

Vliv světelného znečištění na živočichy a ekosystémy (literární řešerše)

Konečný uživatel: Ministerstvo životního prostředí

Název projektu: Vliv světelného znečištění na citlivé druhy živočichů, ekosystémy a krajinný ráz

Číslo projektu: TITSMZP012

Řešitel projektu: Česká zemědělská univerzita v Praze

Doba řešení: 1.11.2021 – 31.12.2024

Důvěrnost a dostupnost: veřejný, přístupný

Informace o řešitelském týmu:

Tomáš Kadlec, Tomáš Bartonička, Zdeňka Bendová, Miroslav Cejpek, František Dřížďal, Tomáš Dvořák, Filip Harabiš, Hana Konrádová, Radek Lučan, Anna-Marie Poskočilová, Aneta Ritz-Radlinská, Petr Zasadil

Další informace o projektu:

V rámci projektu bude zpracováno celkem devět výstupů/výsledků:

Nmap - Mapa (soubor map) ohrožení citlivých druhů živočichů a jejich biotopů světelným znečištěním v České republice

Nmet - Metodika hodnocení vlivů světelného znečištění na volně žijící živočichy a ekosystémy

O - Seznam druhů živočichů citlivých na světelné znečištění

Vsouhrn - Vliv světelného znečištění na krajinný ráz resp. jeho hodnoty

O - Literární rešerše na téma vliv světelného znečištění na živočichy a ekosystémy

O - Terénní sběr dat světelného znečištění

Nmap - Mapa území ochrany krajinného rázu před světelným znečištěním



Program veřejných zakázek v aplikovaném výzkumu a inovacích pro potřeby státní správy BETA2 byl schválen usnesením vlády České republiky č. 278 ze dne 30. 3. 2016 a je zaměřen na podporu aplikovaného výzkumu a inovací pro potřeby orgánů státní správy. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

Obsah

1. Světelné znečištění	5
2. Vliv světelného znečištění na živočichy a ekosystémy	5
2.1 Vnímání světelného záření živočichy	5
2.1.1. Vnímání světla bezobratlými živočichy	5
2.1.2. Obrazové vidění obratlovců	8
2.1.3. Neobrazové vidění	10
2.1.4. Fotobiomodulační účinky světla	11
2.2 Vliv světelného znečištění na fyziologické procesy a cirkadiánní rytmus živočichů	12
2.2.1. Cirkadiánní systém	12
2.2.2. Účinek světla v noci na cirkadiánní systém a noční hladiny melatoninu	14
2.2.3. Vliv světla v noci na sezónní reprodukci	18
2.2.4. Vliv světla v noci na zdravotní stav jednotlivců	19
2.3. Změny v chování živočichů vlivem světelného znečištění	21
2.3.1. Chromatičnost vyzařovaného světla	30
2.3.2. Intenzita světelného záření	39
2.3.3. Orientace vyzařovaného světelného záření	48
2.4. Vliv světelného znečištění na interakce mezi taxony a trofickými úrovněmi	48
2.4.1. Vliv světelného znečištění na rostlinnou složku ekosystémů	48
2.4.2. Interakce mezi skupinami organismů	55
2.5. Nedostatky v dosavadním poznání	57
3. Základní zdroje venkovního světelného znečištění v České republice	59
4. Legislativní nástroje pro řešení vlivu světelného znečištění v ochraně přírody v České republice	59
4.1. Zákon o ochraně ovzduší jakožto jedna z prvních světových úprav světelného znečištění ...	59
4.2. Jednotlivé platné a účinné zákony a úprava světelného znečištění v nich obsažená	60
4.2.1. Zákon č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů	60
4.2.2. Světelné znečištění a rušení nočního klidu	60
4.2.3. Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů	61
4.2.4. Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu, ve znění pozdějších předpisů (stavební zákon)	62
4.2.5. Osvětlení komunikací ve vztahu ke světelnému znečištění	63
4.2.6. Technické normy vztahující se ke světelnému znečištění a jejich postavení v právním systému	64

4.3. Nejzásadnější právní úpravy světelného znečištění v Evropě.....	65
4.3.1. Chorvatská právní úprava	66
4.3.2. Slovinská právní úprava světelného znečištění	66
4.3.3. Francouzská právní úprava světelného znečištění	67
Seznam použité literatury	69
Příloha 1	97

1. Světelné znečištění

Umělé osvětlení, tedy jakékoliv zdroje světelného záření vytvořené člověkem (např. veřejné osvětlení, architektonické osvětlení, světla unikající z budov) má řadu benefitů pro společnost, např. v podobě prodloužení produktivní části dne nebo rekreaci (Chepesiuk 2009). Pokud se ale umělé venkovní osvětlení stává nežádoucím a způsobuje negativní změny v životním prostoru lidí nebo organismů, lze mluvit o světelném znečištění nebo také *light pollution* (Gallaway et al. 2010, Hölker et al. 2010), či *artificial light at night* (ALAN). Jak vědeckých, tak právních definic světelného znečištění je více, obvykle specifikují míru a směřování jeho negativních vlivů. Ve vztahu k živočichům a společenstvům lze světelné znečištění popsat jako vliv světelného záření pocházejícího z umělého osvětlení, jež má nežádoucí efekt na fyziologické procesy a chování jednotlivců, populační procesy a interakce jedinců v populacích, jakož i na vzájemné interakce jedinců různých trofických úrovní mezi sebou a prostředím, ve kterém se vyskytují.

Světelné znečištění se vyskytuje v několika formách (Rajkhowa 2014). Světelný přesah (*light trespass*) nastane, když nežádoucí světlo vnikne do necílového prostoru. Přesvětlení nebo také neúměrné osvětlení (*over-illumination*) je označení pro nadměrné používání světla. Oslnění (*glare*) vzniká v podmínkách výrazného kontrastu mezi jasnými a tmavými oblastmi v zorném poli, jimž se zrakový orgán není schopen ihned adaptovat. Ozáření oblohy nebo také umělý jas oblohy (*sky glow*) vzniká jako efekt záře nad osvětlenými oblastmi (jak odražené světlo, tak světlo směřující k obloze) jež se šíří v atmosféře.

2. Vliv světelného znečištění na živočichy a ekosystémy

2.1 Vnímání světelného záření živočichy

Přestože vědecké poznání je velmi pokročilé v chápání principů obrazového vidění zásadního pro orientaci živočichů v prostředí, mechanismus využívání světelného záření pro synchronizaci cirkadiálního systému a jiné fyziologické funkce je známý pouze dvě desítky let. Zajímavé je, že světlem-indukovaná regulace metabolických cirkadiálních oscilací byla popsána již u ancestrálních cyanobakterií, které se objevili na Zemi před zhruba 3,8 miliardami let. V současnosti rozlišujeme dva typy **vidění** živočichů; tzv. **obrazové**, umožňující orientaci v prostoru, a **neobrazové**, řídící biorytmy a umožňující tak „orientaci“ v čase. Kromě vnímání světla „viděním“, tedy funkcí specializovaných fotoreceptorů ve specializovaných orgánech, mohou živočichové vnímat světlo ještě nespecializovanými fotoakceptory, které mohou procesem **fotobiomodulace** měnit energetický stav ozářené buňky.

2.1.1. Vnímání světla bezobratlými živočichy

Skupinu bezobratlých tvoří řada nezávislých fylogenetických linií s vysokou mírou diverzity fotoreceptorů a fotoreceptorových orgánů, od jednoduchých světločivných dermálních buněk až po komplexní složené oči. Tato variabilita odpovídá nejen fylogenetickému vývoji dané skupiny, ale i světelným podmínkám prostředí, kde se konkrétní skupiny vyskytují. I přes tuto

variabilitu vykazují bezobratlí překvapivě podobné změny v chování v prostředí s určitým typem záření, např. v charakteru fototaxe, reakce na polarizované světlo apod. Tato specifická změna chování se projevuje nejvýrazněji při přechodu od kratších vlnových délek od (< 450 nm) k delším (> 450 nm) (Menzel 1979).

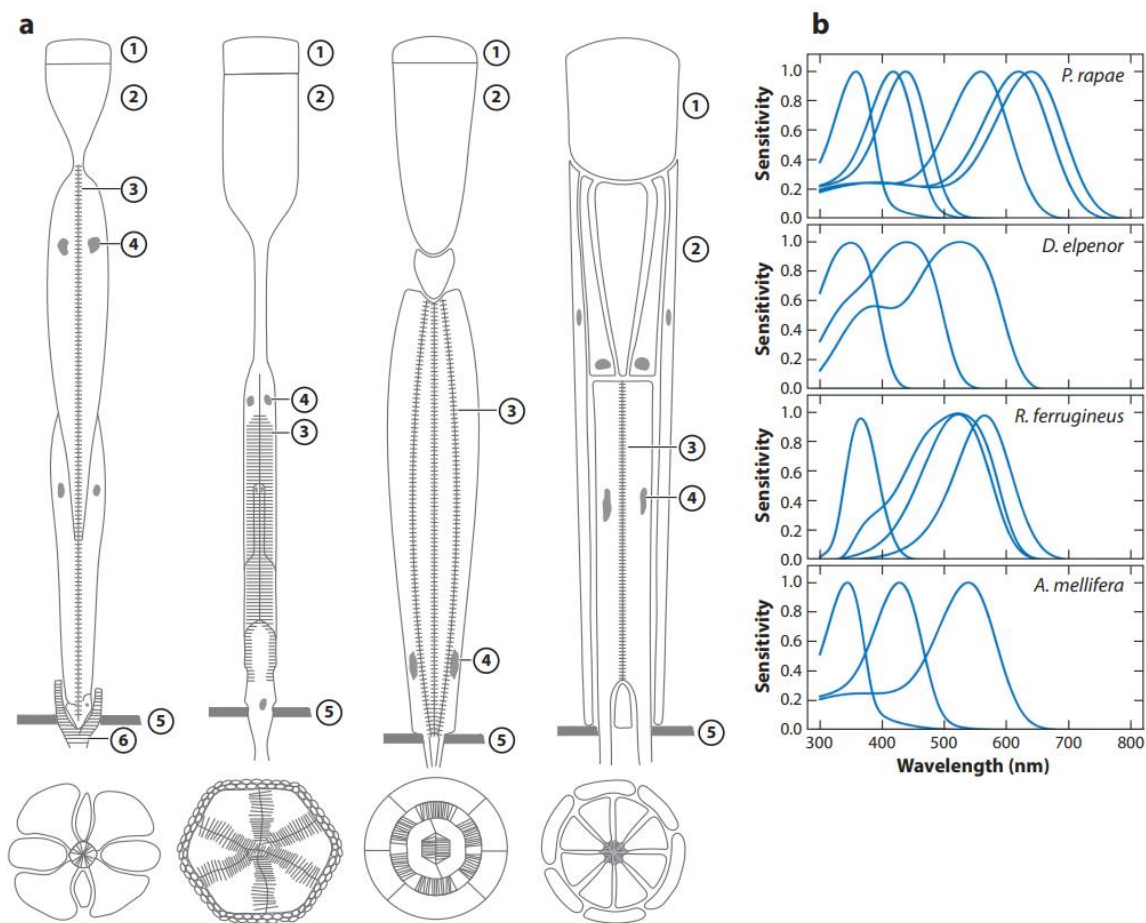
I přesto, že řada skupin nevykazuje přímo barevné vidění, jsou jejich jedinci citliví na konkrétní vlnové délky. Obecně tato reakce probíhá u živočichů formou absorpce světelného záření fotopigmentem vázaným v membráně fotoreceptorové buňky. Fotopigment následně podléhá molekulárním změnám, které vyvolají protékání iontů buněčnou membránou, čímž dojde ke změně napětí v membráně. Takto vzniklý elektrický signál je pak přenášen neurální sítí, což vede následně ke změně nebo realizaci jednotlivých typů chování (Akashi et al. 2018). Stanovením spektrální sensitivity fotopigmentů jednotlivých skupin bezobratlých se vědci zabývají již dlouhou dobu (Menzel 1979). S pravou fotosensitivitou se setkáváme již u živočišných hub (Porifera). Po ozáření silným světlem dochází k smršťení jejich těla (tzv. fotofobní růst). Jejich pohyblivé larvy jsou senzitivní k záření v modré oblasti spektra ($\lambda_{\max} = 440$ nm), s výskytem sekundárního maxima v oranžovo-červené oblasti ($\lambda_{\max} = 600$ nm) díky fotopigmentům flavinům a karotenoidům (Leys et al. 2002). Obdobně roztroušené buňky na těle nezmarů (Hydroida) vykazují silnou reakci v oblasti modrého spektra ($\lambda_{\max} = 350$ - 500 nm). Podobný typ světločivných buněk mají i ploštěnci (Platyhelminthes). Navíc se u nich setkáváme s již specifickými zrakovými orgány s inverzní sítnicí v proximální části těla (se senzitivitou $\lambda_{\max} = 475$ - 530 nm) (Brown et al. 1968). Hlístice (Nematoda) vnímají změny světelných podmínek prostředí pomocí párových ocelli v sensorické oblasti přední části těla. Na světlo v oblasti UV ($\lambda_{\max} = 366$ nm) vykazují negativní fototaxi, světlo s delšími vlnovými délkami ($\lambda_{\max} = 465$ a 570 nm) je ale přitahuje (Croll 1966). U většiny terestrických nebo sladkovodních kroužkovců (Annelida) se setkáváme s fotosensitivními buňkami roztroušenými na ventrálním i dorzálním povrchu těla ($\lambda_{\max} = 450$ nm; Kretz et al. 1976). Značnou variabilitu světločivných orgánů lze pozorovat u měkkýšů (Mollusca), od jednoduchých ocelli nebo primitivních očí s čočkou až po poměrně složité komplexní oko hlavonožců s více než jedním typem fotopigmentu v sítnici s $\lambda_{\max} = 470$ - 500 nm (Menzel 1979).

Členovci (Arthropoda) vykazují obrovskou variabilitu ve fotopigmentech, patřících do skupiny tzv. r-opsinů. Celkově se dělí do pěti základních skupin, a to s citlivostí na dlouhé (LW1, LW2), střední (MW1, MW2) a krátké (SW) vlnové délky (Henze & Oakley 2015). Předkové současných členovců měli pravděpodobně všechny typy kromě LW1. U korýšů je senzitivita pigmentu složeného oka v spektrálním rozhraní $\lambda_{\max} = 460$ - 562 nm, zatímco u sladkovodních skupin je oko citlivé spíše k delším vlnovým délkám (> 520 nm). Na rozdíl od ostatních, převážně terestrických skupin členovců, se receptory pro UV záření vyskytují u korýšů jen velmi vzácně. Tento rozdíl je vysvětlován lepším šířením světla s delšími vlnovými délkami v sladkovodním prostředí (Goldsmith & Fernandez 1968). U pavouků (Araneae) se v sítnici očí nachází fotopigmenty vykazující maximální excitace v několika oblastech spektra. Často se jedná o pestré multipigmentální systémy, s fotoreceptory se silnou reakcí na UV ($\lambda_{\max} = 360$ - 370 nm), modrozelenou ($\lambda_{\max} = 480$ - 500 nm), zelenou ($\lambda_{\max} = 510$ - 540 nm) a oranžovou ($\lambda_{\max} = 580$ nm) část spektra (Menzel 1979).

V případě hmyzu (Insecta) se s vnímáním světla setkáváme takřka u všech skupin. Výjimku tvoří podzemně nebo endoparaziticky žijící formy. Světlo může hmyz vnímat několika způsoby – od dermálního vidění, přes stemata a ocelli až ke složenému facetovému oku (Nation 2016). Dermální vidění je realizováno prostřednictvím fotoreceptorů v kutikule na povrchu těla. Pomocí tohoto typu „vidění“ je hmyz schopen vnímat změny chromatičnosti světla v průběhu denního cyklu (Eacock et al. 2019). Stemata se nachází na hlavové kapsle larev holometabolního hmyzu. Mají pouze malý počet fotoreceptorů. Jednoduchá stemata vytváří jednoduchý obraz, zatímco složitější orgán, tvořený z šesti a více stematy vytváří obraz komplexnější, složený z informace od jednotlivých stemat (Van der Kooi et al. 2020). Na hlavě dospělců hmyzu a larev hemimetabolních skupin nacházíme dorzální ocelli. Ty již mají vytvořenou sítnici, na které ale vniká pouze nedokonalý obraz se slabým prostorovým rozlišením. Jejich funkce spočívá především ve vnímání intenzity a změny světelných podmínek v průběhu dne (Van der Kooi et al. 2020). Složené (facetové) oko se nachází u většiny dospělců hmyzu a u larev hemimetabolního hmyzu, a je tvořeno desítkami až tisíci omatidií (Obr. 1).

Světlo procházející omatidiem je filtrováno v soustavě krystalického kuželíku a na detekční část omatidia již dopadá světlo v požadovaném úhlu (Van der Kooi et al. 2020). Tato část obsahuje 7 až 8 světločivých fotoreceptorů tvořících retinulu (sítničku), jejíž funkce je detekce vlnové délky světla. Výběžky buněk retinuly (rhabdoméry) vytváří dohromady zrakovou tyčinku (rhabdom). V rhabdomérách se nachází vlastní vizuální pigmenty detekující světlo. V okolí buněk retinuly se nachází ještě 12-18 sekundárních pigmentových buněk, které vzájemně funkčně izolují vlastní omatidia (tzv. fotopická omatidia; Wilson et al. 1978). Axony buněk retinuly tvoří dohromady optický nerv, jenž vede do protocerebra hmyzího mozku ganglia. Jelikož se různé světločivé fotoreceptory nachází v omatidiu na stejné vizuální ose (v ose dopadu světla v konkrétním omatidiu), je hmyz schopen vnímat světlo barevně (Takeuchi et al. 2006). V případě hmyzu s noční aktivitou mají pigmentové buňky schopnost kontrakce v podmínkách s nízkou intenzitou světelného záření. Po jejich kontrakci dočasně zaniká jejich stínící funkce a vstupující paprsky světla, tak mohou pronikat do přilehlých omatidií a vzájemně se křížit. V tomto případě mluvíme o adaptaci na noční vidění (superpoziční stavba oka se skotopickým typem omatidií). Na rozdíl od denního vidění není vytvářený obraz superpozičního oka nikterak kvalitní. V podmínkách tmavé noci ale není ani potřebný, důležitá je zvýšená detekce tlumeného světla umožňující orientaci (Miskimen & Rodriguez 1981).

Denní druhy hmyzu mají stavbu oka apoziční, s denní adaptací k vidění, u které nedochází ke křížení světelných drah vstupujících do (fotopických) omatidií (Wigglesworth 1965). U hmyzu jsou vizuální pigmenty tvořeny z r-opsinů patřících do skupin LW2 a SW (Henze & Oakley 2015), s citlivostí fotoreceptorů na UV, modrou a zelenou barvu (tzv. trichromatický systém; Van der Kooi et al. 2020). U některých skupin se ale vyskytuje čtvrtý typ fotoreceptorů citlivý na červenou barvu, o jehož přítomnosti se dlouho nevědělo a předpokládalo se, že hmyz není schopen červenou barvu vnímat.



Obr. 1 – Anatomie fotoreceptoru (omatidia) a spektrální sensitivita čtyř zástupců hmyzu. (a) Schéma anatomie omatidia motýla *Pieris rapae*, nočního motýla *Deilephila elpenor*, brouka *Rynchophorus ferrugineus*, a včely *Apis mellifera*. 1 – rohovka, 2 – krystalický kuželík, 3 – rhabdom, 4 – nukleus, 5 – bazální membrána, 6 – tapetum. (b) Graf spektrální senzitivity čtyř zástupců hmyzu. Převzato z Van der Kooi et al. (2020).

V rámci jednoho zrakového orgánu se může vyskytovat vícero typů opsinů, např. u váček bylo zjištěno 1 UV senzitivní, 8 citlivých na modrou část spektra a až 21 LW opsinů (Futahashi et al. 2015).

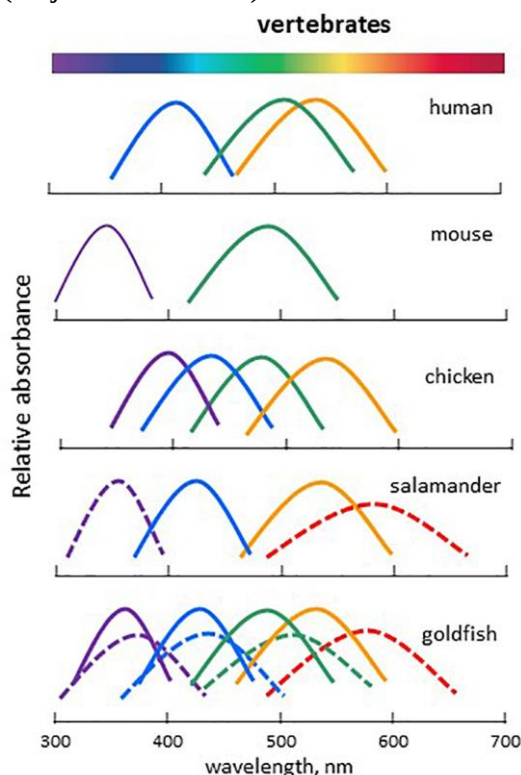
Celkové vnímání světelných podmínek prostředí nemusí být limitováno pouze vlastní spektrální citlivostí fotoreceptorů (vizuálních pigmentů). Hned na povrchu omatidií se nachází transparentní čočka, která nepropouští UV záření v blízkosti 300 nm (Ilić et al. 2016). Tato propustnost může být navíc ovlivněna chitinovými vrstvami s různými indexy lomu světla na povrchu čočky (Stavenga 2002).

2.1.2. Obrazové vidění obratlovců

Světločivným orgánem v oku obratlovce je sítnice (lat. retina), která je složena z fotoreceptorů, tyčinek a čípků, z několika typů převodních buněk, tzv. interneuronů, a gangliových buněk, které tvoří svými výběžky zrakový nerv vedoucí do zrakových center v mozku. Základní skupinou molekul převádějících energii fotonu na elektrické signály srozumitelné nervovému

systému jsou opsiny. Bílkoviny opsiny jsou transmembránové receptory spojené nejčastěji s chromoforem *11-cis* retinalem, který působením fotonu mění svoji konfiguraci, a tím spouští reakci fotoreceptoru na světlo. Obrazové vidění obratlovců je adaptováno na vidění při nízkých intenzitách světla za soumraku či v noci, tzv. **skotopické** vidění, a na vidění při slunečním osvitu, tzv. **fotopické** vidění. Zatímco přepínání mezi skotopickým a fotopickým viděním je zajišťováno jinými morfologickými vlastnostmi tyčinek a čípků, specifitu k vlnové délce světla určuje typ opsinu.

V tyčinkách obratlovců je tzv. **rhodopsin** (Rh1; $\lambda_{\max} = 480-510$), který je citlivý ke skotopickému rozmezí intenzit světla a obvykle zajišťuje pouze achromatické, nebarevné vidění. Výjimku v tomto ohledu tvoří žáby s dvěma tyčinkovými opsiny ($\lambda_{\max} = 502$ nm a 433 nm; (Astakhova et al. 2021)) a noční gekoni, jejichž tyčinky obsahují čípkové opsiny a mohou tak rozlišovat světlo různých vlnových délek i ve skotopickém rozmezí intenzit (Kojima et al. 2021).



Obr. 2 – Křivky spektrální citlivosti zrakového systému zástupců jednotlivých tříd obratlovců.

Shora: čípkové pigmenty člověka ($\lambda_{\max} = 563, 532$, a 424 nm), myši ($\lambda_{\max} = 511$ a 358 nm), kura domácího ($\lambda_{\max} = 571, 508, 455$, a 415 nm), mloka ($\lambda_{\max} = 615$ (A2), 567 (A1), 444, a 367 nm), karase zlatého ($\lambda_{\max} = 566, 516, 447$, a 370 nm (A1), a 617, 535, 454, a 382 nm (A2)). Čípkové opsiny se také označují jako L (z angl. *long wavelength*), neboli “červené”, M (*middle wavelength*), neboli “zelené”, či S (*short wavelength*), neboli “modré”. Jednotlivé skupiny jsou vyznačeny příslušnou barvou. Fialové křivky odkazují na opsiny citlivé k rozsahu UV spektra. Čerchovaná čára vyznačuje posun spektrální citlivosti opsinů obsahujících 3,4-didehydroretinal (forma A2). Obrázek převzat z: Falcón et al. 2020, Shichida et al. 2009.

Barevné vidění ve fotopickém rozmezí intenzit světla je zajištěno porovnáváním míry odpovědi několika typů čípků, které se děje již na úrovni samotné sítnice a dále potom ve zrakových centrech mozku. U většiny živočichů je jeden typ opsinu uložen vždy v jednom čípku. Výjimku tvoří obojživelníci a ryby, kteří mohou mít několik typů opsinů v jednom čípku (Dalton et al. 2015, Isayama et al. 2014). Podobné tzv. duální čípky byly objeveny také u některých savců (Jacobs et al. 2004, Peichl et al. 2004). U většiny obratlovců také existuje nerovnoměrná distribuce fotoreceptorů a opsinů v ploše sítnice, která často podléhá vývojovým změnám, či adaptaci na specifické podmínky prostředí. Tento jev je prostudován nejlépe u vodních živočichů, kteří mohou měnit spektrální citlivost změnou typu *11-cis* retinalu za 3,4-didehydroretinal či expresí nových typů opsinů, či množství čípků (Fuller & Claricoates

2011, Marshall 2017, Valen et al. 2018). Základní **typy čípkových opsinů** významných pro obrazové vidění obratlovců s jejich spektrální citlivostí jsou shrnuty na obrázku 2 (Falcón et al. 2020, Shichida & Matsuyama 2009).

2.1.3. Neobrazové vidění

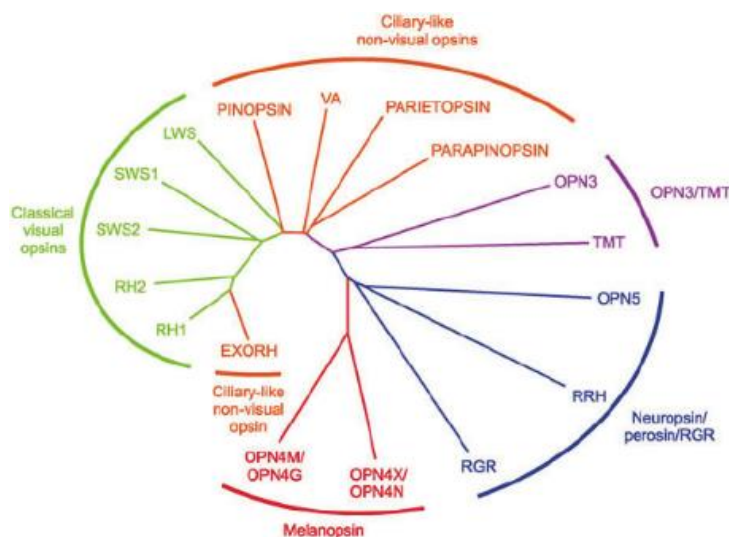
Fotoreceptivní základy neobrazového vidění byly objeveny u savců kolem roku 2000. Série experimentů několika laboratoří ukázala, že v části gangliových buněk sítnice, které integrují signály z tyčinek a čípků se nachází speciální fotopigment **melanopsin** kódovaný genem OPN4. Axony těchto vnitřně-responsivních gangliových buněk (ipRGC, z angl. *intrinsic photoresponsive retinal ganglion cells*) tvoří tzv. retinohypotalamický trakt vedoucí k cirkadiánním hodinám v hypotalamu a dalším částem mozku regulujícím např. pupilární reflex a jsou morfologickou podstatou neobrazového vidění (Berson et al. 2010, Hattar et al. 2002, Panda 2016, Provencio et al. 2000). Tyto fotoreceptory mají nízké prostorové rozlišení a dlouhé latence v odpovědích ve srovnání s odezvami klasických fotoreceptorů tyčinek a čípků, umožňují vnímat intenzitu světla (ozářenost) a mají maximální citlivost na světlo o vlnové délce 460-480 nm ($\lambda_{\max} = 460-480$). Aktivace této dráhy má účinky jednak dlouhodobé, vyplývající ze synchronizace cirkadiánních hodin a posunů v načasování cirkadiánních rytmtů v sekreci hormonů, srdeční frekvenci, tělesné teplotě, spánkových cyklů apod. (Hatori & Panda 2010), nebo okamžité, vedoucí k supresi melatoninu, zúžení zornic, zlepšení bdělosti a kognitivního výkonu (Gooley et al. 2003).

Několik let po objevu melanopsinu u laboratorních hlodavců (Hannibal et al. 2002a) byl melanopsin popsán i u rypošů (Hannibal et al. 2002b), myší nilských (Langel et al. 2015), kosmanů (Jusuf et al. 2007), makaků (Hannibal et al. 2014), pískomilů mongolských (Jeong & Jeon 2015), netopýrů (Jeong et al. 2018), a také u člověka (Provencio et al. 2000). Sekvenčně podobné opsiny byly nalezeny i u jiných obratlovců než savců. např. u ptáků, ($\lambda_{\max} = 476-484$; Torii et al. 2007), u ryb ($\lambda_{\max} = 470-484$; Davies et al. 2011), obojživelníků (Provencio et al. 1998) a plazů (Dearworth et al. 2011, Frigato et al. 2006). Melanopsinu podobné geny byly nalezeny i u korálů (Vize 2009) a kopinatců ($\lambda_{\max} = 484$; Koyanagi et al. 2005).

Melanopsin a jeho ortology jsou u všech živočišných druhů vyladěny k $\lambda_{\max} \approx 480$ nm, což odpovídá spektru slunce okolo horizontu. Svítání a soumrak jsou časová okna pro fyziologickou synchronizaci cirkadiánních hodin u všech živočichů, takže je pravděpodobné, že mohlo být evolučně výhodné spektrálně vyladit fototransdukční mechanismus k těmto vlnovým délkám (Bellingham et al. 2006).

Zatímco obrazové vidění je zprostředkováno výhradně fotoreceptivním orgánem oka, neobrazové vidění může být u obratlovců vytvářeno v několika dalších fotoreceptivních orgánech, jako jsou pineální žláza neboli epifýza, či hluboké fotoreceptory ptáků a plazů uložené v diencephalických strukturách mozku nebo rozptýlené po celém mozku jako v případě ryb. Tyto struktury přispívají k regulaci biorytmů, cirkadiánních či sezónních, ale hrají roli také, např. v časném ontogenetickém vývoji, jak bylo prokázáno na rybách. Opsiny jsou také uloženy v kožních dermatoforech ryb a obojživelníků, kde regulují agregaci pigmentu či dokonce pozitivní a negativní fototaxi a migrační cykly mihulí. Tyto orgány často obsahují jiné typy

opsinů, než jsou v tyčinkách a čípcích, a jiné typy než melanopsin. Obrázek 3 ukazuje fylogenetický strom opsinů a jejich klasifikaci do pěti základních tříd, avšak v databázi NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nucore/?term=opsin+complete+cds>) existuje více než 5000 kompletních sekvencí opsinů, jejichž funkce však není zdaleka známá.



Obr. 3 – Fylogenetický strom pěti základních skupin opsinů. Převzato z: (Davies et al. 2014)

První neobrazový opsin, **pinopsin** ($\lambda_{\max} = 468-477$ nm), byl identifikován v roce 1994 v epifyze ptáků (Okano et al. 1994) a později i v oku ještěřů a jiných obratlovců a předpokládá se, že je účinný ve skotopickém rozmezí intenzit světla (Sato et al. 2018). Později byl nalezen *vertebrate ancient opsin* (**VA**; $\lambda_{\max} = 470-500$ nm) v horizontálních a amakrinních buňkách sítnice (tedy nikoliv ve fotoreceptorech) ryb (Soni & Foster 1997), obojživelníků a ptáků. U ptáků je VA exprimován v hypotalamu v neurosekrečních neuronech a má pravděpodobně roli v sezónní regulaci rozmnožování (García-Fernández et al. 2015). **Encephalopsin** (OPN3; $\lambda_{\max} = 470-480$ nm) je exprimován v sítnici oka, ale také v mnoha orgánech jako je tuková tkáň, testes, játra nebo plíce a to jak u savců včetně člověka, tak u ostatních obratlovců (Guido et al. 2022). Ukázalo se, že tento opsin např. zajišťuje aktivaci lipolýzy „modrým“ světlem o 480 nm v adipocytech myši, důležitou pro chladovou termogenezi (Nayak et al. 2020). Díky jeho tkáňové distribuci se také testuje jako možný kandidát zprostředkování fotobiomodulačních účinků světla (viz níže). **Neuropsin** (OPN5; $\lambda_{\max} = 360-380$ nm) je důležitý pro synchronizaci cirkadiánních hodin v kožních buňkách a v buňkách sítnice a rohovky oka myši (Buhr et al. 2015, 2019) a byl nalezen i v jiných tkáních. Předpokládá se, že OPN5 má funkci také ve vývoji oka, zejména v prevenci krátkozrakosti (myopie) (Jiang et al. 2021). Tento opsin je tzv. dvojstabilní a pro návrat do klidového stavu potřebuje světlo o $\lambda_{\max} = 470$ nm (Yamashita et al. 2010).

2.1.4. Fotobiomodulační účinky světla

V buňkách sítnice i v jiných buňkách těla jsou také tzv. fotoakceptory - molekuly, které nejsou součástí specializovaných světločivných orgánů, ale mohou absorbovat světlo a měnit

fyzologii buňky (Garza et al. 2018). Typickým příkladem je DNA, která absorbuje UV a v důsledku toho dochází k jejímu poškození (Richa et al. 2015), či lipofuscin v retinovém pigmentovém epitelu a jeho fotosenzitivní molekula A2E s absorbančí mezi 335-435 nm, která produkuje reaktivní formy kyslíku a je příčinou např. makulární degenerace v procesu zvaném jako *harmful blue light* (Marie et al. 2018, 2020). Jiným příkladem je cytochrom c oxidáza, enzym důležitý pro produkci buněčné energie v respiračním řetězci mitochondrií, který vnímá červené, až blízké infračervené světlo, čehož se využívá procesem tzv. fotobiomodulace pro podporu hojení kůže a povrchově uložených orgánů, a v posledních letech také k léčbě oka (Geneva 2016). Ačkoliv výzkum fotobiomodulace nepracuje s fotopigmenty opsiny, v teoretických pracích se již objevují hypotézy, že např. OPN3 by mohl hrát významnou roli v těchto procesech (Liebert et al. 2022).

2.2 Vliv světelného znečištění na fyziologické procesy a cirkadiánní rytmus živočichů

2.2.1. Cirkadiánní systém

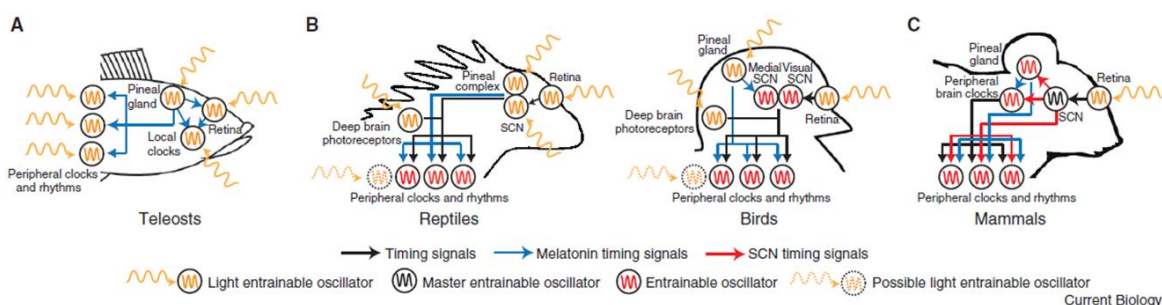
Geofyzikální cykly střídání světla a tmy jsou nejspolehlivějšími ukazateli změn ve vnějším prostředí. Reprodukce a přežití všech typů organismů je významně ovlivněno sezónními výkyvy v přírodních podmínkách, tj. srážkami, změnami teploty či barometrického tlaku, změnami v dostupnosti potravy. Tyto výkyvy jsou ale často nepravidelné a dají se obtížně předvídat. Naproti tomu denní změny v osvětlení a světelném spektru mají sice samy o sobě menší vliv na život organismů, byly ale během celé evoluce vysoce předvídatelné a staly se spolehlivými indikátory přicházejících zásadnějších změn. Předvídání environmentálních událostí bylo pravděpodobně takovým přínosem pro přežití organismů, že se vyvinul evolučně adaptivní časový mechanismus, cirkadiánní systém, který dokáže s velkou přesností odhadovat fázi dne. Všechny organismy od jednobuněčných řas až po člověka mají tento cirkadiánní systém regulující naprostou většinu fyziologických funkcí tak, aby byly v souladu se solárním cyklem (Bhadra et al. 2017).

Cirkadiánní systém, tzv. cirkadiánní hodiny, má dvě charakteristické vlastnosti; 1) na principu genetických zpětnovazebných transkripčně-translačních smyček, post-translačních autoregulačních smyček, či, v případě bezjaderných buněk, metabolických cyklů, generují cirkadiánní rytmy běžící s periodou přibližně 24 hodin. 2) cirkadiánní hodiny jsou citlivé

ke světlu a jsou synchronizovány se solárním cyklem tak, aby perioda cirkadiánních rytmů dosáhla přesných 24 hodin a fáze subjektivního, vnitřního cirkadiánního cyklu se sladila se střídáním světla a tmy v přírodě. **Cirkadiánní hodiny tak integrují geneticky vtištěný odhad denní doby s informací o světle a generují vnitřní reprezentaci času,** která je sdělována každému orgánu a buňce v těle. Časová koordinace probíhá na molekulární a biochemické úrovni tělesné organizace a ovlivňuje základní fyziologické procesy, jako jsou **metabolismus, buněčný cyklus, imunitní reakce, detoxikace, reprodukce, kardiovaskulární funkce, spánkový cyklus a kognitivní funkce** (Schibler et al. 2015). Výsledky klinických a preklinických studií ukazují, že narušení časové koordinace je spojeno se zvýšeným rizikem vzniku rakoviny, imunitní nedostatečnosti, metabolického syndromu, diabetu 2. typu, kardiovaskulárních onemocnění, psychiatrických onemocnění a spánkových

poruch (Sulli et al. 2018). Kromě příležitostných genetických změn je **hlavní příčinou narušení funkce cirkadiálního systému špatná synchronizace v důsledku vysoké úrovně světla v noci** (Bedrosian et al. 2011, Fonken et al. 2012, 2013, Hatori et al. 2017, Lunn et al. 2017, Touitou et al. 2017, Zubidat & Haim 2017).

Cirkadiální systém savců má hierarchické uspořádání. Hlavní cirkadiální pacemaker je uložen v suprachiasmatických jádrech hypotalamu (SCN), která jsou spojena se sítnicí oka přímou dráhou, tzv. retinohypotalamickým traktem tvořeným výběžky ipRGC. SCN integrují svoje, geneticky podmíněné oscilace s informacemi o světle a posílá jasné časové signály do periferních hodin v periferních orgánech a tkáních. U jiných tříd obratlovců je vztah mezi cirkadiálními pacemakery a fotoreceptivními orgány méně hierarchický, jak ukazuje obrázek 4 a zdá se, že jednotlivé pacemakery přímo ovlivněné světlem řídí specifické fyziologické procesy nezávisle na aktivitě ostatních pacemakerů.

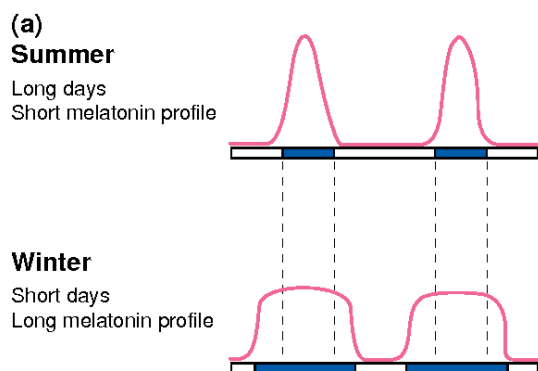


Obr. 4 – Organizace časového systému obratlovců. (A) U modelových ryb typu *Danio rerio* většina periferních tkání a orgánů (srdce, játra apod.) obsahuje na světlocitlivé buněčné hodiny, které mohou být synchronizovány světlem i v in vitro kultuře. (B) U plazů a ptáků jsou již specializované světlocitlivé oscilátory v sítnici, v pineální žláze a v hypotalamu (hluboko položené fotoreceptory, z angl. “deep brain photoreceptors”), které kontrolují cirkadiální rytmy ve fyziologii a chování, a také sezónní fyziologii. (C) Hierarchický cirkadiální systém savců s hlavním cirkadiálním pacemakerem v SCN s omezeným přístupem ke světlu pouze přes sítnici oka. Savci mají také světlocitlivé oscilátory v sítnici, ale jejich role je lokální, omezena pouze na retinální fyziologii. Obrázek také vyznačuje tři mechanismy synchronizace fyziologických funkcí; černé čáry – synchronizace přímou aktivitou cirkadiálních oscilátorů, modré čáry – synchronizace časovanou syntézou a výlevem hormonu melatoninu, červeně – pouze u savců integrovanou informaci vedenou z SCN. Všechny způsoby závisí na přesné informaci o světelném cyklu. (Převzato z Patton & Hastings 2018).

U sezónních živočichů jsou cirkadiální hodiny nezbytné také pro odečet poměru mezi dnem a nocí a spuštění sezónních reprodukčních procesů a synchronizaci cirkadiálních rytmu (Ikegami & Yoshimura 2012). Mnoho experimentů prováděných od poloviny 70. let minulého století ukázalo, že změna hladiny neurohormonu melatoninu je zodpovědná za sezónní změny v chování a fyziologii (např. rozmnožování, línání, příjem potravy a migraci nebo hibernaci) u savců (Bartness & Wade 1985, Cutty et al. 1981, Hoffmann et al. 1981, Tamarkin et al. 1976, Turek et al. 1975, Vaněček & Illnerová 1982), a do značné míry také u ptáků (Bentley et al. 1999, Kumar et al. 2007, Kumar & Gwinner 2005), obojživelníků (Howard & Lutterschmidt 2015, Joshi & Udaykumar 2000, Udaykumar & Joshi 1997), plazů (Firth et al. 2006, Lutterschmidt 2012, Lutterschmidt & Mason 2009, Underwood 1981, Winters et al. 2022) a ryb (Burgerhout et al. 2019, Ciani et al. 2021, Iversen et al. 2016, Maitra et al. 2013,

Nisembaum et al. 2021, Takahashi & Ogiwara 2021). U nižších obratlovců bývá tato regulace korigována přímým působením světla zejména na hluboko položené receptory v hypotalamu.

Denní načasování sekrece melatoninu je u všech obratlovců vysoce konzervováno (Arendt 1998, Reiter et al. 2014). **Melatonin** působící jako signální cirkadiánní hormon je syntetizován pineální žlázou a sítnicí oka v noci a ve tmě. (Existuje ještě extra-pineální melatonin syntetizovaný řadou tkání s lokální funkcí). Přirozená syntéza melatoninu má cirkadiánní rytmus, který mění svou amplitudu a trvání vrcholu podle délky noci (obr. 5; Klein 1985, Klein & Weller 1970). Mnoho experimentů ukázalo, že savci, včetně fotoperiodických křečků a nefotoperiodických potkanů, pokud jsou adaptováni na dlouhou letní fotoperiodu, mají výrazně kratší melatoninový signál než savci adaptovaní na krátkou zimní fotoperiodu (Hoffmann 1979, Illnerová & Vaněček 1980, Preslock 1976, Vivien-Roels et al. 1979). Tyto dynamické změny v průběhu roku slouží jako spolehlivý signál nadcházející sezóny. Délka melatoninového signálu negativně koreluje s velikostí pohlavních žláz živočichů s krátkou dobou březosti, jako jsou hlodavci či ptáci ale pozitivně s reprodukční aktivitou zvířat s dlouhou dobou březosti, jako jsou jelenovití (Hoffmann et al. 1986, Lincoln 1994).



Obr. 5 – Schematicky znázorněná komprese rytmu v produkci melatoninu při adaptaci ke krátkým letním dnům (nahore) a dekomprese rytmu při adaptaci k dlouhé zimní fotoperiodě. Převzato z Arendt (1998).

Cirkadiánní melatonin není ale důležitý pouze pro sezónní fyziologické cykly, účastní se také mnoha regulačních procesů orgánové fyziologie a zhruba od 70. let víme, že je významným modulátorem imunitních a metabolických funkcí v organismu (Csaba & Baráth 1975, Dauchy et al. 2016, Weil et al. 2015).

