythms and photoperiodic time measurements in mammals*, „Federation Proceedings", 35(12): 2339–2346.

Elvidge C., Baugh K.E., Kihn E.A. i Davis E.R. (1997), *Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System*, „Photogrammetric Engineering & Remote Sensing", 64(6): 727–734.

Gauthreaux Jr. S.A. i Belser C.G. (2006), *Effects of artificial night lighting on migrating bird*, [w:] C. Rich i T. Langcore (red.), *Ecological consequences of artificial night lighting*, Island Press, Washington.

Hutson A.M., Mickleburgh S.P. i Racey P.A. (2001), *Microchiropteran bats. Global Status Survey and Conservation Action Plan*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.

Isobe S. i Kosai H. (1998), *Star Watching Observations to Measure Night Sky Brightness*, [w:] S. Isobe i T. Hirayama (red.), *Preserving the Astronomical Windows*, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 139.

Jones J. i Francis C.M. (2003), *The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses*, „Journal of Avian Biology", 34: 328–333.

Kolláth Z. (2010), *Measuring and modelling light pollution at the Zselic Starry Sky Park*, „Journal of Physics": Conference Series 218, 012001.

Kopcewicz J., Tretyn A. i Cymerski M. (1992), *Fitochrom i morfogeneza roślin*, PWN Warszawa.

Król S. (2011), *Jak rośliny widzą światło, czyli fitochrom roślinny i jego funkcje*, Uniwersytet Jagielloński, dostęp: 29.04.2013, <bioinfo.mol.uj.edu.pl/articles/Krol05>.

Kurek P. (2001), *Endozoochoria – studium porównawcze ssaków drapieżnych i ptaków*, „Wiadomości Botaniczne", 55(1/2): 41–50.

Kyba C.C.M., Ruhtz T., Fisher J. i Hölker F. (2011), *Lunar skylight polarization signal polluted by urban lighting*, „Journal of Geophysical Research: Atmospheres", 116(D24106).

Perkin E.K., Hölker F., Richardson J.S., Sadler J.P., Wolter C. i Tockner K. (2011), *The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives*, „Ecosphere", 2(11): 122.

Perry G. i Fisher R.N. (2006), *Night lights and reptiles: observed and potential effects*, [w:] C. Rich i T. Langcore (red.), *Ecological consequences of artificial night lighting*, Island Press, Washington D.C.

Pilarski J. (2005), *Na świetle i w mroku*, „Akademia", 4(4): 33–35.

Pun C.S.J. i So C.W. (2010), *Report of a Survey of Light Pollution in Hong Kong*, dostęp:

29.04.2013, <http://www.opcc.cl/prensa/noticias2009/ECF_2007_01_Final_Report.pdf>.

Rich C. i Langcore T. (red.; 2006), *Ecological consequences of artificial night lighting*, Island Press, Washington D.C.

Rydell J. i Racey P.A. (1995), *Street lamps and the feeding ecology of insectivorous bats*, [w:] P.A. Racey i S.M Swift (red.), *Ecology, evolution and behaviour of bats. Symposia of the Zoological Society of London*, No. 67, Clarendon Press, Oxford: 291–307.

Rydell J. (2006), *Bats and Their Insect Prey at Streetlights*, [w:] C. Rich i T. Longcore (red.), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press, Washington.

Salmon M. (2003), *Artificial night lighting and sea turtles*, „The Biologist", 50: 163–168.

Salmon M. (2006), *Protecting sea turtles from artificial night lighting at Florida's oceanic beaches*, [w:] C. Rich i T. Langcore (red.), *Ecological consequences of artificial night lighting*, Island Press, Washington D.C.

Schreuder D.A. (2001), *Sky Glow Measurements in the Netherlands*, [w:] R.J. Kohen i W.T. Sullivan III (red.), *International Astronomical Union Symposium No. 196*, Astronomical Society of the Pacific.

Skwarło-Sońta K. i Majewski P. (2007), *W jaki sposób zwierzęta odmierzają czas?* Uniwersytet Warszawski, dostęp: 29.04.2013, <http://www.czasiprzestrzen.wuw.pl/?id=str,zwierze ta_czas,1,0>.

Swift S.M. (1980), *Activity patterns of Pipistrelle bats (Pipistrellus pipistrellus) in northeast Scotland*, „Journal of Zoology", 190(3): 285–295.

Ściężor T., Kubała M., Kaszowski W. i Dworak T.Z. (2010), *Zanieczyszczenie świetlne nocnego nieba w obszarze aglomeracji krakowskiej. Analiza pomiarów sztucznej poświaty niebieskiej*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.

Tomiałojć L. (1990), *Ptaki Polski – rozmieszczenie i liczebność* (*The Birds of Poland: Distribution and Abundance*), PWN, Warszawa.

Walker M.F. (1973), *Light Pollution in California and Arizona*, „Astronomical Society of the Pacific", 85(507): 508–519.

Wilkie S.E., Vissers P.M., Das D., Degrip W.J., Bowmaker J.K. i Hunt D.M. (1998), *The molecular basis for UV vision in birds: spectral characteristics, cDNA sequence and retinal localization of the UV-sensitive visual pigment of the budgerigar (Melopsittacus undulatus)*, „Biochemical Journal", 330(1): 541–547.

Yu X., Liu H., Klejnot J. i Lin C. (2010), *The Cryptochrome Blue Light Receptors. The Arabidopsis Book*, American Society of Plant Biologists, dostęp: 29.04.2013, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3155252/>.

Zawilska J.B. i Nowak J. Z. (2002), *Rytmika okołodobowa i zegar biologiczny*, „Sen", 2(4): 127–136.