2.2.2. Účinek světla v noci na cirkadiánní systém a noční hladiny melatoninu

Světlo v noci má dva hlavní účinky na cirkadiánní fyziologii:

1) Noční světlo narušuje přirozenou synchronizaci cirkadiánních hodin snižováním světelného kontrastu mezi dnem a nocí (Martinez-Nicolas et al. 2014). Cirkadiánní hodiny potom běží podle svého genetického nastavení s periodou, která není dlouhá přesně 24 hodin. Fáze jejich rytmů v chování i fyziologii potom neodpovídá nejvhodnějším podmínkám v prostředí a živočich se dostává do přímého ohrožení života (např. pokud se jeho aktivita kryje se zvýšenou aktivitou predátorů) nebo se pozvolna vyčerpává neustálou snahou imunitního a metabolického systému o návrat do *steady state* stavu, případně je narušena adaptace

k sezónním změnám v prostředí. Pokud světlo nepůsobí celou noc, ale pouze v krátkých světelných pulsech (v řádu sekund až minut v závislosti na druhu organismu) indukuje fázové posuny cirkadiánních rytmů, které mají podobné důsledky jako tzv. volný běh cirkadiánního systému podle svého genetického nastavení. Tyto synchronizační cesty, které jsou ovlivněny světlem v noci, jsou naznačeny na obrázku 5 černými a červenými čarami.

2) Noční světlo přímo, v řádu jednotek minut, potlačuje hladinu melatoninu a blokuje jeho syntetickou dráhu. Rozsah potlačení hladiny melatoninu je široce používán jako marker citlivosti zrakové dráhy neobrazového vidění a cirkadiánních hodin na světlo, což umožňuje extrapolaci dopadu světla na další funkce závislé na neobrazovém vidění. Tento přímý účinek lze považovat za „probuzení“ hodin z jejich nočního stavu a často je chápán jako primární příčina nepříznivého účinku světla v noci na zdraví a výkonnost organismu. Kromě toho má chronicky snížená hladina melatoninu přímý dopad na fotoperiodické reakce, imunitní funkce, metabolismus a spánkový cyklus denních a nočních zvířat (Haim & Zubidat 2015, Reiter 2002).

Citlivost syntetické dráhy melatoninu na světlo v noci se může u denních a nočních druhů lišit. Jedna z prvních studií provedených na nočních laboratorních hlodavcích ukázala, že osmiminutové vystavení studenému bílému fluorescenčnímu světlu o intenzitě $0,186 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (<1 lux) způsobilo u křečků syrských snížení pineálního melatoninu na méně než 25 % kontrolních hodnot. Hladina melatoninu zůstala nízká po několik hodin, i když byla zvířata vrácena do tmy (Brainard et al. 1982, Brainard et al. 1984a,b). Tyto výsledky byly podobné jako ve výzkumu na potkanech, u kterých byl melatonin po jednodominutové expozici světlu stlačen až na 5 hodin (Illnerová et al. 1979, Illnerová & Vaněček 1979a,b). Pokles hladiny melatoninu v epifyze v důsledku vystavení světlu má u všech testovaných zvířat poločas kratší než 10 minut. Tato data ukazují, že i velmi slabé světlo může ovlivnit hladinu melatoninu u nočních zvířat během minuty nebo méně. Jasné světlo ($32\,000 \mu\text{W}/\text{cm}^2 \approx 1000$ luxů) může podobně ovlivnit hladinu melatoninu u křečka po expozici trvající pouze 1 s (Reiter et al. 1986). Lerchl (1995) navíc publikoval důležitou studii, ve které prokázal, že jednodominutový světelný puls potlačuje melatonin u křečků džungarských nejen okamžitě, ale efekt pulsu byl zaznamenán po několika po sobě jdoucích nocích, což ukazuje na velmi účinnou paměť neuronové sítě generující melatonin, alespoň u nočních hlodavců. Podobné pokusy provedli na potkanech také Illnerová a Vaněček (1979a,b) a Illnerová et al. (1979), ve kterých ukázali, že načasování světelného pulsu může určovat míru a dobu trvání stlačené hladiny melatoninu. Zjistili, že 1 minuta světla v druhé polovině noci byla účinnější a stlačila syntézu melatoninu na delší dobu než 1 minuta světla v první polovině noci. Podobné pozorování bylo později provedeno u čipmanky východního (*Tamias striatus*) (Reiter et al. 1982b).

Netopýři jsou také studovaný model nočního savce a jeho citlivosti na noční světlo. Ačkoli světlem indukované potlačení melatoninu u nich nebylo testováno, ukázalo se, že i méně než 0,1 sec záblesk světla stačí k fázovému nastavení cirkadiánních hodin netopýřů *Hipposideros speoris*. Autoři ukázali, že účinnost světla nezbytného k vyvolání fázových posunů cirkadiánních hodin saturuje při 136 luxech působících po dobu 0,063 sec (Joshi & Chandrashekar 1984, 1985a,b). Studie na hlodavcích ukázaly, že reakce jejich cirkadiánních hodin a melatoninu na světlo může být závislá na dávce světla. Úroveň saturace

cirkadiálního systému nastává však obvykle při mnohem nižší intenzitě světla, než udává většina naměřených hodnot světelného znečištění v městských oblastech a jejich blízkém okolí (Falchi et al. 2016, Kyba et al. 2017).

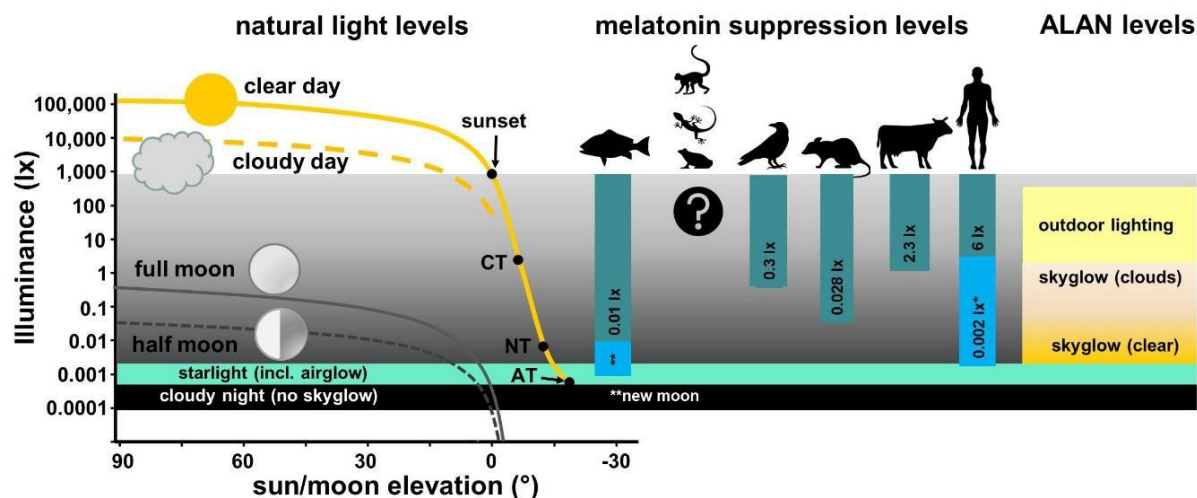
Citlivost denních savců na světlo v noci je řádově nižší ve srovnání s nočními zvířaty. U morčat byla například syntetická dráha melatoninu potlačena desetiminutovými světelnými pulzy o intenzitě až 900 luxů (Vollrath & Huesgen 1988). U koz byl melatonin stlačen 400 luxy světla v noci (Maeda et al. 1984), ale jiná práce ukázala signifikantní potlačení melatoninu u koz již při 0,68 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, tj. cca 2,3 luxu (Deveson et al. 1990). U primátů fluorescenční světlo o intenzitě 450 luxů působící na zvířata 4 hodiny snížilo melatonin měřený v mozkomíšním moku (Reppert et al. 1981a,b). A 45 minut ve světle o 200 luxech snížilo melatonin u ježka evropského (*Erinaceus europaeus* L.) (Saboureaux et al. 1991). Relativně nízká intenzita světla, 10-30 luxů stlačila hladinu sérového melatoninu na téměř denní hladiny u japonských opic (*Macaca fuscata fuscata*), ale i tak je tato intenzita stále o řád vyšší ve srovnání se světlem ovlivňujícím noční zvířata (Nozaki et al. 1990).

Vyčerpávající výčet publikací týkajících se světlem indukovaného potlačení pineálního melatoninu u jiných tříd obratlovců než jsou savci je zpracován v review Grubisic et al. (2019). Obrázek 6 převzatý z této práce ukazuje minimální hladiny světla, které potlačují melatonin u testovaných skupin obratlovců.

Míra snížení hladiny melatoninu světlem v noci nezávisí pouze na jeho intenzitě, ale také na spektru. Ve studiích na lidech se ukázalo, že krátké vlnové délky odpovídající λ_{max} melanopsinu vyvolávají mnohem silnější účinek na hladiny melatoninu než delší vlnové délky, jako je oranžové/červené světlo (Aubé et al. 2013, Cajochen et al. 2005, Navara & Nelson 2007). V průkopnické studii na lidech hladiny melatoninu signifikantně snížilo pouhých 1,3 luxu monochromatického světla o 460 nm, což je více než 10x nižší intenzita než intenzita spektrálně nedefinovaného bílého světla (Brainard et al. 2001, 2008). Jiná studie zjistila, že k fázovému posunu lidského cirkadiálního rytmu je potřeba 2500 luxů (Czeisler et al. 1986), ale při monochromatickém světle v modrém spektru a v laboratorních podmínkách byla tato intenzita pouhých 5 luxů (Lockley et al. 2003, Wright et al. 2004).

Podobně jako u člověka byly účinky světla závislé na jeho vlnové délce zjištěny také u křečků syrských, a to již několik let před objevením melanopsinových ipRGC (Brainard et al. 1984), a relativně nedávno také u hrabošů (*Microtus socialis*) (Zubidat et al. 2011). U několika druhů nočních primátů ustájení pod modrým světlem významně utlumilo jejich noční aktivitu a potlačilo jejich hladinu melatoninu na polovinu úrovně naměřené u zvířat chovaných pod červeným světlem (Fuller et al. 2016). Koním stačí 3-10 luxů modrého světla k inhibici produkce melatoninu (Walsh et al. 2013). Australská studie ukázala, že klokani (*Macropus eugenii*) vystavení bílé LED ($\lambda_{\text{max}} = 448$ nm; průměrné ozáření 2,87 W/m^2), měli nižší melatonin ve srovnání s těmi, kteří byli vystaveni „jantarové“ LED ($\lambda_{\text{max}} = 605$ nm; průměrné ozáření 2 W/m^2) (Dimovski & Robert 2018). Tato studie ukazuje, jak může posunutí spektrálního složení světla k delším vlnovým délkám zmírnit negativní fyziologické dopady světla v noci. U některých hlodavců bylo prokázáno potlačení produkce pineálního melatoninu světlem se spektrálním rozsahem 340-360 nm. Toto světlo má kratší vlnové délky než je spektrální rozsah melanopsinu, a spadá spíše do kategorie blízko-UV záření, které

je absorbováno a transdukováno do neuronálního signálu nejspíše neuropsinem (Benshoff et al. 1987, Brainard et al. 1986, 1994).



Obr. 6 – Minimální intenzity světla potlačující melatonin u studovaných tříd obratlovců vztažené k přirozeným a umělým zdrojům světla. Vlevo: žlutá křivka vyznačuje intenzity přirozeného světla a označuje také civilní soumrak (CT), nautický soumrak (NT) a astronomický soumrak (AT). V centrální části obrázku jsou vyznačeny minimální intenzity světla dostatečné k potlačení pineálního melatoninu. * vyznačuje minimální intenzitu monochromatického světla o 460 nm, které potlačilo melatonin v kontrolních laboratorních podmínkách (Vartanian et al. 2015), ** označuje statisticky významný pokles melatoninu při úplňku (Nikaido et al. 2009). Vpravo jsou vyznačena typická rozmezí intenzit nočního světla (ALAN).

Obecně lze z pokusů na savcích dojít k závěru, že krátké až střední vlnové délky mohou potlačit hladiny melatoninu a posouvat cirkadiánní rytmy u obratlovců mnohem efektivněji a ovlivnit tak cirkadiánní fyziologii ve větší míře než delší vlnové délky. Podobný závěr může platit i pro ptáky, avšak překvapivě neexistují studie analogické savcům, které by testovaly vliv jednotlivých spekter na hladinu melatoninu. Studie s ptáky spíše využívají umělých světelných zdrojů a ukazují, že zdroje s tzv. studeným bílým světlem jsou v potlačení melatoninu účinnější než zdroje s tzv. teplým bílým světlem (de Jong et al. 2017, Dominoni et al. 2013, Jiang et al. 2020, Kumar et al. 2018, Schoech et al. 2013). Žádné studie se doposud nezabývaly spektrální citlivostí cirkadiánního systému a melatoninu u obojživelníků a plazů.

Zatímco důkazů svědčících o vysoké citlivosti ryb na intenzitu nočního světla je známo celkem dost, poměrně málo autorů se pokusilo definovat jejich citlivost ke spektrálnímu složení světla. Z dostupné literatury lze předpokládat, že otázka spektrálního složení světla s nejvyšší účinností na syntézu melatoninu je možná druhově specifická. U plotice je melatonin snížen podobně účinkem modrého, zeleného i červeného světla (Brüning et al. 2018a). U okouna je modré světlo v noci nejméně účinné a melatonin je snížen více zeleným a červeným světlem (Brüning et al. 2016, Brüning et al. 2018b). Je možné, že spektrální účinnost světla u ryb více závisí na jeho intenzitě, neboť z pokusu s mořským vlkem vyplývá, že nízké intenzity (2,4 W/cm²) modrého (454 nm, cca 2 luxy) a zeleného (544 nm, cca 11 luxů) světla potlačily plazmatický melatonin více než červené světlo (640 nm, cca 3 lx). Při vyšších intenzitách

(6 W/cm²) však červené světlo (cca 7 luxů) a modré světlo (cca 5 luxů) byly efektivnější než zelené světlo (cca 28 luxů) (Bayarri et al. 2002).

Význam dobré synchronizace cirkadiánního systému se solárním cyklem a vysoká amplituda rytmu v produkci nočního melatoninu hrají zásadní roli v udržení dobrého zdravotního stavu jednotlivých zvířat a také k zajištění jejich adaptace k sezónním změnám.

2.2.3. Vliv světla v noci na sezónní reprodukci

Načasování sezónních reprodukčních procesů se liší mezi obratlovci obývajícími oblastmi s velkým světelným znečištěním a oblastmi s malým nebo žádným světelným znečištěním. Vzhledem k zásadní úloze melatoninu v regulaci sezónní reprodukce může chronické potlačování jeho produkce světlem v noci, nebo maskování změn v přirozené délce dne během roku, zpomalit reprodukční dospívání a rozmnožovací cykly. Studie na volně žijících obratlovcích, které se zaměřují hlavně na ptáky, zjistily, že ptáci žijící v oblastech s vysokým světelným znečištěním zahajují sezónní reprodukční procesy dříve než ptáci v oblastech bez světla v noci (Da Silva et al. 2015, Derryberry 2017, Dominoni et al. 2013, Kempenaers et al. 2010, Molenaar et al. 2006, Russ et al. 2015, Singh et al. 2021). Autoři Dominoni et al. (2013) například zjistili, že reprodukční systém kosů vystavených nočnímu světlu o intenzitě 0,3 luxů se vyvíjí až o měsíc dříve a ptáci také přepeřují dříve než jedinci chovaní v noci ve tmě. V následující studii stejný tým ukázal, že i malé změny intenzity nočního světla mohou zásadně ovlivnit reprodukční fyziologii divoce žijících sýkor koňader (*Parus major*). Autoři vystavili fotosenzitivní samce sýkory jedné ze tří úrovní nočního osvětlení (0,5, 1,5 a 5 lux) či úplné tmě. Všichni samci vystavení osvětlení s intenzitou pod 5 lux měli 10 až 30krát větší varlata než samci ve všech ostatních skupinách, ale exprese genů důležitých pro vývoj zárodečných buněk, produkci steroidních hormonů a spermatogenezi byla zvýšená již při intenzitě 0,5 luxů (Dominoni et al. 2018).

Autoři Singh et al. (2021) zase sledovali samce strnadce zimního (*Junco hyemalis*) ze stálých a sťahovavých populací, kteří byli vystaveni nočnímu osvětlení s intenzitou $\sim 2,5 \pm 0,5$ luxů. Noční světlo urychlilo u obou populací strnadců reprodukční aktivitu v porovnání s kontrolní skupinou bez vlivu nočního osvětlení, ale sezónní rozdíly v načasování reprodukce, které jsou závislé na zeměpisné šířce, zůstaly zachované v populacích migrujících i stálých jedinců. Změna délky dne, fotoperioda, má dva účinky na reprodukční reakce u ptáků. Jedním z projevů je indukce růstu a zrání gonád a druhým je indukce gonadální regrese. Přepínání mezi oběma stavy je umožněno fotorefraktivitou, tedy stavem, kdy je reprodukční systém k fotoperiodě necitlivý (Kumar 1997). Experimenty ukazují, že i tento proces je ovlivněn nočním světlem a jeho spektrálním složením. Pokud se mění délka fotoperiody tak, že ranní a večerní světlo má jinou vlnovou délku, reprodukční fotorefraktivita strnada černohlavého (*Emberiza melanocephala*) mizí, pokud má toto světlo kratší vlnové délky (428 nm), ale ptáci vystavení dlouhým vlnovým délkám světla (654 nm) zvečera a zrána si zachovávají fotorefraktivitu a na změnu fotoperiody nereagují (Rani et al. 2001).

Podobně jako u ptáků, urychlení sezónních změn bylo publikováno pro reprodukční chování brazilských žab (Dias et al. 2019) a také pro reprodukční procesy ještěrky rodu *Anolis* (Thawley

& Kolbe 2020). Ke světelnému znečištění bude pravděpodobně velmi citlivý reprodukční systém ryb, neboť využívá, alespoň u některých druhů, jako spouštěcí signál intenzitu světla měsíce v úplňku, která je v rozmezí 0,2-0,4 luxu (Bushnell et al. 2010, Ikegami et al. 2014, Takemura et al. 2010).

Laboratorní experimenty se savci prokázaly, že 5 luxů světla během noční fáze stačí k narušení adaptace křečků sibiřských na krátkou zimní fotoperiodu, a dochází ke změnám v hustotě a barvě srsti, aktivitě gonád a tělesné hmotnosti. Kromě toho tyto experimenty jasně prokázaly, že 5 luxů v noci narušuje cirkadiánní hodiny a ovlivňuje fotoperiodické reakce na molekulární i genové úrovni (Aubrecht et al. 2015, Ikeno et al. 2014). Podobná práce ukázala efekt slabého světla v noci na gonadální aktivitu u samců také u křečka syrského (Reiter et al. 1982a).

Dlouhodobé sledování samic klokanů tammarských (*Macropus eugenii*) žijících v oblastech s vysokým světelným znečištěním ukázalo, že samice rodí později a porody jsou méně synchronizované s ročním obdobím než samice žijící v oblastech bez světelného znečištění. Autoři předpokládají, že světelné znečištění maskuje prodloužení noci po letním slunovratu, které klokani potřebují k reaktivaci blastocyst (Robert et al. 2015). U samic lemurů šedých (*Microcebus murinus*) vystavených nočnímu světlu simulujícímu průměrnou intenzitu světla a spektra veřejného osvětlení na Borneu, došlo k estru o 2 týdny dříve než u samic vystavených měsíčnímu světlu. Kromě toho denní rytmy aktivity samic vystavených světlu v noci vykazovaly významné změny, které napodobovaly adaptaci k dlouhé fotoperiodě (Le Tallec et al. 2016). Tyto studie ukazují, že světlo v noci může ovlivnit denní rytmy a načasování sezónní reprodukce. Je zajímavé, že expozice světelnému znečištění vyvolává zpoždění v načasování porodu u živočichů s krátkou dobou březosti, zatímco u živočichů s dlouhou dobou březosti vyvolává naopak předběhnutí období rozmnožování (Aubrecht et al. 2015, Dominoni et al. 2013, Kempenaers et al. 2010, Letallec et al. 2015, Robert et al. 2015, Singh et al. 2021, Zhang et al. 2014). To podporuje myšlenku, že světelné znečištění potlačováním produkce melatoninu mění synchronizaci reprodukčních cyklů s ročním obdobím bez ohledu na reprodukční strategii jednotlivých živočišných druhů. Funkční změny v cirkadiánním systému u volně žijících zvířat by pravděpodobně mohly vést k populačním změnám v důsledku světelného znečištění.

2.2.4. Vliv světla v noci na zdravotní stav jednotlivců

Epidemiologické studie na lidech ukázaly, že narušení cirkadiánní synchronizace a potlačení melatoninu nočním osvětlením zvyšuje riziko psychiatrických nemocí, metabolických poruch, a podporuje rozvoj a progresi rakoviny (Bedrosian et al. 2011, Fonken et al. 2012, 2013, Hatori et al. 2017, Lunn et al. 2017, Touitou et al. 2017). Satelitní snímky nočního osvětlení korelované s epidemiologickými záznamy různých onemocnění naznačují, že dlouhodobá expozice vysokým hladinám světelného znečištění koreluje s nárůstem obezity (Rybníková et al. 2016), s výskytem rakoviny (Walker et al. 2020), depresemi (Min & Min 2018) a neurodegenerativními onemocněními (Romeo et al. 2013).

Vliv nočního světla na zdraví volně žijících zvířat lze odvodit pouze z laboratorních experimentů, které zkoumají příčiny a mechanismy zdravotních následků nočního světla u člověka. Tyto pokusy ukázaly, že silný rušivý stimul, dlouhodobé vystavení laboratorních myši konstantnímu světlu (105 luxů po dobu 24 týdnů), snižuje amplitudu cirkadiálních rytmů o 70 %, snižuje svalovou sílu a vyvolává přechodný zánětlivý stav. Tato zvířata mají také významně vyšší hladinu glukózy v krvi a vykazují všechny příznaky osteoporózy (Lucassen et al. 2016). Narušené imunitní funkce v důsledku nočního světla byly studovány častěji; noční světlo snižuje reakce NK buněk u potkanů (Oishi et al. 2006) a myši vystavené chronickému (tj. čtyřtýdennímu) protokolu jet lag posouváním světelné periody mají zvýšenou reakci na endotoxin lipopolysacharid (Castanon-Cervantes et al. 2010). Vystavení potkanů stálému světlu navíc zvýšilo úmrtnost po sepsi vyvolané tímto endotoxinem (Carlson & Chiu 2008). Podobná studie prokázala, že myši chované v konstantním bílém světle o 180 luxech vykazovaly více než 50% snížení amplitudy cirkadiálních rytmů, zvýšený příjem potravy, snížený výdej energie a co je důležité, úplně u nich vymizel normálních cirkadiálních rytmus v citlivosti na inzulin (Coomans et al. 2013). Tato a mnohá další pozorování ukazují, jak škodlivé může být narušení rytmu světla a tmy, ale relativně intenzivní světlo používané v těchto pokusech není nejvhodnějším modelem pro studium vlivu světelného znečištění. Ve většině oblastí zasažených světelným znečištěním, intenzita nočního světla pouze snížila rozdíl mezi dnem a nocí, ale ještě jej zcela nesmazala.

Experimenty, které testují vliv spíše tlumeného světla v noci, však ukazují také významné negativní dopady na zdraví. Chronická expozice (> 4 týdny) myši nočnímu světlu o intenzitě 5 luxů vyvolala významný nárůst tělesné hmotnosti, změnu rytmu v tělesné teplotě a v rytmu aktivity ve srovnání s jedinci udržovanými v noci ve tmě (Borniger et al. 2014a, Fonken et al. 2013). Rytmus tělesné teploty slouží jako jeden z důležitých synchronizačních signálů od hlavního cirkadiálního pacemakeru k periferním hodinám. Deregulace jeho rytmicity může přispívat k vnitřní desynchronizaci mezi centrálními a periferními oscilátory se zdravotními důsledky. Jiné pokusy ukázaly, že vystavení slabému světlu v noci během raného vývoje zvyšuje úzkostné reakce dospělých (Borniger et al. 2014b). Slabé noční světlo také narušilo prostorové učení a vyvolalo depresivní symptomy u denních i nočních hlodavců (Bedrosian et al. 2013a,b, Fonken et al. 2012, Fonken & Nelson 2013). V posledních letech se shromažďují údaje o akceleraci nádorového růstu u laboratorních myši implantovanými buňkami různých typů karcinomů, pokud jsou zvířata držena v nedostatečně temném nočním prostředí (Zubidat et al. 2018).

Podobné laboratorní pokusy se provádí také na ptácích. Zebřičky (*Taeniopygia guttata*) chované na stálém světle nebo v prostředí s 3 luxy nočního světla mají potlačené rytmy v hladině melatoninu, a také výrazné změny v rytmické expresi interleukinů v mozku i v periferních orgánech (Mishra et al. 2019). Další studie na zebřičkách, kterou provedli (Moaraf et al. 2020), poskytuje důkazy o tom, že světlo v noci již při intenzitě 1,5 luxů zvyšuje buněčnou proliferaci ve ventrikulární zóně v mozku, ale pravděpodobně zvyšuje apoptózu ve striatu a nidopallidu. To poukazuje na důležitost širšího zkoumání možných vztahů mezi světelným znečištěním a neuronální plasticitou ptáků a také otevírá problematiku pohlavních

odlišností, neboť ukazuje, že samci jsou světlem v noci ovlivněni méně, než samice (Moaraf et al. 2021).

Zajímavý experiment byl proveden na australských andulkách vlnkovaných (*Melopsittacus undulatus*) držných v zajetí. Pokus ukázal, že stačí hodinový světelný puls (200 lux, $\lambda = 460$ nm) uprostřed noci, aby se do pěti týdnů zvýšila signifikantně tělesná hmotnost, příjem potravy i vody a výrazně se snížila reprodukční aktivita. Ptáci také vykazovali výrazně vyšší hladinu fekálního kortikosteronu, který může značit výrazně vyšší úroveň stresu u pulsovaných ptáků (Malek et al. 2020).

Umělé osvětlení během noci je stále častěji uváděno do souvislosti s narušováním hormonálních, metabolických a imunitních procesů volně žijících ptáků. Sýkory koňadry (*Parus major*) žijící v nočním prostředí s bílým světlem mají vyšší noční aktivitu, méně spánku měřeného hladinou kyseliny oxaloctové, a vyšší pravděpodobnost infekce (v této studii malárií), než ptáci žijící v temném nočním prostředí nebo při světelném znečištění světlem o delších vlnových délkách (Ouyang et al. 2017). Podobný zásah do imunitního systému byl popsán také u vrabce (*Passer domesticus*). Ptáci vystavení 5 luxům nočního světla o teplotě chromatičnosti 3000 K zůstávali déle infekční a měli vyšší mortalitu nákazou virem Nilské horečky než ptáci držení ve tmě či při nočním světle o 1800 K (Kernbach et al. 2020).

Světelné znečištění ovlivňuje také fyziologii mláďat během vývoje, jak bylo zjištěno u mláďat sýkory koňadry, jejichž hnízda byla po dvě noci experimentálně vystavena světlu o standardizované intenzitě 3 luxy. Mláďata z osvětlovaných hnízd vykazovala vyšší hladinu haptoglobinu a nižší hladinu oxidu dusíku, pravděpodobně v důsledku zvýšeného stresu s snížené hladiny melatoninu (Raap et al. 2016).

Všechny tyto a řada dalších experimentů poukazuje na to, že světlo v noci může zvyšovat náchylnost k nemocem nejenom u člověka, ale i u volně žijících živočichů, což může být, kromě narušení reprodukčních cyklů, další faktor, přispívající ke změně společenstev.

2.3. Změny v chování živočichů vlivem světelného znečištění

Světlo, respektive jeho směr, intenzita, periodičita a další vlastnosti představují velmi stabilní parametry prostředí, které jsou mnohými organismy vnímány jako základní zdroj informace o poloze, denní době, případně dalších i parametrech prostředí. U živočichů známe tři periodické světelné jevy, které jsou živočichy vnímány a dále slouží k řízení biologických mechanismů. Konkrétně se jedná o střídání dne a noci, sezónní změny délky slunečního svitu (sezonalita), případně i měsíční lunární cyklus. Působení ALAN může vést k chybnému „pochopení“ dané informace, což může vést k chybné nebo nedostatečné odpovědi daného organismu na ať už fyziologické nebo behaviorální bázi. Z pohledu působení chybného vnímání světelného vjemu může vést k A) ovlivnění cirkadiánních rytmů a fotoperiodicky indukovaných jevů, B) ke změně schopnosti vnímat určité vizuální podněty, C) k ovlivnění schopnosti prostorové orientace nebo D) přímá atrakce/odrazování umělým světlem.

Ovlivnění cirkadiánních rytmů může probíhat dvěma způsoby, které lze bez podrobné fyziologické znalosti stavu daného jedince jen stěží odlišit. V podstatě všichni živočichové i rostliny mají cirkadiánní hodiny, které regulují specifické aktivity a fyziologické procesy. Aby

cirkadiánní hodiny mohly dobře fungovat, řídí se určitými environmentálními podněty, které tyto procesy v podstatě vymezují. Problém nastává v případě, kdy se působením ALAN snižuje kontrast mezi dnem a nocí, což vede k omezení některých fyziologických procesů jako produkce hormonů nebo imunitních látek. Druhý mechanismus působící na cirkadiánní rytmy souvisí se situací, kdy umělé světlo v podstatě překrývá stimuly spojené s měnící se intenzitou světla. To se může projevit například změnou načasování aktivity soumráčných druhů.

Schopnost vnímat světlo, respektive jeho intenzitu, se výrazně liší napříč jednotlivými skupinami živočichů. Řada studií poukazuje na fakt, že umělé osvětlení zvyšuje schopnost mnohých predátorů identifikovat kořist i ve fázi noci, kdy už by to v přirozených ekosystémech nebylo možné. Důležitá je také výrazná změna světelných podmínek během přechodových fází dne a noci (rozbřesk, stmívání), které jsou mnohými druhy ve vysoké míře využívány k určitým aktivitám (lovu). Světločivné receptory různých skupin organismů se výrazně liší především vlnovými délkami, které jsou schopni vnímat. Změny (rozšíření) světelného spektra například použitím LED lamp může vést k lepší identifikaci zdrojů nektaru u motýlů a jiných skupin opylovačů, ale také i lepší identifikaci kořisti predátorem. Opačný efekt může mít ALAN pro druhy s noční nebo soumrácnou aktivitou. Některé typy umělého světla mohou přerušit některé signály nebo jejich části v určitém vlnovém spektru. Tento jev je znám například u světlušek, kde lokality s výraznějším kontrastem oproti pozadí jsou preferovány daleko více než výrazně osvětlené lokality s nižším kontrastem (Hopkins et al. 2015).

Ačkoliv vysvětlení velmi rozšířeného fenoménu atraktivity umělého světla pro noční motýly a další skupiny hmyzu stále není jednoznačně objasněno, velmi pravděpodobně dochází k narušení signálu svitu Měsíce, který je mnoha organismy využíván k orientaci (Warrant & Dacke 2011). Řada skupin hmyzu jako blanokřídlí, brouci a motýli využívají k orientaci polarizované světlo odražené od noční oblohy (především jeho UV složku). Bohužel však o potenciálním ovlivnění tohoto mechanismu vlivem ALAN ale dosud nemáme dost informací. U některých skupin hmyzu existuje přirozené chování, kde se jedinci vyhýbají osvětleným lokalitám a je velmi pravděpodobné, že umělé osvětlení výrazně omezuje nabídku (rozlohu) prostředí, které mohou využívat. Jedním z nejvíce významných a z pohledu vodních ekosystémů klíčovým typem negativní fototaxe je denní migrace u zooplanktonu typická pro široké spektrum stojatých vod. Ačkoliv dosud nebyl vliv ALAN na tento mechanismus jednoznačně prokázán, některé studie ukazují, že může být ovlivněn i osvětlením o nižších intenzitách (Berge et al. 2009). U některých nočních organismů (např. světlušek rodu *Lampyrus*) byla zaznamenána pozitivní fototaxe pod vlivem umělých HPS světel, zatímco u světel zasahujícího i do modré části světla (LED) se tato atraktivita umělých světel snižuje (Bek 2015).

U evropských ryb byl negativní vliv ALAN prokázán u migrujících úhořů říčních, kdy se při migraci dospělců směrem k moři úhoři cíleně vyhýbali osvětleným úsekům, respektive zrychlovali pohyb, když už v osvětleném úseku byli (Vowles & Kemp 2021).

U obojživelníků jsou v souvislosti s ALAN k dispozici pouze kusé poznatky o druzích, které využívají zdroje světla jako místa, kde se díky vysoké koncentraci hmyzu aktivně živí. Týká se to výlučně dvou druhů našich ropuch – ropuchy obecné (Baker 1990) a ropuchy zelené (Balassina 1984). U ropuchy obecné byl dokonce experimentálně prokázán negativní vliv ALAN na reprodukční potenciál – samci vystavení ALAN dříve opouštěli amplexus a při

vyšších intenzitách (nad 5 lx) měli o 25 % sníženou úspěšnost oplození vajíček (Touzot et al. 2020).

Poznátky shromážděné studiem dostupné literatury věnující se vlivu ALAN na ptáky neposkytují ucelený obraz o dané problematice. Jde spíše o různé případové studie, které mohou poskytnout informace o dopadech na jednotlivé druhy či několik studovaných druhů ptáků. Řada otázek byla studována na druzích, které se nevyskytují ve střední Evropě, tyto studie byly do rešerše zahrnuty v případě, že jejich výsledky jsou zobecnitelné, a tudíž i v nějaké míře aplikovatelné i v našich podmínkách. Nejvíce byl vliv světelného znečištění studován u populací ptáků žijících v městském prostředí, popř. formou srovnání městských a mimoměstských populací stejného druhu. Poměrně dobře je v literatuře popsána tato problematika u mořských druhů ptáků, zejména z pohledu kolizí těchto druhů s různými objekty umístěnými na volném moři (ropné plošiny, větrné farmy aj.) nebo na mořském pobřeží (např. majáky apod.). Přestože většina takto studovaných druhů se ve střední Evropě nevyskytuje, zahrnuli jsme nejvýznamnější publikované výsledky i do této rešerše, s předpokladem, že většina z nich je obecně aplikovatelná i na jiné druhy ptáků.

První zmínky o vlivu světla na ptáky pocházejí už z 19. století, které popisovaly vliv přitažlivosti ke světlu (Adams et al. 2019). Světlo na některé druhy působí jako atraktant, kdy některé druhy mají tendenci shlukovat se v noci kolem zdrojů umělého osvětlení, na jiné druhy naopak působí ALAN rušivě. V obou případech způsobuje okamžité reakce v pohybu ptáků (Day et al. 2017) a ovlivňuje distribuci v lokálním a regionálním měřítku (McLaren et al. 2018). Světlo se někdy dokonce používá i k odhánění ptáků z konfliktních zón (Adams et al. 2019).

Jedním z nejvíce studovaných jevů je vliv zvýšené hladiny umělého nočního osvětlení na výběr stanovišť u ptáků a s tím související změny struktury ptačích společenstev (změny v druhém spektru společenstva). Kosicki (2021) zjistil pomocí dálkově snímaných úrovní umělého nočního osvětlení, že světelné znečištění mění fungování ptačího společenstva na třech úrovních, tedy na taxonomické, funkční a fylogenetické úrovni. Druhová bohatost lineárně klesala s přibývajícím mírou světelného znečištění a nejnižší hodnoty druhové bohatosti byly pozorovány při maximálním umělém osvětlení. Značně negativní vliv ALAN byl pozorován i v případě zastoupení různě fylogeneticky příbuzných skupin ptáků. Již při velmi nízkých hodnotách světelného znečištění fylogenetická diverzita výrazně klesala. Na druhé straně funkční diverzita vykazovala unimodální vztah k umělému osvětlení. Což znamená, že nejvíce funkčních nik bylo obsazeno při průměrné úrovni umělého světla. Velký vliv na složení společenstev ve městech má především akumulace zdrojů ALAN například podél hlavních silnic (Xue et al. (2020)). Tyto výsledky jsou v souladu se zjištěními Marín-Gómeze et al. (2020), kteří hodnotili přítomnost puštíka proměnlivého (*Ciccaba virgata*) v městských biotopech. Populační hustota tohoto druhu se zvyšovala s velikostí plochy zeleného pokryvu a klesala s nárůstem umělého nočního osvětlení a hladiny hluku. Adams et al. (2019) se také zaměřili na to, jak antropogenní světelné znečištění ovlivňuje pohyb ptačích druhů, výběr stanovišť či distribuci. Navrhli protokol pro systematické mapování, shromažďování a organizování důkazů z mnoha zdrojů uvádějících, že umělé osvětlení ovlivňuje ptáky různými způsoby.

Světelné znečištění ovlivňuje i ptáky žijící v okolí komunikací, např. Morelli et al. (2014) upozorňují, že veřejné osvětlení v okolí komunikací u určitých ptačích druhů ovlivňuje prodlužování denní aktivity.

V souvislosti s vlivem na reprodukci Senzaki et al. (2020) zjistili, že u druhů se zvýšenou schopností shromažďovat světlo ve zrakových orgánech může dojít k posunu načasování reprodukce v reakci na světelnou expozici, což potenciálně vede k neshodám s fenologickými cykly. Překvapivě bylo vystavení ALAN spojeno se sníženým rizikem ztráty snůšky a zvýšenou celkovou úspěšností hnízdění při vystavení světlu. Také Ciach a Fröhlich (2017) zjistili pozitivní vliv městských infrastruktur, jako jsou budovy, silnice a skládky odpadu na mezi sezónní stabilizaci druhové skladby přezimujících ptáků. Hlukové a světelné znečištění společně s čistě stanovištními faktory měly pozitivní vliv na druhovou bohatost, hustotu a stabilitu ptačích společenstev přezimujících v městských oblastech.

Rostoucí světelné emise způsobené lidskou činností jsou považovány za významnou hrozbu zejména pro druhy s noční aktivitou. Dobrým příkladem citlivosti na míru světelného znečištění je vysoce specializovaný noční ptačí druh lelek lesní (*Caprimulgus europaeus*), jehož poslední hnízdní populace ve Švýcarsku se vyskytuje v kantonu Wallis. Sierro a Erhardt (2019) zjistili, že nárůst světelných emisí během posledních desetiletí překročil pro tento druh tolerovatelnou úroveň a druh z dřívějších oblastí výskytu mizí. Autoři doporučují, aby státní orgány kantonu Wallis zavedly kroky nezbytné ke snížení světelného znečištění v blízkosti stanovišť lelků lesních, například výměnou současně používaných žárovek za přizpůsobené LED osvětlení či širokospektrální lampy s nízkým obsahem bílého a modrého světla. Další vhodné opatření by bylo kvalifikovat zbývající stanoviště lelka lesního jako oblasti s úplnou noční tmou, čímž by se také přispělo k ochraně dalších ohrožených nočních živočichů.

Většina ptačích druhů dokáže vnímat světlo v rozsahu stejných vlnových délek jako lidské oko. Ptačí oko je navíc vybaveno odlišným typem sítnicového čípku, který reaguje na vlnové délky UV záření. V důsledku toho může být umělé osvětlení pro ptačí oko nevhodné, protože může omezit funkčnost zrakového orgánu. Greenwood et al. (2002) zkoumali preference špačka obecného (*Sturnus vulgaris*) pro různá prostředí s umělým osvětlením. Na stanovištích s prostředím odlišujícím se pouze přítomností či nepřítomností UV vlnových délek preferovaly skupiny špačků přirozenější UV+. Chování ptáků bylo proto ovlivněno stimulací očních čípků citlivých na UV záření. De Jong et al. (2016) zkoumali samce sýkory koňadry a zjistili, že jedinci z párů hnízdících na jasně osvětlených lokalitách se v noci vyhýbali světlu tím, že si vybírali nocoviště se sníženou intenzitou světla. Na rozdíl od městských oblastí, kde je světlo všudypřítomné, se ptačí jedinci obývající mimoměstské oblasti mohou vyhýbat nočnímu umělému osvětlení, čímž se vyhnou přímým následkům světla v noci.

Umělé světlo v noci má negativní dopad na početnost mnoha druhů ptáků. Podrobněji byl jeho vliv zkoumán především u mořských ptáků, kteří patří mezi celosvětově ohroženou skupinu ptáků, dá se však předpokládat, že většina z těchto zjištění je obecně aplikovatelná i na jiné druhy ptáků. Jedinci jsou často přitahováni umělým osvětlením, což vede ke zvýšené úmrtnosti a způsobuje pokles početnosti a změny distribuce těchto druhů v celosvětovém měřítku (Deppe et al. 2017). Jednou z nejohroženějších skupin je řád Trubkonosí (Procellariiformes), která je těmito hrozbami také silně zasažena. Buřňák indopacifický

(*Puffinus bailloni*) vyskytující se na ostrově Réunion je jedním z druhů silně ovlivněných světelným znečištěním. Gineste et al. (2017) provedli rozsáhlý průzkum po celém ostrově, kdy analyzovali počty jedinců buňňáka přitahovaných umělým osvětlením a počty jedinců zachráněných místním záchranným centrem pro volně žijící zvířata. Snížení světelného znečištění by bylo důležitým a efektivním zmírňujícím opatřením, protože úmrtnost způsobená světlem je pro buňňáky hlavní hrozbou. Stejně tak se Norambuena et al. (2021) zaměřili na tuto vysoce ohroženou skupinu ptáků a provedli fylogeografickou analýzu současného a budoucího potenciálního rozšíření buňňáčka Markhamova (*Hydrobates markhami*), založenou na mitochondriálním genu ND1 a geografických záznamech o tomto druhu. Výsledky odhalily pozitivní vztah mezi střední teplotou, slunečním zářením a antropogenními rušivými vlivy. Předpovědi budoucího rozšíření založené na předpokladu středně závažných a závažných scénářů globálních změn naznačují potenciální ztrátu jedinečné genetické diverzity. Zároveň bude nejvíce zasaženou oblastí rozšíření *H. markhami* její současné stanoviště výskytu, což je také oblast nejvíce ovlivněná světelným znečištěním.

Zaměříme-li se na fyziologické rozdíly mezi ptačími druhy přítomnými v městských oblastech a druhy, které se městským oblastem vyhýbají, lze najít určité koncentrace hormonů spojených se stresory, na základě kterých můžeme předpokládat dopad antropogenních faktorů, jako je urbanizace, hluk a světelné znečištění na ptáky. Injaian et al. (2020) prokázali negativní vztah mezi antropogenním hlukem a výchozí hodnotou kortikosteronu u ptačích druhů charakterizovaných jako druhy vyhýbající se městským prostředím. Pro světelné znečištění nezjistili signifikantní vztah. Celkově však jejich výsledky naznačují, že vztah mezi člověkem způsobenou změnou životního prostředí a kortikosteronem se u různých druhů a kontextů liší. Na druhou stranu ale nenalezli žádný obecný vztah mezi dopady lidské činnosti a výchozím stresem vyvolaným kortikosteronem u ptáků. Na základě těchto výsledků tedy nelze obecně předpokládat, že vysoké či nízké úrovně expozice člověkem vyvolaným změnám prostředí jsou spojeny s vysokými nebo nízkými hladinami kortikosteronu, anebo že blízké příbuzné druhy či dokonce jedinci budou reagovat podobně.

Mezi nejvíce studované skupiny ptáků, u kterých se dá předpokládat vliv světelného znečištění jsou sovy (Strigiformes). Studie, které by se vlivem světelného znečištění na tuto skupinou s významnou noční aktivitou téměř chybí. Je předpoklad, že světelné znečištění ovlivňuje hledání potravy během noci, avšak tyto účinky jsou pravděpodobně nepatrné ve srovnání s vlivem jiných změn v krajině, jako jsou změny ve struktuře krajiny, či vliv intenzivního zemědělství na dostupnost a strukturu potravy atd. (Scobie et al. 2016). Hanmer et al. (2021) zkoumali vliv urbanizace a povětrnostních podmínek na výskyt a rozšíření puštíka obecného (*Strix aluco*) se zjištěním, že hlavními faktory ovlivňující výskyt tohoto druhu v městském prostředí jsou zastoupení lesních porostů a stupeň urbanizace zahrnující i světelné znečištění.

Další skupinou, kde se předpokládá vliv světelného znečištění a dalších rušivých faktorů na výskyt a početnost, jsou tetřevovití (Tetraoninae), opět ale chybí přesvědčivé důkazy. Např. v NP Šumava vede rozšiřování sídelních celků (př. Kvilda) k celkovému zvýšení zatíženosti území. Hlukové i světelné znečištění mohou zvyšovat predaci a stres u jedinců vystavených těmto rušivým vlivům (Starý et al. 2019). Častým problémem na jinak vhodných územích pro

tetřeva hlušce (*Tetrao urogallus*) či tetřívka obecného (*Tetrao tetrix*) je rekreační lyžování. Lampy na osvětlených lyžařských tratích mohou za nepříznivých povětrnostních podmínek ovlivnit celé široké okolí. Například v Krkonoších nelze intenzitu jejich osvětlení odůvodnit bezpečnostními důvody, jak napovídá nízká osvětlenost ostatních studovaných lyžařských tratí (Bujalský et al. 2014). Za zmínku stojí také zamítnutí osvětlení dvou sjezdovek v Beskydech, které jsou buď v prostoru migrační trasy, nebo přímo v domovském okrsku velkých šelem a tetřevovitých ptáků. Tost et al. (2020) zkoumali vliv cestovního ruchu na využívání přirozeného prostředí tetřívka obecného u izolované populace v severním Německu. Jedinci využívali okolí veřejných stezek pouze v noci a za svítání, ale během vrcholné lidské činnosti kolem poledne a odpoledne se těmito místům vyhýbali. Zdá se, že disturbance rekreační turistikou významně ovlivňují efektivní dostupnost stanovišť pro tetřívka obecného v přírodní rezervaci. Vegetační kryt však do jisté míry snižuje negativní efekty turistických stezek a poskytuje poměrně účinné ochranné opatření (Tost et al. 2020).

Další zajímavou otázkou je, zda umělé noční osvětlení a antropogenní hluk působící vzájemně ovlivňují početnost ptačích druhů v kontinentálním měřítku. Výsledky, ke kterým došli Wilson et al. (2021) odhalily, že početnost druhů reagujících na hluk v prostředí se obecně snižovala, a při kombinaci přítomnosti hluku s umělým osvětlením se docházelo k interakci obou faktorů. Interakce těchto dvou faktorů odhalila negativní emergentní reakci u několika druhů, které reagovaly pouze tehdy, když se světlo a hluk vyskytovaly společně. Ptáci mohou být přitahováni světlem a pozměnit své chování, jelikož světlo jim poskytuje potenciální příležitosti k vyhledávání potravy. Na druhou stranu spolu tyto změny v chování mohou přinést také negativní fyziologické následky. V reakci na světlo a hluk mohou jedinci často měnit stanoviště. Konkrétně druhy obývající uzavřená stanoviště bývají méně tolerantní vůči oběma těmito senzorickým stresorům ve srovnání s druhy obývajícími otevřená stanoviště. Například pro sluku lesní (*Scolopax rusticola*) byl zjištěn největší vliv na pravděpodobnost výskytu v úhrnu srážek ve vegetačním období, objemu emisí umělého osvětlení, podílu listnatých stromů v lesích a stupni pokryvnosti keřového patra. Tyto výsledky lze využít k identifikaci vhodných oblastí pro sluku lesní, přičemž zvláštní pozornost je třeba věnovat světelnému znečištění, protože s rostoucí intenzitou umělého osvětlení vhodnost stanoviště výrazně klesá (Zellweger & Bollmann 2019).

U mnoha denních živočišných druhů ovlivňuje umělé světlo v noci jejich distribuci či zvyky a může dokonce ovlivnit potravní řetězce a predáčnické chování. Nankoo et al. (2019) zkoumali vliv umělého osvětlení umístěného na mostě Jacques Cartier v Montrealu v Kanadě na hmyz, hmyzožravé ptačí druhy a jedince sokola stěhovavého (*Falco peregrinus*). Tyto tři skupiny jsou navzájem propojeny prostřednictvím potravního řetězce, ve kterém početnost hmyzu ovlivňuje početnost hmyzožravých ptáků, a ta zase ovlivňuje přítomnost sokola stěhovavého. V tomto případě umělé osvětlení tedy pozitivně ovlivňuje tyto tři skupiny samostatně i společně prostřednictvím jejich potravního řetězce. Podobně, za účelem posouzení dopadů umělého osvětlení na potravní řetězec Spoelstra et al. (2015), experimentálně osvětlovali biotop na okraji lesa světlem s různým spektrálním složením, aby posoudili přímé a nepřímé ekologické důsledky s tím spojené. Umělé světlo mělo podstatné účinky na ptačí druhy na úrovni společenstev, které se lišily podle spektrálního složení světla. Umělé osvětlování mělo

jednoznačný vliv na meziroční změnu výskytu jednotlivých druhů ptáků na studovaných lokalitách. Možná vysvětlení tohoto jevu mohou být například biologie rozmnožování druhů, dostupnost kořisti a změny v konkurenci mezi druhy. Otázkou je, zda je u jedinců hnízdících v blízkosti zdrojů umělého osvětlení možné pozorovat zvýšený reprodukční úspěch.

Umělé osvětlení může pro určité druhy představovat příležitost k využití pozměněných podmínek a vést k vyvinutí antipredačního chování. Daoud-Opit a Jones (2016) zjistili, že austrálští loriové horští (*Trichoglossus haematodus*) používají k hnízdění širokou škálu typů stromů. V oblastech s řídkým porostem loriové jasně upřednostňovali shluky stromů, které byly v noci vystaveny výrazně vyšším hladinám umělého osvětlení než jinak vhodná místa a stromy v okolí. Tyto rysy preferovaných nocovišť pomáhají lorům usnadnit detekci nočních predátorů, což naznačuje, že pro tento druh má antropogenní osvětlení potenciálně pozitivní dopad.

Noční světelné znečištění významně ovlivňuje jednu z důležitých oblastí života ptáků, a to migraci. Světelné znečištění se v největší míře vyskytuje v urbanizovaných oblastech, které zabírají přibližně 0,5 % zemského povrchu. Městské oblasti jsou nejčastější mezi 30° a 45° severní šířky. Mnoho populací ptáků hnízdí severně od 50° zeměpisné šířky a zimuje na jih od 25° severní šířky (od obratníku Raka) (Zhou et al. 2015). Při migraci tak ptáci překonávají oblasti s nejvyššími hodnotami světelného znečištění a pokoušejí se dostat do svých zimovišť, kde je intenzita ALAN výrazně nižší. Ačkoliv má světelné znečištění celosvětově nízké procento kumulativního zastoupení, formou skyglow je rozšířeno i mimo urbanizované oblasti a dnes již existuje jen velmi málo oblastí, které jím zasaženy nejsou (Cabrera-Cruz et al. 2018).

Negativní vlivy umělého světla na ptáky jsou nepopiratelné, ale ne všechny typy světla mají stejné škodlivé účinky a některé typy světla nemusí účinkovat vůbec. Jedním ze základních faktorů ovlivňujících ptáky při migraci i mimo ni je chromatičnost světla. Jedinec, který je vystaven vlivu umělého světla, může při různých vlnových délkách, tedy různé chromatičnosti, vykazovat odlišné reakce v porovnání s jinými druhy nebo i s dalšími zástupci stejné populace. Vystavení jedinců umělému světlu může mít vliv na jejich zdraví a fyzickou kondici při migraci a také na následné načasování migrace. Práce Bani Assadiho a Fräsera (2021) chtěla zjistit vliv umělého světla na budoucí kondici ptáků při migraci experimentální cestou, kdy vystavila čerstvě vylíhnutá mláďata pěvců různým typům umělého světla. Rozdělila hnízda na 3 skupiny – kontrolní skupinu (přirozená tma), skupinu se zeleným světlem (5 lux) a skupinu s bílým světlem (5 lux). Studie zkoumala vliv světla z několika hledisek – datum odletu, hmotnost, míra přežití. Z výsledků experimentu plyne, že průměrná doba odletu se výrazně nelišila ani u jedné sledované skupiny. Míra přežití byla pro všechny skupiny též srovnatelná, ovšem na rozdíl od ostatních vykazovala skupina s bílým světlem několik případů opuštění hnízda dospělými jedinci ihned po zavedení nočního světelného režimu. Při zkoumání hmotnosti u mláďat starých 20 až 22 dní experiment objevil významný rozdíl u jedinců vystavených bílému světlu v noci. Jejich průměrná váha byla až o 3 g vyšší, než u jedinců s žádným, či zeleným světlem v nočních hodinách. Vliv umělého světla bílé barvy na načasování migračního tahu však zjištěn nebyl.

Stejně výsledky potvrdila i terénní studie, kterou provedli Poot et al. (2008), zaměřená na zkoumání míry fototaxe vzhledem k barevnosti světla při noční migraci. Tato studie do svého měření zahrнула i vliv modrého světla. Za svitu bílého a červeného světla byla orientace ptáků

narušena výrazněji než za svitu krátkovlnného světla. Při vystavení modrému světlu byli ptáci schopni nadále sledovat správný směr migrace, a tedy na jejich orientaci nemělo žádný efekt. Vliv zeleného světla byl znatelně vyšší, než vliv modrého světla, ale stále zanedbatelný v porovnání se světlem červeným a bílým. K výsledku negativního vlivu dlouhovlnného světla se přidává i testování Wiltschka et al. (2010). Monochromatické světlo, jehož výskyt je možný pouze v laboratorních podmínkách, o vlnové délce větší než 560 nm způsobuje dezorientaci. Přitom zelené světlo, jenž dosahuje délky 565 nm je například u červenky evropské (*Erithacus rubecula*) pro orientaci stále žádoucí. Stejnou závislost na určité vlnové délce vykazují i kruhoočka australopacifická, pěníce slavíkové, poštovní holubi či domestikovaná kuřata (Wiltschko et al. 1993). Tyto závěry poukazují na možnost obecné závislosti vlnové délky na magnetické orientaci, odvíjející se dle specifické chromatické citlivosti jednotlivého druhu či dokonce konkrétního ptáka. Zvláštním případem je žluté LED světlo (590 nm) v interakci s krátkovlnným světlem, kde je rozdíl mezi vhodným a dezorientujícím typem vlnové délky velice malý. Při poloviční šířce pásma se LED spektra dokonce překrývají. Přechod k dezorientaci je tedy při svitu takového typu světla opravdu rychlý (Wiltschko et al. 2010).

Silné zdroje umělého osvětlení přitahují suchozemské stěhovavé ptačí druhy a (mladé) jedince mořských ptačích druhů během letu (Gauthreaux et al. 2006, Poot et al. 2008, Rodríguez et al. 2015), což může vést ke zvyšování úmrtnosti migrujících jedinců následkem kolizí s antropogenními strukturami (Longcore & Smith 2013). Umělé osvětlení však může mít potenciální vliv na stěhovavé ptačí druhy i v širším měřítku. McLaren et al. (2018) použili víceletá meteorologická radarová měření nočních migrantů na severovýchodě USA a zjistili, že hustota podzimních mezipřistání se u migrujících jedinců zvýšila v regionálním měřítku s blízkostí k nejjasněji osvětleným oblastem, ale snížila se v rozmezí několika kilometrů kolem jasně osvětlených světelných zdrojů. To naznačuje pozitivní fototaxi migrujících jedinců k umělému osvětlení, která může bránit využití rozsáhlých lesních stanovišť k mezipřistání. Vzhledem k tomu, že pro úspěšnou migraci jsou rozhodující vysoce kvalitní stanoviště pro mezipřistání a překážky během migrace mohou snížit zdatnost jedinců, umělé osvětlení představuje potenciální hrozbu a vysoce důležitý faktor z hlediska ochrany populací stěhovavých ptáků. Korpach et al. (2022) zjistili, že urbanizace a umělé osvětlení v noci snižují funkční konektivitu vzdušných migračních tras. Ptáci se obecně vyhýbali městským oblastem a volili k přeletům tmavé lokality. Stanoviště zvolená k mezipřistání byla umístěna téměř výhradně v tmavých venkovských oblastech.

Světelné znečištění může mít patrně vliv i na kolísání výskytu nočních migrantů v městském prostředí. La Sorte a Horton (2021) použili informace o výskytu ptáků eBird k odhadu sezónní druhové bohatosti u nočních migrujících pěvců v USA. Vyšší míra umělého osvětlení byla spojena s nižší druhovou bohatostí pěvců migrujících v noci během zimy a léta a vyšší druhovou bohatostí pěvců migrujících v noci během jarní a podzimní migrace. Až 50% nárůst intenzity umělého osvětlení byl spojen s 3,0% až 3,6% poklesem druhové bohatosti nočních migrantů během zimy, 1,7% nárůstem během jarní migrace, 2,1% poklesem během léta a 5,0% nárůstem během podzimní migrace.

Také migrující mořští ptáci jsou často přitahováni umělými zdroji osvětlení, což vede ke kolizím s lidskými strukturami, včetně ropných plošin. Day et al. (2017) studovali

přitažlivost umělého osvětlení a vyhýbání se kolizím u migrujících kajek mořských (*Somateria mollissima*) v blízkosti ropné těžební plošiny na Aljašce. Při zapnutých světlech jedinci vykazovali tendenci častěji měnit kurz, když se přiblížili k plošině s umělým osvětlením; při změně kurzu vykazovali vyšší úhlové změny; a také navyšování vzdálenosti průletu od plošiny; žádný z těchto rozdílů však nebyl statisticky významný. Umělé světlo přímo nenarušilo migrační pohyby kajky mořské, ale vedlo ke zvýšenému vyhýbání se ropné plošině.

U evropských savců se naprostá většina studií věnovala efektu pouličního osvětlení a nepřekvapí, že intenzivně byl studován zejména vliv na letouny, jako skupinu rostoucím světelným znečištěním značně postiženou. Několik studií (např. Azam et al. 2018, Blake et al. 1994, Rydell 1992, Stone et al. 2009) ukázalo, že osvětlení odrazuje mnoho druhů letounů, zejména pomalu létajících druhů adaptovaných na lesní prostředí, jako jsou vrápenci nebo netopýři rodů *Myotis* a *Plecotus*. Osvětlení letových koridorů, jakými jsou například ekotony, či vodní toky, způsobuje pro tuto ekomorfologickou skupinu výrazný bariérový efekt, který v kontextu dopravní infrastruktury ještě zhoršuje bariérový efekt silnic a jiných liniových staveb, protože tyto druhy se zdráhají přeletovat otevřené prostory a světlo tento efekt ještě umocňuje. Negativní efekt umělého osvětlení je u některých druhů částečně neutralizován přítomností husté vegetace, takže zatímco v otevřeném prostoru se netopýři osvětlené ploše vyhýbají, v kontextu stromové vegetace je negativní efekt menší (Pauwels et al. 2021), či je dokonce přitahuje, jak zjistili Mathews et al. (2015) u druhu *Pipistrellus pipistrellus*.

Pozitivně naopak působí umělé zdroje osvětlení na aktivitu netopýřů rodu *Pipistrellus* (s výjimkou *P. pipistrellus* v některých situacích), *Nyctalus*, *Hypsugo* a *Miniopterus*, kteří často využívají zvýšené density hmyzu přilákaného světlem, který zde loví (Azam et al. 2018). U řady druhů, kteří využívají světlem přilákaný hmyz jako zdroj potravy, je pozitivní efekt výraznější v otevřených prostranstvích, než poblíž vegetace či ekotonu (Pauwels et al. 2021). Ne vždy je však pozitivní vztah ke zdrojům osvětlení jednoznačný, jak ukazuje studie Barré et al. (2020), která ukázala, že i netopýři rodu *Pipistrellus* se na svých letových koridorech podél řeky vyhýbali osvětleným mostům.

Zajímavé je, že při pokusech s umělým osvětlením přetrvával pozitivní i negativní efekt (v závislosti na skupině) i po vypnutí osvětlení. Tzn. že jedinci kteří se světlu vyhýbaly, se dotyčnému osvětlenému místu dále vyhýbaly, stejně jako druhy, které byly ke světlu přitahovány, vykazovaly v místě původního osvětlení vyšší aktivitu (Azam et al. 2018). Tento paměťový efekt je jistě jen krátkodobý, ale je třeba s ním počítat.

Extrémně citliví jsou všichni letouni na umělé osvětlení okolí svých úkrytů, zejména pak vletových otvorů na budovách (Boldogh et al. 2007). Na osvětlení reagují změnou načasování (typicky zpožděním) výletu z úkrytů, prodloužením délky trvání výletu, změnou tradičních letových koridorů, v řadě případů ovšem také opuštěním daného úkrytu po instalaci nového zdroje světla. Tato situace se týká zejména rostoucí obliby osvětlení historických budov, které řada druhů netopýřů tradičně využívá jako úkryty mateřských kolonií. Při studii zaměřené na kolonie *Plecotus auritus* v historických budovách bylo zjištěno opuštění více než poloviny takto nově osvětlených budov, zatímco všechny kolonie, kde osvětlení instalováno nebylo, zůstaly na místě (Rydell et al. 2017). V osvětlených budovách mají netopýři zároveň horší tělesnou kondici a mláďata rostou pomaleji a později dospívají (Boldogh et al. 2007).

Negativní vliv jakéhokoliv osvětlení na celkovou aktivitu byl u ostatních skupin savců zjištěn u nočních hlodavců, konkrétně myšice křovinné (*Apodemus sylvaticus*) (Spoelstra et al. 2015), norníka rudého (*Myodes glareolus*) (Hoffmann et al. 2018), z kopytníků u srnce obecného (*Capreolus capreolus*) (Ciach & Fröhlich 2019), i když u tohoto druhu byl negativní efekt míry světelného znečištění částečně kompenzován behaviorálně, výběrem větších otevřených prostranství, byla-li k dispozici. U hmyzožravců byl negativní vliv ALAN zjištěn u ježka západního (*Erinaceus europaeus*), kde sledovaní ježci preferovali v rámci urbánního prostředí vždy místa s co nejnižším osvětlením (Berger et al. 2020).

2.3.1. Chromatičnost vyzařovaného světla

Spektrální složení emitovaného světla (tj. zastoupení záření s různými vlnovými délkami) představuje kvalitativní charakteristiku záření. I za stejné intenzity záření mohou různé části spektra být více či méně atraktivní pro jednotlivé skupiny živočichů.

Bezobratlí

Vliv rozdílných částí světelného spektra na chování, reprodukční schopnost a další životní projevy je ze skupin bezobratlých živočichů nejlépe prozkoumán u členovců (Arthropoda), a to zejména u hmyzu (Insecta). Řada skupin hmyzu má extrémně široké vnímání spektrálních složek světla, jež jim umožňuje lepší orientaci v prostředí, ve kterém se vyskytují. Na základě světelných podmínek jsou schopni správně vyhodnotit jednotlivé vzorce chování, někteří dokonce na světelných signálech postavili svoje reprodukční strategie (Van der Kooi et al. 2020).

Ve většině experimentů, či už v umělých nebo přírodních podmínkách, byla obecně pozorována dominantní preference světelného záření s kratšími vlnovými délkami, především v UV rozhraní (< 400 nm). Už i malá přítomnost tohoto záření může u hmyzu vyvolat silnou fototaktickou reakci (Barghini & de Medeiros 2012). Nejmenší odezva byla na dlouhé vlnové délky v rozhraní červené části záření (cca 600 nm a více). Charakter prostředí, zejména jeho fyzikální vlastnosti ovlivňující šíření jednotlivých vlnových délek záření, vyvolává adaptivní odezvu ve vnímání dominantních vlnových délek. Příkladem mohou být larvální stadia hmyzu, vyvíjejících se ve vodě. Voda samotná dobře propouští záření o delších vlnových délkách, zatímco krátkovlnné záření do ní neproniká. Proto jsou larvy tohoto hmyzu citlivější na červené spektrální rozhraní, zatímco dospělci, žijící již mimo vodní prostředí, preferují kratší vlnové délky (Heise 1992). Reakce na různé vlnové délky je variabilní, jak mezi vyššími taxony hmyzu, tak i mezi jednotlivými druhy. Toto poznání je ale silně zatíženo různou prozkoumaností jednotlivých řádů.

Dospělci jepic (Ephemeroptera) výrazně preferují kratší vlnové délky (450 nm), ale také světlo v oblasti zelené části spektra (550 nm) (Egri et al. 2017). Podobně jako u ostatních skupin hmyzu je tento efekt zapříčiněn citlivostí jednotlivých fotoreceptorů v jejich složených očích.

Obdobně vnímá světelné podněty i rovnokřídlý hmyz (Orthoptera) (Herzmann & Labhart 1989) a pisivky (Psocoptera) (Diaz-Montano et al. 2016), jejichž fotoreceptory jsou sice citlivé na poměrně široké spektrální rozhraní (380-500 nm, tedy UV až zelená část spektra),

ale největší fototaktickou reakci vykazovaly na UV záření (u pisivek dokonce výrazně na záření s vlnovou délkou 350 nm; Diaz-Montano et al. 2016). V případě třásněnek (Thysanoptera) (Costa & Robb 1999, Nguyen et al. 2009, Murata et al. 2018b) a chrostíků (Diken & Boyaci 2008) se jednalo o dominantní preferenci krátkovlnného záření v UV části spektra. Termiti (Isoptera), jejich alátní, okřídlené formy preferovaly spíše modré až zelené spektrum (460-550 nm) (Ferreira et al. 2012). Ve skupině třásněnek lze ale vyzorovat i významné rozdíly mezi jednotlivými taxony. Pokud jim nelze dát na výběr zdroj UV záření, mohou významně pozitivně reagovat na světla ve spektrálním rozhraní žluté (590 nm), zelené (520 nm) nebo modré (470 nm) barvy (Yang et al. 2015). Navíc ozáření jejich přirozeného prostředí, typické přítomností zelené barvy, červeným světlem (660 nm) vyvolává jejich výraznou negativní fototaxi a únik ze zasaženého místa (Murata et al. 2018a).

U švábů (Blattodea) se setkáváme s poměrně výraznou – a dobře známou – negativní fototaxi. Zatímco ale záření o dlouhých vlnových délkách (v červené oblasti) nevyvolává téměř žádnou reakci, záření v modré části spektra způsobuje výrazné zhoršení orientace dospělců s až repelentním vlivem (Burhan & Gencer 2020). Další výraznou senzitivitu vykazuje jejich fotocitlivý pigment v rozhraní zeleného spektra (500 nm; Goldsmith & Ruck 1958).

U skupin stejnokřídlého hmyzu (kdysi řád Homoptera), konkrétně u kříšů (Auchenorrhyncha), mer (Psylloidea) a molic (Aleyrodoidea) dospělce shodně přitahuje záření s kratšími vlnovými délkami. Zatímco u mer je nejsilnější reakce posunuta do UV části spektra (390-400 nm; Allan et al. 2020), u molic a kříšů se jednalo o delší vlnové délky v modré oblasti (440-480 nm; Jeon et al. 2014, Kim et al. 2012, Yang et al. 2014). Další atraktivní vlnové délky pro molic a křísy (bez rozdílu mezi pohlavími) bylo záření v zelené části spektra (520-585 nm; Jeon et al. 2014, Kim et al. 2012, Yang et al. 2014). Minimálně u skupiny molic budou ale výrazné rozdíly mezi jednotlivými taxony, zatímco v laboratorních *choice* experimentech byla pozorována také poměrně vysoká míra atraktance jedinců v červené oblasti záření (625 nm; Jeon et al. 2014, Kim et al. 2012), ve studii provedené v přírodních podmínkách byla zaznamenána výrazná preference fialové barvy záření (405 nm) oproti všem ostatním částem viditelného spektra (Zheng et al. 2014).

V případě ploštic (Heteroptera) dochází k výrazné citlivosti na široká světelná spektra, ale i na jednotlivé části spektra. Podobně jako u jiných skupin hmyzu, mají i ploštice nejsilnější reakci na UV a modrou složku záření (Leskey et al. 2015). Nicméně se míra senzitivity k UV záření může mezi druhy lišit. U krevsajících zákeřnic (Reduviidae) způsobuje UV záření u stejného druhu, jak atraktanci, tak i repelentní chování (Minoli & Lazzari 2006). Patrně se jedná o efekt menotaktické orientace, kdy směrový světelný signál jedinci používají k orientaci – udržení vhodného směru k pohybu než o výraznou fotopozitivní reakci. Jiné druhy jsou zas méně citlivé nejenom na UV záření, ale také na záření s dlouhými vlnovými délkami (od oranžové až po červenou; Reisenman & Lazzari 2006). Naopak výrazně preferují směsné bílé světlo (Minoli & Lazzari 2006). Patrně se jedná o adaptaci na prostředí s výskytem jejich hostitelů – zde příbytky lidí s velmi častým použitím tohoto typu osvětlení.

Brouci (Coleoptera) patří z hlediska chromatičnosti světla mezi nejlépe prozkoumané skupiny hmyzu. Dospělci z řady skupin brouků – např. kůrovci (Scolytinae) (Pawson et al. 2009), mandelinkovití (Chrysomelidae) (Yang et al. 2003), potěmňovití (Tenebrionidae)

(Duehl et al. 2011), tesaříkovití (Cerambycidae) (Pawson et al. 2009) vykazují největší citlivost na záření s krátkými vlnovými délkami v oblasti UV a modrého záření. V mnoha případech se jedná o běžně používané komerční typy světelných zdrojů se širokospektrálním smíšeným zářením, ale s vysokým zastoupením záření s kratšími vlnovými délkami (standardní rtuťové výbojky; Wakefield et al. 2018), a to ani nemusí být UV složka v emitovaném světle dominantní (např. vysokotlaké sodíkové výbojky s typicky žlutě zbarveným světlem; Medeiros et al. 2017). V reakcích na další části spektra se ale mohou výrazně lišit. Zatímco tesaříci preferovali kromě krátkovlnného záření také červenou část spektra (Pawson et al. 2009), u střevlíků (Carabidae) dochází v prostředí osvětleném tímto světlem (620-645 nm) k ovlivnění disperze v podobě snížené rychlosti pohybu a prodlužováním délky klidové pauzy (Allema et al. 2012). Pro jiné skupiny, např. dlouhánovití (Brentidae) (McQuate 2014) nebo střevlíci (Šustek 1999) vykazují výrazné preference na světlo kolem zelené části spektra (500-520 nm). Citlivost brouků na světla s různými vlnovými délkami se během denního rytmu může ale výrazně lišit. Mandelinkovití brouci v ranních hodinách preferovali záření o vlnových délkách 380-430 nm, zatímco odpoledne a večer preference kratších vlnových délek byla utlumena na vnímání záření kolem 430 nm. Takto výrazná změna senzitivity během dne poukazuje na adaptaci nervového systému na měnící se světelné podmínky v přirozeném prostředí (Yang et al. 2003). Zdroje světelného znečištění se zastoupením krátkých vlnových délek tedy mohou výrazně zasáhnout do synchronizace jejich rytmu. Podobné negativní efekty lze pozorovat i v případě ovlivnění reprodukčního chování brouků. Zatímco vyzařované světlo v oblasti zelené až žluté barvy (510, 575 nm) pozitivně ovlivnilo vyhledání partnera a délku samotné kopulace, záření o kratších vlnových délkách (395, 480 nm) negativně ovlivnilo počet kopulací slunéčkovitých brouků (Wang et al. 2014). Tyto výsledky jsou zcela v souladu se světelnými podmínkami, kde se tyto aphidofágní brouci vyskytují – v porostech rostlinné vegetace, kde je zelená barva dominantní.

Z hlediska vlivu světelného znečištění na chování jsou nejlépe prostudovány světluškovití (Lampyridae). Tito brouci jako jeden z mála skupin hmyzu mají vysoce vyvinutý systém světelných signálů, na základě kterých dochází k rozeznání jedinců vlastního druhu, nalezení partnera k reprodukci, nebo formou agresivní mimikry také nalezení kořisti. Schopnost správně zachytit a vyhodnotit světelné signály v prostředí tmavé noci je tedy zcela klíčová pro přežívání jejich populací. Přirozeně vyzařované světlo světlušek se pohybuje v rozmezí zeleného rozhraní 550-570 nm. V přítomnosti světelného znečištění podobných vlnových délek může dojít k tlumení světelné reakce samic, zatímco samečci jsou naopak nejaktivnější v jejich vyhledávání (Bird & Parker 2014). Pokud ale světlo emituje záření s krátkými vlnovými délkami v modré barvě (485 nm), výrazně poklesne úspěšnost samců v nalezení samic (Booth et al. 2004, Steward et al. 2020). Naopak záření v červené části spektra tento efekt nevykazovalo (Booth et al. 2004). Další vlnové délky – např. v rozmezí jantarově zbarveného světla (613 nm) ovlivňují správnou světelnou komunikaci mezi samci a samicemi stejného druhu (Owens & Lewis 2021a). Z těchto poznatků je jasné, že světlušky jsou značně citlivé na kvalitu světelných podmínek prostředí, proto by alespoň v místech výskytu jejich nejčtetnějších populací mělo být zvaženo použití zdrojů světelného znečištění.

Dvoukřídlí hmyz (Diptera) má výrazně vyvinutou citlivost světločivých orgánů (Lunau 2014), zároveň se i v této početné skupině setkáváme s rozdílnou reakcí na různá spektra záření. Většina skupin – např. komárovití (Culicidae), muchničkovití (Simuliidae) (Allan et al. 1987) nebo pakomárovití (Wakefield et al. 2018), silně preferují záření s krátkými vlnovými délkami (především v UV části spektra), ale také v části zelené (Bishop et al. 2004, Burkett & Butler 2005). Přílišné zastoupení krátkých vlnových délek v celkovém osvětlení ale u jiných skupin hmyzu může způsobit výrazní zkrácení života dospělců. Rozdíly ve vnímání vlnových délek světla mohou být i mezi jednotlivými pohlavími. U komárů byla u samic pozorovaná preference především UV části spektra, v případě samic byla posunuta více k barvě modré (Chen et al. 2011).

Řád motýlů (Lepidoptera) patří nesporně k nejlépe prozkoumaným skupinám hmyzu. Již pouhá přítomnost osvětleného povrchu vykazuje – ve srovnání s přírodními podmínkami bez světelného znečištění – výraznou fototaktickou reakci (Sambaraju & Phillips 2008). Spektrální senzitivita složených očí dospělců motýlů je nejcitlivější nejčastěji ve třech spektrálních oblastech – v oblasti UV záření (kolem 350 nm), modrého (440 nm) a zeleného světla (535 nm) (Briscoe & Chittka 2001, Johnsen et al. 2006, Lau & Meyer-Rochow 2007). Citlivost k těmto částem spektra se může u jednotlivých skupin lišit, převážně je ale pozitivní fototaxe pozorována za použití světla s výrazným podílem UV až modrého záření (Brehm et al. 2021). Obecně přítomnost UV složky ve světle výrazně zvyšuje jak celkovou diverzitu, tak i abundanci odchycených motýlů na zasažených místech (pozorováno u bekyní (Lymantriinae)), Wallner & Baranchikov 1995; lišajů (Sphingidae), Cutler et al. 1995; obalečů (Tortricidae), Sun et al. 2014; zavíječů (Pyralidae), Cowan & Gries 2009, Sambaraju & Phillips 2008; obecně u velkých nočních motýlů, např. Van Langevelde et al. 2011). Tato pozitivní reakce na kratší vlnové délky je výrazná zejména u druhů se soumravní aktivitou, tedy s adaptací na podmínky, ve kterých se podobné světelné záření přirozeně a hojně vyskytuje (Cowan & Gries 2009, Cutler et al. 1995). Záření s příliš krátkými vlnami (kolem 350 nm), ale může působit inhibičně. V případě velkých motýlů, jako jsou lišajové, byla za těchto světelných podmínek negativně ovlivněna schopnost vyhledávání potravy (Cutler et al. 1995; viz ale také Van Langevelde et al. 2017, jež u velkých nočních motýlů pozoroval obdobnou inhibiční reakci v přítomnosti zeleného světla).

U světla, u kterých UV nebo modrá složka nejsou zastoupeny, se mohou jednotlivé skupiny motýlů v reakci dospělců na ostatní vlnové délky lišit (Brehm et al. 2021). Zástupci prástevníků (Arctiinae) a píďalek (Geometridae) selektovali také světla s přítomností jantarové barvy (597 nm; Van Langevelde et al. 2011), můry (Noctuidae) a obaleči více preferovali zelenou část spektra (520-540 nm; Sun et al. 2014, Yang et al. 2012). Tyto reakce na další části spektra jsou také důvodem, proč směsná světla, kombinující jednotlivé atraktivní spektra, přitahují mnohem více motýlů, než světla emitující pouze UV záření (Fayle et al. 2007).

Larvální stadia vykazují obdobně jako dospělci silnou reakci k UV záření (370-380 nm), ale také k zelené části spektra (520-540 nm). Tento jen patrně souvisí s jejich potřebou správně detekovat potravu – obvykle zeleně zbarvenou vegetaci (Castrejon & Rojas 2010).

I přesto, že blanokřídlí (Hymenoptera) patří mezi nejrozsáhlejší skupiny hmyzu, studií vlivu složení světelného záření na jejich aktivitu je velmi málo. Patrně to je způsobeno i převážně

denní aktivitou nejznámějších skupin, jako jsou včely nebo vosy. I zde ale můžeme najít zástupce se soumravní až noční aktivitou. Ve skupině ploskoček (Halictidae) se vyskytuje několik typicky lesních druhů, jež žijí v polostínu až tmě v lesních porostech. Jejich světelné orgány jsou méně citlivé na UV záření, s nejvyšší senzitivitou v oblasti zelené barvy záření (500 nm; Berry et al. 2011). Jedná se o velmi důležitou adaptaci, jež jim umožňuje vůbec vidět během noci v lesním prostředí. Při průchodu světelného záření korunovým patrem lesa dochází k velmi rychlému filtrování UV fotonů. Z tohoto důvodu se v daném prostředí vyskytuje nejvíce fotonů se zářením v zelené části spektra, a proto jsou zrakové pigmenty těchto včel na ně nejcitlivější. Obdobná skoro-absence pigmentů citlivých na UV záření byla pozorována i u několika druhů švábů, permanentně žijících v tmavých podmínkách (Goldsmith & Ruck 1958).

Z ostatních skupin členovců jsou z hlediska chromatičnosti světla zkoumány také pavouci (Araneae). Pavouky výrazně přitahovaly běžně používané zdroje pouličního osvětlení se zastoupením záření v modré barvě (bílá LED světla (Willmott et al. 2019). Obdobnou reakci vykazovaly i tzv. sodíkové lampy. Tento typ osvětlení může do velké míry ovlivnit složení jejich kořisti (Manfrin et al. 2018).

Další velmi málo studovanou skupinou jsou měkkýši (Mollusca). Směsné bílé světlo (s výrazným peakem v UV záření) vyvolává negativní fototaxi, a tím omezuje možnosti hledání potravy druhů s noční aktivitou (Marinquez et al. 2019).

Ptáci

Navzdory intenzivnímu používání umělého osvětlení v chovu zvířat v zajetí, jeho účinek na ptáky byl dosud jen zřídka experimentálně studován. Bylo například zjištěno, že odlišná světelná spektra ovlivňují růst drůbeže jak in ovo, tak i po vylíhnutí. Brojleři fotostimulovaní in ovo zeleným světlem přibrali na váze výrazně více než jedinci inkubovaní v tmavých podmínkách (Halevy et al. 1998). Rozenboim et al. (2013) zjistili, že in ovo fotostimulace zeleným světlem potlačuje genovou expresi zeleného a červeného opsiového receptoru v posledních třech dnech před vylíhnutím, zatímco červené světlo jejich expresi zesiluje. Podobně také Pan et al. (2014) prokázali, že spektrální složení hraje klíčovou roli při ovlivňování růstu a fyziologie kuřat. Zjistili, že zeleno-modré duální světlo má různé vedlejší účinky na tělesnou hmotnost kuřat v závislosti na daných poměrech zelené a modré. Zeleno-modré duální světlo s potlačenou či střední modrou složkou snížilo tělesnou hmotnost, zatímco světlo s obohacenou modrou složkou podpořilo nárůst tělesné hmotnosti u kuřat ve srovnání s kuřaty ošetřenými monochromatickým zeleným nebo modrým spektrem.

House et al. (2021) zkoumali, jak čtyři LED osvětlení vyzařující různé části spektra viditelného světla – monochromatické modré, monochromatické zelené, monochromatické červené a bílé – ovlivňují stres, strachovou reakci, vývoj očí a růst u pekingských kachen. Jak jejich výsledky ukázaly, světle modré a červené osvětlení nemusí být pro růst pekingské kachny adekvátní a pekingské kachny mohou vyžadovat umělé světelné zdroje obsahující široký rozsah vlnových délek, jaké mají například bílé a zelené světlo. Ačkoli jsou pekingské kachny i brojleři citliví na světlé barvy, druhově specifické nuance ve vnímání světla mohou způsobit výrazné rozdíly ve fyziologických reakcích. Zde je však nutno podotknout, že se výše uvedené studie

netýkaly vlivu umělého osvětlení v noci, ale zabývaly se vlivem vysoké intenzity denního anebo stálého světla na ptáky chované v zajetí. Vliv světla s různými vlnovými délkami na fyziologické reakce dosud nebyly zkoumány u volně žijících ptačích druhů a výzkum této problematiky by mohl přispět k rozšíření porozumění potenciálně negativních vlivů světelného znečištění především na ohrožené druhy.

Vliv na fototaxi

Reakce ptáků na umělé osvětlení ovlivňuje řada faktorů, včetně roční doby, počasí a vlastností světla. Významným faktorem může být vlnová délka světla (Zhao et al. 2014). Poot et al. (2008) zjistili, že červené světlo má tendenci přitahovat stěhovavé ptáky. Omezení schopností geomagnetické orientace způsobené červeným osvětlením může vést ke srážkám jedinců s umělými zdroji světla, zatímco modré a zelené světelné zdroje, obsahující méně nebo žádné viditelné dlouhovlnné záření, mají slabší vliv na fototaxi. Zhao et al. (2020) také použili různá monochromatická světla (červené, zelené a modré) a polychromatické teplé bílé světlo ke zkoumání vlivu vlnové délky světla na fototaxi u nočních migrujících ptáků. Na rozdíl od výsledků Poot et al. (2008) zjistili, že krátkovlnné modré světlo způsobilo nejsilnější fototaktickou odezvu, a naopak ptáci byli jen zřídka přitahováni dlouhovlnným červeným světlem.

Studie mechanismu geomagnetické navigace u ptáků ukázaly, že protein kryptochrom, o kterém se předpokládá, že slouží pro geomagnetickou orientaci, se aktivuje, když je vystaven ultrafialovému či modrému světlu, a naopak se jeho účinek výrazně snižuje, když je vystaven zelenému světlu. Protein se neaktivuje vůbec, je-li vystaven červenému světlu (Nießner et al. 2014). Proto se ptáci při ozařování dlouhovlnným červeným světlem nemohou normálně orientovat (Wiltschko et al. 2010). Nicméně názor, že červené světlo ptáky přitahuje, byl také zpochybněn. Evans et al. (2007) studovali agregaci ptáků pod různými vlnovými délkami světla počítáním hlasových projevů prolétajících migrantů. Zjistili, že ptáci mají tendenci se shlukovat pod vlivem bílého, modrého a zeleného světla, ale ne červeného světla.

Nejvíce je tato problematika prostudována u mořských ptáků, kde se řada autorů věnovala vlivu osvětlení různých konstrukcí umístěných na volném moři na proletující, zejm. migrující, ptáky. Např. Syposz et al. (2021) naznačují, že dospělci z rodu trubkonosých (*Procellariiformes*) byli odpuzováni světlem s různým trváním, barvou a intenzitou. Negativní fototaxe byla silnější s vyšší intenzitou světla, prodlužující se dobou svícení a u zeleného a modrého světla ve srovnání s červeným světlem. Autoři doporučují nižší intenzitu světla, červenou barvu a kratší dobu svícení jako zmírňující opatření ke snížení účinků umělého osvětlení na ptactvo. Stejně tak Rebke et al. (2019) navrhuje omezit světelné zdroje na moři na minimum, za účelem zmírnění negativních dopadů na noční stěhovavé ptačí druhy. Možností může být osvětlení konstrukcí pouze tehdy, když se lodě nebo letadla blíží. Blikající světlo má být preferováno před nepřetržitým světlem, ale pokud je potřeba nepřetržité světlo, mělo by být použito červené světlo.

Velká pozornost byla dosud věnována vlivu silně osvětlených budov, televizních a komunikačních věží na zvýšený úhyn nočních stěhovavých pěvců (Crawford & Engstrom

2001, van Doren et al. 2021). U majáků je již dlouho známo, že vedou k úhynu stěhovavých ptáků, avšak o jejich přesném dopadu na ptačí populace bylo dosud shromážděno jen málo informací. Jones a Francis (2003) zkoumali dopad majáku Long Point na noční stěhovavé ptačí druhy. V letech 1960–1989 byl průměrný roční úhyn 200 jedinců na jaře a 393 na podzim. V roce 1989 bylo u majáku zmodernizováno osvětlení s užším a méně výkonným paprskem. Tato změna přinesla drastické snížení úmrtnosti v letech 1990–2002 v průměru na pouhých 18,5 ptáků ročně na jaře a 9,6 na podzim. Stejně tak Korner et al. (2022) sledovali mortalitu u stěhovavých ptačích druhů přilákaných osvětlením 41 patrové budovy v německém Bonnu. Nápadné osvětlení fasády mělo na svědomí mnoho obětí, kromě toho osvětlená loga na střeše, a dokonce i slabé zdroje světla (například nouzová), působily jako atraktant a vedly ke kolizím. Vypnutí osvětlení bylo velmi účinným opatřením. Tyto výsledky zdůrazňují účinnost jednoduchých změn ve světelných signaturách při snižování fototaxe a úmrtnosti během migrace. U buňáků (*Procellariiformes*) je jednou z nejkritičtějších fází života vylétání z hnízda, kdy mláďata přecházejí z péče rodičů na souši do samostatného života na moři. Mnoho jedinců je při tom ohroženo umělým osvětlením (Brooke 2004). Rodríguez et al. (2015) monitorovali počty tří druhů buňáků (*Puffinus mauretanicus*, *Calonectris diomedea* a *Hydrobates pelagicus*) zachráněných na Baleárských ostrovech, kde byla mláďata nalezená uvízlá na souši vlivem umělého osvětlení. Úmrtnost způsobená umělým osvětlením se během období hnízdění u těchto druhů zvýšila. Rodríguez et al. (2017) hodnotili opěření a tělesný stav mláďat buňáka tenkozobého (*Ardenna tenuirostris*) odchycených v koloniích těsně před odletem ve srovnání s mláďaty vyplavenými na plážích a mláďaty přitahovanými umělým světlem podél silnic. Kovové halogenidové výbojky zvyšovaly riziko úmrtnosti faktorem 1,6 až 1,9 ve srovnání se světelnými diodami a vysokotlakými sodíkovými výbojkami. Použití vysokotlakých sodíkových výbojek (či světelných zdrojů s podobným spektrem) a boční útlu světla by mohly sloužit jako opatření ke zmírnění negativních dopadů umělého osvětlení na populace ptáků.

Tyto výsledky otevírají možnosti pro vývoj umělého osvětlení, které nebude mít tolik rušivý efekt na ptáky pomocí manipulace s charakteristikami vlnové délky (Marquenie et al. 2013). Stále však chybí ucelený obraz o vlivech jednotlivých vlnových délek na odlišné ptačí skupiny, protože dosud dostupné zdroje ukazují odlišné trendy pro jednotlivé druhy.

Změny spánku a denních rytmu

Studie ptačích populací ve volné přírodě ukázaly, že umělé osvětlení během noci může ovlivnit mnoho aspektů ptačího života: např. u kosa černého (*Turdus merula*) byly zjištěny změny v potravním chování (Russ et al. 2015); u mnoha druhů pěvců se mění načasování ranní vokalizace (Da Silva et al. 2014, Kempenaers et al. 2010) či změny v denní aktivitě a zkrácení délky spánku (Yadav et al. 2022); u sýkory modřinky (*Cyanistes caeruleus*) a sýkory koňadry (*Parus major*) byl pozorován posun v načasování reprodukce (de Jong et al. 2015, Kempenaers et al. 2010). De Jong et al. (2016) zkoumali, zda se volně žijící sýkory koňadry vyhýbají nočnímu vystavení světlu. Jejich výsledky naznačují, že ptáci obývající mimoměstské oblasti se mohou vyhýbat oblastem s vysokou hladinou nočního umělého osvětlení, čímž se vyhnou přímým následkům světla v noci. Naopak Ulgezen et al. (2019) zjistili, že sýkory koňadry raději spaly pod umělým osvětlením namísto tmavých lokalit, a preferovaly zelené světlo před bílým

světlem. Bílé světlo u nich také ovlivnilo vzorce aktivity více než zelené světlo. Protože účinek vlivu červeného a bílého světla na ptáky je většinou srovnatelný, De Jong et al. (2017) testovali vliv intenzity světla na aktivitu sýkory modřinky pouze při různých intenzitách zeleného a bílého osvětlení. Zatímco ve vyšším rozsahu intenzit byly účinky bílého a zeleného světla srovnatelné, při nižších intenzitách mělo zelené světlo na denní rytmy sýkory modřinky méně rušivé účinky ve srovnání s bílým světlem, a perioda aktivity a spánku lépe odpovídala přírodní fotoperiodě. Rozsah tohoto rušení lze zmírnit modulací spektrálních charakteristik a intenzity venkovního osvětlení, což je nyní možné pomocí inovativních LED osvětlení.

V zajetí byly účinky nočního osvětlení na denní rytmy ptáků studovány ještě podrobněji než ve volné přírodě. Aulsebrook et al. (2020a) experimentálně vystavili jedince holuba domácího (*Columba livia*) a straky australské (*Cracticus tibicen tyrannica*) nočnímu světlu o intenzitách typických pro městské oblasti. Zástupci obou druhů spali během experimentu kratší dobu, upřednostňovali lehkou fázi spánku NREM před REM spánkem a měli více přerušovaný spánek ve srovnání s vypnutými světly. U holubů byly tyto rušivé účinky na spánek podobné pro bílé i teplé bílé osvětlení. U strak však mělo teplé bílé světlo na spánek menší vliv. Teplé bílé osvětlení může tedy u některých druhů ptáků minimalizovat narušení spánku. Aulsebrook et al. (2020b) zjistili, že spánková aktivita ve městě žijících labutí černých byla podobná, když byli ptáci vystaveni chladnému a teplému bílému světlu, ale klesala pod teplým bílým světlem ve srovnání s tmavými podmínkami. Také Alaasam et al. (2018) zjistili, že umělé osvětlení s chladnými tóny barev u zebříček (*Taeniopygia guttata*) narušuje spánek a zvyšuje hladinu glukokortikoidů. Jedinci vystaveni chladnému bílému světlu vykazovali vyšší míru noční aktivity, měli zvýšené hladiny kortikosteronu. Jedinci, kteří byli aktivní v noci, následně snížili denní aktivitu. Autoři jako řešení navrhuji použití nočního osvětlení s teplými barvami, které by mohlo pomoci snížit energetické výdaje u volně žijících ptáků.

Reprodukční chování a péče o mláďata

Světelné znečištění významně ovlivňuje nástup ranní aktivity a zahájení ranní vokalizace u ptáků, což může ovlivnit extrapárové otcovství. Dřívější vokalizace samců může stimulovat samice, aby se zapojily do extrapárové kopulace, a dřívější nástup aktivity může ovlivnit chování samců při hlídání samice. De Jong et al. (2018) provedli experimentální studii účinků nočního osvětlení na extrapárové otcovství sýkor koňader. Původně tmavé přírodní oblasti byly osvětleny bílými, červenými a zelenými LED lampami a porovnávány s neosvětlenými kontrolními lokalitami. Podíl mláďat z extrapárového spojení se zvyšoval se vzdáleností od červených a bílých lamp (tj. při nižších intenzitách světla), ale klesal se vzdáleností u tmavých kontrolních lokalit. Celkový počet potomků zplozených samcem však nebyl ovlivněn umělým světlem v noci, což naznačuje, že potenciální změny ve věrnosti samic u párů hnízdících blízko zdroje bílého a červeného světla se nepromítly do přínosů pro kondici samců. Umělé světlo v noci by tedy mohlo narušit přirozené vzorce extrapárového otcovství, případně negovat potenciální výhody mimopárové kopulace, a tím by mohlo měnit procesy sexuální selekce u volně žijících ptáků.

V dalších studiích bylo prokázáno, že umělé osvětlení u ptáků mění mnoho přirozených vzorců chování, které jsou důležité pro zdatnost jedinců, včetně krmení mláďat. Van Dis et al.

(2021) zjistili, že mláďata inkubující se pod vlivem bílého světla během chladného časného jara měla na konci inkubační doby nižší průměrné teploty v hnízdě, a to jak ve dne, tak v noci, ve srovnání s jedinci vystavenými zelenému osvětlení. Nicméně nebyly zjištěny žádné jasné dopady na celkovou kondici, na počet vylíhnutých mláďat nebo na jejich hmotnost. Na rozdíl od toho Bani Assadi a Fraser (2021) zjistili, že mláďata jiříčky modrolesklé (*Progne subis*) vystavené bílému osvětlení měla vyšší hmotnost, pozdější datum vylíhnutí a pozdější datum odletu z kolonie než mláďata kontrolní skupiny. Tyto výsledky také naznačují, že zelené světlo může mít menší dopad ve srovnání s bílým světlem. Welbers et al. (2017) se zaměřili na hnízdící sýkory koňadry vystavené umělému osvětlení během noci. Ptáci krmící své potomky pod bílým a zeleným světlem vykazovali nižší denní energetický výdej ve srovnání s ptáky v kontrolní tmavé oblasti. Rozdíly v aktivitě krmení mláďat tento výsledek nevysvětlovaly, protože ani míra krmení, ani načasování denní aktivity světlem ovlivněny nebyly. Nicméně dostupnost potravy byla mnohem vyšší na lokalitách s bílým a zeleným osvětlením ve srovnání s červeným světlem a tmavou kontrolní lokalitou, což naznačuje, že nižší denní energetický výdej na lokalitách s bílým a zeleným osvětlením je důsledkem vyšší dostupnosti potravy. Mohou tedy existovat pro jednotlivé druhy pozitivní, nepřímé účinky umělého osvětlení na hnízdění chování pěvců, které mohou vyvažovat negativní přímé účinky uvedené v předchozích studiích. De Jong et al. (2015) experimentálně osvětlili dříve tmavé přírodní prostředí bílým, zeleným a červeným světlem a zkoumali účinky nočního osvětlení na funkční vlastnosti a kondici sýkory koňadry a lejska strakatého (*Ficedula hypoleuca*). Poukázali vliv umělého osvětlení na načasování snůšky a vzájemného působení osvětlení a vzdálenosti k nejbližšímu zdroji světla na hmotnost mláďat sýkory koňadry, ale ne u lejska strakatého. U žádného z těchto druhů nebyl zjištěn vliv osvětlení na hustotu hnízdění, velikost snůšky, pravděpodobnost výpadku ve snůšce, počtu mláďat a přežití dospělých jedinců. Výsledky však nebyly konsistentní vzhledem k chromatičnosti světla a autoři poukázali na nutnost dlouhodobějšího sběru dat. Negativní ekologické účinky nočního osvětlení mohou být zřejmě také zmírněny použitím různých světelných spekter.

Savci

Reakce letounů na světlo různé barvy se lokálně mohou lišit, ale u druhů, které využívají světlem přilákaný hmyz jako zdroj potravy odpovídá intenzita reakce množství přilákaného hmyzu. Z nejčastěji využívaných zdrojů osvětlení připadají v úvahu oranžové (LPS), žluté (HPS) a bílé (metalhalidové, LED) zdroje, přičemž aktivita lovcích netopýrů klesá v pořadí bílé, žluté, oranžové světlo (Stone et al. 2015).

U druhů, které osvětlení využívají k potravní aktivitě, závisí úroveň lovecké aktivity na množství přilákaného hmyzu, i když některé studie ukazují, že nejen bílé, ale i oranžové nízkotlaké a žluté vysokotlaké sodíkové výbojky přitahovaly značné množství lovcích netopýrů, u některých druhů (*Pipistrellus pygmeus*, *Nyctalus leisleri*) dokonce i mírně víc, než bílé světlo (Mathews et al. 2015). Zdaleka nejsilnější pozitivní reakce na různobarevné zdroje světla byla u *Pipistrellus pipistrellus* pozorována u zeleného zdroje světla, zatímco u červeného byla srovnatelná s kontrolou bez osvětlení, tzn. bez reakce (Spoelstra et al. 2015, Spoelstra et al. 2017). Zdá se, že zelené světlo způsobuje pozitivní fototaxi u migrujících *Pipistrellus*

pygmaeus a *Pipistrellus nathusii* nad mořským pobřežím, aniž by to souviselo s potravním chováním (Voigt et al. 2017).

Voigt et al. (2018) při zapnutí červené LED pozorovali zvýšení letové aktivity u netopýrů *Pipistrellus pygmaeus* a trend k vyšší aktivitě u netopýrů *Pipistrellus nathusii*. Vzhledem k tomu, že vyšší letová aktivita netopýrů nebyla spojena se zvýšenou potravou, vyloučili možnost, že by netopýři při červeném LED světle lovili. Při vystavení teplé bílé LED diodě se obecná letová aktivita u zdroje světla nezvýšila, přesto pozorovali zvýšenou potravní aktivitu přímo u zdroje světla ve srovnání s kontrolou bez světla. Migrující netopýři tedy reagují na světlo typu LED specificky, podle barvy. Nejspolehlivějším vysvětlením reakce na červené LED je fototaxe a reakce na teplé bílé LED hledání potravy. Při používání červeného osvětlení zejména u větrných turbín, je třeba zvýšené opatrnosti, protože tato barva světla by mohla netopýry přitahovat (Voigt et al. 2018), což by v konečném důsledku vedlo ke zvýšenému riziku kolize migrujících netopýrů s větrnými turbínami.

Zdroje světla s UV spektrem zesilují pozitivní i negativní efekt u obou ekomorfologických skupin netopýrů s rostoucím zapojením vegetace – zvyšují aktivitu v jejich blízkosti u druhů rodu *Pipistrellus*, *Nyctalus*, *Eptesicus* a *Vespertilio* a snižují aktivitu druhů rodu *Myotis* (Straka et al. 2019).

Při pokusném osvětlení výletových otvorů z úkrytů u druhu *Pipistrellus pygmaeus* různě barevným světlem byla negativní reakce projevovaná snížením počtu vylétujících jedinců nejsilnější na bílé LED světlo, slabší pak na modré a nejslabší na červené světlo (Downs et al. 2003).

U myšice křovinné (*Apodemus sylvaticus*) snižovalo celkovou aktivitu v okolí světelných zdrojů bílé, červené i zelené osvětlení bez rozdílu (Spoelstra et al. 2015).

2.3.2. Intenzita světelného záření

Intenzita světelného záření osvětlující dané prostředí udává míru světelného toku, dopadajícího na jednotku plochy. Za tmavé, ale jasné noci s hvězdnou oblohou dosahuje míra intenzity osvětlení méně než 0,004 lx (luxů; Thakurdas et al. 2009). Tyto hodnoty přirozeného osvětlení se pochopitelně zvyšují v době plného úplňku Měsíce. V tomto období lze za jasného počasí naměřit osvětlení do 0,5 lx (Eccard et al. 2018, Thakurdas et al. 2009), nebo také – vyjádřeno v jiných jednotkách – méně než $1,0 \times 10^{14}$ fotonů na $m^{-2}s^{-1}$ (Murata et al. 2018b). Pro představu, během zcela jasného dne dosahuje míra osvětlení až 70 tisíc lx, při zatažené obloze 2600 lx (Thakurdas et al. 2009).

Umělé noční osvětlení mnohokrát převyšuje míru nočního přirozeného osvětlení, často i na úrovni řádů. Slabší pouliční osvětlení dosahuje hodnot 10 lx, značně osvětlené ulice a intravilán měst 30-100 lx (Botha et al. 2017, Davies et al. 2017, Gaston et al. 2014). Běžně používané pouliční LED osvětlení, v jeho tlumené verzi, vyzařuje záření při intenzitě 15 lx (Davies et al. 2017), kolem lesních pěšin se často používá osvětlení s hodnotou intenzity záření 1,5 lx (Bird & Parker 2014), jedná se přitom o hodnoty neměřené přímo u zdrojů záření. Ve velmi blízkém okolí světelných zdrojů, u kterých lze během teplých letních nocí pozorovat hejna nočního

hmyzu, dosahuje intenzita záření hodnot řádově tisícinásobně silnějších než za noci během nejjasnějšího úplňku.

Bezobratlí

Intenzita světelného záření je tedy značně důležitým parametrem prostředí, ovlivňující živočichy s noční aktivitou. Podobně jako v případě chromatičnosti světla, i tento parametr byl nejčastěji zkoumán u hmyzu.

Mezi velmi častý hmyz přilákaný ke světelným zdrojům patří jepice. Silným atraktantem je pro ně již světelné záření běžného pouličního osvětlení (Egri et al. 2017). Značně silná osvětlení, často používaná jako bezpečnostní osvětlení objektů nebo například silné osvětlení sportovních stadionů může přilákat i obrovské roje jepic, z nichž většina u těchto zdrojů rychle umírá (Szaz et al. 2015).

Rovnokřídlý hmyz s noční aktivitou je na míru intenzity světelného znečištění značně citlivý. Již nižší míra osvětlení prostředí (2-5 lx) výrazně zkracuje pohybovou aktivitu cvrčků (Gryllidae) a způsobuje jejich asynchronní stridulaci (Levy et al. 2021). Silnější osvětlení, ale pořád v hodnotách běžného antropogenně relevantního světla (10-100 lx) významně ovlivňuje výběr partnera a jejich reprodukční chování (Botha et al. 2017). V podstatě jakékoliv osvětlení v noci (1-100 lx) prodlužuje vývoj larválních stadií cvrčků, což může výrazně negativně ovlivnit fenologii celé lokální populace (Durrant et al. 2018). U kobylek (Tettigoniidae) byla pozorována výrazná míra pozitivní fototaxe na výkonnější zdroje světla s výkonem 400 W (Sengenado et al. 2021). Světla s extrémně silnou intenzitou záření, srovnatelná např. s fotobleskem, způsobuje u rovnokřídleho hmyzu až efekt oslunění jedinců (nadměrnou senzibilitu vůči světelnému záření; Tan 2019).

V případě švábů vyvolává zvyšující se intenzita osvětlení (od 25 do 2500 lx) potíže s orientací v prostoru a tím výrazně prodlužuje jejich únikovou reakci před případným predátorem (Burhan & Gencer 2020).

Charakter reakce jednotlivých jedinců může záviset i na jejich aktuálním morfotypu. U vícero skupin hmyzu se setkáváme s jevem, kdy se jedinci mohou lišit v schopnosti disperze a tím i rozdílným přizpůsobením k světelným podmínkám konkrétního prostředí. U termitů jsou alátní (okřídlení) jedinci odpovědní za šíření v prostoru, proto jsou jejich světločivé orgány značně citlivé na světelné záření. Již míra osvětlení 11 lx způsobuje jejich pozitivní fototaxi, která přirozeně roste s intenzitou osvětlení. Apterní (bezokřídlí) jedinci žijí značnou část života uvnitř kolonie, tedy v tmavém prostředí. Jejich odezva na světelné záření je zcela opačná, a již za osvětlení s intenzitou standardně osvětleného lidského obydlí vykazují výraznou negativní fototaxi (Ferreira & Scheffrahn 2011).

Dospělci trásnenek vykazují výraznou pozitivní fototaxi i v případě světla s velmi nízkou intenzitou záření, srovnatelnou se svitem Měsíce za úplňku (Murata et al. 2018b). Intenzita světelného záření také ovlivňuje jejich schopnost vnímání barev. Při nižší intenzitě záření (< 40 lx) dospělci preferují výrazně kratší vlnové délky (< 520 nm), zatímco při vyšší intenzitě vyzařovaného světla (60-100 lx) se posouvá jejich citlivost k žlutému spektru (590 nm) (Yang et al. 2015). Patrně se jedná o efekt způsobený adaptací na změnu intenzity záření během dne, a tím přizpůsobení i načasování jednotlivých typů chování.

Se zvyšující se intenzitou světelného záření se u světelných zdrojů objevuje i více jedinců stejnokřídlého hmyzu (Homoptera). Molice vykazují nejsilnější fototaxi již u hodnot intenzity osvětlení 40-60 lx. Při intenzitě 20 lx je ale míra jejich pozitivní fototaxe pořád výrazná, ve srovnání s přirozeným osvětlením během noci (Jeon et al. 2014, Kim et al. 2012). V případě vyšší intenzity ozáření vegetace může výrazně ovlivnit úspěšnost nalezení vhodné hostitelské rostliny. Na takto ozářených ploškách často sedají na rostliny, které nejsou schopny přijímat (Nissinen et al. 2008). U mšic (Aphidoidea) byl pozorován pokles populační hustoty po dlouhodobém vystavení osvětlení typickému pro standardně osvětlenou ulici (30 lx). Tento pokles je vysvětlován kaskádovým efektem přes sníženou biomasu jejich hostitelských rostlin vlivem dlouhodobého světelného znečištění (Sanders et al. 2015).

Plošnice, zejména skupiny s dobrými disperzními schopnostmi, jako jsou například mohutnatky (Belostomatidae) jsou atrahovány z velkých vzdáleností do netypických habitatů vlivem použití silných světelných zdrojů (650 lx 1,5 m nad povrchem v případě osvětlení tenisových kurtů (Yoon et al. 2010). Na rozdíl od nich dravé zákeřnice vykazují výrazně negativní fototaxi již u osvětlení s malou intenzitou záření (0,06 mikroW/cm²) (Reisenman & Lazzari 2006).

U brouků byl prokázán vliv intenzity osvětlení na řadu aspektů jejich chování, kondice a reprodukce. Přítomnost jakéhokoliv osvětlení – ve srovnání s přirozenými podmínkami během noci – vede u potěmňovitých brouků k výraznému snížení tělesné kondice (Quintanilla-Ahumada et al. 2021). V přítomnosti světelného znečištění se dospělci méně pohybují, tedy v noci naleznou méně potravy a tím klesá i jejich hodnota celkového metabolismu. Změna pohybové aktivity byla pozorována i u střevlíkovitých brouků, a to v podmínkách při použití světelného zdroje o síle 600 W (což odpovídá hodnotě světelného toku 12 W/m² u úrovně povrchu). Tuto změnu jejich lokomoce lze ale pozorovat již u osvětlení s velmi nízkými hodnotami intenzity (<0,1 W/m²; Allema et al. 2012). Malou míru pozitivní fototaxe vykazují již za nízkých hodnot intenzity osvětlení (1,2 lx), přičemž silnější intenzita záření (35 lx) může být atraktivní pro značnou většinu jedinců v populaci (Eccard et al. 2018).

U slunéčkovitých brouků byl prokázán vliv různé intenzity osvětlení na změny v reprodukčním chování dospělců. Se zvyšováním intenzity osvětlení (až do hodnot 1500 lx) docházelo ke zkrácení celkové doby kopulace, ovšem také k růstu počtu kopulací. Lze tedy předpokládat, že vyšší míra osvětlení zapříčiní méně kvalitní oplození vajíček – intenzita osvětlení přes 1200 lx ovlivnila také plodnost vajíček. Zdárný vývoj vajíček, jako nejméně chráněného stadia v životním cyklu brouků před různými formami radiace, může být pravděpodobně značně ovlivněn v prostředí s vyšší mírou intenzity osvětlení (Wang et al. 2014).

Jak již bylo řečeno v předešlé kapitole, světluškovití brouci, vzhledem k složitosti jejich světelné komunikace, jsou značně citliví na kvalitu světelných podmínek prostředí. Obdobně je tomu tak i v případě intenzity záření. Již hodnoty velmi nízké intenzity osvětlení (0,09-0,3 lx; tedy hodnot výrazně pod hodnotami přirozeného osvětlení za plného úplňku Měsíce) vyvolávají u samců značné obtíže v detekci světelných signálů samic (Bird & Parker 2014). I za takto nízkých hodnot intenzity osvětlení dokážou světlušky selektovat místa s optimální nižší mírou ozáření (0,01-0,17 lx; Picchi et al. 2013). Pokud je vyzařované světlo z pouličního

osvětlení složením vlnových délek blízké vyzařovanému světlu samičkami, jsou samci mnohem více lákáni k umělému, ale intenzivnějšímu osvětlení ($5,11 \text{ cd.m}^2$, cca 5 lx ve vzdálenosti jednoho metru; vs. samičí záření $3,8 \text{ cd.m}^2$, cca 4 lx ve vzdálenosti jednoho metru). Pozitivní fototaxe samečků byla dokonce pozorována ještě za intenzity osvětlení $2,52 \text{ cd.m}^2$, což odpovídá přibližně $2,5 \text{ lx}$ ve vzdálenosti jednoho metru (Booth et al. 2004). Je tedy pravděpodobné, že zelené světlo s vyšší intenzitou záření, než má světlo samiček bude pro samce představovat supraoptimální stimul, díky němuž může být značně negativně ovlivněn reprodukční úspěch celé populace. Pokud se v pouličním osvětlení použije časté bílé světlo s výrazným zastoupením záření v modré části spektra, dochází u samců k výraznému poklesu v schopnosti najít samičky již u záření o intenzitě přibližně 2 lx (Steward et al. 2020). Lze také předpokládat, že intenzita světelného záření bude mít na světelnou komunikaci světlušek výraznější efekt, jako kvalitativní složení světla (Van den Broeck et al. 2021). Síla této reakce na intenzitu světelného záření se může výrazně lišit mezi jednotlivými druhy světlušek. Pro některé druhy může mít intenzita záření v podobě jasně osvětlené ulice (57 lx) jen nepatrný význam, u jiných může dojít k výraznému snížení frekvence emitovaných světelných signálů (Firebaugh

& Haynes 2017). Za těchto hodnot intenzity osvětlení se navíc starší larvy některých druhů spíše drží v substrátu, než by se aktivně šířili do okolí. Následně tím dochází k ovlivnění celkové disperze populace, což vede k trvalejšímu výskytu dospělců na zasažené lokalitě, se všemi negativními efekty popsány výše (Owens & Lewis 2021b).

Dvoukřídle hmyz je z hlediska vlivu intenzity osvětlení studován poměrně málo, poznatky pochází vesměs z experimentů na modelové skupině octomilek (*Drosophilidae*). Záření s malou hodnotou intenzity (1 lx) výrazně negativně ovlivňuje četnost ovipozic a počet nakladených vajíček (McLay et al. 2017). Míra intenzity záření má i významný vliv na synchronizaci jedinců během líhnutí. Umělé osvětlení s intenzitou 50 lx , ale i 5 lx způsobuje značnou nepravidelnost v líhnutí dospělců (Thakurdas et al. 2009). Zejména v případě krátce žijících jedinců může toto vychýlení od synchronního líhnutí vést k snížení celkovému reprodukčnímu úspěchu populace. Nízké hodnoty intenzity záření mohou také ovlivnit i průběh diapauzy. Změna intenzity záření v přírodních podmínkách patří mezi prvotní stimuly k správnému načasování jejího začátku. Pokud vlivem trvalého osvětlení prostředí dojde k prodloužení aktivity jedinců, může to vést k velmi negativním dopadům na jejich životaschopnost. U komárů byl tento efekt pozorován u osvětlení s intenzitou 4 lx (Fyie et al. 2021), u masařek (*Sarcophagidae*) došlo k narušení načasování dormance dokonce za velmi nízkých hodnot intenzity ($0,01 \text{ lx}$; Mukai et al. 2021).

V případě nočních motýlů bylo experimentálně zjištěno, že atrakční rádius emitovaného světla ze světelného zdroje nemusí být nikterak široký. Tato otázka vyvstala z potřeby vhodně provedených inventarizačních průzkumů, při kterých je nutné kvantitativní metodou lákáním na světlo stanovit diverzitu konkrétního místa bez nevhodné atraktance jedinců ze vzdálenějšího okolí. Nejčastěji jsou tyto experimenty prováděny metodou vypouštění značených jedinců v různých vzdálenostech od studovaného světelného zdroje. Atrakční rádius se stanovuje jako míra návratu 50% vypuštěných jedinců z daného bodu (Beck & Linsenmair 2006). Zjištění těchto experimentů bylo poměrně překvapivé. Atrakční rádius tak mobilní skupiny, jako jsou lišajové, byl u 125 W rtuťové výbojky, dříve používané spíše k lákání

z delších vzdáleností, pouze 30 metrů (Beck & Linsenmair 2006), pro menší druhy dokonce jen 3 metry (Baker & Sadovy 1978). Experimenty se světly srovnatelnými s bodovými světly přenosných světelných lapačů, cílících na diverzitu nejbližšího okolí, přinesly podobné výsledky. Míra atraktivity se ale lišila mezi jednotlivými skupinami velkých nočních motýlů. Atrakční rádius 6 W aktinické zářivky byl pro píďalky a čeleď *Erebidae* stanoven na 30 metrů, pro můry a menší *Erebidae* pouze na 10 m (Merckx & Slade 2014, van Grunsven et al. 2014). V případě silnější 15 W UV zářivky nebyl rozdíl mezi čeledi pozorován, atrakční rádius činil ale bez ohledu na skupinu pouze 10 až 15 metrů (Truxa & Fiedler 2012). Z těchto experimentů je zřejmé, že bodová světla, srovnatelná s pouličním osvětlením, přitahují dospělé motýly prolétávajících ve vzdálenosti několika desítek metrů od zdroje světla. Nejvíce jedinců je přilákáno z nejbližší vzdálenosti (Merckx & Slade 2014). Nejvýraznější atraktivita světelného zdroje byla pozorována při nasvícení ploch na 40 lx (Yang et al. 2012).

Bez ohledu na to, zda světlo působí přímo v bezprostředním okolí světelného zdroje, nebo jako difuzní světlo v krajině, ovlivňuje jeho intenzita zejména jejich reprodukční chování.

Hrotnokřídleci (*Hepialidae*) patří mezi skupiny s výrazně soumráční aktivitou. Během tohoto období dosahuje přirozená intenzita záření 2-10 lx a obsahuje spíše kratší vlny. Tyto podmínky využívají hrotnokřídleci ke vzájemné komunikaci pomocí vizuálních znaků. Jejich křídla nesou světlé skvrny, které jsou viditelné nejlépe ve světelných podmínkách během soumraku. Pouze v tomto krátkém časovém okně (s benefity jako je nízká míra predace) dochází k vzájemnému vyhledávání partnerů (Andersson et al. 1998). Jakékoliv rušivé osvětlení s vyšší intenzitou by mohlo výrazně ovlivnit jejich schopnost reprodukce. Pozdější soumráční aktivitu vykazuje i řada bekyně. V jejich případech již velmi malá intenzita osvětlení (0,4 lx) může významně ovlivnit správné načasování začátku aktivity (Chen et al. 2016).

Vysoká intenzita osvětlení má výrazně negativní vliv na pohlavní chování řady dalších skupin nočních motýlů (Nemec 1969). Samice píďalek ztrácely schopnost kopulace a tlumily produkci pohlavních feromonů již při osvětlení 10 lx (Van Geffen et al. 2015a). V případě můr mělo trvalé působení světla o intenzitě 17 lx vliv na složení samičích pohlavních feromonů, což vedlo k neschopnosti samic přilákat samce (van Geffen et al. 2015b). Světlo s intenzitou 50 lx negativně ovlivnilo vlastní množství produkovaných pohlavních feromonů (Li et al. 2015). Další vzrůstající intenzita osvětlení (až k 300 lx) může vést k postupnému utlumení samičího vábení (Sower et al. 1970). Takto silné světelné znečištění snižovalo pohlavní aktivitu samců a plodnost samic i u obalečů (Li et al. 2019).

Pro řád blanokřídlého hmyzu jsou dostupné poznatky ze skupin parazitoidů. V prostředí s velmi silnou intenzitou světelného znečištění (5000 lx) bylo pozorováno prodloužení trvání aktivity dospělců lumků (*Ichneumonidae*). Tato náhle zvýšená aktivita vedla v důsledku ke snížení jejich celkové životnosti a plodnosti (Sahin & Ozkan 2007).

Ostatní skupiny členovců jsou z hlediska vlivu intenzity osvětlení studovány jen velmi málo. V případě pavouků se jedná spíše o poznatky o selekci osvětlených míst s ohledem na dostupnost potravy. Z korýšů (*Crustacea*) má intenzita záření vliv na výskyt terestrických stejnonožců (*Isopoda*). Pod zdroji pouličního osvětlení se vyhýbají místům s vyšší mírou intenzity osvětlení (>3 lx, s maximem intenzity záření 120 lx) (Duarte et al. 2019).

Umělé osvětlení prostředí a jeho doprovodní efekty mohou paradoxně vytvářet i podmínky, ze kterých jiné skupiny bezobratlých živočichů mohou profitovat. U terestrických měkkýšů, především plzáků (Arionidae) bylo pozorováno nápadné zvýšení populační hustoty přímo pod zdroji pouličního osvětlení (120 lx; Van Grunsven et al. 2018). Na takto osvětlených místech lze očekávat nižší výskyt přirozených nepřátel, např. střevlíkovitých brouků. Zároveň zde nachází i dostatek potravy v podobě značného počtu uhynulých jedinců hmyzu, jež zahynuli přímo u zdroje světla.

Ptáci

Vliv na aktivitu

Zvýšená míra urbanizace vede u ptáků k modifikaci jejich chování, včetně zahájení ranní vokalizace (Marín-Gómez 2022, Sánchez-González et al. 2021). Vystavení umělému osvětlení během noci vede u mnoha ptačích druhů ke změnám v hlasové aktivitě (Da Silva et al. 2015). Miller (2006) zjistil, že šíření umělého nočního osvětlení může silně ovlivňovat hlasovou aktivitu drozdů stěhovavých (*Turdus migratorius*) na úrovni populace. Populace drozdů obývajících oblasti s velkým množstvím umělého světla často začínaly ranní vokalizace již během noci. Doba zahájení vokalizace vzhledem k občanskému soumraku byla pozitivně korelována s množstvím umělého světla přítomného během noci. Populace drozdů v oblastech s malým nebo téměř žádným umělým osvětlením téměř nikdy nezahájily hlasovou aktivitu během noci, ale řídily se nástupem občanského soumraku. Podobně tomu ukazují také zjištění Da Silvy a Kempenaerse (2017), že pěvci začínající běžně vokalizovat velmi časně, tedy evropské červenky (*Erithacus rubecula*) a kosí obecní (*Turdus merula*), zahájili hlasovou aktivitu ve Finsku za svítání dříve spolu s nárůstem přirozeného světla, bez dalších účinků umělého nočního osvětlení. Naproti tomu druhy pozdějších pěvců, jako jsou sýkora koňadra (*Parus major*), sýkora modřinka (*Cyanistes caeruleus*) a pěnkava obecná (*Fringilla coelebs*), zahajovaly ranní vokalizace podobně vzhledem k východu slunce v průběhu sezóny a umělé noční osvětlení na ně mělo podobné účinky ve všech zeměpisných šířkách. Také Da Silva et al. (2014) zjistili, že umělé noční osvětlení vede u ptáků k dřívějšímu začátku vokalizace za svítání a za soumraku. Tento efekt byl nejsilnější při vyšších intenzitách světla. Gillings a Scott (2021) měřili hlasovou aktivitu drozdů při noční migraci ve vztahu k umělému osvětlení v noci. Míra vokalizace byla až pětkrát vyšší v nejjasnějších městských oblastech ve srovnání s tmavšími rurálními oblastmi, což naznačuje silný fototaktický účinek umělého světla na stěhovavé drozdy. Na rozdíl od prací potvrzujících navýšení hlasové aktivity účinkem umělého osvětlení, Dickerson et al. (2022) zkoumali vliv přirozeného a umělého světla na noční hlasovou aktivitu pávíka černobílého (*Rhipidura leucophrys*) a prokázali, že se noční vokalizace u pávíků zvyšovala s intenzitou měsíčního svitu v temnějších venkovských oblastech, ale klesala v oblastech s vysokou září oblohy. Kromě toho byla u pávíků zjištěna o polovinu nižší pravděpodobnost, že budou zpívat v noci v přítomnosti lokalizovaných zdrojů světla, jako jsou veřejné osvětlení v městských a venkovských oblastech. Experimentální zavedení veřejného osvětlení do původně tmavé oblasti potvrdilo tento vztah: frekvence zpěvu pávíka poklesla při rozsvíceném světle, a po odstranění veřejného osvětlení se opět vrátila na původní hodnoty.

Všechna tato zjištění poukazují na to, že míra a také intenzita umělého osvětlení jsou důležité při zvažování dopadu světelného znečištění, protože měsíční světlo, záře oblohy a lokalizované zdroje umělého světla mají různé účinky na noční chování ptevců.

Dalším efektem světelného znečištění na ptáky je změna jejich spánkové aktivity. U sýkor koňader bylo pozorováno, že jedinci vystaveni umělému osvětlení vlétali do hnízdních budek a usínali později, probouzeli se a opouštěli hnízdní budky dříve a celkové množství spánku u nich bylo nižší. Oproti tomu tyto změny ve spánkové aktivitě nebyly pozorovány u modřinek vystavených umělému osvětlení. Dva blízce příbuzné druhy tedy reagují na umělé osvětlení během noci odlišně, zatímco jejich spánková aktivita v tmavých podmínkách bez světelného znečištění je velmi podobná (Sun et al. 2017). Liu et al. (2019) zkoumali vliv umělého světla s různými spektry a intenzitami na nástup spánku u kruhoček stříbrných (*Zosterops lateralis*). Bílé, oranžové a žluté světlo významně zpomalilo nástup spánku, zatímco modré či zelené světlo způsobilo jen mírnou interferenci. Čím delší byly vlnové délky světla, tím déle byl nástup spánku oddalován. Co se týče intenzity světla, zjistili Raap et al. (2017), že účinky umělého osvětlení na spánek u volně žijících ptáků se téměř nelišily mezi vysokou a nízkou intenzitou světla. Umělé světlo narušilo spánkovou aktivitu ptáků především snížením celkové délky spánku (≈ -40 min), protože se zvířata probudila dříve (≈ -24 min). Jedinci spali méně, protože se budili téměř o tři čtvrtě hodiny dříve a opouštěli budku dříve. Podíl času, který strávili spánkem během noci, se snížil (asi o 5 %). Avšak ve srovnání s přirozenými tmavými podmínkami byl nástup spánku zpožděn vysokou (3 lx), ale nikoli nízkou (1,6 lx) intenzitou umělého osvětlení. Podobně tomu zjistili také Ren et al. (2022), že umělé osvětlení u ptáků hlavně oddaluje nástup spánku, zkracuje jeho celkovou dobu trvání a zvyšuje frekvenci probouzení. Doba probuzení byla opožděná při vyšší intenzitě světla, zatímco při tlumeném světle byla urychlena. V největší míře to vedlo k tříhodinovému zpoždění nástupu spánku, 25% redukci spánku a 0,31x vyššímu počtu nočních probouzení za hodinu. Účinek světelných spekter seřazených od největšího po nejmenší rušivý vliv byl zjištěn u zeleného, žlutého či bílého až po modré či oranžové světlo; parametry spánku byly ovlivněny silněji u vyšší intenzity světla. Tato zjištění jsou v souladu s výsledky De Jong et al. (2017), kteří zkoumali vliv barvy a intenzity umělého světla na vzorce denní aktivity u sýkor modřinek. Zatímco při vyšším rozsahu intenzit byly účinky bílého a zeleného světla srovnatelné; při nižších intenzitách mělo zelené světlo méně rušivý účinek na denní rytmy sýkory modřinky ve srovnání s bílým světlem. Rozsah těchto rušivých vlivů lze zmírnit modulací spektrálních charakteristik a intenzity venkovního osvětlení, což je v současnosti možné použitím LED osvětlení. Yorzinski et al. (2015) uvádí, že světelné znečištění významně zvyšuje noční bdělost u pávů. Pávi preferovali nocoviště mimo stanoviště s vysokou úrovní umělého osvětlení, ale nevykazovali výraznou preferenci pro nocoviště bez umělého osvětlení nebo jen s nízkou úrovní umělého osvětlení. Také u mořských ptačích druhů byl zjištěn vliv umělého světla na jejich aktivitu. Dupuis et al. (2021) odhalili prostorové variace v interakcích mezi buňákem ledním (*Fulmarus glacialis*) a rybolovem. V místech s vyšší mírou rybolovu trávili buňáci během noci více času hledáním potravy a méně času odpočinkem, což silně naznačuje, že zdroje umělého osvětlení zvyšují aktivitu ptáků kolem rybářských plavidel.

Umělé osvětlení v noci transformuje noční krajinu po celém světě a způsobuje světelné znečištění ovlivňující ekosystémy nesčetnými způsoby. Jedním z nich je změna nebo posouvání vzorců aktivity, do značné míry synchronizovaných se světelnými podněty. Amichai a Kronfeld-Schor (2019) pozorovali u kolonií rorýsů obecných (*Apus apus*) vystavených nižší intenzitě umělého osvětlení, že jejich aktivita ustávala kolem západu slunce, ale s intenzivnějším osvětlením ustávala jejich aktivita později. Vystavení umělému osvětlení v noci může také způsobit, že ptáci budou večer hledat potravu déle než jedinci obývající tmavší oblasti (Russ et al. 2015). Například u drozdce mnohohlasého (*Mimus polyglottos*) bylo na lokalitách ovlivněných světelným znečištěním pozorováno krmení mládřat po setmění. Průměrná doba po západu slunce, kdy drozdci pokračovali v krmení mládřat, pozitivně korelovala s průměrnou úrovní osvětlení v blízkosti hnízda (Stracey et al. 2014). Stejně tak u brodivých ptáků byl zjištěn stimulační vliv umělého osvětlení na noční hledání potravy, ale na druhou stranu je světlo může přitahovat do degradovaných oblastí blízko městských center a potenciálně tak zvyšovat riziko predace (Santos et al. 2010).

Vliv na reprodukční a migrační chování

Vlaštovka obecná (*Hirundo rustica*) si staví hnízda na místech s různou intenzitou světelného znečištění a vykazuje vysokou toleranci k umělému osvětlení, což může vysvětlovat, proč se tomuto druhu daří v městských oblastech. Vlaštovky nyní hnízdí téměř výhradně na lidských budovách, které jim poskytují ochranu před přírodními vlivy, jako je nepříznivé počasí nebo predátoři (Speich et al. 1986). Zvýšená bdělost a zkrácená doba spánku způsobené silným světelným znečištěním však mohou mít na vlaštovky dlouhodobé negativní dopady na funkční vlastnosti jedinců (Wang et al. 2021). Ptačí druhy hnízdící v dutinách budují na obranu před predací hnízda s tenkým vstupem, aby byla zvýšena vzdálenost od vstupu do dutiny hnízda. Úzký tvar hnízda může také snížit vystavení umělému osvětlení v noci. Holveck et al. (2019) sledovali umístění hnízda městských sýkor koňader a zjistili, že se mění s blízkostí ke zdroji umělého osvětlení. Sýkory stavěly užší hnízda v hnízdních budkách různých velikostí v reakci na zvyšující se intenzitu nočního osvětlení. Ve velkých hnízdních budkách byl tvar hnízda také užší, pokud se nacházely v blízkosti veřejného osvětlení.

Také stěhovaví ptáci mohou být silně ovlivněni světelným znečištěním, jelikož se při načasování migrace spoléhají na funkci extra-retinálních fotoreceptorů a hodnocení fotoperiodických podnětů (Kumar et al. 2018). Smith et al. (2021) zjistili, že načasování jarní migrace jiříčky modrolesklé (*Progne subis*), která je kritická pro přežití a reprodukční úspěch tohoto druhu, je negativně korelováno s mírou světelného znečištění na zimovištích. Posuny v migrační fenologii vlivem světelného znečištění mohou zapříčinit nesoulad mezi migrací a dostupností kořisti, což může mít přímý dopad na kondici jedinců a může být zvláště ohrožující pro druhy vykazující prudký populační pokles, jako právě některé hmyzožravé stěhovavé ptačí druhy. Zjištění La Sorte et al. (2017) také naznačují, že městské zdroje umělého osvětlení mohou významně ovlivnit migrační chování ptáků a vyzdvihují nutnost lépe porozumět dopadům světelného znečištění na populace stěhovavých ptáků.

Savci

Netopýři rodu *Myotis* negativně reagují již na místa osvětlená intenzitou <1 lx (Azam et al. 2018). Vysokotlaké žluté sodíkové a bílé LED osvětlení odrazuje lesnímu prostředí přizpůsobené druhy dokonce už při nízké intenzitě kolem 0.1 lx (Stone et al. 2009, 2012). Ve větším krajinném kontextu byla celková míra nočního osvětlení pozitivně korelována s aktivitou netopýřů rodu *Pipistrellus* s výjimkou *P. pipistrellus*, který se krajinným celkům s velkou mírou ozáření vyhýbal (Barré et al. 2022). Pokusné utlumení pouličního osvětlení v závislosti na nočním provozu na 1/3 intenzity v době bez provozu mělo za následek menší množství přilákaného hmyzu a odpovídající pokles aktivity druhů, které jsou za tímto zdrojem potravy u pouličních lamp přitahovány a nevyhýbají se osvětleným místům (rod *Pipistrellus*). Pokles intenzity osvětlení však ani při takovém utlumení není dostatečný, aby se těmto místům nevyhýbaly na osvětlení citlivé druhy, např. zástupci rodu *Myotis* (Bolliger et al. 2020). Studie hodnotící letovou aktivitu netopýřů v závislosti na intenzitě osvětlení v širším krajinném kontextu ukázala, že aktivita může u některých světlo tolerujících druhů růst jen po určité prahové intenzitě (v případě *Pipistrellus nathusii* cca $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$), v oblastech s vyšším osvětlením však opět klesá (Laforge et al. 2019).

Studium vlivu pokusného utlumování intenzity pouličního LED osvětlení ve 4 úrovních (100 %, 75 %, 50 % a 25 %) na skupinu druhů, kteří kolem světél loví (*Pipistrellus pipistrellus*) a kteří se osvětleným plochám vyhýbají (*Myotis* spp.) ukázalo, že při čtvrtinové intenzitě již nebyl pozorován žádný efekt osvětlení na letovou aktivitu zástupců ani jedné skupiny (Rowse et al. 2018).

Mnoho studií také ukázalo, že savci s noční aktivitou (netopýři, drobní hlodavci, šelmy apod.) reagují na měsíční světlo tím, že snižují svou aktivitu a překonávají pouze kratší vzdálenosti, což v konečném důsledku vede i k nižší spotřebě potravy. Umělé světlo podobné intenzity jako měsíční světlo způsobilo, že hlodavci v experimentálních arénách snížili svou aktivitu, pohyb, a spotřebu potravy (Brillhart & Kaufman 1991, Kramer & Birney 2001, Vásquez 1994). Tyto experimenty používaly jak zářivky, tak žárovky k simulaci měsíčního světla, přičemž hlodavci reagovali na podněty odpovídající poloviční intenzitě měsíčního světla (0,1 lx) i úplňku (0,3 lx). Umělé noční osvětlení o intenzitě podobné měsíčnímu světlu tedy snižuje aktivitu a pohyb mnoha nočních živočichů, zejména těch, kteří se spoléhají na úkryt, aby snížili pravděpodobnost predace při nočním hledání potravy. Osvětlení vozovek v USA je navrženo tak, aby osvětlovalo povrch vozovky na úrovni minimálně 3 lx, obvykle však 4-17 lx v závislosti na typu vozovky. Projíždějící auta i sloupy s pouličním osvětlením tedy řádově převyšují prahové hodnoty světla, které již vede ke změně chování zvířat.

Naneštěstí jen málo studií se zabývalo vlivem umělého osvětlení na dobu strávenou hledáním potravy v přírodních populacích. Během novoluní bylo zjištěno, že severoameričtí křečci rodů *Dipodomys* a *Peromyscus* nasbírali vlivem světél benzinových pump v průměru o 21 % méně semen než v místech neosvětlených. Budoucí výzkum by měl proto určit funkční vztah mezi podílem zkonsumované potravy (nebo jinými proměnnými souvisejícími s fitness zvířat) a osvětlením potravních stanovišť. Měl by také stanovit prahovou hodnotu osvětlení, pod níž se negativní účinek osvětlení již neprojeví. Přestože osvětlení sportovních stadionů, čerpacích stanic a některých průmyslových areálů je jasnější než osvětlení na dálnicích,

je osvětlení silnic pravděpodobně nejjasnějším osvětlením, které ovlivňuje rozsáhlé oblasti volné přírody. Tudíž výzkum zaměřený na intenzitu a výšku osvětlení, které je předepsáno nebo realizováno podél dálnic, a jeho účinky v krajině v krajinném kontextu, by byl velmi užitečný.

Zatímco zahraniční výzkumy prokázaly, že pouliční osvětlení může ovlivnit chování řady živočichů, jejich reprodukční úspěch a přežívání, doposud existuje jediná studie, která se věnuje změnám celých společenstev (Davies et al. 2012). Její autoři ukázali, že složení společenstev bezobratlých je pouličním osvětlením významně ovlivňováno a vede k nárůstu počtu dravých a mrchožravých druhů v jasně osvětlených společenstvech. To ukazuje na skutečnost, že pouliční osvětlení mění prostředí na vyšších trofických úrovních, než se doposud předpokládalo.

2.3.3 Orientace vyzařovaného světelného záření

Úhel a směřování přímého světelného záření (světelného kuželu) vyzařovaného ze světelného zdroje (tedy jeho orientace) patří mezi nejméně studované charakteristiky světla ve vztahu k vlivu ALAN na živočichy. Veškeré poznatky jsou spíše aplikačního charakteru, vycházející ze studií šíření světla do okolního prostředí a vlivu různých parametrů světla (především intenzita záření) na živočichy. Navíc tento parametr silně závisí na sledovaném taxonu. Vhodně orientovaný a intenzivnější světelný kužel může značně utlumit negativní efekt okolních světelných zdrojů. V případě, že bude kužel směřován do atraktivního a kvalitního prostředí (u ve vodě se vyvíjejících jepic na vodní hladinu), může být přitahován hmyz do těchto míst cíleně naváděn od nevhodných zdrojů světelného znečištění v okolí. V konečném důsledku to může vést ke správné lokalizaci reprodukce (Egri et al. 2017). U těchto opatření je ale potřebné postupovat opatrně. Vlastní světelný kužel může představovat řadu negativních efektů pro další necílové skupiny živočichů. Obecně je nejvhodnější, aby byl emitovaný světelný kužel co nejúžší, alespoň v místech výskytu extrémně citlivých skupin, jako např. světlušek (Steward et al. 2020). Už na vzdálenost kratší než 20 metrů od zdroje světla výrazně klesá schopnost samců těchto brouků nalézt samice.

Správná orientace světelného kuželu může přispět i k potřebnému snížení celkového difuzního šíření světla na noční obloze (*skyglow*). Některé skupiny brouků, např. vrubouni (Scarabaeidae) využívají pro orientaci během noci nebeský kompas (Foster et al. 2021), případně se orientují pomocí vnímání odraženého polarizovaného světla (Dacke et al. 2004). Přílišné šíření světla v jejich prostředí tak může vést k citelnému zhoršení orientace v prostoru. U jiných skupin, např. rovnokřídlého hmyzu může ozářená obloha nad velkými městy výrazně vychýlit směřování migračních tras (Tielens et al. 2021). Zcela nevhodné je tedy v těchto případech použití světelných zdrojů se širokým světelným kuzelem, emitujícím světlo nahoru do atmosféry.

2.4. Vliv světelného znečištění na interakce mezi taxony a trofickými úrovněmi

2.4.1. Vliv světelného znečištění na rostlinnou složku ekosystémů

Vnímání světelného záření rostlinami

Podobně jako ostatní organismy, i rostliny jsou dokonale přizpůsobeny stabilnímu režimu 24 hodinových cyklů světla a tmy a (mimo rovníkové oblasti) pravidelným sezónním změnám v délce dne a noci. Rostliny jsou na světelných podmínkách závislé pomocí dvou hlavních skupin reakcí, kdy: 1. světlo je zdrojem energie, a 2. světlo je informací k modulaci růstu, vývoje a metabolismu.

Světlo jako zdroj energie.

Pro rostliny jakožto fotoautotrofní organismy světlo zajišťuje zdroj energie (která je fixována do organických sloučenin sledem reakcí fotosyntézy). K tomuto účelu rostliny vyvinuly karotenoidy a chlorofylové pigmenty, pomocí kterých využívají energii světelného záření k přeměně oxidu uhličitého na sacharidy (např. sacharózu). Tyto pigmenty mají specifická absorpční spektra mezi 400-700 nm (oblast známá jako fotosynteticky aktivní záření, PAR), a proto rostliny mohou fotosyntetizovat pouze v tomto spektru.

Světlo jako zdroj informací.

Světlo je pro rostliny i nejdůležitějším zdrojem informací o okolním prostředí – pomocí nefotosyntetických fotoreceptorů vnímající světelné podmínky a regulují fotomorfogenezi a modulují mnoho fyziologických procesů. Do této kategorie patří i velká skupina reakcí, kde světlo u rostlin hraje zásadní roli upravující denní i sezónní vzorce chování (fotoperiodismus), protože světlo je nejdůležitějším zdrojem informací o průběhu dne či vegetačního období. Hlavní informace z okolí ohledně kvality, intenzity, směru a fotoperiody dopadajícího světla jsou rostlinou získávány pomocí fotoreceptorů, které jsou charakterizovány a dále děleny na základě schopnosti vnímat světlo o určité vlnové délce. Mezi hlavní rodiny fotoreceptorů patří: 1. fytochromy absorbující především červené záření R (640-700 nm) a vzdálené červené záření FR (700-740 nm), 2., 3. a 4. kryptochromy, fototropiny a nedávno objevené ZTL/FKF1/LKP2 proteiny, které absorbují ultrafialové (UV-A) a modré B (425–490 nm) záření, 5. recentně objevený fotoreceptor UVR8 pro UV-B záření. Stimulace fotoreceptorů spouští různé komplexní signální dráhy, které zprostředkovávají širokou škálu funkcí v rostlině. Kryptochromy se například účastní regulace klíčení semen, vývoje rostlin a opravy DNA. Fytochromy – často spolu s kryptochromy – se podílejí na regulaci cirkadiánních hodinových odpovědí, vyhýbání se stínu („shade avoidance“) a podílejí se na načasování fenologických událostí, jako je klíčení, kvetení a rašení. Fototropiny hrají důležitou roli ve fototropismu, pohybu rostlin vzhledem ke zdroji světla. Důležitost informační funkce světla pro rostliny je zřejmá už z existence těchto pěti skupin známých fotoreceptorů, které zprostředkovávají vnímání světelných podmínek v červené, modré a ultrafialové části spektra (shrnutí dle Weller & Kendrick 2015).

Z výše uvedeného vyplývá, že jednoznačné hodnocení dopadu světelného znečištění na rostliny může být zdánlivě ztíženo komplexností vztahu rostlina – světlo. Čím se ALAN liší od denního světla? Existují různé aspekty ALAN, které jej odlišují od denního světla a ovlivňují, jak je vnímáno rostlinami. Prvním aspektem je realizovaná úroveň osvětlení emitovaného zdroji ALAN. Zatímco nefiltrované přímé sluneční světlo může dosáhnout úrovně

přes 100 000 luxů nebo lumenů na metr čtvereční, moderní LED pouliční osvětlení může v noci poskytovat pouze osvětlení zhruba 5-30 luxů (Bennie et al. 2016). Nízké hladiny ozáření způsobené zdrojem světelného znečištění většinou neposkytují dostatek energie, aby mohla být významně stimulována fotosyntéza (a bylo tedy možné uvažovat o nějakém „přilepšení“ ve smyslu výživy), naproti tomu informační funkce světla je silně narušována již při nízkých ozářeních a tím je ovlivňováno správné fungování procesů závislých na této funkci světla. Narušováním přirozeně tmavého prostředí v noci (stíráním rozdílu mezi dnem a nocí) rostlina dostává de facto chybnou informaci o průběhu dne či vegetačního období. Tuto chybnou informaci díky faktu, že světlo je evolučně velice silně ukotvený a stabilní vnější faktor, pak není možno plně kompenzovat monitorováním stavu jiného faktoru, např. průběhu teplot (méně stabilní faktor, obvykle modulační).

Dostupnou literaturu o vlivu ALAN na rostliny a systémy s rostlinnou složkou lze rozdělit do několika hlavních skupin: 1. přímý vliv ALAN na základní fyziologické procesy rostlin s denní rytmiticitou, jako je fotosyntéza, transpirace / hospodaření s vodou, obranné a ochranné reakce rostlin a dlouhodobější vývojové změny jedinců daného druhu (urychlení kvetení, změny v nástupu rašení nebo senescence apod.), 2. Změny či posuny ve složení populací rostlinných společenstev, a 3. změny či posuny ve vztazích rostlin a živočichů, případně dalších skupin organismů (např. symbiózy). V následujících odstavcích se s pomocí tohoto hrubého dělení zaměříme především na publikované příklady, z prvních dvou skupin detailněji.

Přímý vliv světelného znečištění – vliv světelného znečištění na fyziologické procesy a cirkadiální rytmy rostlin.

Je poměrně překvapivé (podobně uvažují i autoři přehledových článků, např. Bennie et al. 2016, Singhal et al. 2019, Heinen 2021), že lze najít pouze relativně málo primárních prací, které aplikují jinak dlouhodobě a dobře známé a prozkoumané projevy vlivu světla na rostliny a na výzkum umělého světla v prostředí. Jsou to totiž již učebnicové znalosti, které ukazují, jak relativně malé hladiny světla a/nebo krátké intervaly ozáření mohou být efektivní v ovlivnění či dokonce zvrácení fotoperiodické odpovědi rostlin – těchto efektivních hladin světla je v uměle osvětlovaných prostředích běžně dosahováno. Navíc vysoký poměr záření v R oblasti ku FR oblasti u většiny starších typů venkovního osvětlení (ve srovnání se slunečním světlem) je činí zvláště účinnými při narušení správné detekce fotoperiody prostřednictvím fytochromové dráhy, zatímco LED osvětlení bohaté na modrou oblast, které se rychle zavádí v mnoha regionech, silně vyzařuje v oblasti spektra, na kterou jsou citlivé kryptochromy a fototropiny.

Cirkadiální hodiny rostlin a fotoperiodické reakce

Podobně jako u živočichů, světelné znečištění je největším nebezpečím pro správnou synchronizaci přirozených rytmů rostlin s vnějším prostředím. Tyto rytmy jsou řízeny vnitřními biologickými hodinami, které jsou synchronizovány pravidelným střídáním světla a tmy. Stále častěji se v odborné literatuře objevují práce, které popisují, jak umělé světlo v nočním prostředí ovlivňuje správný nástup fenologických fází, tedy jednotlivých pravidelně se opakujících životních projevů, jako je např. rašení pupenů, žloutnutí listů, jejich opad apod. První práce

tohoto typu se objevily už ve 30. letech 20. století s rozvojem městského umělého osvětlení (např. Matzke 1936, cit. v Heinen 2021). Příklady takového narušení jsou nejlépe zřetelné u městské zeleně – v průběhu podzimu dávají kratší dny citlivým druhům stromů signál, že je čas se připravovat se na opad listů a příchod nízkých teplot – přeskupit zdroje tak, aby byly rostliny co nejlépe chráněny před blížícími se mrazivými zimními teplotami. Některé druhy stromů jsou citlivější než jiné, v klimatické zóně podobné ČR se jedná o topoly (*P. nigra*, *P. canadensis*), vrbu *Salix fragilis*, jilm *Ulmus americana*, několik druhů platanů, jírovec maďal (*Aesculus hippocastaneum*) či některé břízy (*B. pendula*) (podle Bennie et al. 2016). Je-li informace o zkracujících se dnech falešně zkreslena – v blízkosti svítidel – nedostatečná příprava na zimu vede k zámrazu celých větví. Podobně je narušena akumulace ochranných látek, které chrání před poškozením citlivé meristémy v pupenech. Na jaře je problém podobný – falešná informace o „dostatečně“ dlouhém dni vede k časnějšímu rašení pupenů vystavených v této citlivé fázi vývoje riziku jarních mrazíků.

Na Slovensku (Zvolen), tedy k České republice v geograficky velice blízkém prostředí, byla v letech 2013-2016 uskutečněna studie, která v předměstském prostředí hodnotila vliv světelného znečištění na posuny podzimních fenologických fází dvou v tomto prostředí běžných stromů: javoru kleny (*Acer pseudoplatanus*) a škumpy (*Rhus typhina*) (Škvareninová et al. 2017). U stromů, jejichž koruny byly vystaveny zvýšenému osvětlení v nočních hodinách, došlo k opoždění nástupu podzimních vegetativních fenofází průměrně o 13-22 dní, jejich trvání pak bylo prodlouženo o 6-9 dní. Rozsáhlá studie, která hodnotila posun v jarním období, se uskutečnila ve Velké Británii (French-Constant et al. 2016). Autoři využili třináctiletý, ke konkrétním stanovištím dobře definovaný dataset obsahující informace o rašení 4 druhů opadavých stromů (*Acer pseudoplatanus*, *Fagus sylvatica*, *Quercus robur* a *Fraxinus excelsior*) a korelovali ho se satelitními snímky nočního osvětlení i průměrnými jarními teplotami (k posouzení možného souběhu vlivu tepelných ostrovů). I tato studie uzavírá, že v osvětlených oblastech dochází k jarnímu rašení průměrně o 7,5 dne dříve než v temných. Satelitní data (ALAN i fenologická) ke své studii použili též Zheng et al. (2021), kteří pro území Spojených států popsali, že působení ALAN mělo tendenci urychlovat datum začátku vegetačního období, ačkoli tato vazba byla relativně slabá ve srovnání s jinými potenciálními faktory (např. předsezónní teplota). Je ale velice zajímavé, že vliv ALAN na fenologii vykazoval prostorově odlišný vzorec, přičemž ALAN urychloval začátek vegetačního období především v klimaticky mírných oblastech USA (např. Virginie), zatímco jeho účinek byl nevýznamný nebo dokonce obrácený ve velmi chladných (např. Minnesota) a horkých oblastech (např. Florida). Toto zjištění může mít velký význam v klimatu blízké České republice.

Jaký dopad mohou mít takové vývojové posuny zimní dormance na zdravotní stav takového jedince? Přestože dlouhodobé účinky změněných světelných podmínek nebyly dosud dostatečně prozkoumány, jisté je, že ztráta zdrojů (látky, které rostlina ztratila předčasným opadem starého listoví či zničením části mladých výhonů) způsobuje na strom sice malý, ale opakovaný tlak. To se může projevit sníženým růstem ve srovnání se stromy stejného druhu rostoucími v přirozeně osvětleném prostředí. Je pravděpodobné, že většímu riziku dramatického zhoršení celkového stavu budou vystaveny stromy v lokalitě, kde již existují další abiotické stresové faktory, jejichž účinky se mohou vzájemně prohlubovat (v městech typicky

zhoršená kvalita ovzduší, omezená dostupnost vody, zvýšené teploty), a takoví jedinci budou náchylnější i k nejrůznějším chorobám.

Mezi další uváděné efekty světelného znečištění na posuny ve vývojových procesech patří změny v nástupu fotoperiodicky řízeného kvetení. Uvádí se, že až 80 % kvetoucích rostlin je citlivých k fotoperiodě (stručně řečeno změnu ve svém vývojovém programu uskuteční, když je den dostatečně krátký, nebo naopak dostatečně dlouhý) (Searle & Coupland 2004). Jejich kvetení je tímto způsobem směřováno do správné fáze sezóny tak, aby byl zajištěn semenný základ pro další generace. Rostliny, u nichž je kvetení řízeno délkou dne, se liší v požadavku na tuto délku – některé jsou ke kvetení stimulovány dlouhými dny (dlouhodenní rostliny), jiné krátkými (krátkodenní). Proto ani účinky světelného znečištění na jednotlivé rostliny nejsou stejného typu. Předpokládá se, že efekt světelného znečištění se projevuje výrazněji u rostlin krátkodenních. Novozélandská dřevina železnatec (*Metrosideros excelsa*) kvete hojněji v blízkosti svítidel veřejného osvětlení než v mezerách mezi nimi (Bennie et al. 2016), což může znamenat pro rostlinu extrémní energetickou zátěž zvýšenými náklady na tvorbu květů bez dostatečných zásob zajišťujících dozrání zvýšeného množství semen. Naopak pro druh *Traganum moquinii* (laskavcovité), což je typická rostlina přímořských dun španělských Kanárských ostrovů, bylo publikováno, že u rostlin nebo části rostlin vystavené přímému zdroji nočního osvětlení se signifikantně snížil počet vytvářených květů (Viera-Pérez et al. 2019). Nejeфекtivněji při tomto snížení fungovalo světlo mezi 600 a 700 nm.

S kvetením u kulturních plodin obvykle úzce souvisí jejich výnos. V USA (Ohio) již byly popsány první efekty ALAN na zemědělské plodiny. Rostliny kukuřice a sóji poté, co byly na komunikaci vedle pole nainstalovány výkonnější vysokotlaké sodíkové zdroje, rostly sice rychleji, ale nepřecházely správně do generativní fáze, čímž došlo ke snížení výnosu (Sinnadurai 1981).

U volně žijících druhů účinky ALAN zatím zůstávají spíše bez povšimnutí, v experimentálním systému ale již bylo zjištěno, že např. štirovník (*Lotus pedunculatus*), produkuje až o 25 % méně květů, pokud je v noci vystaven umělému světlu simulujícímu veřejné osvětlení. Rozdílná reakce různých druhů má logicky dopad i na stabilitu ekosystému, který je ohrožen posuny v druhovém složení, což bude probráno později.

Narušení nočního zotavování

Ukazuje se, že temná perioda je u rostlin podobně jako u jiných organismů určena mimo jiné k zotavení ze stresu včetně zneškodňování některých nebezpečných látek jako jsou reaktivní formy kyslíku (ROS). Právě efektivita takových fyziologických reakcí, sloužících k tzv. nočnímu zotavení, může být významně snížena. Jako příklad lze uvést vliv nočního osvětlení (ekvivalentní přibližně expozici vegetace při běžném pouličním osvětlení) na působení troposférického ozonu – nebezpečné látky produkované fotochemickými reakcemi oxidů dusíku a uhlovodíků a související s automobilovým provozem. Experimenty se třemi druhy jetele ukázaly, že po vystavení nízkým hladinám světla v noci se významně zvýšilo poškození listů experimentálně aplikovaným ozonem (Futsaether et al. 2009). Také liliovník tulipánokvětý (*Liriodendron tulipifera*) vystavený podobným hladinám nočního světla reagoval akumulací nebezpečných ROS (peroxid vodíku, superoxidové radikály) (Kwak et al. 2018).

Klíčové fyziologické procesy – narušení fotosyntetických systémů, hospodaření s vodou, narušení toku metabolitů

I když se nepředpokládalo, že ALAN bude mít vliv na fotosyntetickou kapacitu, opak je nejspíše pravdou. Nedávný experiment ukázal, že stromy pod pouličním osvětlením mají nižší fotosyntetický kvantový výtěžek (F_v/F_m), hodnoty nefotochemického zhášení (NPQ), což v konečném důsledku ovlivňuje negativně rychlost fotosyntézy (Meravi & Prajapati 2020). Další studie na *Liriodendron tulipifera* s použitím ALAN různé intenzity a kvality ukázala, že celkový obsah chlorofylu se snížil až o 35 % a rychlost fotosyntézy až o 45 % (Kwak et al. 2018). Jiná studie na stejném druhu ukázala, že ALAN ovlivňuje ultrastrukturu chloroplastu (Kwak et al. 2017). Tyto modifikace v ultrastruktuře chloroplastů vedou k časnému stárnutí a chlorotickým listům s abnormálním vzhledem. Studium vlivu ALAN se u jílku (*Lolium perenne*) zabývali Zhang et al. (2020). Popsali, že ALAN negativně ovlivňuje obsah Chl a, Chl b, rychlou kinetiku fluorescenční indukce, fotochemickou aktivitu fotosystému II a prostřednictvím změn fotosyntetického aparátu i růstové charakteristiky. Z hlediska logické snahy o hledání jakýchsi „bezpečných“ hladin ALAN je zajímavá práce Crump et al. (2021), která naopak nepotvrdila efekt nízkých hladin ALAN na fotosyntetické parametry (rychlost čisté fotosyntézy, rychlá kinetika fluorescenční indukce), stomatální vodivost ani růstovou rychlost u rostlin lipnice luční (*Poa pratensis*) vystavených v krátkodobém experimentu (tři týdny) poměrně nízkým hladinám ALAN (0,3 lx). Autoři spekulují, že zřejmě kombinací více faktorů (např. druh méně citlivý k ALAN, částečně i díky selekci pro použití k tvorbě odolných travníků, krátké trvání experimentu, nízké použité hodnoty ALAN) v tomto konkrétním experimentu nedosáhly účinky ALAN jisté hraniční úrovně (threshold), kdy se již ALAN stává pro rostlinu signifikantně škodlivým.

Další pozorované efekty se týkají narušení denní (cirkadiální) rytmicity některých důležitých funkcí souvisejících s výměnou plynů a hospodařením s vodou, jako je např. otevírání a zavírání průduchů. Vodivost průduchů byla u *Liriodendron tulipifera* vlivem ALAN snížena (Kwak et al. 2018), podobně jako účinnost využití vody. Cirkadiální rytmicity se také podílí na regulaci některých významných enzymatických systémů. Například ALAN dramaticky snížilo klíčivost rýže, a to díky redukcí aktivity α -amylázy, - enzymu, který zodpovídá za štěpení škrobu při klíčení (Singhal et al. 2019).

Co se týče vlivu na další světlem ovlivňované procesy, předpokládá se narušení denního chodu hospodaření s fotoasimiláty (sacharidy) syntetizovanými v listech během dne a rozváděnými do dalších částí rostliny během noci. Rostliny produkují během dne cukry prostřednictvím fotosyntézy a potřebují je dočasně ukládat ve formě škrobu v nadzemních pletivech. Tento škrob je v noci degradován a transportován do kořenů či jiných částí rostliny, kde je využit k růstu či skladován v dlouhodobých zásobách (Stitt & Zeeman 2012). Tyto procesy jsou kontrolovány tak, aby optimalizovaly energetické výdaje při měnící se délce dne ve vegetačním období (Sulpice et al. 2014). Fotoreceptory hrají důležitou roli při načasování těchto procesů a bylo prokázáno, že ALAN snižuje noční degradaci škrobu u liliovníku tulipánokvětého (*Liriodendron tulipifera*), snižují se i hladiny škrobu během dne, což nakonec vede ke stresu z nedostatku uhlíku (Kwak et al. 2017).

Literatura popisující účinky ALAN na rostliny je obecně omezena na klasické ekologické parametry rostlin týkající se fenologie nebo růstu (rychlost, biomasa, pokryvnost), případně několik studií primárního metabolismu (fotosyntéza, obranné reakce). Díky pokroku v molekulární biotechnologii a biochemii v posledních desetiletích se však zcela jasně ukázalo, že ekologické interakce rostlin mohou být ovlivněny mnohem více faktory než samotnou velikostí rostliny a že mnoho reakcí rostlin na životní prostředí může mít podobu kvalitativních změn rostlinných pletiv / orgánů, které se nemusí nutně přímo odrážet v jejich růstových reakcích. Důležitou, ale zatím nezodpovězenou otázkou je, jak ALAN ovlivňuje rostliny na hlubších úrovních jejich organizace, například prostřednictvím transkriptomických nebo metabolomických procesů v kořenech, nadzemních částech a květních strukturách, a jak se dále tyto spojují s interakcemi ve fytooblastu.

Interakce – nepřímý vliv světelného znečištění mezi skupinami rostlin

Světelné znečištění může změnit druhové složení i rovnováhu pokryvu a biomasy mezi rostlinnými druhy v přirozených vegetačních společenstvech (Bennie et al. 2018). V dlouhodobé experimentální terénní studii tuto autoři vystavili polopřírodní travnaté plochy umělému světlu při intenzitách a vlnových délkách typických pro vystavení vegetace pouličním osvětlení (15-30 lx nad okolní pozadí, bílé či teplé světlo, LED). Zjistili, že osvětlení vedlo k významným rozdílům v reakci rostlin různých druhů – po vystavení ALAN *Agrostis tenuis* vykazoval nižší přírůstek biomasy, zatímco u *Anthoxanthum odoratum* a *Holcus lanatus* se zvýšila pokryvnost (pro většiny typů variant ALAN). Došlo tedy k významným posunům ve složení vegetace. Změny ve fenologii kvetení byly mezi lety variabilní, předpokládají v tomto ohledu významný synergický efekt jiných abiotických faktorů, kritických pro rostliny, v tomto případě nízké teploty. Co se týče spektrálního složení působícího ALAN, uzavírají, že teplé „amber light“ simulující nízkotlaké sodíkové osvětlení mělo obecně účinek podobný účinku bílého světla. Autoři uzavírají svou domněnkou, že nedávný posun od osvětlení na bázi sodíku k širšímu spektru bílého světla může zvýšit ekologické dopady na druhy zvířat i rostlin.

Co se týče možných interakcí či modulací reakce rostlin na ALAN, Hey et al. (2020) demonstrovali, že u rostliny klejchy (*Asclepias syriaca*) účinek ALAN vykazuje silné interaktivní účinky s půdní vlhkostí a naznačují, že ALAN může mít silnější účinky v sušších oblastech. Bez aditivního stresu mělo ALAN na růstové parametry této rostliny pozitivní účinky.

Speisser et al. (2021) se zaměřili na v současnosti intenzivně studované invazivní druhy a testovali, jak reagují na ALAN. Zejména je zajímavé, zda se v růstové reakci běžné invazivní druhy liší od méně rozšířených. Pěstovali devět taxonomicky příbuzných párů druhů samostatně a v konkurenci s původními rostlinami, s ALAN i bez něj. Zjistili, že ALAN významně zvýšil celkovou produkci biomasy na květináč, ale ne poměr biomasy mezi naturalizovanými cizími rostlinami a původními konkurenty. Je zajímavé, že ačkoli méně naturalizované druhy produkovaly celkově výrazně méně biomasy než široce naturalizované druhy, pozorovali stabilní trend, že tyto druhy zvyšovaly svou biomasu silněji v reakci na ALAN než široce naturalizované druhy. Dle autorů jejich výsledky naznačují, že působení ALAN by mohlo vést ke zvýšenému šíření v současnosti méně rozšířených invazivních druhů,

respektive že zvyšování rozšíření a zvýšení hladin ALAN může vést k vyššímu riziku invazivity těchto druhů.

2.4.2. Interakce mezi skupinami organismů

Světelné znečištění ovlivňuje jak fyziologii (např. cirkadiánní rytmy, viz kapitola 2.2.1.), tak i chování jedince a podle mnohých indicií může výrazně ovlivnit i interakce mezi jednotlivými organismy včetně pro člověka důležitých ekosystémových služeb (např. opylování). Drtivá většina studií zabývající se vlivem ALAN na interakce druhů a mechanismů ovlivňujících následnou strukturu společenstev je postavena na krátkodobých laboratorních experimentech. Máme tak jen velmi omezené informace o tom, jak se projevuje dlouhodobé působení ALAN na populace jednotlivých druhů a v podstatě žádné informace o tom, jak se dlouhodobý účinek ALAN promítne do struktury a fungování jednotlivých společenstev, které jsou vlivu ALAN dlouhodobě vystaveny. Usuzujeme tak často jen z nepřímých důkazů. Pokud budeme hodnotit světlo jako zdroj, pak lze charakterizovat i jeho gradient (např. intenzitu osvětlení) a stejně tak můžeme stanovit prahové hodnoty pro jednotlivé druhy. Naproti tomu je důležité uvědomit si i fakt, že schopnost lovit při nízké intenzitě osvětlení (ve tmě) je pro mnohé druhy zásadní adaptací, která jim přináší určitou (evoluční) výhodu a tma pro ně v podstatě představuje limitující zdroj, který je působením ALAN výrazně omezen. Například u některých druhů obojživelníků probíhá aktivní lov pouze za určité úrovně osvětlení (obvykle v nejtemnější fázi noci), zatímco jiné druhy mají rozmezí tolerance v tomto ohledu výrazně širší, což pro ně v podstatě představuje konkurenční výhodu (Longcore & Rich 2004). Z pohledu fungování společenstev hmyzu a vlivu ALAN na ně se největší zájem vědců ubírá především dvěma směry: A) Predací (včetně herbivorie) a B) vztahem mezi rostlinami a opylovateli.

Predace

Většina studií se shoduje v tom, že ALAN zcela zásadně ovlivňuje vztah mezi predátorem a kořistí a může zásadně měnit strukturu celých společenstev, přičemž společenstva vystavená ALAN mohou být dokonce i druhově bohatší (McMunn et al. 2019). Studie z různých typů ekosystémů však naznačují skutečnost, že ačkoliv přítomnost ALAN většinou zvýhodňuje predátora, může mít zcela opačný efekt. Nízká úroveň osvětlení například zvyšuje efektivitu i celkový predanční efekt soumrakových druhů predátorů (např. parazitoidů), při jejím zvýšení se jejich efektivita výrazně snižuje (Gomes et al. 2021). Pozitivní vliv ALAN představující výhodu ve prospěch predátorů lze rozdělit do dvou kategorií podle mechanismu působení. A) Prodloužením doby aktivity predátora, případně i zkrácení jeho životního cyklu. Tento vztah je velmi dobře znám u některých herbivorů. Například populace můry (*Hadena bicruris*) vystavené ALAN měly signifikantně vyšší konzumaci semen než můry z kontrolní skupiny (Boom et al. 2020), nebo běžný vodní plž plovatka bahenní (*Lymnaea stagnalis*) zkonzumuje 1,5-2x větší listové plochy vodních rostlin za umělého osvětlení než za přirozených podmínek (Mondy et al. 2021). B) Přitažlivost zdroje umělého světla (lampy) vede nejen k agregaci nočních motýlů a jiných skupin hmyzu, ale vyvolává i cílenou agregaci jejich přirozených

predátorů. Některé studie navíc ukazují, že se nejedná jen o oportunistické chování, ale že přítomnost ALAN může vést k dlouhodobé změně struktury společenstev (Davies et al. 2012). Agregáčnı chování je velmi dobře prozkoumáno u pavouků, kteří cíleně stavı lapací sítě v blízkosti pouličních lamp (Willmott et al. 2019), i za cenu toho, že dlouhodobé vystavenı účinkům ALAN snižuje jejich fitness (Willmott et al. 2018). Agregace hmyzu v blízkosti lamp využívají i některé rychle létající druhy netopýřů, zatímco pomalu létající druhy se vyhýbají místům s vyšší intenzitou osvětlení, aby snížili riziko predace (Russo et al. 2019). Vyšší intenzita osvětlení negativně ovlivňuje i defenzivní chování nočních motýlů, což se pravděpodobně promítá i do skutečnosti, že na více osvětlených plochách byla celková početnost nočních motýlů nižší než u neosvětlené kontroly (Minnaar et al. 2015).

V případe letounů mají zdroje ALAN vliv na změnu struktury trofických interakcí vlivem lákání řady skupin hmyzu ke zdroji světla, kde tento zdroj pak ale konzumují jen vybranı oportunisté, které světlo neodpuzuje (například netopýři rodu *Pipistrellus*, *Hypsugo*, *Vespertilio* či *Nyctalus*) zatímco řada druhů se k této kořisti nedostane, protože se osvětleným místům vyhýbají (Russo et al. 2018). Rozdíly v míře ochoty lovit kolem zdrojů světla mohou ovlivňovat i areálovou dynamiku, resp. strukturu společenstev v dlouhodobém časovém měřítku, jak ukázala studie segregace potravních nik dvou druhů (*Pipistrellus kuhlii* a *P. pipistrellus*), které sice využívají světelné zdroje k lovu potravy, ale ne se stejnou ochotou (Salinas-Ramos et al. 2021).

Načasování výletu a návratu netopýřů do svých úkrytů může být ovlivněno řadou podmınek prostředí (teplota, vlhost), biotickými faktory (reprodukční stav, riziko predace), ale také intenzitou osvětlení (Feng et al. 2022). Největší podíl na rytmech jejich aktivity má především intenzita světla. Výsledky této studie ukázaly, že doba vylétávání netopýřů byla časnější za vyšší světelné intenzity, přestože v okolí výletového otvoru byli predátoři přítomni. To zpochybňuje tradiční názor, že vysoké riziko predace vede k pozdějšímu vylétávání a dřívějšímu návratu. Potřeba využít optimálních hustot kořisti je pro ně v období péče o mláďata větším rizikem než riziko predace za vyšší intenzity světla.

Populace, které nemohou reagovat na umělé osvětlení tím, že přesunou sběr potravy do tmavších podmınek, protože ty zkrátka nejsou přítomny, mají v podstatě pouze dvě možnosti. První je přijmout riziko vyšší predace tím, že budou hledat potravu za jasného světla, jak to dělají například dikobrazové srstnatonoši (*Hystrix indica*), které nedostatek potravy donutil hledat potravu i na osvětlených stanovištích (Alkon & Saltz 1988). Druhou možností je pokračovat v minimalizaci rizika predace i za cenu ztrát (např. energetických zásob a tělesné hmotnosti), jak bylo pozorováno v experimentu na chilských křečcích (*Phyllotis darwini*) (Vásquez 1994). Tito hlodavci reagovali na simulované měsıční světlo tím, že 40 % potravy přenesli do úkrytu a tam ji zkonzumovali, zatímco přímo na světle konzumovali méně než 4 % potravy. Za světlých nocı hlodavci zkonzumovali o 15 % méně potravy než za nocı tmavých. Navzdory obtížím při zobecnění těchto laboratorních výsledků do přírodních podmınek, umělé noční osvětlení nepochybně snižuje dostupnost, a tedy i spotřebu potravy a pravděpodobně zvyšuje riziko predace hlodavců ve volné přírodě.

Opylování

Opylování představuje zcela zásadní ekosystémovou službu, kterou plní v drtivé většině ekosystémů hmyz. Až donedávna se většina studií o opylovatelích zaměřovala téměř výhradně na opylovatele s diurnální aktivitou. Při studiu interakčních sítí v některých, například lučních, ekosystémech je ale zjevné, že pro určité druhové spektrum rostlin hrají úlohu opylovatelů i noční druhy. Pro některé druhy rostlin je jejich příspěvek zcela klíčový (MacGregor et al. 2015). Ačkoliv účinek ALAN na efektivitu opylování může být i pozitivní, např. v důsledku agregace v okolí osvětlených oblastí, či delší aktivity některých diurnálních opylovatelů, stále více studií vyzdvihuje působení hned několika mechanismů, jakým může ALAN efektivitu opylování signifikantně snížit (Macgregor et al. 2015). Snížená míra opylování vyjádřena například sníženou produkcí plodů v důsledku působení ALAN může souviset: A) s přímou mortalitou opylovatelů, B) s principem ekologické pasti – kdy jsou jedinci dezorientováni umělým světlem a tráví výrazně méně času opylováním, C) s nočním osvětlením, jež může snížit produkci látek (feromonů), které rostliny produkují jako atraktant pro opylovatele (Macgregor & Scott-Brown 2020). Z hlediska rostlin jako součástí ekosystémů nelze opomenout fakt, že umělé světlo v noci ovlivňuje fyziologický stav, chování a ekologické vztahy herbivorů a opylovatelů. Podle švýcarské studie (Knop et al. 2017) narušilo vztahy s opylovateli, konkrétně snížilo počet návštěv nočních opylovatelů o 62 %. Toto mělo za následek pokles produkce semen o 13 % (rostliny byly opylovány i denními opylovateli).

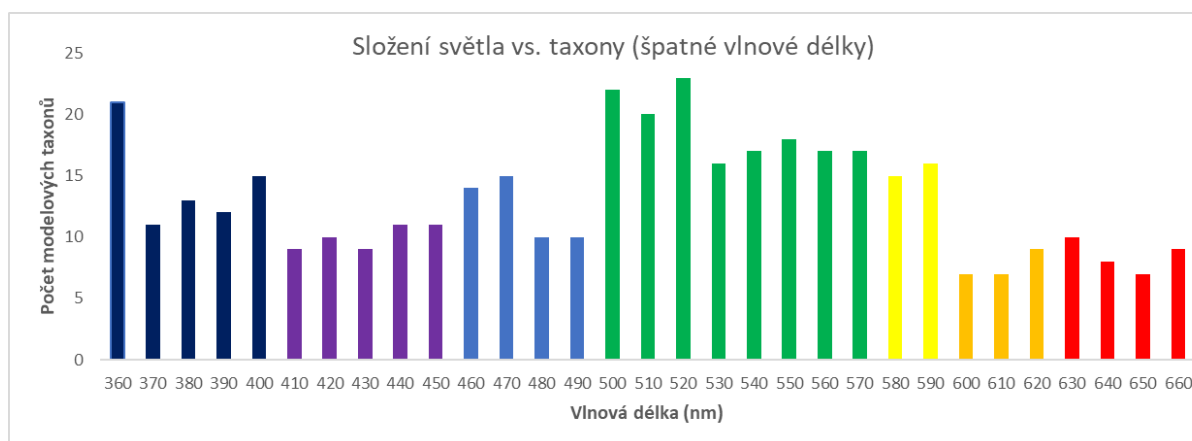
2.5. Nedostatky v dosavadním poznání

Je poněkud překvapivé, jak málo (experimentálního) výzkumu existuje o účincích ALAN na rostliny, fyziologii rostlin a rostlinami zprostředkovaných interakcích, i když ekologie rostlin a fyziologie rostlin jsou dvě obrovské vědecké disciplíny. Experimentální výzkum ALAN je náročný z různých důvodů, včetně časových a prostorových aspektů. V experimentech je obtížné udržovat jednak plošky s ALAN a kontrolní tmavé plošky ve stejném prostoru (např. ve výzkumných skleníkových zařízeních), protože případný přesah světla může negativně ovlivnit podmínky tmavé kontroly. Experimenty s vícekomorovými klimatickými místnostmi mohou usnadnit experimenty ALAN, ale jejich realizace je finančně náročná. Typické světelné podmínky klimatické komory však nefungují v rozmezích typických pro ALAN (např. pouliční osvětlení 5-30 luxů). Další experimentální problém vyvstává se vzorkováním rostlinného materiálu (zejména při kontrolním ošetření ve tmě).

V případě členovců, zejména hmyzu, byla provedena řada terénních pozorování a laboratorních experimentů, poukazujících na výrazný vliv ALAN na jejich životní projevy. I přes vysoký počet studií jsou ale dosavadní informace o většině taxonů spíše fragmentární, i co do diverzity na území České republiky. Pro většinu druhů neznáme míru jejich citlivosti vůči ALAN. V praktickém využití poznatků lze aplikovat pouze extrapolaci získaných informací na pár modelových skupinách. Zcela nedostatečně je problematika studována ve všech ostatních skupinách bezobratlých. I přes velmi malý taxonomický přesah studií je nápadná variabilita v reakcích jednotlivých taxonů (včetně obratlovců) na konkrétní parametry ALAN. Už jen v případě kvalitativního složení vyzařovaného světla

(chromatičnosti), se skupiny výrazně liší snad napříč celým spektrem viditelného světla (Obr. 7). Podobná situace je také v případě intenzity světla, kdy některé taxony jsou extrémně citlivé i na světlo velmi nízké intenzity.

Celkově je možné říci, že znalosti vlivu nočního světelného znečištění na ptáky, savce či obratlovce obecně, ať už na úrovni druhů nebo celých společenstev jsou velmi kusé. Jedná se spíše o případové studie, které dohromady nedávají ucelený přehled o dané problematice. Řada zjištění je založena na nepřímých důkazech či na zjištěních pouze v některém typu prostředí. Často se jedná o městská stanoviště, či porovnání populací stejného druhu žijící v městském a mimoměstském prostředí, což samo o sobě přináší určité nepřesnosti, protože tyto dva typy prostředí se liší i v jiných ohledech, nejenom z hlediska míry světelného znečištění, a vliv těchto faktorů není v přírodě jednoduché oddělit (hlukové znečištění, fragmentace stanovišť, míra urbanizace aj.).



Obr. 7 – Která spektra jsou ta špatná? Graf zobrazující počet modelových taxonů živočichů, pro které konkrétní zkoumané vlnové délky světla byly ve studiích vyhodnoceny jako nevyhovující. Lze vidět výrazná maxima v různých částech spektrálního složení světla. V případě delších vlnových délek (červené barvy) může být situace pouze podhodnocena. Recepce červené barvy je u řady skupin bezobratlých prokázána teprve nedávno.

Většina studií, které řeší vliv světelného znečištění na volně žijící ptáky ve střední Evropě, je postavena na porovnání oblastí se světelným znečištěním a bez světelného znečištění. Téměř vůbec nebyl v podmínkách střední Evropy zkoumán vliv světelného znečištění z pohledu jeho intenzity či vlnových délek. Publikované práce, které na toto téma existují, pocházejí ve velké většině z laboratorních experimentů a téměř vůbec nebyla dosud tato problematika zkoumána u volně žijících druhů ptáků. Pro pár modelových taxonů tak máme vesměs pouze informaci, že v určitém směru negativně reagují na nějaké světelné znečištění. A i přesto pro velkou většinu taxonů chybí i tato informace. Tato problematika je velmi významná z hlediska prevence či snížení mortality volně žijících ptáků a dalších obratlovců, např. v důsledku srážek s motorovými vozidly, prevence nárazů do prosklených budov atp.

Z praktického hlediska už i teď lze konstatovat, že jakákoliv úprava stávajícího osvětlení bude vždy alespoň pro určité taxony pouze nuceným kompromisem. Z těchto důvodů je vhodné minimálně v biologicky nejvzácnějších oblastech zcela zamezit vliv světelného znečištění.

Pro rychlé řešení konfliktních situací je potřebné získat dostatečně kvalitní data. Minimálně pro noční bezobratlé zcela chybí lapací zařízení, pomocí kterých by bylo možné odebírat vzorky bezobratlých na konkrétních zdrojích pouličního osvětlení v řešených lokalitách. Mimo jiné by pomocí tohoto vybavení bylo možné pro řadu taxonomických skupin přímo zhodnotit míru atrakce konkrétních typů běžně používaných zdrojů světla s různými vlnovými délkami a intenzitou vyzařovaného světla. Obdobná zařízení by přinesla mnoho cenných informací, využitelných přímo i v osvětlovací praxi.

3. Základní zdroje venkovního světelného znečištění v České republice

V samostatné rešeršní části (viz Příloha 1) je ohodnocena dostupnost vhodných zdrojů světla pro specifické prostředí pozemních komunikací, venkovních pracovišť a sportovišť, architektonického a reklamního osvětlení a osvětlení staveb pro bydlení a rodinnou rekreaci. V tak rozdílných podmínkách se používá tolik různých typů svítidel, že nebylo možné pro potřebu této rešerše zpracovat výčet všech jejích typů. Z toho důvodu byla rešerše problematiky zaměřena na dostupné a v praxi již používané typy svítidel, která minimalizují alespoň z části dopady nechtěného světelného znečištění na okolní prostředí. Seznam těchto svítidel je dostupný v elektronické příloze 1 s názvem *Seznam výrobků VO pro omezení světelného znečištění*.

4. Legislativní nástroje pro řešení vlivu světelného znečištění v ochraně přírody v České republice

Ve vztahu k právní úpravě světelného znečištění se mohla Česká republika stát v dané oblasti lídrem. Ačkoliv byla jednou z prvních zemí světa, která se zabývala právní úpravou a legislativními možnostmi boje se světelným znečištěním či, chceme-li, světelným smogem, svou vůdčí pozici nevyužila a v současné době jen těžkopádně reaguje na sílící moderní ekologicky orientované potřeby obyvatel. Vzhledem ke skutečnosti, že daná problematika byla až do nedávna na okraji zájmu legislativních normotvorných orgánů, a tudíž mimo hlavní záběr legislativního procesu, je vnitrostátní právní úprava světelného znečištění nekoncepční, kusá a roztržitá.

4.1. Zákon o ochraně ovzduší jakožto jedna z prvních světových úprav světelného znečištění

Onou první vlašťovkou byla úprava obsažená v zákoně č. 86/2002 Sb. o ochraně ovzduší. Tento zákon byl však několikrát novelizován, až se stal v praxi nevymahatelným, a to zejména v souvislosti s neexistencí prováděcího předpisu (vyhlášky ministerstva), který by se světelným znečištěním dále zabýval, specifikoval jej a konkretizoval. V původním znění ze dne 1. února 2002 bylo světelné znečištění výše uvedeným zákonem definováno v § 2 odst. 1 písm. r) jako: „každá forma osvětlení umělým světlem, které je rozptýleno mimo oblasti, do kterých je určeno,

zejména pak míří-li nad hladinu obzoru“. Novelizacemi pozměněná definice světelného znečištění zněla pak od 1. 5. 2004 následovně: „Světelné znečištění je viditelné záření umělých zdrojů světla, které může obtěžovat osoby nebo zvířata, způsobovat jim zdravotní újmu nebo narušovat některé činnosti a vychází z umístění těchto zdrojů ve vnějším ovzduší nebo ze zdrojů světla, jejichž záření je do vnějšího ovzduší účelově směřováno.“ Zákon o ochraně ovzduší krom výše uvedené definice světelného znečištění dále umožňoval základním územním samosprávným celkům nejprve zcela zakázat promítání světelných reklam a efektů na oblohu (obecně závaznou vyhláškou), po pozdějších již zmíněných novelizacích takové chování pouze regulovat. Později přijatý zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší zrušil výše uvedený předchozí nefunkční a bezzubý zákon. Úpravu světelného znečištění sám již neobsahoval a neobsahuje, a to ani ve znění pozdějších předpisů.

Dle některých názorů, mohou tak obce v současné době regulovat činnosti způsobující světelné znečištění (světelné reklamy, efekty apod.) formou obecně závazné vyhlášky na základě ustanovení § 10 písm. a) či c) zákona č. 128/2000 Sb., o obcích (obecní zřízení), ve znění pozdějších předpisů, tedy s ohledem na místní poměry a situaci v konkrétní obci z důvodu ochrany veřejného pořádku, bezpečnosti nebo ochrany životního prostředí.

4.2. Jednotlivé platné a účinné zákony a úprava světelného znečištění v nich obsažená

4.2.1. Zákon č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů

V rámci soukromoprávní sféry se světelným znečištěním v omezené míře zabývá i tzv. nový občanský zákoník (dále též „NOZ“), který obtěžování světlem řadí mezi rušivé prvky. V daném případě se NOZ zaměřuje na tzv. sousedské spory. Proti takovému rušení je pak dána možnost obrany prostřednictvím sousedské žaloby. Ve své podstatě NOZ stanovuje jistá omezení vlastnického práva. Konkrétně v § 1013 odst. 1) stanoví, že „Vlastník se zdrží všeho, co působí, že odpad, voda, kouř, prach, plyn, pach, **světlo**, stín, hluk, otřesy a jiné podobné účinky (imise) vnikají na pozemek jiného vlastníka (souseda) v míře nepřiměřené místním poměrům a podstatně omezují obvyklé užívání pozemku; to platí i o vnikání zvířat. Zakazuje se přímo přivádět imise na pozemek jiného vlastníka bez ohledu na míru takových vlivů a na stupeň obtěžování souseda, ledaže se to opírá o zvláštní právní důvod.“ NOZ tedy zakazuje vlastníkovu pozemku přivádět světlo a jakékoliv další imise na pozemek jiného vlastníka, avšak je zde nechána vysoká míra pro posouzení soudem, neboť se v daném případě světelné znečištění vždy bude zkoumat ve smyslu přiměřenosti k místním poměrům a obvyklému využívání pozemku, a teprve bude-li tak seznáno, bude se jednat o nepřiměřené imise a znečištění v daném smyslu slova.

4.2.2. Světelné znečištění a rušení nočního klidu

Je-li světelným znečištěním ohrožován a rušen noční klid, a to formou rušení světlem v rámci krátkodobých či jednorázových akcí lokálního charakteru, ale i dochází-li k rušení světlem ze zdrojů trvalejšího charakteru, může být dané jednání příslušným správním orgánem

posouzeno jako přestupek dle zákona č. 251/2016 Sb., o některých přestupcích, ve znění pozdějších předpisů (dále jen „zákon o některých přestupcích“).

Noční klid je vymezen výše uvedeným zákonem v § 5 odst. 6 jako: „*doba od dvacáté druhé do šesté hodiny. Obec může obecně závaznou vyhláškou stanovit výjimečné případy, zejména slavnosti nebo obdobné společenské nebo rodinné akce, při nichž je doba nočního klidu vymezena dobou kratší nebo při nichž nemusí být doba nočního klidu dodržována...*“ Obec tedy může dobu nočního klidu regulovat, zkrátit anebo i zrušit obecní vyhláškou.

Zákon však již blíže nedefinuje, co se nočním klidem rozumí. Analogicky bychom mohli říct, že noční klid je možno narušit takovým jednáním, které je schopno narušit pořádek v obci.

„*Obecně nelze stanovit pevnou hranici přípustného světelného zatížení pro účely posuzování odpovědnosti za přestupek rušení nočního klidu podle zákona o některých přestupcích. Danou otázku musí správní orgán zvážit v každém případě individuálně podle konkrétních skutkových okolností. Především je nutno náležitě zhodnotit společenskou škodlivost činu [§ 5 zákona č. 250/2016 Sb., o odpovědnosti za přestupky a řízení o nich], tak aby nedocházelo k postihu bagatelních jednání. Rozhodující bude vždy míra dotčení chráněného veřejného zájmu, v tomto případě zájmu na nerušeném odpočinku obyvatel v nočních hodinách. Správní orgán by měl v této souvislosti zohlednit mimo jiné skutečnost, že pro jednotlivce je obvykle snadnější chránit se před světlem než před hlukem či jinými rušivými elementy (prostřednictvím závěsů, rolet, žaluzií apod.). Daná okolnost může odůvodnit vyšší míru tolerance vůči světelnému rušení, daný závěr ovšem nelze uplatňovat absolutně (nebylo by zřejmě přiměřené očekávat od obyvatel například trvalé zatemňování obydlí).*“¹

4.2.3. Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny, ve znění pozdějších předpisů

Zákon o ochraně přírody a krajiny (dále také “ZOPK”) je dalším ze zákonů, který parciálně upravuje světelné znečištění. V daném případě dopadá úprava v něm obsažená na problematiku ochrany národních parků před škodlivými vlivy osvětlení na přírodu a krajinu, když jako jednu ze základních ochranných podmínek pro národní parky stanoví v § 16 odst. 1 písm. j) „*zákaz umisťovat světelné zdroje mimo uzavřené objekty, které směřují světelný tok nad vodorovnou rovinu procházející středem světelného zdroje.*“ Jedná se tak ve své podstatě o zákaz umisťování světelných zdrojů svítících nad horizont v daném území. Jedním z úseků, na které se ZOPK v rámci dopadu světelného znečištění také uplatní, je druhová ochrana. Ze znění § 50 odst. 2 ZOPK vyplývá, že: „*je zakázáno škodlivě zasahovat do přirozeného vývoje zvláště chráněných živočichů, zejména je chytat, chovat v zajetí, rušit, zraňovat nebo usmrcovat...*“ Pro dopad světelného znečištění by se v takto nastavené rovině hodilo spíše použití pojmenování „*rušivé světlo*“, neboť i způsobem takto popsáním je možné škodlivě zasahovat do přirozeného vývoje chráněných živočichů. Na stejném principu pak stojí ochrana a dopad rušivého světla na chráněné rostliny či památné stromy.

¹ METODICKÉ DOPORUČENÍ K ČINNOSTI ÚZEMNÍCH SAMOSPRÁVNÝCH CELKŮ: Tvorba obecně závazných vyhlášek; Úprava místních záležitostí veřejného pořádku. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, p. o., Bartůňkova 1159/4, 149 01 Praha 4, 2018. ISBN 978-80-87544-76-1.

Blízce a v určitých případech neoddelitelně je na problematiku světelného znečištění v ZOPK navázaná úprava obsažená v zákoně 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o posuzování vlivů na životní prostředí), ve znění pozdějších předpisů. Zjednodušeně řečeno, by mělo být ze zákonem stanovených důvodů a záměrů provedeno hodnocení vlivu na životní prostředí dle výše uvedeného zákona, a to jako součást hodnocení vlivů a dopadů na ekosystémy, faunu a flóru.

Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí blíže neupravuje podmínky pro posuzování světelného znečištění u přezkoumávaných záměrů, avšak Ministerstvo životního prostředí vydalo metodický pokyn č. j.: MZP/2020/710/2387 ze dne 30. 6. 2020, ve kterém je uvedeno, že: „*Světelné znečištění, které by mohlo být způsobováno záměry uvedenými v § 3 písm. a) zákona o posuzování vlivů na životní prostředí, je žádoucí považovat za jeden z možných vlivů těchto záměrů na životní prostředí a veřejné zdraví. Doporučuje se proto, aby v dokumentech zpracovávaných podle daného zákona byly v příslušných kapitolách týkajících se charakteru záměru, technického řešení, výstupů a vlivů záměru, opatření k prevenci atd.) vhodným způsobem popsány a v rámci posuzování zohledněny i vlivy záměru, které by mohly přispívat ke světelnému znečištění a v důsledku toho ovlivnit jednotlivé relevantní složky životního prostředí a veřejného zdraví (obyvatelstvo, biologická rozmanitost, krajina apod.).*“

Z výše specifikovaného dokumentu dále uvádím výběr doporučení, která by mohla přispívat k ochraně před světelným znečištěním: „*1) navrhovat osvětlení šetrné k nočnímu prostředí, které využívá moderních poznatků a technologií, je účelné a neobtěžuje své okolí; 2) osvětlovací soustavy navrhovat tak, aby světlo co nejméně unikalo do prostoru, který není určen k osvětlování; 3) při návrzích osvětlenosti venkovních prostor, či dopravních staveb, osvětlenost bezúčelně nepředimenzovávat; 4) vyvarovat se zařízení s emisemi stroboskopických a laserových světelných efektů do vnějšího prostředí; 5) navrhovat osvětlení respektující soukromí a zdraví obyvatel (zamezit záření venkovního osvětlení do oken obytných domů)*“ apod.

4.2.4. Zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu, ve znění pozdějších předpisů (stavební zákon)

§ 137 odst. 1 písm. a) stavebního zákona upravuje oprávnění věcně a místně příslušného stavebního úřadu nařídit „*vlastníku stavby, stavebního pozemku nebo zastavěného stavebního pozemku nezbytné úpravy jimiž se docílí, aby užívání stavby nebo jejího zařízení neohrožovalo životní prostředí, nepřiměřeně neobtěžovalo její uživatele a okolí hlukem, exhalacemi včetně zápachu, otřesy, vibracemi, účinky neionizujícího záření anebo světelným zářením.*“ Tuto pravomoc však nemá stavební úřad ve všech případech. Předmětná úprava dopadá výlučně na situace, kdy jsou dotčena stavba či předmětné zařízení postaveny či užívány v rozporu s podmínkami danými stavebním povolením. Další podmínkou, kdy může stavební úřad nařídit nezbytné úpravy je skutečnost, že je prokázáno významné ohrožení a nadto ještě za náhradu újmy, kterou by nařízené úpravy vyvolaly.

Stavební zákon je proveden širokou škálou tzv. prováděcích předpisů (vyhlášek Ministerstva pro místní rozvoj). Jedním z prováděcích předpisů stavebního zákona, zmiňujícím úpravu

osvětlení, je vyhláška č. 501/2006 Sb., o obecných požadavcích na využívání území. Ta se v rámci osvětlování zabývá v § 24d odst. 1 stavbami pro reklamu a reklamními zařízeními, kdy stanoví, že tyto se: *„nesmí umisťovat tak, aby narušovaly architektonický a urbanistický nebo pietní charakter prostředí, ohrožovaly bezpečnost provozu na pozemních komunikacích a drahách, obtěžovaly okolí, zejména obytné prostředí, hlukem, nebo světlem nad limitní hodnoty stanovené jinými právními předpisy.“*

Vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na stavby v § 10 upravuje všeobecné požadavky pro ochranu zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí. Konkrétně v odst. 1 písm. j) stanoví, že: *„Stavba musí být navržena a provedena tak, aby neohrožovala život a zdraví osob nebo zvířat, bezpečnost, zdravé životní podmínky jejich uživatelů ani uživatelů okolních staveb a aby neohrožovala životní prostředí nad limity obsažené v jiných právních předpisech, zejména následkem nevhodných světelně technických vlastností.“*

Je zde pak možnost provázání s § 8 odst. 1 písm. c) téže vyhlášky, který rozpracovává základní požadavky na bezpečnost a vlastnosti staveb. Výslovně pak uvádí, že: *„Stavba musí být navržena a provedena tak, aby byla při respektování hospodárnosti vhodná pro určené využití a aby současně splnila základní požadavky, kterými jsou ochrana zdraví osob a zvířat, zdravých životních podmínek a životního prostředí.“*

Ve výše uvedených případech se výslovně nejedná o úpravu světelného znečištění jako takového. Přesto však se jedná o úpravu světelného záření a jeho možných nežádoucích dopadů a jsou tak dány minimální limity pro ochranu před světelným smogem či obtěžováním světlem. Je otázkou, jak a zda vůbec jsou výše uvedená ustanovení naplnitelná, proveditelná a v praxi vymahatelná.

Specifickým způsobem je světelné znečištění regulováno zákonem č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci a o omezování znečištění, o integrovaném registru znečišťování a o změně některých zákonů (zákon o integrované prevenci), ve znění pozdějších předpisů. Tento zákon dopadá na jím vymezená velká průmyslová zařízení, obsažená v příloze č. 1 tohoto zákona. Tento zákon umožňuje určitým způsobem řešit v rámci integrovaných povolení světelné znečištění, a to skrz podmínky stanovené povolujícím úřadem, který integrované povolení vydává. Možnost úpravy světelného znečištění je dána prostřednictvím § 2 písm. b) kdy se znečištěním rozumí: *„lidskou činností přímo či nepřímo způsobené vniknutí látek, vibrací, hluku, tepla nebo jiných forem neionizujícího záření do ovzduší, vody nebo půdy, které může být škodlivé pro zdraví člověka nebo zvířat nebo může nepříznivě ovlivnit kvalitu životního prostředí nebo může vést ke škodám na hmotném majetku nebo může omezit či zabránit využívání hodnot životního prostředí, které jsou chráněna zvláštními právními předpisy.“*

4.2.5. Osvětlení komunikací ve vztahu ke světelnému znečištění

Právní úpravu osvětlování komunikací obsahuje zákon č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů. § 14 odst. 1 písm. b) v souvislosti s § 12 a § 13 téhož zákona stanoví, že: *„součástmi ani příslušenstvím průjezdního úseku dálnice a průjezdního úseku silnice nejsou zábradlí, řetězy a jiná zařízení pro zajištění a zabezpečení přechodů pro chodce, veřejné osvětlení, světelná signalizační zařízení sloužící k řízení*

provozu.“ To platí pouze pro tzv. průjezdné úseky. Průjezdný úsek je úsek dálnice nebo silnice, který vede zastavitelným nebo zastavěným územím obce. § 13 písm. c) výslovně stanoví, že: „*Příslušenstvím dálnice, silnice a místní komunikace jsou veřejné osvětlení, světelná signalizační zařízení sloužící k řízení provozu.*“

Zákon o pozemních komunikacích dále v § 35 odst. 3 stanoví, že: „*Vlastník nemovitosti sousedící s průjezdným úsekem silnice nebo s místní komunikací v zastavěném území obce je v nezbytně nutných případech povinen za jednorázovou úhradu strpět zřízení věcného břemene na své nemovitosti spočívajícího v umístění veřejného osvětlení, dopravních značek světelných signálů, dopravních zařízení...*“

Ve vztahu k osvětlování a potenciálnímu světelnému znečištění je pak zásadní Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů č. 104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů.

Za zmínku jistě stojí ustanovení v § 14 odst. 2. písm. i), které stanoví, že pro doplňování stávajícího nebo stavba nového elektrického osvětlení komunikace vyžaduje pouze ohlášení speciálnímu stavebnímu úřadu.

§ 25 této vyhlášky upravující veřejné osvětlení stanoví: „*Dálnice a silnice se vždy osvětlují v zastavěném území obcí. Mimo toto území se osvětlují jen zvlášť určené úseky, jako např. na hraničních přechodech, v tunelech a na jejich přilehlých úsecích, výjimečně na křižovatkách, za podmínek obsažených v závazných ČSN 73 6102 a ČSN 73 7507. Osvětlení lze zřídit i v oblastech, kde to zdůvodňuje intenzita dopravy, případně četnost chodců a cyklistů. Podrobnosti obsahují doporučené české technické normy...*“

4.2.6. Technické normy vztahující se ke světelnému znečištění a jejich postavení v právním systému

Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů v hlavě II. upravuje technické předpisy a technické normy (dále také „ČSN“). § 4 odst. 1 stanoví, že: „*Česká technická norma je dokument schválený Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (dále jen „Úřad“) pro opakované nebo stále použití vytvořený podle tohoto zákona a označený písmenným označením ČSN, jehož vydání bylo oznámeno ve Věstníku Úřadu. Česká technická norma není obecně závazná.*“

„*Obecnou závazností se rozumí povinnost dodržovat ČSN obecně, bez jakéhokoliv omezení, tj. všemi právníky nebo fyzickými osobami. Povinnost postupovat při určité činnosti v souladu s českými technickými normami však může vzniknout, a to různými způsoby, především pak na základě ustanovení právního předpisu, který stanoví, že ve vztazích upravených tímto právním předpisem je nutno dodržovat české technické normy.*“

Odkazy na technickou normu v právních předpisech mohou mít z hlediska jejich síly formu odkazu výlučného (povinného) nebo indikativního. Výlučný odkaz určuje shodu s technickou normou, na kterou se odkazuje jako jediný způsob splnění příslušného ustanovení daného právního předpisu. Technická norma tak doplňuje nekompletní právní požadavek, a stává se tak vlastně součástí právního předpisu. Tím vzniká povinnost řídit se ustanoveními příslušné

normy pro ty subjekty, kterých se daný právní předpis týká. I když ani v tomto případě většinou nejde o obecnou závaznost, je možno říci, že ve vztahu k plnění požadavků příslušného předpisu se odkazovaná norma nebo její část stává závaznou. V případě indikativního odkazu je shoda s normou jedním z možných způsobů splnění požadavků právního předpisu. Obecný požadavek právního předpisu však může být splněn jiným způsobem. Forma indikativního odkazu je uplatněna v § 4a zákona č. 22/1997 Sb., pokud jde o harmonizované nebo určené normy.“²

Odstavec 2 pak v písmenech a) – c) říká, že soustavu českých technických norem tvoří: a) původní české technické normy, b) evropské či mezinárodní normy přejaté překladem a c) evropské či mezinárodní normy přejaté v původním jazyce nebo přejaté schválením k přímému používání. Co je cílem ČSN je upraveno v odst. 4 takto: „Česká technická norma poskytuje pro obecné a opakované používání pravidla, směrnice nebo charakteristiky činností nebo jejich výsledků zaměřené na dosažení optimálního stupně uspořádání ve vymezených souvislostech.“

Jak již bylo výše uvedeno, § 4a odst. 1 daného zákona upravuje, co jsou harmonizované technické normy a určené normy takto: „Česká technická norma se stává harmonizovanou českou technickou normou, přejímá-li plně požadavky stanovené evropskou normou nebo harmonizačním dokumentem, které uznaly orgány Evropského společenství jako harmonizovanou evropskou normu, nebo evropskou normou, která byla jako harmonizovaná evropská norma stanovena v souladu s právem Evropských společenství společnou dohodou notifikovaných osob (dále jen "harmonizované evropské normy"). Pro specifikaci technických požadavků na výrobky, vyplývajících z nařízení vlády nebo jiného příslušného technického předpisu, může Úřad po dohodě s ministerstvy a jinými ústředními správními úřady, jejichž působnosti se příslušná oblast týká, určit české technické normy, další technické normy nebo technické dokumenty mezinárodních, popřípadě zahraničních organizací, nebo jiné technické dokumenty, obsahující podrobnější technické požadavky (dále jen "určené normy").“ Harmonizované české technické normy jsou zveřejňovány ve věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

4.3. Nejzásadnější právní úpravy světelného znečištění v Evropě

V současné době jsou světelným znečištěním ovlivněny v zásadě všechny světové kontinenty. K těm nejvíce zasaženým patří dle všech známých studií Evropa a zejména její noční obloha. Vyhodnocením dat z družicových snímků bylo zjištěno, že 83 % světové populace se dotýká světelné znečištění. V Evropě a v USA je to dokonce 99 %. To zapříčiňuje, že například Mléčná dráha je tak pro zhruba 60 % Evropanů neviditelná. Aby jednotlivé Evropské státy ochránily své občany před negativními dopady a důsledky světelného znečištění, vzrůstá v posledních letech jeho legislativní úprava. Jako příklad těchto států můžeme uvést Slovinsko, Chorvatsko či Francii.

² Závaznost českých technických norem (ČSN) - Hasičský záchranný sbor České republiky. Úvodní strana - Hasičský záchranný sbor České republiky [online]. Copyright © 2021 Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, všechna práva vyhrazena [cit. 13.03.2022]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/zavaznost-ceskych-technickych-norem-csn.aspx>

4.3.1. Chorvatská právní úprava

Chorvatsko bylo a je v rámci právní úpravy světelného znečištění jednou z nejprogresivnějších zemí Evropy. Zákon na úpravu světelného znečištění přijalo již v r. 2011 a 2015. V r. 2019 byl přijat nový zákon, modernější a reagující na závazky vyplývající z mezinárodních právních úmluv zaměřených na omezení změny klimatu.

Nový Chorvatský zákon z roku 2019 je rozdělen do 6 kapitol a 32 článků následujícím způsobem: I) základní ustanovení, II) opatření na ochranu před světelným znečištěním, III) plánování, výstavba, údržba a rekonstrukce venkovního osvětlení, IV) správní a kontrolní dozor, V) sankční ustanovení a VI) přechodná a závěrečná ustanovení.

Chorvatský zákon o světelném znečištění jasně a zřetelně stanovuje své cíle, především v článcích 2) a 8). Zejména se jedná o snížení světelného znečištění v obecné rovině, ochranu lidského zdraví, biologické rozmanitosti, ekologie a udržitelného rozvoje. Vysoká pozornost je věnována také zajištění instalace správného druhu a typu osvětlení a snížení celkové spotřeby elektrické energie.

Článek 3) obsahuje výjimky z přísné úpravy omezení světelného znečištění. Zejména jde o osvětlení na místech jako jsou staveniště či osvětlování v případě mimořádných událostí či osvětlování pro armádní účely. Je zde také výjimka pro osvětlování továren.

Článek 5) stanoví definici nejrozumnějších pojmů užitých pro účely daného zákona, a to včetně definice „ekologického osvětlení“, které definuje jako plně stíněné osvětlení, které má 0 % osvětlení nad horizont a teplotu chromatičnosti (CCT – Correlated Color Temperature) nižší než 2700 K. Takto stanovená forma osvětlení je pak jediná povolená forma venkovního osvětlení, čímž Chorvatsko učinilo významný pokrok v ochraně před světelným znečištěním i v porovnání s ostatními Evropskými státy upravujícími světelné znečištění.

Velice zajímavá jsou také ustanovení článků 6) a 10), ze kterých vyplývá, že povolovací proces osvětlení vyžaduje, aby osoby instalující osvětlovací prvky měli státní licenci a také ukládá obcím v místní samosprávě povinnost aktivně vymáhat dodržování tohoto zákona.

Články 12) a 13) pak upravují povinnost předložení plánů osvětlení k zajištění souladu se zákonem a články 16), 17) a 18) stanoví zájem prosazování zákona prostřednictvím důkladně nastaveného kontrolního režimu.

Nový Chorvatský zákon je výrazným a důležitým krokem k moderní legislativně upravující světelné znečištění, chrání nejen člověka a živou a neživou přírodu, ale i nám již téměř neznámou tmavou oblohu.

4.3.2. Slovinská právní úprava světelného znečištění

Slovinská právní úprava světelného znečištění byla přijata v roce 2007. Tento zákon upravuje osvětlování a předcházení světelnému znečištění ve velice široké míře s výjimkami například pro signalizační osvětlení v silniční, železniční, letecké a lodní dopravě, ale dává výjimky i pro dekorativní osvětlení mezi 10. prosincem a 15. lednem.

Zákon pracuje s tzv. osvětlováním pomocí svítidel šetrných k životnímu prostředí. Obecně lze pro vnější osvětlení dle tohoto zákona použít pouze svítidla s 0 % zářivostí nad horizont, s určitými výjimkami v rámci osvětlování kulturních památek.

Ustanovení zákona také stanoví roční spotřebu elektřiny pro veřejné osvětlení na obyvatele obce, tak že celková spotřeba elektřiny na obyvatele je omezena na 50 kWh.

Dále zákon upravuje osvětlování nejrozličnějších zařízení a budov, od výrobních a obchodních zařízení, osvětlování institucí jako jsou školy, obecní úřady, mateřské školy, osvětlování domovních fasád, národních památek apod.

Zákon také stanoví, že pokud se v budově nachází ohrožený druh, či se na povrchu budovy nachází místa kde sídlí (hnízdí) tyto druhy, pak se takové budovy nenavěšují.

Dále je obsažena úprava osvětlování reklamních zařízení, sportovních ploch, staveníšť a následuje úprava možných sankcí uložitelných v případě nedodržení zákona.

4.3.3. Francouzská právní úprava světelného znečištění

Ve Francii je aktuální právní úprava světelného znečištění obsažena ve vyhlášce ze dne 27. prosince 2018 o prevenci, snižování a omezování světelného znečištění, platné od 1. 1. 2019 a novelizované vyhláškou ze dne 29. května 2019.

Tato vyhláška dopadá na venkovní osvětlovací zařízení sloužící pro účely určené k podpoře bezpečnosti pohybu, osob a majetku ve veřejných nebo soukromých prostorách, zejména na pozemních komunikacích s výjimkou signalizačního osvětlení, osvětlení tunelů apod. Dále tato vyhláška dopadá na osvětlení památek kulturního dědictví, soukromých a veřejných parků, venkovních a sportovních zařízení a prostor, nebytových prostor a to jak vnější, tak na osvětlení z nich vyzařované ven, na osvětlení nekrytých či polokrytých parkovišť, venkovních staveníšť i na venkovní světelné instalace uměleckého, kulturního, komerčního, sportovního či volnočasového účelu a to včetně dočasných.

Z článku 2 pak obecně vyplývá, že předmětná osvětlovací zařízení se vypínají v určitých hodinách, či určitou dobu po ukončení činnosti, pro které je dané osvětlení instalováno, a zapínají se opět v konkrétních hodinách či v určitém časovém úseku před zahájením činnosti. (Př. zařízení pro osvětlování památkových objektů, parků a zahrad se rozsvítí nejdříve při západu slunce a zhasínají nejpozději v 1 hodinu ráno, nebo v případě parků a zahrad nejpozději 1 hodinu po jejich uzavření; či osvětlení v nebytových prostorách se zapíná nejdříve při západu slunce a vnitřní osvětlení v obchodních prostorách musí být vypnuto nejpozději jednu hodinu po skončení provozu a může být zapnuto nejdříve v 7 hodin ráno nebo 1 hodinu před zahájením činnosti, podle toho, co nastane dříve.)

Obecně je dále také stanoveno, že emise umělého světla z venkovního osvětlení a osvětlení vyzařovaného zvenci musí být navrženy tak, aby předcházely, omezovaly a snižovaly světelné znečištění, zejména nadměrné rušení osob, fauny, flóry nebo ekosystémů a zabránily plýtvání energií či bránily nebránily pozorování noční oblohy. Tedy snahy zamezit přesvětlování.

Další obsah vyhlášky je ve zkratce možné shrnout tak, že je zde obsažena značná snaha o omezení maximálního přípustného podílu světla mířícího vzhůru, a to až na 1 % a také směřovat minimálně 95 % světla nejvýše 15° pod horizont.

Vyhláška dále stanovuje i teplotu chromatičnosti, kdy je v zásadě obecně uvedeno že maximální přípustná teplota chromatičnosti je 3000 K, v citlivých oblastech (zejména v oblasti národních parků) pak 2700 K v aglomeraci a 2400 K mimo ni.

Jak již bylo výše řečeno, francouzská právní úprava světelného znečištění je v současné době společně s Chorvatskou a Slovinskou, jednou z nejprogresivnějších a pro účely inspirace vnitrostátní normotvorby nejbližších právních úprav, ze kterých může Česká republika čerpat.

Seznam použité literatury

- Adams CA, Blumenthal A, Fernández-Juricic E, Bayne E & St Clair CC (2019). Effect of anthropogenic light on bird movement, habitat selection, and distribution: a systematic map protocol. *Environmental Evidence* 8: 1-16.
- Akashi HD, Chen PJ, Akiyama T, Terai Y, Wakakuwa M, Takayama Y, ... & Arikawa K (2018). Physiological responses of ionotropic histamine receptors, PxHCLA and PxHCLB, to neurotransmitter candidates in a butterfly, *Papilio xuthus*. *Journal of Experimental Biology* 221: jeb183129.
- Alaasam VJ, Duncan R, Casagrande S, Davies S, Sidher A, Seymoure B, ... & Ouyang JQ (2018). Light at night disrupts nocturnal rest and elevates glucocorticoids at cool color temperatures. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology* 329: 465-472.
- Alkon PU & Saltz D (1988). Foraging Time and the Northern Range Limits of Indian Crested Porcupines (*Hystrix indica* Kerr). *Journal of Biogeography* 15: 403.
- Allan SA, Day JF, Edman JD (1987). Visual ecology of biting flies. *Annual Review of Entomology* 32: 297-316.
- Allan SA, George J, Stelinski LL & Lapointe SL (2020). Attributes of Yellow Traps Affecting Attraction of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). *Insects* 11: 452.
- Allema AB, Rossing WAH, van der Werf W, Heusinkveld BG, Bukovinszky T, Steingrover E, Lenteren JC (2012). Effect of light quality on movement of *Pterostichus melanarius* (Coleoptera: Carabidae). *Journal of Applied Entomology* 136: 793-800.
- Amichai E & Kronfeld-Schor N (2019). Artificial light at night promotes activity throughout the night in nesting common swifts (*Apus apus*). *Scientific reports* 9: 1-8.
- Andersson S, Rydell J, Svensson MGE (1998). Light, predation and the lekking behaviour of the ghost swift *Hepialus humuli* (L): (Lepidoptera : Hepialidae). *Proceedings of the Royal Society B - Biological Sciences* 265: 1345-1351.
- Arendt J (1998). Melatonin and the pineal gland: Influence on mammalian seasonal and circadian physiology. *Reviews of Reproduction* 3: 13-22.
- Astakhova LA, Novoselov AD, Ermolaeva ME, Firsov ML & Rotov AYU (2021). Phototransduction in Anuran Green Rods: Origins of Extra-Sensitivity. *International Journal of Molecular Sciences* 22: 13400.
- Aubé M, Roby J & Kocifaj M (2013). Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility. *PloS One* 8: e67798.
- Aubrecht TG, Jenkins R & Nelson RJ (2015). Dim light at night increases body mass of female mice. *Chronobiology International* 32: 557-560.
- Aulsebrook AE, Connelly F, Johnsson RD, Jones TM, Mulder RA, Hall ML, ... & Lesku JA (2020a). White and amber light at night disrupt sleep physiology in birds. *Current Biology* 30: 3657-3663.
- Aulsebrook AE, Lesku JA, Mulder RA, Goymann W, Vyssotski AL & Jones TM (2020b). Streetlights disrupt night-time sleep in urban black swans. *Frontiers in Ecology and Evolution* 8: 131.
- Azam C, le Viol I, Bas Y, Zissis G, Vernet A, Julien JF & Kerbiriou C (2018). Evidence for distance and illuminance thresholds in the effects of artificial lighting on bat activity. *Landscape and Urban Planning* 175: 123-135.
- Baker J (1990). Toad aggregations under street lamps. *British Herpetological Society Bulletin* 31: 26-27.
- Baker RR & Sadovy Y (1978). The distance and nature of the light trap response of moths. *Nature* 276: 818-821.
- Balassina D (1984). *Amphibians of Europe: a Colour Field Guide*. David & Charles, Devon, UK.

- Bani Assadi S & Fraser KC (2021). The Influence of Different Light Wavelengths of Anthropogenic Light at Night on Nestling Development and the Timing of Post-fledge Movements in a Migratory Songbird. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9: 735112.
- Barghini A & Medeiros B (2012). UV radiation as an attractor for insects. *LEUKOS* 9: 47-56.
- Barré K, Spoelstra K, Bas Y, Challéat S, Kiri R, Azam C & Le Viol I (2020): Artificial light may change flight patterns of bats near bridges along urban waterways. *Animal Conservation* 24: 259-267.
- Barré K, Vernet A, Azam C, Le Viol I, Dumont A, Deana T, Kerbirou C (2022). Landscape composition drives the impacts of artificial light at night on insectivorous bats. *Environmental Pollution* 292: 118394.
- Bartness TJ & Wade GN (1985). Photoperiodic control of seasonal body weight cycles in hamsters.
- Bek RJ (2015). Investigating the impact of artificial night lighting on the common European glow-worm, *Lampyrus noctiluca* (L.) (Coleoptera: Lampyridae). Unpublished report for the University of Leeds.
- Bayarri MJ, Madrid JA & Sánchez-Vázquez FJ (2002). Influence of light intensity, spectrum and orientation on sea bass plasma and ocular melatonin. *Journal of Pineal Research* 32: 34-40.
- Beck J & Linsenmair KE (2006). Feasibility of light-trapping in community research on moths: Attraction radius of light, completeness of samples, nightly flight times and seasonality of Southeast-Asian hawkmoths (Lepidoptera: Sphingidae). *The Journal of Research on the Lepidoptera* 39: 18-36.
- Bedrosian TA, Fonken LK, Walton JC & Nelson RJ (2011). Chronic exposure to dim light at night suppresses immune responses in Siberian hamsters. *Biology Letters* 7: 468-471.
- Bedrosian TA, Vaughn CA, Galan A, Daye G, Weil ZM & Nelson RJ (2013a). Nocturnal light exposure impairs affective responses in a wavelength-dependent manner. *Journal of Neuroscience* 33: 13081-13087.
- Bedrosian TA, Weil ZM & Nelson RJ (2013b). Chronic dim light at night provokes reversible depression-like phenotype: Possible role for TNF. *Molecular Psychiatry* 18: 930-936.
- Bellingham J, Chaurasia SS, Melyan Z, Liu C, Cameron MA, Tartelin EE, Iuvone PM, Hankins MW, Tosini G & Lucas RJ (2006). Evolution of melanopsin photoreceptors: Discovery and characterization of a new melanopsin in nonmammalian vertebrates. *PLoS Biology* 4: e254.
- Bennie J, Davies TW, Cruse D & Gaston KJ (2016). Ecological effects of artificial light at night on wild plants. *Journal of Ecology* 104: 611-620.
- Bennie J, Davies TW, Cruse D, Bell F & Gaston KJ (2018). Artificial light at night alters grassland vegetation species composition and phenology. *Journal of Applied Ecology* 55: 442-450.
- Benshoff HM, Brainard GC, Rollag MD & Lynch GR (1987). Suppression of pineal melatonin in *Peromyscus leucopus* by different monochromatic wavelengths of visible and near-ultraviolet light (UV-A). *Brain Research* 420: 397-402.
- Bentley GE, Van't Hof TJ & Ball GF (1999). Seasonal neuroplasticity in the songbird telencephalon: A role for melatonin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 96: 4674-4679.
- Berge J, Cottier F, Last KS, Varpe Ø, Leu E, Søreide J, Eiane K, Falk-Petersen S, Willis K, Nygård H, Vogedes D, Griffiths C, Johnsen G, Lorentzen D & Brierley AS (2009). Diel vertical migration of Arctic zooplankton during the polar night. *Biology Letters* 5: 69-72.
- Berger A, Lozano B, Barthel LMF & Schubert N (2020). Moving in the dark—evidence for an influence of artificial light at night on the movement behaviour of European hedgehogs (*Erinaceus europaeus*). *Animals* 10: 1-16.
- Berry RP, Wcislo WT, Warrant EJ (2011). Ocular adaptations for dim light vision in a nocturnal bee. *Journal of Experimental Biology* 214: 1283-1293.

- Berson DM, Castrucci AM & Provencio I (2010). Morphology and mosaics of melanopsin-expressing retinal ganglion cell types in mice. *The Journal of Comparative Neurology* 518: 2405-2422.
- Bhadra U, Thakkar N, Das P & Pal Bhadra M (2017). Evolution of circadian rhythms: From bacteria to human. *Sleep Medicine* 35: 49-61.
- Bird S & Parker J (2014). Low levels of light pollution may block the ability of male glow-worms (*Lampyrus noctiluca* L.): to locate females. *Journal of Insect Conservation* 18: 737-743.
- Bishop AL, Worrall R, Spohr LJ, McKenzie HJ & Barchia IM (2004). Response of *Culicoides* spp. (Diptera: Ceratopogonidae) to light-emitting diodes. *Australian Journal of Entomology* 43: 184-188.
- Blake D, Hutson AM, Racey PA, Rydell J & Speakman JR (1994). Use of lamplit roads by foraging bats in southern England. *Journal of Zoology* 234: 453-462.
- Bolliger J, Hennet T, Wermelinger B, Bösch R, Pazur R, Blum S, Haller J & Obrist MK (2020). Effects of traffic-regulated street lighting on nocturnal insect abundance and bat activity. *Basic and Applied Ecology* 47: 44-56.
- Boom MP, Spoelstra K, Biere A, Knop E & Visser ME (2020). Pollination and fruit infestation under artificial light at night: light colour matters. *Scientific Reports* 10: 18389.
- Booth D, Stewart AJA & Osorio D (2004). Colour vision in the glow-worm *Lampyrus noctiluca* (L.): (Coleoptera: Lampyridae): evidence for a green-blue chromatic mechanism. *Journal of Experimental Biology* 207: 2373-2378.
- Boldogh S, Dobrosi D & Samu P (2007). The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *Acta Chiropterologica* 9: 527-534.
- Borniger JC, Maurya SK, Periasamy M & Nelson RJ (2014a). Acute dim light at night increases body mass, alters metabolism, and shifts core body temperature circadian rhythms. *Chronobiology International* 31: 917-925.
- Borniger JC, McHenry ZD, Abi Salloum BA & Nelson RJ (2014b). Exposure to dim light at night during early development increases adult anxiety-like responses. *Physiology & Behavior* 133: 99-106.
- Botha LM, Jones TM & Hopkins GR (2017). Effects of lifetime exposure to artificial light at night on cricket (*Teleogryllus commodus*): courtship and mating behaviour. *Animal Behaviour* 129: 181-188.
- Brainard GC, Barker FM, Hoffman RJ, Stetson MH, Hanifin JP, Podolin PL & Rollag MD (1994). Ultraviolet regulation of neuroendocrine and circadian physiology in rodents. *Vision Research* 34: 1521-1533.
- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E & Rollag MD (2001). Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 21: 6405-6412.
- Brainard GC, Podolin PL, Leivy SW, Rollag MD, Cole C & Barker FM (1986). Near-ultraviolet radiation suppresses pineal melatonin content. *Endocrinology* 119: 2201-2205.
- Brainard GC, Richardson BA, Hurlbut EC, Steinlechner S, Matthews SA & Reiter RJ (1984a). The influence of various irradiances of artificial light, twilight, and moonlight on the suppression of pineal melatonin content in the Syrian hamster. *Journal of Pineal Research* 1: 105-119.
- Brainard GC, Richardson BA, King TS & Reiter RJ (1984b). The influence of different light spectra on the suppression of pineal melatonin content in the Syrian hamster. *Brain Research* 294: 333-339.
- Brainard GC, Richardson BA, Petterborg LJ & Reiter RJ (1982). The effect of different light intensities on pineal melatonin content. *Brain Research* 233: 75-81.
- Brainard GC, Sliney D, Hanifin JP, Glickman G, Byrne B, Greeson JM, Jasser S, Gerner E & Rollag

- MD (2008). Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420-nm) light. *Journal of Biological Rhythms* 23: 379-386.
- Brehm G, Niermann J, Jaimes Nino LM, Enseling D, Jüstel T, Axmacher JC, Warrant E & Fiedler K (2021): Moths are strongly attracted to ultraviolet and blue radiation *Insect Conservation and Diversity* 14: 188-198.
- Brillhart DB & Kaufman DW (1991). Influence of Illumination and Surface Structure on Space Use by Prairie Deer Mice (*Peromyscus maniculatus bairdii*). *Journal of Mammalogy* 72: 764-768.
- Briscoe AD & Chittka L (2001). The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology* 46: 471-510.
- Brooke M (2004). Albatrosses and petrels across the world. Oxford University Press.
- Brown HM, Ito H, & Ogden TE (1968). Spectral sensitivity of the planarian ocellus. *The Journal of General Physiology* 51: 255.
- Brüning A, Hölker F, Franke S, Kleiner W & Kloas W (2016). Impact of different colours of artificial light at night on melatonin rhythm and gene expression of gonadotropins in European perch. *The Science of the Total Environment* 543: 214–222.
- Brüning A, Hölker F, Franke S, Kleiner W & Kloas W (2018a). Influence of light intensity and spectral composition of artificial light at night on melatonin rhythm and mRNA expression of gonadotropins in roach *Rutilus rutilus*. *Fish Physiology and Biochemistry* 44: 1-12.
- Brüning A, Kloas W, Preuer T & Hölker F (2018b). Influence of artificially induced light pollution on the hormone system of two common fish species, perch and roach, in a rural habitat. *Conservation Physiology* 6: coy016.
- Buhr ED, Vemaraju S, Diaz N, Lang RA & Van Gelder RN (2019). Neuropsin (OPN5) Mediates Local Light-Dependent Induction of Circadian Clock Genes and Circadian Photoentrainment in Exposed Murine Skin. *Current Biology* 29: 3478-3487.
- Buhr ED, Yue WWS, Ren X, Jiang Z, Liao H-WR, Mei X, Vemaraju S, Nguyen M-T, Reed RR, Lang RA, Yau K-W & Van Gelder RN (2015). Neuropsin (OPN5)-mediated photoentrainment of local circadian oscillators in mammalian retina and cornea. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112: 13093-13098.
- Bujalský L, Březina S, Matějček L & Frouz J (2014). Světelné znečištění způsobené umělým osvětlením sjezdovek v Krkonošském národním parku Light pollution caused by artificial illumination on downhill ski tracks in the Krkonoše Mts National Park. *Opera Corcontica* 51: 109-124.
- Burgerhout E, Lokman PM, van den Thillart GEEJM & Dirks RP (2019). The time-keeping hormone melatonin: A possible key cue for puberty in freshwater eels (*Anguilla* spp.). *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 29: 1-21.
- Burhan A & Gençer N (2020). The effect of illumination with different light wavelengths on the orientation of Turkestan cockroach, *Blatta lateralis* (Walker, 1868): (Blattodea: Blattidae). *Turkish Journal of Entomology* 44: 477-486.
- Burkett DA & Butler JF (2005). Laboratory evaluation of colored light as an attractant for female *Aedes aegypti*, *Aedes albopictus*, *Anopheles quadrimaculatus*, and *Culex nigripalpus*. *Florida Entomologist* 88: 383-389.
- Bushnell ME, Claisse JT & Laidley CW (2010). Lunar and seasonal patterns in fecundity of an indeterminate, multiple-spawning surgeonfish, the yellow tang *Zebrasoma flavescens*. *Journal of Fish Biology* 76: 1343-1361.
- Cabrera-Cruz SA, Smolinsky JA & Buler JJ (2018). Light pollution is greatest within migration passage areas for nocturnally-migrating birds around the world. *Scientific Reports* 8: 1-8.
- Cajochen C, Münch M, Kobiacka S, Kräuchi K, Steiner R, Oelhafen P, Orgül S & Wirz-Justice A

- (2005). High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 90: 1311-1316.
- Carlson DE & Chiu WC (2008). The absence of circadian cues during recovery from sepsis modifies pituitary-adrenocortical function and impairs survival. *Shock* (Augusta, Ga.) 29: 127-132.
- Castanon-Cervantes O, Wu M, Ehlen JC, Paul K, Gamble KL, Johnson RL, Besing RC, Menaker M, Gewirtz AT & Davidson AJ (2010). Dysregulation of inflammatory responses by chronic circadian disruption. *Journal of Immunology* (Baltimore, Md.: 1950) 185: 5796-5805.
- Castrejon F & Rojas LC (2010). Behavioral responses of larvae and adults of *Estigmene acrea* (Lepidoptera: Arctiidae) to light of different wavelengths. *Florida Entomologist* 93: 505-509.
- Chen YC, Wang CY, Teng HJ, Chen CF, Chang MC, Lu LC, Lin C, Jian SW & Wu HS (2011). Comparison of the efficacy of CO₂-baited and unbaited light traps, gravid traps, backpack aspirators, and sweep net collections for sampling mosquitoes infected with Japanese encephalitis virus. *Journal of Vector Ecology* 36: 68-74.
- Chen F, Shi J & Keena M (2016). Evaluation of the effects of light intensity and time interval after the start of scotophase on the female flight propensity of Asian Gypsy Moth (Lepidoptera: Erebiidae). *Environmental Entomology* 45: 404-409.
- Chepesiuk R (2009). Missing the dark: Health effects of light pollution. *Environmental Health Perspectives* 117: A20-A27.
- Ciach M & Fröhlich A (2017). 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* 20: 547-559.
- Ciach M & Fröhlich A (2019). Ungulates in the city: light pollution and open habitats predict the probability of roe deer occurring in an urban environment. *Urban Ecosystems* 22: 513-523.
- Ciani E, Haug TM, Maugars G, Weltzien F-A, Falcón J & Fontaine R (2021). Effects of Melatonin on Anterior Pituitary Plasticity: A Comparison Between Mammals and Teleosts. *Frontiers in Endocrinology* 11.
- Coomans CP, van den Berg SAA, Houben T, van Klinken J-B, van den Berg R, Pronk ACM, Havekes LM, Romijn JA, van Dijk KW, Biermasz NR & Meijer JH (2013). Detrimental effects of constant light exposure and high-fat diet on circadian energy metabolism and insulin sensitivity. *FASEB Journal: Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology* 27: 1721-1732.
- Costa HS & Robb KL (1999). Effects of Ultraviolet-Absorbing Greenhouse Plastic Films on Flight Behavior of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) and *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Economic Entomology* 92: 557-562.
- Cowan T & Gries G (2009). Ultraviolet and violet light: attractive orientation cues for the Indian meal moth, *Plodia interpunctella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 131: 148-158.
- Crawford RL & Engstrom RT (2001). Characteristics of avian mortality at a north Florida television tower: a 29-year study. *Journal of Field Ornithology* 72: 380-388.
- Croll NA (1966). The phototactic response and spectral sensitivity of *Chroviadorina viridis* (Nematoda, Chromadorida) with a note on the nature of the paired pigment spots. *Nematologica* 12: 610-614.
- Crump MC, Brown C, Griffin-Nolan RJ, Angeloni L, Lemoine NP & Seymoure BM (2021). Effects of low-level artificial light at night on Kentucky Bluegrass and an introduced herbivore. *Frontiers in Ecology and Evolution* 612.
- Csaba G & Baráth P (1975). Morphological changes of thymus and the thyroid gland after postnatal extirpation of pineal body. *Endocrinologia Experimentalis* 9: 59-67.
- Cutty GB, Goldman BD, Doherty P & Bartke A (1981). Melatonin prevents decrease in plasma PRL

- and LH levels in male hamsters exposed to a short photoperiod. *International Journal of Andrology* 4: 281-290.
- Cutler DE, Bennett RR, Stevenson RD & White RH (1995). Feeding behavior in the nocturnal moth *Manduca sexta* is mediated by blue receptors, but where are they located in the retina? *The Journal of Experimental Biology* 198: 1909-1917.
- Czeisler CA, Allan JS, Strogatz SH, Ronda JM, Sánchez R, Ríos CD, Freitag WO, Richardson GS & Kronauer RE (1986). Bright light resets the human circadian pacemaker independent of the timing of the sleep-wake cycle. *Science* 233: 667-671.
- Da Silva A & Kempnaers B (2017). Singing from North to South: latitudinal variation in timing of dawn singing under natural and artificial light conditions. *Journal of Animal Ecology* 86: 1286-1297.
- Da Silva A, Samplonius JM, Schlicht E, Valcu M & Kempnaers B (2014). Artificial night lighting rather than traffic noise affects the daily timing of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Behavioral Ecology* 25: 1037-1047.
- Da Silva A, Valcu M & Kempnaers B (2015). Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370: 20140126.
- Dacke M, Byrne MJ, Scholtz CH & Warrant EJ (2004). Lunar orientation in a beetle. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 271: 361-365.
- Dalton BE, Lu J, Leips J, Cronin TW & Carleton KL (2015). Variable light environments induce plastic spectral tuning by regional opsin coexpression in the African cichlid fish, *Metriacrima zebra*. *Molecular Ecology* 24: 4193-4204.
- Daoud-Opit S & Jones DN (2016). Guided by the light: Roost choice and behaviour of urban Rainbow Lorikeets (*Trichoglossus haematodus*). *European Journal of Ecology* 2: 72-80.
- Dauchy RT, Wren-Dail MA, Hoffman AE, Hanifin JP, Warfield B, Brainard GC, Hill SM, Belancio VP, Dauchy EM & Blask DE (2016). Effects of Daytime Exposure to Light from Blue-Enriched Light-Emitting Diodes on the Nighttime Melatonin Amplitude and Circadian Regulation of Rodent Metabolism and Physiology. *Comparative Medicine* 66: 373-383.
- Davies TW, Bennie J, Cruse D, Blumgart D, Inger R & Gaston KJ (2017) Multiple night-time light-emitting diode lighting strategies impact grassland invertebrate assemblages. *Global Change Biology* 23: 2641-2648.
- Davies TW, Bennie J & Gaston KJ (2012). Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biology Letters* 8: 764-767.
- Davies WIL, Foster RG & Hankins MW (2014). The Evolution and Function of Melanopsin in Craniates. In DM Hunt, MW Hankins, SP Collin & NJ Marshall (Eds.), *Evolution of Visual and Non-visual Pigments* (pp. 23–63). Springer US.
- Davies WIL, Zheng L, Hughes S, Tamai TK, Turton M, Halford S, Foster RG, Whitmore D & Hankins MW (2011). Functional diversity of melanopsins and their global expression in the teleost retina. *Cellular and Molecular Life Sciences: CMLS* 68: 4115-4132.
- Day RH, Prichard AK, Rose JR, Streever B & Swem T (2017). Effects of a hazing-light system on migration and collision avoidance of eiders at an artificial oil-production Island, Arctic Alaska. *Arctic* 70: 13-24.
- De Jong M, Caro SP, Gienapp P, Spoelstra K & Visser ME (2017). Early Birds by Light at Night: Effects of Light Color and Intensity on Daily Activity Patterns in Blue Tits. *Journal of Biological Rhythms* 32: 323-333.
- De Jong M, Lamers KP, Eugster M, Ouyang JQ, Da Silva A, Mateman AC, ... & Spoelstra K (2018). Effects of experimental light at night on extra-pair paternity in a songbird. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology* 329: 441-448.

- De Jong M, Ouyang JQ, Da Silva A, van Grunsven RH, Kempenaers B, Visser ME & Spoelstra K (2015). Effects of nocturnal illumination on life-history decisions and fitness in two wild songbird species. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370: 20140128.
- De Jong M, Ouyang JQ, van Grunsven RH, Visser ME & Spoelstra K (2016). Do wild great tits avoid exposure to light at night? *PLoS One* 11: e0157357.
- Dearworth JR, Selvarajah BP, Kalman RA, Lanzone AJ, Goch AM, Boyd AB, Goldberg LA & Cooper LJ (2011). A mammalian melanopsin in the retina of a fresh water turtle, the red-eared slider (*Trachemys scripta elegans*). *Vision Research* 51: 288-295.
- Deppe L, Rowley O, Rowe L K, Shi N, McArthur N, Gooday O & Goldstien SJ (2017). Investigation of fallout events in Hutton's shearwaters (*Puffinus huttoni*): associated with artificial lighting. *Notornis* 64: 181-191.
- Derryberry EP (2017). Dawn song in natural and artificial continuous day: Light pollution affects songbirds at high latitudes. *The Journal of Animal Ecology* 86: 1283-1285.
- Deveson SL, Arendt J & Forsyth IA (1990). Sensitivity of goats to a light pulse during the night as assessed by suppression of melatonin concentrations in the plasma. *Journal of Pineal Research* 8: 169-177.
- Dias KS, Dosso ES, Hall AS, Schuch AP & Tozetti AM (2019). Ecological light pollution affects anuran calling season, daily calling period, and sensitivity to light in natural Brazilian wetlands. *Die Naturwissenschaften* 106: 46.
- Diaz-Montano J, Campbell JF, Phillips TW, Cohnstaedt LW & Throne JE (2016): Evaluation of light attraction for the stored-product psocid, *Liposcelis bostrychophila*. *Journal of Pest Science* 89: 923-930.
- Dickerson AL, Hall ML & Jones TM (2022). The effect of natural and artificial light at night on nocturnal song in the diurnal willie wagtail. *Science of The Total Environment* 808: 151986.
- Diken G & Boyaci YO (2008). Light-trapping of caddisflies (Insecta: Trichoptera) from Eğirdir Lake in the southern. *Turkey Journal of Fisheries* 2: 653-661.
- Dimovski AM & Robert KA (2018). Artificial light pollution: Shifting spectral wavelengths to mitigate physiological and health consequences in a nocturnal marsupial mammal. *Journal of Experimental Zoology. Part A, Ecological and Integrative Physiology* 329: 497-505.
- Dominoni DM, de Jong M, Bellingham M, O'Shaughnessy P, van Oers K, Robinson J, Smith B, Visser ME & Helm B (2018). 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* 329: 473-487.
- Dominoni DM, Quetting M & Partecke J (2013). Long-term effects of chronic light pollution on seasonal functions of European blackbirds (*Turdus merula*). *PloS One* 8: e85069.
- Downs NC, Beaton V, Guest J, Polanski J, Robinson SL & Racey PA (2003). The effects of illuminating the roost entrance on the emergence behaviour of *Pipistrellus pygmaeus*. *Biological Conservation* 111: 247-252.
- Duarte C, Quintanilla-Ahumada D, Anguita C, Manríquez K & Quijón PA (2019). Artificial light pollution at night (ALAN): disrupts the distribution and circadian rhythm of a sandy beach isopod. *Environmental Pollution* 248: 565-573.
- Duehl AJ, Cohnstaedt LW, Arbogast RT & Teal PEA (2011). Evaluating light attraction to increase trap efficiency for *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Economic Entomology* 104: 1430-1435.
- Dupuis B, Amélineau F, Tarroux A, Bjørnstad O, Bråthen VS, Danielsen J, ... & Strøm H (2021).

- Light-level geolocators reveal spatial variations in interactions between northern fulmars and fisheries. *Marine Ecology Progress Series* 676: 159-172.
- Durrant J, Botha LM, Green MP, Jones TM (2018). Artificial light at night prolongs juvenile development time in the black field cricket, *Teleogryllus commodus*. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution* 330: 225-233.
- Eacock A, Rowland HM, van't Hof AE, Yung CJ, Edmonds N & Saccheri IJ (2019). Adaptive colour change and background choice behaviour in peppered moth caterpillars is mediated by extraocular photoreception. *Communications Biology* 2: 1-8.
- Eccard J, Scheffler I & Franke S (2018). Off-grid: solar powered LED illumination impacts epigeal arthropods. *Insect Conservation and Diversity* 11: 600-607.
- Egri Á, Száz D, Farkas A, Pereszlényi Á, Horváth G & Kriska G (2017). Method to improve the survival of night-swarmer mayflies near bridges in areas of distracting light pollution. *Royal Society Open Science* 4: 171166.
- Evans WR, Akashi Y, Altman NS & Manville AM (2007). Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light. *North American Birds* 60: 476-488.
- Falchi F, Cinzano P, Duriscoe D, Kyba CC, Elvidge CD, Baugh K, ... & Furgoni R (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances* 2: e1600377.
- Falcón J, Torriglia A, Attia D, Viénot F, Gronfier C, Behar-Cohen F, Martinsons C & Hicks D (2020). Exposure to Artificial Light at Night and the Consequences for Flora, Fauna, and Ecosystems. *Frontiers in Neuroscience* 14: 602796.
- Fayle TM, Sharp RE & Majerus MEN (2007). The effect of moth trap type on catch size and composition of British Lepidoptera. *British Journal of Entomology Natural History* 20: 221-232.
- Feng L, Qin H, Li J, Li X, Feng J & Jiang T (2022). Extrinsic and intrinsic factors influencing the emergence and return of Asian particolored bats *Vespertilio sinensis*. *Ecology and Evolution*, accepted.
- Ferreira MT, Borges PAV & Scheffrahn RH (2012). Attraction of Alates of *Cryptotermes brevis* (Isoptera: Kalotermitidae): to Different Light Wavelengths in South Florida and the Azores. *Journal of Economic Entomology* 105: 2213-2215.
- Ferreira MT & Scheffrahn RH (2011). Light Attraction and Subsequent Colonization Behaviors of Alates and Dealates of the West Indian Drywood Termite (Isoptera: Kalotermitidae): *Florida Entomologist* 94: 131-136.
- Ffrench-Constant RH, Somers-Yeates R, Bennie J, Economou T, Hodgson D, Spalding A & McGregor PK (2016). Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 283: 20160813.
- Firebaugh A & Haynes KJ (2017). Light pollution may create demographic traps for nocturnal insects. *Basic and Applied Ecology* 34: 118-125.
- Firth BT, Belan I & Kennaway DJ (2006). Persistence of a plasma melatonin rhythm in constant darkness and its inhibition by constant light in the sleepy lizard, *Tiliqua rugosa*. *Journal of Pineal Research* 41: 15-20.
- Fonken LK, Aubrecht TG, Meléndez-Fernández OH, Weil ZM & Nelson RJ (2013). Dim Light at Night Disrupts Molecular Circadian Rhythms and Increases Body Weight. *Journal of Biological Rhythms* 28:262-271.
- Fonken LK & Nelson RJ (2013). Dim light at night increases depressive-like responses in male C3H/HeNHsd mice. *Behavioural Brain Research* 243: 74-78.
- Fonken LK, Kitsmiller E, Smale L & Nelson RJ (2012). Dim nighttime light impairs cognition and provokes depressive-like responses in a diurnal rodent. *Journal of Biological Rhythms* 27: 319-327.

- Foster JJ, Tocco C, Smolka J, Khaldy L, Baird E, Byrne MJ, Nilsson DE & Dacke M (2021). Light pollution forces a change in dung beetle orientation behavior. *Current Biology* 31: 3935-3942.
- Frigato E, Vallone D, Bertolucci C & Foulkes NS (2006). Isolation and characterization of melanopsin and pinopsin expression within photoreceptive sites of reptiles. *Die Naturwissenschaften* 93: 379-385.
- Fuller G, Raghanti MA, Dennis PM, Kuhar CW, Willis MA, Schook MW & Lukas KE (2016). A comparison of nocturnal primate behavior in exhibits illuminated with red and blue light. *Applied Animal Behaviour Science* 184: 126-134.
- Fuller RC & Claricoates KM (2011). Rapid light-induced shifts in opsin expression: Finding new opsins, discerning mechanisms of change, and implications for visual sensitivity. *Molecular Ecology* 20: 3321-3335.
- Futahashi R, Kawahara-Miki R, Kinoshita M, Yoshitake K, Yajima S, Arikawa K & Fukatsu T (2015). Extraordinary diversity of visual opsin genes in dragonflies. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: E1247-E1256.
- Futsaether CM, Vollsnes AV, Kruse OMO, Otterholt E, Kvaal K & Eriksen AB (2009). Effects of the Nordic photoperiod on ozone sensitivity and repair in different clover species studied using infrared imaging. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 38: 437-443.
- Fyie LR, Gardiner MM & Meuti ME (2021). Artificial light at night alters the seasonal responses of biting mosquitoes. *Journal of Insect Physiology* 129: 104194.
- Gallaway T, Olsen RN & Mitchell DM (2010). The economics of global light pollution. *Ecological Economics* 69: 658-665.
- García-Fernández JM, Cernuda-Cernuda R, Davies WIL, Rodgers J, Turton M, Peirson SN, Follett BK, Halford S, Hughes S, Hankins MW & Foster RG (2015). The hypothalamic photoreceptors regulating seasonal reproduction in birds: A prime role for VA opsin. *Frontiers in Neuroendocrinology* 37: 13-28.
- Garza ZCF, Born M, Hilbers PAJ, van Riel NAW & Liebmann J (2018). Visible Blue Light Therapy: Molecular Mechanisms and Therapeutic Opportunities. *Current Medicinal Chemistry* 25: 5564-5577.
- Gaston KJ, Duffy JP, Gaston S, Bennie J & Davies TW (2014). Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia* 176: 917-931.
- Gauthreaux Jr SA, Belser CG, Rich C & Longcore T (2006). Effects of artificial night lighting on migrating birds. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, p. 67-93. IslandPress, Washington, Covelo, London.
- Geneva II (2016). Photobiomodulation for the treatment of retinal diseases: A review. *International Journal of Ophthalmology* 9: 145-152.
- Gillings S & Scott C (2021). Nocturnal flight calling behaviour of thrushes in relation to artificial light at night. *Ibis* 163: 1379-1393.
- Gineste B, Souquet M, Couzi FX, Giloux Y, Philippe JS, Hoarau C, ... & Le Corre M (2017). Tropical shearwater population stability at Reunion Island, despite light pollution. *Journal of Ornithology* 158: 385-394.
- Goldsmith TH & Fernandez HR (1968). Comparative studies of crustacean spectral sensitivity. *Zeitschrift für Vergleichende Physiologie* 60: 156-175.
- Goldsmith TH & Ruck PR (1958). The spectral sensitivities of the dorsal ocelli of cockroaches and honeybees: an electrophysiological study. *The Journal of General Physiology* 41: 1171.
- Gomes E, Rey B, Débias F, Amat I & Desouhant E (2021). Dealing with host and food searching in a diurnal parasitoid: consequences of light at night at intra- and trans-generational levels. *Insect Conservation and Diversity* 14: 235-246.
- Gooley JJ, Lu J, Fischer D & Saper CB (2003). A broad role for melanopsin in nonvisual

- photoreception. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 23: 7093-7106.
- Greenwood VJ, Smith EL, Cuthill IC, Bennett AT, Goldsmith AR & Griffiths R (2002). Do European starlings prefer light environments containing UV? *Animal Behaviour* 64: 923-928.
- Grubisic M, Haim A, Bhusal P, Dominoni DM, Gabriel KMA, Jechow A, Kupprat F, Lerner A, Marchant P, Riley W, Stebelova K, van Grunsven RHA, Zeman M, Zubidat AE & Hölker F (2019). Light Pollution, Circadian Photoreception, and Melatonin in Vertebrates. *Sustainability* 11: 6400.
- Guido ME, Marchese NA, Rios MN, Morera LP, Diaz NM, Garbarino-Pico E & Contin MA (2022). Non-visual Opsins and Novel Photo-Detectors in the Vertebrate Inner Retina Mediate Light Responses Within the Blue Spectrum Region. *Cellular and Molecular Neurobiology* 42: 59-83.
- Haim A & Zubidat AE (2015). Artificial light at night: Melatonin as a mediator between the environment and epigenome. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 370: 20140121.
- Halevy O, Biran I & Rozenboim I (1998). Various light source treatments affect body and skeletal muscle growth by affecting skeletal muscle satellite cell proliferation in broilers. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 120: 317-323.
- Hanmer HJ, Boothby C, Toms MP, Noble DG & Balmer DE (2021). Large-scale citizen science survey of a common nocturnal raptor: urbanization and weather conditions influence the occupancy and detectability of the Tawny Owl *Strix aluco*. *Bird Study* 68: 233-244.
- Hannibal J, Hindersson P, Knudsen SM, Georg B & Fahrenkrug J (2002a). The photopigment melanopsin is exclusively present in pituitary adenylate cyclase-activating polypeptide-containing retinal ganglion cells of the retinohypothalamic tract. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 22: RC191.
- Hannibal J, Hindersson P, Nevo E & Fahrenkrug J (2002b). The circadian photopigment melanopsin is expressed in the blind subterranean mole rat, *Spalax*. *Neuroreport* 13: 1411-1414.
- Hannibal J, Kankipati L, Strang CE, Peterson BB, Dacey D & Gamlin PD (2014). Central projections of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells in the macaque monkey. *The Journal of Comparative Neurology* 522: 2231-2248.
- Hatori M & Panda S (2010). The emerging roles of melanopsin in behavioral adaptation to light. *Trends in Molecular Medicine* 16: 435-446.
- Hatori M, Gronfier C, Van Gelder RN, Bernstein PS, Carreras J, Panda S, Marks F, Sliney D, Hunt CE, Hirota T, Furukawa T & Tsubota K (2017). Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies. *NPJ Aging and Mechanisms of Disease* 3: 9.
- Hattar S, Liao HW, Takao M, Berson DM & Yau KW (2002). Melanopsin-containing retinal ganglion cells: Architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science* 295: 1065-1070.
- Heinen R (2021). A spotlight on the phytobiome: Plant-mediated interactions in an illuminated world. *Basic and Applied Ecology* 57: 146-158.
- Heise BA (1992). *Overview and Strategies of Ephemeroptera and Plecoptera*. The Sandhill Crane Press, Devon.
- Henze MJ & Oakley TH (2015). The dynamic evolutionary history of pancrustacean eyes and opsins. *Integrative and Comparative Biology* 55: 830-842.
- Herzmann D & Labhart T (1989). Spectral sensitivity and absolute threshold of polarization vision in crickets: A behavioral study. *Journal of Comparative Physiology* 165: 315-319.
- Hey MH, DiBiase E, Roach DA, Carr DE & Haynes KJ (2020). Interactions between artificial light at

- night, soil moisture, and plant density affect the growth of a perennial wildflower. *Oecologia* 193: 503-510.
- Hoffmann K (1979). Photoperiod, pineal, melatonin and reproduction in hamsters. *Progress in Brain Research* 52: 397-415.
- Hoffmann K, Illnerová H & Vaněček J (1981). Effect of photoperiod and of one minute light at night-time on the pineal rhythm on N-acetyltransferase activity in the Djungarian hamster *Phodopus sungorus*. *Biology of Reproduction* 24: 551-556.
- Hoffmann K, Illnerová H & Vaněček J (1986). Change in duration of the nighttime melatonin peak may be a signal driving photoperiodic responses in the Djungarian hamster (*Phodopus sungorus*). *Neuroscience Letters* 67: 68-72.
- Hoffmann J, Palme R & Eccard JA (2018). Long-term dim light during nighttime changes activity patterns and space use in experimental small mammal populations. *Environmental Pollution* 238: 844-851.
- Hölker F, Wolter C, Perkin EK & Tockner K (2010). Light pollution as a biodiversity threat. *Trends in Ecology & Evolution* 25: 681-682.
- Holveck MJ, Grégoire A, Doutrelant C & Lambrechts MM (2019). Nest height is affected by lamppost lighting proximity in addition to nestbox size in urban great tits. *Journal of Avian Biology* 50: e01798.
- Hopkins J, Baudry G, Candolin U & Kaitala A (2015). I'm sexy and I glow it: female ornamentation in a nocturnal capital breeder. *Biology Letters* 11: 20150599.
- House GM, Sobotik EB, Nelson JR & Archer GS (2021). Experimental monochromatic light-emitting diode fixture impacts Pekin duck stress and eye development. *Poultry Science* 100: 101507.
- Howard CM & Lutterschmidt DI (2015). The Effects of Melatonin on Brain Arginine Vasotocin: Relationship with Sex and Seasonal Differences in Melatonin Receptor Type 1 in Green Treefrogs (*Hyla cinerea*). *Journal of Neuroendocrinology* 27: 670-679.
- Ikegami K & Yoshimura T (2012). Circadian clocks and the measurement of daylength in seasonal reproduction. *Molecular and Cellular Endocrinology* 349: 76-81.
- Ikegami T, Takeuchi Y, Hur S-P & Takemura A (2014). Impacts of moonlight on fish reproduction. *Marine Genomics* 14: 59-66.
- Ikeno T, Weil ZM & Nelson RJ (2014). Dim light at night disrupts the short-day response in Siberian hamsters. *General and Comparative Endocrinology* 197: 56-64.
- Ilić M, Pirih P & Belušić G (2016). Four photoreceptor classes in the open rhabdom eye of the red palm weevil, *Rynchophorus ferrugineus* Olivier. *Journal of Comparative Physiology A* 202: 203-213.
- Illnerová H & Vaněček J (1979a). Effect of one-minute exposure to light at night on rat pineal serotonin N-acetyltransferase. *Progress in Brain Research* 52: 241-243.
- Illnerová H & Vaněček J (1979b). Response of rat pineal serotonin N-acetyltransferase to one min light pulse at different night times. *Brain Research* 167: 431-434.
- Illnerová H & Vaněček J (1980). Pineal rhythm in N-acetyltransferase activity in rats under different artificial photoperiods and in natural daylight in the course of a year. *Neuroendocrinology* 31: 321-326.
- Illnerová H, Vaněček J, Krecek J, Wetterberg L & Sääf J (1979). Effect of one minute exposure to light at night on rat pineal serotonin N-acetyltransferase and melatonin. *Journal of Neurochemistry* 32: 673-675.
- Injaian AS, Francis CD, Ouyang JQ, Dominoni DM, Donald JW, Fuxjager MJ, ... & Vitousek MN (2020). Baseline and stress-induced corticosterone levels across birds and reptiles do not reflect urbanization levels. *Conservation Physiology* 8: coz110.
- Isayama T, Chen Y, Kono M, Fabre E, Slavsky M, DeGrip WJ, Ma J-X, Crouch RK & Makino CL

- (2014). Coexpression of three opsins in cone photoreceptors of the salamander *Ambystoma tigrinum*. *Journal of Comparative Neurology* 522: 2249-2265.
- Iversen M, Myhr AI & Wargelius A (2016). Approaches for delaying sexual maturation in salmon and their possible ecological and ethical implications. *Journal of Applied Aquaculture* 28: 330-369.
- Jacobs GH, Williams GA & Fenwick JA (2004). Influence of cone pigment coexpression on spectral sensitivity and color vision in the mouse. *Vision Research* 44: 1615-1622.
- Jeon JH, Kim MG, Lee HS (2014). Phototactic behavior 4: attractive effects of *Trialeurodes vaporariorum* adults to light emitting diodes under laboratory conditions. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 57: 197-200.
- Jeong M-J & Jeon C-J (2015). Localization of melanopsin-immunoreactive cells in the Mongolian gerbil retina. *Neuroscience Research* 100: 6-16.
- Jeong M-J, Kim H-G & Jeon C-J (2018). The organization of melanopsin-immunoreactive cells in microbat retina. *PloS One* 13: e0190435.
- Jiang J, He Y, Kou H, Ju Z, Gao X & Zhao H (2020). The effects of artificial light at night on Eurasian tree sparrow (*Passer montanus*): Behavioral rhythm disruption, melatonin suppression and intestinal microbiota alterations. *Ecological Indicators* 108: 105702.
- Jiang X, Pardue MT, Mori K, Ikeda S-I, Torii H, D'Souza S, Lang RA, Kurihara T & Tsubota K (2021). Violet light suppresses lens-induced myopia via neuropsin (OPN5) in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 118: e2018840118.
- Johnsen S, Kelber A, Warrant E, Sweeney AM, Widder EA, Lee RL Jr & Hernández-Andrés J (2006). Crepuscular and nocturnal illumination and its effects on color perception by the nocturnal hawkmoth *Deilephila elpenor*. *The Journal of Experimental Biology* 209: 789-800.
- Jones J & Francis CM (2003). The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses. *Journal of Avian Biology* 34: 328-333.
- Joshi BN & Udaykumar K (2000). Melatonin counteracts the stimulatory effects of blinding or exposure to red light on reproduction in the skipper frog *Rana cyanophlyctis*. *General and Comparative Endocrinology* 118: 90-95.
- Joshi D & Chandrashekar MK (1984). Bright light flashes of 0.5 milliseconds reset the circadian clock of a microchiropteran bat. *The Journal of Experimental Zoology* 230: 325-328.
- Joshi D & Chandrashekar MK (1985a). Light flashes of different durations (0.063-3.33 msec) phase shift the circadian flight activity of a bat. *The Journal of Experimental Zoology* 233: 187-192.
- Joshi D & Chandrashekar MK (1985b). Spectral sensitivity of the photoreceptors responsible for phase shifting the circadian rhythm of activity in the bat, *Hipposideros speoris*. *Journal of Comparative Physiology A* 156: 189-198.
- Jusuf PR, Lee SCS, Hannibal J & Grünert U (2007). Characterization and synaptic connectivity of melanopsin-containing ganglion cells in the primate retina. *The European Journal of Neuroscience* 26: 2906-2921.
- Kempnaers B, Borgström P, Loës P, Schlicht E & Valcu M (2010). Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds. *Current Biology*: CB 20: 1735-1739.
- Kernbach ME, Cassone VM, Unnasch TR & Martin LB (2020). Broad-spectrum light pollution suppresses melatonin and increases West Nile virus-induced mortality in House Sparrows (*Passer domesticus*). *The Condor* 122: duaa018.
- Kim M-G, Yang J-Y, Chung N-H & Lee H-S (2012). Photo-response of tobacco whitefly, *Bemisia tabaci gennadius* (hemiptera: Aleyrodidae) to light-emitting diodes. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 55: 567-569.

- Klein DC (1985). Photoneural regulation of the mammalian pineal gland. Ciba Foundation Symposium 117: 38-56.
- Klein DC & Weller JL (1970). Indole metabolism in the pineal gland: A circadian rhythm in N-acetyltransferase. Science 169: 1093-1095.
- Knop E, Zoller L, Ryser R, Gerpe C, Hörler M & Fontaine C (2017). Artificial light at night as a new threat to pollination. Nature 548: 206-209.
- Kojima K, Matsutani Y, Yanagawa M, Imamoto Y, Yamano Y, Wada A, Shichida Y & Yamashita T (2021). Evolutionary adaptation of visual pigments in geckos for their photic environment. Science Advances 7: eabj1316.
- Korner P, von Maravic I & Haupt H (2022). Birds and the 'Post Tower' in Bonn: a case study of light pollution. Journal of Ornithology 163: 827-841.
- Korpach AM, Garroway CJ, Mills AM, von Zuben V, Davy CM & Fraser KC (2022). Urbanization and artificial light at night reduce the functional connectivity of migratory aerial habitat. Ecography 2022: e05581.
- Kosicki JZ (2021). 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 780: 146434.
- Koyanagi M, Kubokawa K, Tsukamoto H, Shichida Y & Terakita A (2005). Cephalochordate melanopsin: Evolutionary linkage between invertebrate visual cells and vertebrate photosensitive retinal ganglion cells. Current Biology: CB 15: 1065-1069.
- Kramer KM & Birney EC (2001). Effect of Light Intensity on Activity Patterns of Patagonian Leaf-Eared Mice, Phyllotis Xanthopygus. Journal of Mammalogy 82: 535-544.
- Kretz JR, Stent GS & Kristan WB (1976). Photosensory input pathways in the medicinal leech. Journal of Comparative Physiology 106: 1-37.
- Kumar J, Malik S, Bhardwaj SK & Rani S (2018). Bright light at night alters the perception of daylength in Indian weaver bird (Ploceus philippinus). Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology 329: 488-496.
- Kumar V (1997). Photoperiodism in higher vertebrates: An adaptive strategy in temporal environment. Indian Journal of Experimental Biology 35: 427-437.
- Kumar V & Gwinner E (2005). Pinealectomy shortens resynchronisation times of house sparrow (Passer domesticus) circadian rhythms. Die Naturwissenschaften 92: 419-422.
- Kumar V, Rani S, Malik S, Trivedi AK, Schwabl I, Helm B & Gwinner E (2007). Daytime light intensity affects seasonal timing via changes in the nocturnal melatonin levels. Die Naturwissenschaften 94: 693-696.
- Kwak MJ, Je SM, Cheng HC, Seo SM, Park JH, Baek SG, ... & Woo SY (2018). Night light-adaptation strategies for photosynthetic apparatus in yellow-poplar (Liriodendron tulipifera L.) exposed to artificial night lighting. Forests 9: 74.
- Kwak MJ, Lee SH, Khaine I, Je SM, Lee TY, You HN, ... & Woo SY (2017). Stomatal movements depend on interactions between external night light cue and internal signals activated by rhythmic starch turnover and abscisic acid (ABA) levels at dawn and dusk. Acta Physiologiae Plantarum 39: 1-12.
- Kyba CCM, Kuester T, Sánchez de Miguel A, Baugh K, Jechow A, Hölker F, Bennie J, Elvidge CD, Gaston KJ & Guanter L (2017). Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. Science Advances 3: e1701528.
- La Sorte FA, Fink D, Buler JJ, Farnsworth A & Cabrera-Cruz SA (2017). Seasonal associations with urban light pollution for nocturnally migrating bird populations. Global Change Biology 23: 4609-4619.
- La Sorte FA & Horton KG (2021). Seasonal Variation in the Effects of Artificial Light at Night on the

- Occurrence of Nocturnally Migrating Birds in Urban Areas. *Environmental Pollution* 270: 116085.
- Laforge A, Pauwels J, Faure B, Bas Y, Kerbiriou C, Fonderflick J, & Besnard A (2019). Reducing light pollution improves connectivity for bats in urban landscapes. *Landscape Ecology* 34: 793-809.
- Langel JL, Smale L, Esquivá G & Hannibal J (2015). Central melanopsin projections in the diurnal rodent, *Arvicanthis niloticus*. *Frontiers in Neuroanatomy* 9: 93.
- Lau TFS, Gross EM & Meyer-Rochow VB (2007): Sexual dimorphism and light/dark adaptation in the compound eyes of male and female *Acentria ephemerella* (Lepidoptera: Pyraloidea: Crambidae). *European Journal of Entomology* 104: 459-470.
- Le Tallec T, Théry M & Perret M (2016). Melatonin concentrations and timing of seasonal reproduction in male mouse lemurs (*Microcebus murinus*) exposed to light pollution. *Journal of Mammalogy* 97: 753-760.
- Lerchl A (1995). Sustained response of pineal melatonin synthesis to a single one-minute light pulse during night in Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*). *Neuroscience Letters* 198: 65-67.
- Leskey TC, Lee D-H, Glenn DM & Morrison WR (2015): Behavioral Responses of the Invasive *Halyomorpha halys* (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae) to Light-Based Stimuli in the Laboratory and Field. *Journal of Insect Behavior* 28: 674-692.
- Letaltec T, Théry M & Perret M (2015). Effects of light pollution on seasonal estrus and daily rhythms in a nocturnal primate. *Journal of Mammalogy* 96: 438-445.
- Levy K, Wegrzyn Y, Efronny R, Barnea A & Ayali A (2021). Lifelong exposure to artificial light at night impacts stridulation and locomotion activity patterns in the cricket *Gryllus bimaculatus*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 2288: 20211626.
- Leys SP, Cronin TW, Degnan BM & Marshall JN (2002). Spectral sensitivity in a sponge larva. *Journal of Comparative Physiology A* 188: 199-202.
- Li H, Yan S, Li Z, Zhang Q & Liu X (2015). Dim light during scotophase enhances sexual behavior of the Oriental Tobacco Budworm *Helicoverpa assulta* (Lepidoptera: Noctuidae). *Florida Entomologist* 98: 690-696.
- Li X, Jia X, Xiang H, Diao H, Yan Y, Wang Y & Ma R (2019). The effect of photoperiods and light intensity on mating behavior and reproduction of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) *Environmental Entomology* 48: 1035-1041.
- Liebert A, Pang V, Bicknell B, McLachlan C, Mitrofanis J & Kiat H (2022). A Perspective on the Potential of Opsins as an Integral Mechanism of Photobiomodulation: It's Not Just the Eyes. *Photobiomodulation, Photomedicine, and Laser Surgery* 40: 123-135.
- Lincoln GA (1994). Effects of placing micro-implants of melatonin in the pars tuberalis, pars distalis and the lateral septum of the forebrain on the secretion of FSH and prolactin, and testicular size in rams. *The Journal of Endocrinology* 142: 267-276.
- Lincoln GA & Clarke IJ (1994). Photoperiodically-Induced cycles in the secretion of prolactin in hypothalamo-pituitary disconnected Rams: Evidence for translation of the melatonin signal in the pituitary gland. *Journal of Neuroendocrinology* 6: 251-260.
- Liu G, Peng X, Ren Z, Liu M, Dang R, Chen Y & Liu F (2019). The effect of artificial light with different SPDs and intensities on the sleep onset of silvereyes. *Biological Rhythm Research* 50: 787-804.
- Lockley SW, Brainard GC & Czeisler CA (2003). High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 88: 4502-4505.
- Longcore T & Rich C (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2: 191-198.

- Longcore, T & Smith P (2013). On avian mortality associated with human activities. *Avian Conservation and Ecology* 8:1.
- Lucassen EA, Coomans CP, van Putten M, de Kreijl SR, van Genugten JH, Sutorius RP, ... & Meijer JH (2016). Environmental 24-hr cycles are essential for health. *Current Biology* 26: 1843-1853.
- Lunau K (2014). Visual ecology of flies with particular reference to colour vision and colour preferences. *Journal of Comparative Physiology A* 200: 497-512.
- Lunn RM, Blask DE, Coogan AN, Figueiro MG, Gorman MR, Hall JE, Hansen J, Nelson RJ, Panda S, Smolensky MH, Stevens RG, Turek FW, Vermeulen R, Carreón T, Caruso CC, Lawson CC, Thayer KA, Twery MJ, Ewens AD, ... Boyd WA (2017). Health consequences of electric lighting practices in the modern world: A report on the National Toxicology Program's workshop on shift work at night, artificial light at night, and circadian disruption. *The Science of the Total Environment* 607-608: 1073-1084.
- Lutterschmidt DI (2012). Chronobiology of reproduction in garter snakes: Neuroendocrine mechanisms and geographic variation. *General and Comparative Endocrinology* 176: 448-455.
- Lutterschmidt DI & Mason RT (2009). Endocrine mechanisms mediating temperature-induced reproductive behavior in red-sided garter snakes (*Thamnophis sirtalis parietalis*). *The Journal of Experimental Biology* 212: 3108-3118.
- MacGregor CJ, Pocock MJO, Fox R & Evans DM (2015). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. *Ecological Entomology* 40: 187-198.
- Maeda K, Mori Y, Sawasaki T & Kano Y (1984). Diurnal changes in peripheral melatonin concentration in goats and effects of light or dark interruption. *Nihon Juigaku Zasshi. The Japanese Journal of Veterinary Science* 46: 837-842.
- Maitra SK, Chatteraj A, Mukherjee S & Moniruzzaman M (2013). Melatonin: A potent candidate in the regulation of fish oocyte growth and maturation. *General and Comparative Endocrinology* 181: 215-222.
- Malek I, Haim A & Izhaki I (2020). Melatonin mends adverse temporal effects of bright light at night partially independent of its effect on stress responses in captive birds. *Chronobiology International* 37: 189-208.
- Manfrin A, Lehmann D, van Grunsven RHA, Larsen S, Syväranta J, Wharton G, Voigt CC, Monaghan MT & Hölker F (2018). Dietary changes in predators and scavengers in a nocturnally illuminated riparian ecosystem. *Oikos* 127: 960-969.
- Marie M, Bigot K, Angebault C, Barrau C, Gondouin P, Pagan D, Fouquet S, Villette T, Sahel J-A, Lenaers G & Picaud S (2018). Light action spectrum on oxidative stress and mitochondrial damage in A2E-loaded retinal pigment epithelium cells. *Cell Death & Disease* 9: 287.
- Marie M, Forster V, Fouquet S, Berto P, Barrau C, Ehrismann C, Sahel J-A, Tessier G & Picaud S (2020). Phototoxic damage to cone photoreceptors can be independent of the visual pigment: The porphyrin hypothesis. *Cell Death & Disease* 11: 711.
- Marín-Gómez OH (2022). Artificial Light at Night Drives Earlier Singing in a Neotropical Bird. *Animals* 12: 1015.
- Marín-Gómez OH, García-Arroyo M, Sánchez-Sarria CE, Sosa-López JR, Santiago-Alarcon D & MacGregor-Fors I (2020). Nightlife in the city: drivers of the occurrence and vocal activity of a tropical owl. *Avian Research* 11: 1-14.
- Marinquez PH, Jara ME, Diaz MI, Quijon PA, Widdicombe S, Pulgar J, Marinquez K, Quintanilla-Ahumada D & Duarte C (2019). Artificial light pollution influences behavioral and physiological traits in a keystone predator species *Conocholepas conocholepas*. *Science of the Total Environment* 661: 543-552.
- Marquenie J, Donners M, Poot H, Steckel W & de Wit B (2013). Bird-friendly light sources: Adapting

- the spectral composition of artificial lighting. *IEEE Industry Applications Magazine* 19: 56-62.
- Marshall J (2017). Vision and lack of vision in the ocean. *Current Biology: CB* 27: R494-R502.
- Martinez-Nicolas A, Madrid JA & Rol MA (2014). Day-night contrast as source of health for the human circadian system. *Chronobiology International* 31: 382-393.
- Mathews F, Roche N, Aughney T, Jones N, Day J, Baker J & Langton S (2015). Barriers and benefits: implications of artificial night-lighting for the distribution of common bats in Britain and Ireland. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370: 20140124.
- Matzke EB (1936). The effect of street lights in delaying leaf-fall in certain trees. *American Journal of Botany* 23: 446-452.
- Macgregor CJ & Scott-Brown AS (2020). Nocturnal pollination: an overlooked ecosystem service vulnerable to environmental change. *Emerging Topics in Life Sciences* 4: 19-32.
- McLaren JD, Buler JJ, Schreckengost T, Smolinsky JA, Boone M, Emiel van Loon E, ... & Walters EL (2018). Artificial light at night confounds broad-scale habitat use by migrating birds. *Ecology Letters* 21: 356-364.
- McLay LK, Green MP & Jones TM (2017). Chronic Exposure to Dim Artificial Light at Night Decreases Fecundity and Adult Survival in *Drosophila Melanogaster*. *Journal of Insect Physiology* 100: 15-20.
- McMunn MS, Yang LH, Ansalmo A, Bucknam K, Claret M, Clay C, Cox K, Dungey DR, Jones A, Kim AY, Kubacki R, Le R, Martinez D, Reynolds B, Schroder J & Wood W (2019). Artificial light increases local predator abundance, predation rates and herbivory. *Environmental Entomology* 48: 1331-1339.
- McQuate GT (2014). Green light synergistically enhances male Sweetpotato Weevil response to sex pheromone. *Scientific Reports* 4: 4499.
- Medeiros B, Barghini A & Vanin S (2017). Streetlights attract a broad array of beetle species. *Revista Brasileira de Entomologia* 61: 74-79.
- Menzel R (1979). Spectral sensitivity and color vision in invertebrates. In: Autrum H (ed.) *Comparative physiology and evolution of vision in invertebrates*, Springer Berlin, Heidelberg. pp. 503-580.
- Meravi N & Kumar Prajapati S (2020). Effect street light pollution on the photosynthetic efficiency of different plants. *Biological Rhythm Research* 51: 67-75.
- Merckx T & Slade EM (2014). Macro-moth families differ in their attraction to light: implications for light-trap monitoring programmes. *Insect Conservation and Diversity* 7: 453-461.
- Miller MW (2006). Apparent effects of light pollution on singing behavior of American Robins'. *Condor* 108: 130-139.
- Min J-Y & Min K-B (2018). Outdoor light at night and the prevalence of depressive symptoms and suicidal behaviors: A cross-sectional study in a nationally representative sample of Korean adults. *Journal of Affective Disorders* 227: 199-205.
- Minnaar C, Boyles JG, Minnaar IA, Sole CL & McKechnie AE (2015). Stacking the odds: light pollution may shift the balance in an ancient predator-prey arms race. *Journal of Applied Ecology* 52: 522-531.
- Minoli SA & Lazzari CR (2006). Take-off activity and orientation of triatomines (Heteroptera: Reduviidae): in relation to the presence of artificial lights. *Acta Tropica* 97: 324-330.
- Mishra I, Knerr RM, Stewart AA, Payette WI, Richter MM & Ashley NT (2019). Light at night disrupts diel patterns of cytokine gene expression and endocrine profiles in zebra finch (*Taeniopygia guttata*). *Scientific Reports* 9: 15833.
- Miskimen GW & Rodriguez NL (1981). Structure and functional aspects of the Scotopic compound

- eye of the sugarcane borer moth. *Journal of Morphology* 168: 73-84.
- Moaraf S, Heiblum R, Okuliarová M, Hefetz A, Scharf I, Zeman M & Barnea A (2021). Evidence That Artificial Light at Night Induces Structure-Specific Changes in Brain Plasticity in a Diurnal Bird. *Biomolecules* 11: 1069.
- Moaraf S, Vistorovsky Y, Pozner T, Heiblum R, Okuliarová M, Zeman M & Barnea A (2020). Artificial light at night affects brain plasticity and melatonin in birds. *Neuroscience Letters* 716: 134639.
- Molenaar de H, Sanders ME & Jonkers DA (2006). Road lightning and grassland birds: Local influence of road lightning on a black-tailed godwit population. In: Rich C & Longcore T (eds.) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, Washington, pp. 114-136.
- Mondy N, Boisselet C, Poussineau S, Vallier F, Lengagne T, Secondi J, Romestaing C, Geay M & Pujalon S (2021). Herbivory increases on freshwater plants exposed to artificial light at night. *Aquatic Botany* 175: 103447.
- Morelli F, Beim M, Jerzak L, Jones D & Tryjanowski P (2014). Can roads, railways and related structures have positive effects on birds?—A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 30: 21-31.
- Mukai A, Yamaguchi K & Goto SG (2021). Urban warming and artificial light alter dormancy in the flesh fly. *Royal Society Open Science* 8: 210866.
- Murata M, Hariyama T, Yamahama Y, Toyama M & Ohta I (2018a). In the presence of red light, cucumber and possibly other host plants lose their attractability to the melon thrips *Thrips palmi* (Thysanoptera: Thripidae). *Applied Entomology and Zoology* 53: 117-128.
- Murata M, Hariyama T, Yamahama Y, Toyama M & Ohta I (2018b). Effects of the range of light wavelengths on the phototactic behaviour and biological traits in the melon thrips, *Thrips palmi* Karny (Thysanoptera Thripidae). *Ethology Ecology & Evolution* 30: 101-113.
- Nankoo S, Raymond S & Galvez-Cloutier R (2019). The impact of the Jacques Cartier bridge illumination on the food chain: from insects to predators. *Community Ecology* 20: 172-180.
- Nation JL (2016). *Insect Physiology and Biochemistry*. Third Edition. CRC Press, Boca Ronton, Florida.
- Navara KJ & Nelson RJ (2007). The dark side of light at night: Physiological, epidemiological, and ecological consequences. *Journal of Pineal Research* 43: 215-224.
- Nayak G, Zhang KX, Vemaraju S, Odaka Y, Buhr ED, Holt-Jones A, Kernodle S, Smith AN, Upton BA, D'Souza S, Zhan JJ, Diaz N, Nguyen M-T, Mukherjee R, Gordon SA, Wu G, Schmidt R, Mei X, Petts NT, ... Lang RA (2020). Adaptive Thermogenesis in Mice Is Enhanced by Opsin 3-Dependent Adipocyte Light Sensing. *Cell Reports* 30: 672-686.
- Nemec SJ (1969). Use of artificial lighting to reduce *Heliothis* Spp populations in cotton Fields. *Journal of Economic Entomology* 62: 1138-1140.
- Nguyen THN, Borgemeister C, Max J & Poehling H-M (2009). Manipulation of Ultraviolet Light Affects Immigration Behavior of *Ceratotheripoides claratris* (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Economic Entomology* 102: 1559-1566.
- Nissinen A, Kristoffersen L & Anderbrant O (2008). Physiological state of female and light intensity affect the host-plant selection of carrot phyllid, *Trioza apicalis* (Hemiptera: Triozidae). *European Journal of Entomology* 105: 227-232.
- Nießner C, Denzau S, Peichl L, Wiltshko W & Wiltshko R (2014). Magnetoreception in birds: I. Immunohistochemical studies concerning the cryptochrome cycle. *Journal of Experimental Biology* 217: 4221-4224.
- Nikaido Y, Ueda S & Takemura A (2009). Photocircadian regulation of melatonin production in

- the Mozambique tilapia *Oreochromis mossambicus*. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology* 152: 77-82.
- Nisembaum LG, Martin P, Lecomte F & Falcón J (2021). Melatonin and osmoregulation in fish: A focus on Atlantic salmon *Salmo salar* smoltification. *Journal of Neuroendocrinology* 33: e12955.
- Norambuena HV, Rivera R, Barros R, Silva R, Peredo R & Hernández CE (2021). Living on the edge: genetic structure and geographic distribution in the threatened Markham's Storm-Petrel (*Hydrobates markhami*). *PeerJ* 9: e12669.
- Nozaki M, Tsushima M & Mori Y (1990). Diurnal changes in serum melatonin concentrations under indoor and outdoor environments and light suppression of nighttime melatonin secretion in the female Japanese monkey. *Journal of Pineal Research* 9: 221-230.
- Oishi K, Shibusawa K, Kakazu H, Kuriyama T, Ohkura N & Machida K (2006). Extended light exposure suppresses nocturnal increases in cytotoxic activity of splenic natural killer cells in rats. *Biological Rhythm Research* 37: 21-35.
- Okano T, Yoshizawa T & Fukada Y (1994). Pinopsin is a chicken pineal photoreceptive molecule. *Nature* 372: 94-97.
- Ouyang JQ, de Jong M, van Grunsven RHA, Matson KD, Haussmann MF, Meerlo P, Visser ME & Spoelstra K (2017). Restless roosts: Light pollution affects behavior, sleep, and physiology in a free-living songbird. *Global Change Biology* 23: 4987-4994.
- Owens ACS & Lewis SM (2021a). Narrow-spectrum artificial light silences female fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *Insect Conservation and Diversity* 14: 199-210.
- Owens ACS & Lewis SM (2021b). Effects of artificial light on growth, development, and dispersal of two North American fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *Journal of Insect Physiology* 130: 104200.
- Pan J, Yang Y, Yang B & Yu Y (2014). Artificial polychromatic light affects growth and physiology in chicks. *PloS one* 9: e113595.
- Panda S (2016). Circadian physiology of metabolism. *Science* 354: 1008-1015.
- Patton AP & Hastings MH (2018). The suprachiasmatic nucleus. *Current Biology* 28: R816-R822.
- Pauwels J, Le Viol I, Bas Y, Valet N & Kerbirou C (2021). Adapting street lighting to limit light pollution's impacts on bats. *Global Ecology and Conservation* 28: e01648.
- Pawson SM, Watt MS & Brockerhoff EG (2009). Using differential responses to light spectra as a monitoring and control tool for *Arhopalus fesus* (Coleoptera: Cerambycidae): and other exotic wood-boring pests. *Journal of Economic Entomology* 102: 79-85.
- Peichl L, Nemec P & Burda H (2004). Unusual cone and rod properties in subterranean African mole-rats (Rodentia, Bathyergidae). *The European Journal of Neuroscience* 19: 1545-1558.
- Picchi M, Avolio L & Azzani L (2013). Fireflies and land use in an urban landscape: The case of *Luciola italica* L (Coleoptera: Lampyridae) in the city of Turin. *Journal of Insect Conservation* 17: 797-805.
- Poot H, Ens BJ, de Vries H, Donners MA, Wernand MR & Marquenie JM (2008). Green light for nocturnally migrating birds. *Ecology and Society* 13: 47.
- Preslock JP (1976). Regulation of pineal enzymes by photoperiod, gonadal hormones and melatonin in Coturnix quail. *Hormone Research* 7: 108-117.
- Provencio I, Jiang G, De Grip WJ, Hayes WP & Rollag MD (1998). Melanopsin: An opsin in melanophores, brain, and eye. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95: 340-345.
- Provencio I, Rodriguez IR, Jiang G, Hayes WP, Moreira EF & Rollag MD (2000). A novel human opsin in the inner retina. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience* 20: 600-605.

- Quintanilla-Ahumada D, Quijón P, Pulgar J, Manríquez PH, García-Huidobro MR & Duarte C (2021). Exposure to artificial light at night (ALAN): alters RNA:DNA ratios in a sandy beach coleopteran insect. *Marine Pollution Bulletin* 165: 112-132.
- Raap T, Casasole G, Pinxten R & Eens M (2016). Early life exposure to artificial light at night affects the physiological condition: An experimental study on the ecophysiology of free-living nestling songbirds. *Environmental Pollution* 218: 909-914.
- Raap T, Sun J, Pinxten R & Eens M (2017). Disruptive effects of light pollution on sleep in free-living birds: Season and/or light intensity-dependent? *Behavioural Processes* 144: 13-19.
- Rajkhowa R (2014). Light Pollution and Impact of Light Pollution. *International Journal of Science and Research* 3: 861-867.
- Rani S, Singh S, Misra M & Kumar V (2001). The influence of light wavelength on reproductive photorefractoriness in migratory blackheaded bunting (*Emberiza melanocephala*). *Reproduction, Nutrition, Development* 41: 277-284.
- Rebke M, Dierschke V, Weiner CN, Aumüller R, Hill K & Hill R (2019). Attraction of nocturnally migrating birds to artificial light: The influence of colour, intensity and blinking mode under different cloud cover conditions. *Biological Conservation* 233: 220-227.
- Reisenman CE & Lazzari C (2006). Spectral sensitivity of the photonegative reaction of the blood-sucking bug *Triatoma infestans* (Heteroptera: Reduviidae). *Journal of Comparative Physiology A* 192: 39-44.
- Reiter RJ (2002). Potential biological consequences of excessive light exposure: Melatonin suppression, DNA damage, cancer and neurodegenerative diseases. *Neuro Endocrinology Letters* 23: 9-13.
- Reiter RJ, Hurlbut EC, King TS, Richardson BA, Vaughan MK & Kosub KY (1982a). A 15-minute light pulse during darkness prevents the antigonadotrophic action of afternoon melatonin injections in male hamsters. *International Journal of Biometeorology* 26: 295-303.
- Reiter RJ, Joshi BN, Heinzeller T & Nürnberger F (1986). A single 1- or 5-second light pulse at night inhibits hamster pineal melatonin. *Endocrinology* 118: 1906-1909.
- Reiter RJ, King TS, Richardson BA & Hurlbut EC (1982b). Studies on pineal melatonin levels in a diurnal species, the eastern chipmunk (*Tamias striatus*): Effects of light at night, propranolol administration or superior cervical ganglionectomy. *Journal of Neural Transmission* 54: 275-284.
- Reiter RJ, Tan DX & Galano A (2014). Melatonin: Exceeding expectations. *Physiology* 29: 325-333.
- Ren Z, Chen Y, Liu F, Ma X, Ma J & Liu G (2022). Effects of artificial light with different wavelengths and irradiances on the sleep behaviors of Chestnut buntings (*Emberiza rutila*). *Biological Rhythm Research* 53: 1454-1473.
- Reppert SM, Perlow MJ, Tamarkin L, Orloff D & Klein DC (1981a). The effects of environmental lighting on the daily melatonin rhythm in primate cerebrospinal fluid. *Brain Research* 223: 313-323.
- Reppert SM, Perlow MJ, Ungerleider LG, Mishkin M, Tamarkin L, Orloff DG, ... & Klein DC (1981b). Effects of damage to the suprachiasmatic area of the anterior hypothalamus on the daily melatonin and cortisol rhythms in the rhesus monkey. *Journal of Neuroscience* 1: 1414-1425.
- Richa, Sinha RP & Häder D-P (2015). Physiological aspects of UV-excitation of DNA. *Topics in Current Chemistry* 356: 203-248.
- Robert KA, Lesku JA, Partecke J & Chambers B. (2015). Artificial light at night desynchronizes strictly seasonal reproduction in a wild mammal. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282: 1816.
- Rodríguez A, Dann P & Chiaradia A (2017). Reducing light-induced mortality of seabirds: high

- pressure sodium lights decrease the fatal attraction of shearwaters. *Journal for Nature Conservation* 39: 68-72.
- Rodríguez A, García D, Rodríguez B, Cardona E, Párpal L & Pons P (2015). Artificial lights and seabirds: is light pollution a threat for the threatened Balearic petrels? *Journal of Ornithology* 156: 893-902.
- Romeo S, Viaggi C, Di Camillo D, Willis AW, Lozzi L, Rocchi C, Capannolo M, Aloisi G, Vaglini F, Maccarone R, Caleo M, Missale C, Racette BA, Corsini GU & Maggio R (2013). Bright light exposure reduces TH-positive dopamine neurons: Implications of light pollution in Parkinson's disease epidemiology. *Scientific Reports* 3: 1395.
- Rowse EG, Harris S & Jones G (2018). Effects of dimming light-emitting diode street lights on light-opportunistic and light-averse bats in suburban habitats. *Royal Society open Science* 5: 180205.
- Rozenboim I, El Halawani ME, Kashash Y, Piestun Y & Halevy O (2013). The effect of monochromatic photostimulation on growth and development of broiler birds. *General and Comparative Endocrinology* 190: 214-219.
- Russ A, Rüger A & Klenke R (2015) Nutze die nacht: Amseln (*Turdus merula*) verlängern ihre nahrungssuche unter künstlichem nachlicht. *Journal of Ornithology* 156: 123-131.
- Russo D, Ancillotto L, Cistrone L, Libralato N, Domer A, Cohen S & Korine C (2018). Effects of artificial illumination on drinking bats: a field test in forest and desert habitats. *Animal Conservation* 22: 124-133.
- Russo D, Cosentino F, Festa F, De Benedetta F, Pejic B, Cerretti P & Ancillotto L (2019) Artificial illumination near rivers may alter bat-insect trophic interactions. *Environmental Pollution* 252: 1671-1677.
- Rybníková NA, Haim A & Portnov BA (2016). Does artificial light-at-night exposure contribute to the worldwide obesity pandemic? *International Journal of Obesity* 40: 815-823.
- Rydell J (1992). Exploitation of Insects around Streetlamps by Bats in Sweden. *Functional Ecology* 6: 744.
- Rydell J, Eklöf J & Sánchez-Navarro S (2017). Age of enlightenment: long-term effects of outdoor aesthetic lights on bats in churches. *Royal Society Open Science* 4: 161077.
- Saboureau M, Vivien-Roels B & Pevet P (1991). Pineal melatonin concentrations during day and night in the adult hedgehog: Effect of a light pulse at night and superior cervical ganglionectomy. *Journal of Pineal Research* 11: 92-98.
- Sahin AK & Ozkan C (2007). Effect of light on the longevity and fecundity of *Venturia canescens* (Gravenhorst): (Hymenoptera: Ichneumonidae). *Pakistan Journal of Zoology* 39: 315-319.
- Salinas-Ramos VB, Ancillotto L, Cistrone L, Nastasi C, Bosso L, Smeraldo S & Russo D (2021). Artificial illumination influences niche segregation in bats. *Environmental Pollution* 284: 117187.
- Sambaraju KR & Phillips TW (2008). Responses of adult *Plodia interpunctella* (Hubner): (Lepidoptera: Pyralidae): to light and combinations of attractants and light. *Journal of Insect Behaviour* 21: 422-439.
- Sánchez-González K, Aguirre-Obando OA & Ríos-Chelén AA (2021). Urbanization levels are associated with the start of the dawn chorus in vermilion flycatchers in Colombia. *Ethology Ecology & Evolution* 33: 377-393.
- Sanders D, Kehoe R, Tiley K, Bennie J, Cruse D, Davies TW, Frank van Veen FJ & Gaston KJ (2015). Artificial nighttime light changes aphid-parasitoid population dynamics. *Scientific Reports* 5: 15232.
- Santos CD, Miranda AC, Granadeiro JP, Lourenço PM, Saraiva S & Palmeirim JM (2010). Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders. *Acta Oecologica* 36: 166-172.

- Sato K, Yamashita T, Kojima K, Sakai K, Matsutani Y, Yanagawa M, Yamano Y, Wada A, Iwabe N, Ohuchi H & Shichida Y (2018). Pinopsin evolved as the ancestral dim-light visual opsin in vertebrates. *Communications Biology* 1: 156.
- Schibler U, Gotic I, Saini C, Gos P, Curie T, Emmenegger Y, Sinturel F, Gosselin P, Gerber A, Fleury-Olela F, Rando G, Demarque M & Franken P (2015). Clock-Talk: Interactions between Central and Peripheral Circadian Oscillators in Mammals. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 80: 223-232.
- Schoech SJ, Bowman R, Hahn TP, Goymann W, Schwabl I & Bridge ES (2013). The effects of low levels of light at night upon the endocrine physiology of western scrub-jays (*Aphelocoma californica*). *Journal of Experimental Zoology. Part A, Ecological Genetics and Physiology* 319: 527-538.
- Scobie CA, Bayne EM & Wellicome TI (2016). Influence of human footprint and sensory disturbances on night-time space use of an owl. *Endangered Species Research* 31: 75-87.
- Searle I & Coupland G (2004). Induction of flowering by seasonal changes in photoperiod. *The EMBO Journal* 23: 1217-1222.
- Sengenado F, Subramanian S, Chemurot M, Tanga CM & Egonyu JP (2021). Efficient Harvesting of Safe Edible Grasshoppers: Evaluation of Modified Drums and Light-Emitting Diode Bulbs for Harvesting *Ruspolia differens* (Orthoptera: Tettigoniidae) in Uganda. *Journal of Economic Entomology* 114: 676-683.
- Senzaki M, Barber JR, Phillips JN, Carter NH, Cooper CB, Ditmer MA, ... & Francis CD (2020). Sensory pollutants alter bird phenology and fitness across a continent. *Nature* 587: 605-609.
- Shichida Y & Matsuyama T (2009). Evolution of opsins and phototransduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 364: 2881-2895.
- Sierro A & Erhardt A (2019). Light pollution hampers recolonization of revitalised European Nightjar habitats in the Valais (Swiss Alps). *Journal of Ornithology* 160: 749-761.
- Singh D, Montoure J & Ketterson ED (2021). Exposure to artificial light at night accelerates but does not override latitude-dependent seasonal reproductive response in a North American songbird. *Environmental Pollution* 279: 116867.
- Singhal RK, Kumar M, Bose B (2019) Eco-physiological Responses of Artificial Night Light Pollution in Plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 66: 190-202.
- Sinnadurai S (1981). High pressure sodium street lights affect crops in Ghana. *World Crops* 33: 120-122.
- Škvareninová J, Tuhárska M, Škvarenina J, Babálová D, Slobodníková L, Slobodník B, ... & Mindáš J (2017). Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. *Moravian Geographical Reports* 25: 282-290.
- Smith RA, Gagné M & Fraser KC (2021). Pre-migration artificial light at night advances the spring migration timing of a trans-hemispheric migratory songbird. *Environmental Pollution* 269: 116136.
- Soni BG & Foster RG (1997). A novel and ancient vertebrate opsin. *FEBS Letters* 406: 279-283.
- Sower LL, Shorey HH & Gaston LK (1970). Sex pheromones of noctuid moths XXI Light: dark cycle regulation and light inhibition of sex pheromone release by females of *Trichoplusia ni*. *Annals of the Entomological Society of America* 63: 1090-1092.
- Speich SM, Jones HL & Benedict EM (1986). Review of the natural nesting of the Barn Swallow in North America. *American Midland Naturalist* 115: 248-254.
- Speisser B, Liu Y & van Kleunen (2021) Biomass responses of widely and less-widely naturalized alien plants to artificial light at night. *Journal of Ecology* 109: 1667.
- Spoelstra K, van Grunsven RH, Donners M, Gienapp P, Huigens ME, Slaterus R, ... & Veenendaal E

- (2015). Experimental illumination of natural habitat—an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370: 20140129.
- Spoelstra K, van Grunsven RHA, Ramakers JJ, Ferguson KB, Raap T, Donners M & Visser ME (2017): Response of bats to light with different spectra: light-shy and agile bat presence is affected by white and green, but not red light. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 284: 20170075.
- Starý M, Mokřý J, Belotti E, Bufka L, Hubený P, Černý M, Vondrka A, Zelenková E & Bufková I. (2019). Klidové území tetřívka obecného, jeřába popelavého a perlorodky říční. www.npsumava.cz.
- Stavenga D (2002). Colour in the eyes of insects. *Journal of Comparative Physiology A* 188: 337-348.
- Steward A, Perl C & Niven J (2020). Artificial lighting impairs mate attraction in a nocturnal capital breeder. *Journal of Experimental Biology* 223: jeb.229146.
- Stitt M & Zeeman SC (2012). Starch turnover: pathways, regulation and role in growth. *Current Opinion in Plant Biology* 15: 282-292.
- Stone EL, Jones G & Harris S (2009). Street lighting disturbs commuting bats. *Current Biology* 19: 1123-1127.
- Stone EL, Jones G & Harris S (2012). Conserving energy at a cost to biodiversity? Impacts of LED lighting on bats. *Global Change Biology* 18: 2458-2465.
- Stone EL, Wakefield A, Harris S & Jones G (2015). The impacts of new street light technologies: experimentally testing the effects on bats of changing from low-pressure sodium to white metal halide. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370: 20140127.
- Stone M, Caro SP, Gienapp P, Spoelstra K & Visser ME (2017). Early birds by light at night: effects of light color and intensity on daily activity patterns in blue tits. *Journal of Biological Rhythms* 32: 323-333.
- Stracey CM, Wynn B & Robinson SK (2014). Light pollution allows the northern mockingbird (*Mimus polyglottos*) to feed nestlings after dark. *The Wilson Journal of Ornithology* 126: 366-369.
- Straka TM, Wolf M, Gras P, Buchholz S & Voigt CC (2019). Tree cover mediates the effect of artificial light on urban bats. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7: 91.
- Sulli G, Manoogian ENC, Taub PR & Panda S (2018). Training the Circadian Clock, Clocking the Drugs, and Drugging the Clock to Prevent, Manage, and Treat Chronic Diseases. *Trends in Pharmacological Sciences* 39: 812-827.
- Sulpice R, Flis A, Ivakov AA, Apelt F, Krohn N, Encke B, ... & Stitt M (2014). Arabidopsis coordinates the diurnal regulation of carbon allocation and growth across a wide range of photoperiods. *Molecular Plant* 7: 137-155.
- Sun YX, Tian A, Zhang XB, Zhao ZG, Zhang ZW & Ma RY (2014): Phototaxis of *Grapholitha molesta* (Lepidoptera: Olethreutidae): to different light sources. *Journal of Economic Entomology* 107: 1792-1799.
- Sun J, Raap T, Pinxten R & Eens M (2017). Artificial light at night affects sleep behaviour differently in two closely related songbird species. *Environmental Pollution* 231: 882-889.
- Šustek Z (1999). Light attraction of carabid beetles and their survival in the city centre. *Biologia* 54: 539-551.
- Syposz M, Padgett O, Willis J, Van Doren BM, Gillies N, Fayet AL, ... & Guilford T (2021). Avoidance of different durations, colours and intensities of artificial light by adult seabirds. *Scientific Reports* 11: 1-13.
- Szaz D, Horvath G, Barta A, Robertson BA, Farkas A, Egri A, Tarjanyi N, Racz G & Kriska G

- (2015). Lamp-lit bridges as dual light-traps for the night-swarming mayfly, *Ephoron virgo*: Interaction of polarized and unpolarized light pollution PLOS ONE 10: e0121194.
- Takahashi T & Ogiwara K (2021). Roles of melatonin in the teleost ovary: A review of the current status. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology* 254: 110907.
- Takemura A, Rahman MS & Park YJ (2010). External and internal controls of lunar-related reproductive rhythms in fishes. *Journal of Fish Biology* 76: 7-26.
- Takeuchi Y, Arikawa K & Kinoshita M (2006). Color discrimination at the spatial resolution limit in a swallowtail butterfly, *Papilio xuthus*. *Journal of Experimental Biology* 209: 2873-2879.
- Tamarkin L, Westrom WK, Hamill AI & Goldman BD (1976). Effect of melatonin on the reproductive systems of male and female Syrian hamsters: A diurnal rhythm in sensitivity to melatonin. *Endocrinology* 99: 1534-1541.
- Tan MK (2019). Why do nocturnal grasshoppers and katydids “salute” to flash photography? *Entomological Science* 22: 216-219.
- Thakurdas P, Sharma S, Vanlalhratpuia K, Sinam B, Chib M, Shivagaje A & Joshi D (2009). Light at night alters the parameters of the eclosion rhythm in a tropical fruitfly, *Drosophila jambulina*. *Chronobiology International* 26: 1575-1586.
- Thawley CJ & Kolbe JJ (2020). Artificial light at night increases growth and reproductive output in *Anolis* lizards. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 287: 1919
- Tielens EK, Cimprich PM, Clark BA, DiPilla AM, Kelly JF, Mirkovic D, Strand AI, Zhai M & Stepanian PM (2021). Nocturnal city lighting elicits a macroscale response from an insect outbreak population. *Biology Letters* 17: rsbl20200808.
- Torii M, Kojima D, Okano T, Nakamura A, Terakita A, Shichida Y, Wada A & Fukada Y (2007). Two isoforms of chicken melanopsins show blue light sensitivity. *FEBS Letters* 581: 5327-5331.
- Tost D, Strauß E, Jung K & Siebert U (2020). Impact of tourism on habitat use of black grouse (*Tetrao tetrix*) in an isolated population in northern Germany. *PloS One* 15: e0238660.
- Touitou Y, Reinberg A & Touitou D (2017). Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of circadian disruption. *Life Sciences* 173: 94-106.
- Touzot M, Lengagne T, Secondi J, Desouhant E, Thery M, Dumet A, Mondy N (2020). Artificial light at night alters the sexual behaviour and fertilisation success of the common toad. *Environmental Pollution* 259: 113883.
- Truxa C & Fiedler K (2012). Attraction to light - from how far do moths (Lepidoptera): return to weak artificial sources of light? *European Journal of Entomology* 109: 77-84.
- Turek FW, Desjardins C & Menaker M (1975). Melatonin: Antigonadal and progonadal effects in male golden hamsters. *Science* 190: 280-282.
- Udaykumar K & Joshi BN (1997). Effect of exposure to continuous light and melatonin on ovarian follicular kinetics in the skipper frog, *Rana cyanophlyctis*. *Biological Signals* 6: 62-66.
- Ulgezen ZN, Käpylä T, Meerlo P, Spoelstra K, Visser ME & Dominoni DM (2019). The preference and costs of sleeping under light at night in forest and urban great tits. *Proceedings of the Royal Society B* 286: 20190872.
- Underwood H (1981). Effects of pinealectomy and melatonin on the photoperiodic gonadal response of the male lizard *Anolis carolinensis*. *Journal of Experimental Zoology* 217: 417-422.
- Valen R, Karlsen R & Helvik JV (2018). Environmental, population and life-stage plasticity in the visual system of Atlantic cod. *The Journal of Experimental Biology* 221: jeb165191.
- Van den Broeck M, De Cock R, Van Dongen S & Matthysen E (2021). White LED light intensity, but

- not colour temperature, interferes with mate-finding by glow-worm (*Lampyris noctiluca* L) males. *Journal of Insect Conservation* 25: 339-347.
- Van Der Kooi CJ, Stavenga DG, Arikawa K, Belušič G & Kelber A (2021). Evolution of insect color vision: from spectral sensitivity to visual ecology. *Annual Reviews in Entomology* 66: 435-461.
- Van Dis NE, Spoelstra K, Visser ME & Dominoni DM (2021). Color of artificial light at night affects incubation behavior in the great tit, *Parus major*. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9: 728377.
- Van Doren BM, Willard DE, Hennen M, Horton KG, Stuber EF, Sheldon D, ... & Winger BM (2021). Drivers of fatal bird collisions in an urban center. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118: e2101666118.
- Van Geffen KG, Van Eck E, De Boer RA, Van Grunsven RHA, Salis L, Berendse F & Veenendaal EM (2015a). Artificial light at night inhibits mating in a Geometrid moth. *Insect Conservation and Diversity* 8: 282-287.
- Van Geffen KG, Groot AT, Van Grunsven RHA, Donners M, Berendse M & Veenendaal EM (2015b). Artificial night lighting disrupts sex pheromone in a noctuid moth. *Ecological* 40: 401-408.
- Van Grunsven RHA, Lham D, Van Geffen KG & Veenendaal EM (2014) Range of attraction of a 6-W moth light trap. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 152: 87-90.
- Van Grunsven RHA, Jähnichen D, Grubisic M, Hölker F (2018). Slugs (*Arionidae*): benefit from nocturnal artificial illumination. *Journal of Experimental Zoology Part A Comparative Experimental Biology* 329: 429-433.
- Van Langevelde F, Ettema JA, Donners M, WallisDeVries MF & Groenendijk D (2011). Effect of spectral composition of artificial light on the attraction of moths. *Biological Conservation* 144: 2274-2281.
- Van Langevelde F, van Grunsven RHA, Veenendaal EM & Fijen TPM (2017). Artificial night lighting inhibits feeding in moths. *Biology Letters* 13: 20160874.
- Vaněček J & Illnerová H (1982). Effect of light at night on the pineal rhythm in N-acetyltransferase activity in the Syrian hamster *Mesocricetus auratus*. *Experientia* 38: 513-514.
- Vartanian GV, Li BY, Chervenak AP, Walch OJ, Pack W, Ala-Laurila P & Wong KY (2015). Melatonin Suppression by Light in Humans Is More Sensitive Than Previously Reported. *Journal of Biological Rhythms* 30: 351-354.
- Vásquez RA (1994). Assessment of predation risk via illumination level: facultative central place foraging in the cricetid rodent *Phyllotis darwini*. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 34: 375-381.
- Viera-Pérez M, Hernández-Calvento L, Hesp PA & Santana-del Pino A (2019). Effects of artificial light on flowering of foredune vegetation. *Ecology* 100: e02678.
- Vivien-Roels B, Arendt J & Bradtke J (1979). Circadian and circannual fluctuations of pineal indoleamines (serotonin and melatonin) in *Testudo hermanni* Gmelin (Reptilia, Chelonia). I. Under natural conditions of photoperiod and temperature. *General and Comparative Endocrinology* 37: 197-210.
- Vize PD (2009). Transcriptome analysis of the circadian regulatory network in the coral *Acropora millepora*. *The Biological Bulletin* 216: 131-137.
- Voigt CC, Rehnig K, Lindecke O & Pētersons G (2018). Migratory bats are attracted by red light but not by warm-white light: Implications for the protection of nocturnal migrants. *Ecology and Evolution* 8: 9353-9361.
- Voigt CC, Roeleke M, Marggraf L, Pētersons G & Voigt-Heucke SL (2017). Migratory bats respond to artificial green light with positive phototaxis *PLoS One* 12: e0177748.

- Vollrath L & Huesgen A (1988). Response of pineal serotonin N-acetyltransferase activity in male guinea pigs exposed to light pulses at night. *Journal of Neural Transmission* 72: 55-66.
- Vowles AS & Kemp PS (2021). Artificial light at night (ALAN) affects the downstream movement behaviour of the critically endangered European eel, *Anguilla anguilla*. *Environmental Pollution* 274: 116585.
- Wakefield A, Broyles M, Stone EL, Harris S & Jones G (2018). Quantifying the attractiveness of broad-spectrum street lights to aerial nocturnal insects. *Journal of Applied Ecology* 55: 714-722.
- Walker WH, Bumgarner JR, Walton JC, Liu JA, Meléndez-Fernández OH, Nelson RJ & DeVries AC (2020). Light Pollution and Cancer. *International Journal of Molecular Sciences* 21: E9360.
- Wallner WE & Branchikov YN (1995). Response of adult lymantriid moths to illumination devices in the Russian Far East. *Forest Entomology* 88: 337-342.
- Walsh CM, Prendergast RL, Sheridan JT & Murphy BA (2013). Blue light from light-emitting diodes directed at a single eye elicits a dose-dependent suppression of melatonin in horses. *Veterinary Journal* 196: 231-235.
- Wang S, Wang K, Michaud JP, Zhang F & Tan X-L (2014). Reproductive performance of *Propylea japonica* (Coleoptera: Coccinellidae): under various light intensities, wavelengths and photoperiods. *European Journal of Entomology* 111: 341-347.
- Wang JS, Tuanmu MN & Hung CM (2021). Effects of artificial light at night on the nest-site selection, reproductive success and behavior of a synanthropic bird. *Environmental Pollution* 288: 117805.
- Warrant E & Dacke M (2011). Vision and visual navigation in nocturnal insects. *Annual Review of Entomology* 56: 239-254.
- Weil ZM, Borniger JC, Cisse YM, Abi Salloum BA & Nelson RJ (2015). Neuroendocrine control of photoperiodic changes in immune function. *Frontiers in Neuroendocrinology* 37: 108-118.
- Welbers AA, van Dis NE, Kolvoort AM, Ouyang J, Visser ME, Spoelstra K & Dominoni DM (2017). Artificial light at night reduces daily energy expenditure in breeding great tits (*Parus major*). *Frontiers in Ecology and Evolution* 5: 55.
- Weller JL & Kendrick RE (2015). Photomorphogenesis and photoperiodism in plants. In *Photobiology*. Springer, New York, NY. pp. 299-321.
- Wigglesworth VB (1965). *The Principles of Insect Physiology*. Methuen, London.
- Willmott NJ, Henneken J, Selleck CJ & Jones TM (2018). Artificial light at night alters life history in a nocturnal orb-web spider. *PeerJ* 6: e5599.
- Willmott NJ, Henneken J, Elgar MA & Jones TM (2019). Guiding lights: Foraging responses of juvenile nocturnal orb-web spiders to the presence of artificial light at night. *Ethology* 125: 289-297.
- Wilson AA, Ditmer MA, Barber JR, Carter NH, Miller ET, Tyrrell LP & Francis CD (2021). Artificial night light and anthropogenic noise interact to influence bird abundance over a continental scale. *Global Change Biology* 27: 3987-4004.
- Wilson M, Garrard P & McGinness S (1978). The unit structure of the locust compound eye. *Cell and Tissue Research* 195: 205-226.
- Wiltschko R, Stapput K, Thalau P & Wiltschko W (2010). Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions. *Journal of the Royal Society Interface* 7: S163-S177.
- Wiltschko W, Munro U, Ford H & Wiltschko R (1993). Red light disrupts magnetic orientation of migratory birds. *Nature* 364: 525-527.
- Winters TJ, Martin S, Anderson H, Procter ND & Lutterschmidt DI (2022). Role of Melatonin in

- Temperature-Induced Activation of the Neuroendocrine Reproductive Axis in Garter Snakes. *Brain, Behavior and Evolution* 97: 167-183.
- Wright HR, Lack LC & Kennaway DJ (2004). Differential effects of light wavelength in phase advancing the melatonin rhythm. *Journal of Pineal Research* 36: 140-144.
- Xue X, Lin Y, Zheng Q, Wang K, Zhang J, Deng J, ... & Gan M (2020). Mapping the fine-scale spatial pattern of artificial light pollution at night in urban environments from the perspective of bird habitats. *Science of the Total Environment* 702: 134725.
- Yadav A, Kumar R, Tiwari J, Vaish V, Malik S & Rani S (2022). Effect of artificial light at night on sleep and metabolism in weaver birds. *Environmental Science and Pollution Research* 1-14.
- Yamashita T, Ohuchi H, Tomonari S, Ikeda K, Sakai K & Shichida Y (2010). Opn5 is a UV-sensitive bistable pigment that couples with Gi subtype of G protein. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107: 22084-22089.
- Yang EC, Lee DW & Wu WY (2003). Action spectra of phototactic responses of the flea beetle, *Phyllotreta striolata*. *Physiological Entomology* 28: 362-368.
- Yang JY, Kim MG & Lee HS (2012). Phototactic behavior: Attractive effects of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae): Tobacco Cutworm, to high-power light-emitting diodes. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 55: 809-811
- Yang HB, Hu G, Zhang G, Chen X, Zhu ZR, Liu S, Liang ZL, Zhang XX, Cheng XN & Zhai BP (2014). Effect of light colours and weather conditions on captures of *Sogatella furcifera* (Horvath) and *Nilaparvata lugens* (Stal). *Journal of Applied Entomology* 138: 743-753.
- Yang J-Y, Sung B-K & Lee H-S (2015). Phototactic behavior 8: phototactic behavioral responses of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* Pergande (Thysanoptera: Thripidae), to light-emitting diodes. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 58: 359-363.
- Yoon TJ, Kim DG, Kim SY, Jo SI & Bae YJ (2010). Light-attraction flight of the giant water bug, *Lethocerus deyrollei* (Hemiptera: Belostomatidae), an endangered wetland insect in East Asia. *Aquatic Insects* 32: 195-203.
- Yorzinski JL, Chisholm S, Byerley SD, Coy JR, Aziz A, Wolf JA & Gnerlich AC (2015). Artificial light pollution increases nocturnal vigilance in peahens. *PeerJ* 3: e1174.
- Zellweger F & Bollmann K (2018). Modellierung der Habitateignung für die Waldschnepfe im Jura: Anforderungen bezüglich biotischen und abiotischen Umweltfaktoren. Projektschlussbericht, WSL Birmensdorf.
- Zhang B, Zhang H, Jing Q & Wang J (2020). Light pollution on the growth, physiology and chlorophyll fluorescence response of landscape plant perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Ecological Indicators* 115: 106448.
- Zhang S, Chen X, Zhang J & Li H (2014). Differences in the reproductive hormone rhythm of tree sparrows (*Passer montanus*) from urban and rural sites in Beijing: The effect of anthropogenic light sources. *General and Comparative Endocrinology* 206: 24-29.
- Zhao X, Chen M, Wu Z & Wang Z (2014). Factors influencing phototaxis in nocturnal migrating birds. *Zoological Science* 31: 781-788.
- Zhao X, Zhang M, Che X & Zou F (2020). Blue light attracts nocturnally migrating birds. *The Condor* 122: duaa002.
- Zheng LX, Zheng Y, Wu WJ & Fu YG (2014). Field evaluation of different wavelengths light-emitting diodes as attractants for adult *Aleurodicus dispersus* Russell (Hemiptera: Aleyrodidae). *Neotropical Entomology* 43: 409-414.
- Zheng Q, Teo HC & Koh LP (2021). Artificial light at night advances spring phenology in the United States. *Remote Sensing* 13: 399.
- Zhou Y, Smith SJ, Zhao K, Imhoff M, Thomson A, Bond-Lamberty B, ... & Elvidge CD (2015). A global map of urban extent from nightlights. *Environmental Research Letters* 10: 054011.

- Zubidat AE & Haim A (2017). Artificial light-at-night—A novel lifestyle risk factor for metabolic disorder and cancer morbidity. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology* 28: 295-313.
- Zubidat AE, Fares B, Fares F & Haim A (2018). Artificial Light at Night of Different Spectral Compositions Differentially Affects Tumor Growth in Mice: Interaction With Melatonin and Epigenetic Pathways. *Cancer Control: Journal of the Moffitt Cancer Center* 25: 1073274818812908.
- Zubidat AE, Nelson RJ & Haim A (2011). Spectral and duration sensitivity to light-at-night in ‘blind’ and sighted rodent species. *The Journal of Experimental Biology* 214: 3206-3217.

Seznam legislativních zdrojů

- Zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší
- Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší
- Zákon č. 128/2000 Sb., o obcích (obecní zřízení)
- Zákon č. 89/2012 Sb., občanský zákoník
- Zákon č. 251/2016 Sb., o některých přestupcích
- Zákon č. 250/2016 Sb., o odpovědnosti za přestupky a řízení o nich
- Metodické doporučení k činnosti územních samosprávných celků, ISBN 978-80-87544-76-1
- Zákon č. 114/1992 Sb., o ochraně přírody a krajiny
- Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů
- Metodický pokyn Ministerstva životního prostředí č. j.: MZP/2020/710/2387 ze dne 30. 6. 2020
- Zákon č. 183/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)
- Vyhláška č. 501/2006 Sb. o obecných požadavcích na využívání území
- Vyhláška č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích a stavby
- Zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci a o omezování znečištění, o integrovaném registru znečišťování a o změně některých zákonů
- Zákon č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích
- Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů 104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích
- ČSN 736102
- ČSN 737507
- Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky o o změně a doplnění některých zákonů
- Závaznost českých technických norem (ČSN) - Hasičský záchranný sbor České republiky. Úvodní strana - Hasičský záchranný sbor České republiky [online]. Copyright © 2021 Generální ředitelství

Hasičského záchranného sboru ČR, všechna práva vyhrazena [cit. 13.03.2022]. Dostupné z:
<https://www.hzscr.cz/clanek/zavaznost-ceskych-technickych-norem-csn.aspx>

NN 14/2019 (7.2.2019.), Zakon o zaštití od svjetlosnog onečišćenja

Na podlagi tretjega in petega odstavka 17. člena Zakona o varstvu okolja (Uradni list RS, št. 39/06 – uradno prečiščeno besedilo, 49/06 – ZMetD, 66/06 – odl. US in 33/07 – ZPNačrt) izdaja Vlada Republike Slovenije

Vyhláška ze dne 27. prosince 2018 o prevenci, snižování a omezování světelného znečištění, platná od 1. 1. 2019 a novelizovaná vyhláškou ze dne 29. května 2019 (Francie)

TA ČR ISRB2 - Technická zpráva k projektu TITSMZP012



Technická řešerše

TAČR BETA Světelné znečištění

Autor:

Ing. Miroslav Cejpek

08/2022

Bibliografická citace:

CEJPEK, M. Technická řešení TAČR BETA Světelné znečištění. Praha: Česká Zemědělská Univerzita. Fakulta životního prostředí, 2022. 6 s. Vedoucí práce Mgr. Tomáš Kadlec, Ph.D.

Klíčová slova:

světelné znečištění, světlo, město, noční obloha, jev, aplikace, chytrá svítidla, biodynamická svítidla.

Předmluva:

Fenomén světelného znečištění je jev, který patří k přirozenému vývoji městské zástavby a společnosti, která v těchto aglomeracích žije. Jedná se o jev spojený s rozvojem aglomerací a s osidlováním planety člověkem obecně. Dopady světelného znečištění jsou v oblasti bezpečnostní, zdravotní, ekologické a v dnešní době především i ekonomické, neboť zbytečné svícení stojí mnoho peněz i energie - zbytečně. Přitom přiměřenou regulací světelného znečištění a omezením rušivého světla v České republice, budou výsledkem ušetřené náklady na energii, kvalitnější podmínky pro život obyvatel, zachování přirozených biorytmů zvířat i rostlin a zlepšení bezpečnostních hledisek spojených se světlem a oslňováním, a to bez snížení komfortu obyvatel nebo dalších nákladů (Maršálek 2012, Šrám 2018).

Na rozdíl od jiných druhů znečištění životního prostředí má světelné znečištění jednu výhodu: může být rychle, jednoduše a bez velkých nákladů významně sníženo. Pro jeho redukcii stačí pouze svítit chytře, to je jen tehdy, kdy je potřeba, pouze tolik, kolik je potřeba a jen tam, kam je potřeba. Svítit na zem, ne do nebe ani ostatním do očí a používat „chytrá svítidla“.

Určení tématu:

Provedení rešerše trhu - utřídit a rozšířit seznam dostupných svítidel pro venkovní prostory (dále jen VO), které jsou výrobcem už od počátku koncipována jako svítidla, která mají omezit světelné znečištění a případně omezit nežádoucí modrou složku spektra v pozdních nočních hodinách. Dále utřídit jednotlivé výrobce a jejich produkty do níže uvedeného seznamu oblastí, se kterými pracuje aktuálně zpracovávaná norma ČSN 36 0459 "Omezování nežádoucích účinků venkovního osvětlení", ze které byly tyto oblasti zadáním určeny následovně:

- osvětlení pozemních komunikací
- osvětlení venkovních pracovišť
- osvětlení venkovních sportovišť
- architektonické osvětlení
- reklamní osvětlení
- osvětlení staveb pro bydlení a rodinnou rekreaci

Zpracování rešerše:

Hlavním výstupem rešerše je utříděný seznam svítidel pro venkovní prostory s jejich možnými provedeními, odkazy na konkrétní výrobky a také nejčastěji používanými spektry „ekologicky šetrných svítidel“ omezujících vliv světelného znečištění. Výstup je zpracován v elektronické příloze č. 1 s názvem *Seznam výrobků VO pro omezení světelného znečištění*.

S ohledem na specifické zadání a na aktuální vývoj a směřování trhu, v kombinaci s běžící dotační výzvou z programů MPO a SFŽP, byla vybrána především moderní biodynamická

svítidla, která, kromě základního předpokladu pro omezení světelného znečištění, tj. vyzařování do spodního poloprostoru a možnost autonomní regulace a snížení intenzity osvětlení v nočních hodinách (tzv. funkce AstroDIM), zároveň omezují modrou složku světla, která není v nočních hodinách v přírodě žádoucí, neboť ve večerních hodinách má negativní vliv na spánkové charakteristiky (Hahnová et al. 2016, Šrám 2018). Expozice modrým světlem zkracuje dobu spánku, snižuje efektivitu spánku a prodlužuje dobu potřebnou k usnutí (Blažek 2021).

Pro oblasti osvětlení pozemních komunikací, do které spadá i osvětlení parků byla zahrnuta především svítidla, která se dnes již běžně dostávají do programů dotačních programů EFEKT a jsou trhem ověřená. Příliš velká intenzita nesprávného světla při osvětlení ulic a parků má, kromě negativního vlivu na člověka (Meier 2014), také negativní vliv na bezobratlé živočichy, u nichž snižuje produkci feromonů, což má za následek narušení jejich reprodukce (Vašková 2016). Pro osvětlení venkovních pracovišť se dnes již objevují i mezi investory z řad soukromého sektoru požadavky na snížení intenzity osvětlení v nočních hodinách, ne výjimečně už i požadavek na teplejší odstín bílé tj. 3000K nebo i 2700K oproti doposud užívanému zažitému standardu 4000K. Už se ovšem objevují první pokrokové instalace s biodynamickým osvětlením, především tam kde není provoz 24h denně, a v noci se osvětlení bere jen jako orientační a pochůzkové např. pro potřeby ostrahy areálu.

Osvětlení venkovních sportovišť je z pohledu rušivého světla specifické v tom, že i když již existují výrobci, kteří umí daná biodynamická svítidla pro tento specifický účel vyrobit, tak se v praxi používají méně často, a to z důvodu, že na sportovišti se většinou svítí jen v době, kdy se na nich provozují sporty, a v mezíchase se většinou osvětlení vypíná. Výjimku tvoří opět areály, kde svítidla zároveň slouží pro noční nasvětlení, případně z důvodu ostrahy areálu.

Architektonické osvětlení se až dosud v tomto ohledu rušivého světla obecně společensky neřešilo, neboť negativní vlivy byly vyváženy pozitivním aspektem vnímání kulturního prostředí městské zástavby. Většina výrobců, kteří vyráběli svítidla s proměnným spektrem je prováděli v RGB a RGBW variantě, kde si barvu světla lze namixovat dle požadavku. Toto se ale řešilo především pro vizuální efekt a potřeby slavnostního osvětlení. Pro čistě ekologickou stopu snížení světelného smogu se vydávají první výrobci, ale jedná se také spíše o požadavky trhu a obecné diskuze nad problematikou rušivého světla než samotnou iniciativou výrobců.

V oblasti reklamního osvětlení nejsou na území ČR známy instalace ani plány na využití biodynamického osvětlení pro potřeby osvětlení billboardů a venkovní reklamy. Provozovatelé mají naopak ve většině případů smluvní závazky reklamní plochy dostatečně nasvětlit a s potřebným indexem podání barev pro věrné podání reklamy. Tyto zájmy provozovatelů jdou proti požadavkům na omezování rušivého světla. Pokud už jsou provozovatelé toto donucení řešit, je to většinou na základě nějakého vnějšího podnětu a opatření se provádí lepším směřováním nebo odcloněním světla svítícího mimo určenou plochu reklamy.

U osvětlení staveb pro bydlení a rodinnou rekreaci je dnes tak široké spektrum výrobců, že lze těžko udělat uřízený seznam bez toho, aby nebyl někdo znevýhodněn tím, že v seznamu nebude uveden. Dále nelze seznam vytvořit především pro to, že většina výrobků pro rodinné bydlení je koncipována jako svítidla s vyměnitelnými zdroji se standardizovanými paticemi (např. E27, E14, GU10 a jiné). Tedy je na každém majiteli nemovitosti, případně jejím uživateli, jaký světelný zdroj a s jakým výkonem a teplotou chromatičnosti zvolí. Na skutečnost,

že absence výrazné změny denní / noční světelné intenzity v námi vytvořeném vnitřním prostředí může ovlivnit schopnost vnitřních biologických hodin synchronizovat se s vnějším prostředím (Maierová & Kabele 2014), již naštěstí reagují výrobci zdrojů s patricemi E27 s proměnným spektrem pro rezidenční trh (Např. fy SPECTRASOL nebo LUMBIO). Zakázkovou výrobou venkovních svítidel s integrovanými čipy se nicméně zabývají pouze specializovaní výrobci.

Přílohy:

Elektronická příloha 1 – *Seznam výrobků VO pro omezení světelného znečištění (xls soubor)*

Literatura:

Odkazy na jednotlivé světelné zdroje jsou uvedeny v příložené tabulce (Elektronická příloha 1 – *Seznam výrobků VO pro omezení světelného znečištění*).

Blažek J (2021). Vliv modrého světelného spektra na spánek. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická. 60 s. Vedoucí práce Mgr. Lukáš Rubín, Ph.D.

Hahnová K, Pačesová D, Volfová B, Červená K, Kašparová D, Žurmanová J & Bendová Z (2016). Circadian Dexras1 in rats: Development, location and responsiveness to light. *Chronobiology International* 33:141-50.

Maierová L & Kabele K (2014). Vliv osvětlení na aktivitu člověka. Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze 4:1-4.

Maršálek M (2012). Cirkadiánní rytmy a deprese. *Psychiatrie pro praxi* 13: 50-53.

Meier J (2014). *Urban lighting, light pollution and society*. 324 s. ISBN 9781315747811.

Šrám R (2018). Stanovisko Komise pro životní prostředí AVČR. AV ČR. 2: 1-2.

Vašková P (2016). Světlo jako faktor ovlivňující organismy. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. 61 s. Vedoucí práce RNDr. Helena Nejezchlebová, Ph. D.