

Ekologické světelné znečištění

Travis Longcore a Catherine Rich

Ekologové již dlouho studují rozhodující roli přírodního světla, jak se projevuje v regulaci mezidruhových interakcí, ale až na ojedinělé výjimky nezkoumali důsledky umělého nočního osvětlení. V minulém století rozsah a intenzita umělého osvětlení natolik vzrostly, že má podstatné dopady na biologii a ekologii druhů v přírodě. Rozlišujeme „astronomické světelné znečištění“, které kazí pohled na noční nebe, od „ekologického světelného znečištění“, které mění přírodní světelné poměry v suchozemských a vodních ekosystémech. Některé katastrofické důsledky světla pro jisté taxonomické skupiny jsou dobře známy, jako úmrtí tažných ptáků u vysokých osvětlených konstrukcí a čerstvě vyhlých želv dezorientovaných světly na jejich rodných plážích. Jemnější vlivy umělého nočního osvětlení na chování druhů a ekologii společenstev jsou hůře známy a tvoří nové ohnisko pozornosti pro výzkum v ekologii a také nálehavou výzvu pro ochranu přírody.

Front Ecol Environ 2004; 2(4): 191–198

Jako denní tvorové hledali lidé odedávna způsoby, jak osvětlit noc. V předprůmyslových dobách bylo světlo uměle vytvářeno pálením různých materiálů, jako oleje, dřeva a dokonce sušených ryb. Jakkoliv takové metody osvětlování jistě lokálně ovlivňovaly chování a ekologii živočichů, jejich vlivy byly omezené. Poměrně nedávný výzkum a rychlé rozšíření elektrických světel však proměnily noční prostředí na podstatné části povrchu Země.

Ekologové možný rozvrat ekologických systémů umělým nočním osvětlováním neignorovali tak docela. Několik autorů napsalo přehledy potenciálních vlivů na ekosystémy nebo taxonomické skupiny, publikované v „šedé“ literatuře ([26, Health Council of the Netherlands 2000]; [27, Hill 1990]), konferenčních sbornících ([39, Outen 2002]; [47, Schmiedel 2001]) a časopiseckých článcích ([16, Frank 1988]; [52, Verheijen 1985]; [45, Salmon 2003]). Nynější přehled se opírá o dosavadní literaturu na toto téma a o konferenci organizovanou autory v roce 2002, nazvanou *Ekologické důsledky umělého nočního osvětlování*. Snažíme se najít role, které hraje umělé noční osvětlování při proměňování ekologických interakcí napříč taxony. To je něco jiného než přehled vlivu svícení na jednotlivé taxonomické skupiny. Nejprve diskutujeme velikost a rozsah ekologického světelného znečištění, a také způsoby měření světla pro ekologický výzkum.

Pak se věnujeme zaznamenaným a potenciálním vlivům umělého nočního osvětlování v hierarchických stupních behaviorální a populační ekologie, ekologie společenstev a ekosystémů. Jakkoliv je taková hierarchie poněkud umělá a určitě měnitelná, ilustruje šíři potenciálních následků ekologického světelného znečištění. Důležité vlivy světla na fyziologii organismů (viz [26, Health Council of the Netherlands 2000]) zde diskutovány nejsou.

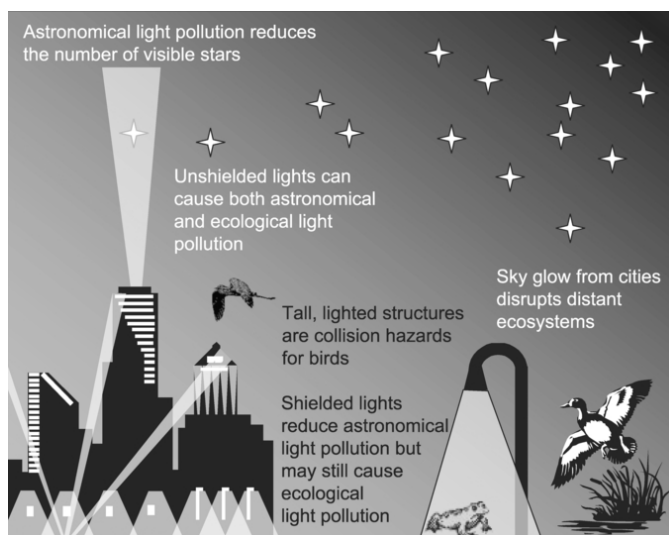
Astronomické a ekologické světelné znečištění: velikost a rozsah

Termín „světelné znečištění“ se užívá již řadu let a ve většině situací se vztahuje na degradaci lidských pohledů na noční oblohu. Tehdy se ale jedná jen o „astronomické světelné znečištění“, kdy jsou hvězdy a jiná nebeská tělesa vymazána světlem, které buď směřuje vzhůru nebo je tam odraženo. Jde o fenomén velkého měřítka, se statisíci světelnými zdroji kumulativně přispívajícími zvýšenému nočnímu osvětlení ovzduší; světlu rozptýlenému ovzduším zpět k zemi se říká „zář oblohy“ (skyglow, obr. 1). My pro uměle produkované světlo, které zasahuje do přírodního střídání světla a tmy v ekosystémech, zavádíme termín „ekologické světelné znečištění“. Verheijen ([52, 1985]) navrhl termín „photopollution“, čímž myslí „umělé světlo s nežádoucími dopady na život v přírodě“. Protože foto-polluce znamená doslova „světelné znečištění“ a protože světelné znečištění se dnes tak často chápe jen jako zhoršení vzhledu nočního nebe a lidského vnímání noci, věříme, že je potřeba mít k dispozici i nějaký přesnější termín. Ekologické světelné znečištění zahrnuje přímé oslňování, chronicky zvýšenou intenzitu osvětlení a přechodné, nečekané výkyvy v osvětlení. Mezi jeho zdroji jsou zář oblohy, osvětlené budovy a věže, uliční světla, rybářské čluny, bezpečnostní světla, světla na vozidlech, pochodně na mořských těžních plošinách, a dokonce světla na výzkumných ponorkách, která všechna mohou v různé míře rozvracet ekosystémy. Fenomén tudíž zahrnuje potenciální vlivy ve velkém rozsahu prostorových a časových měřítek.

V kostce:

- Ekologické světelné znečištění zahrnuje chronické nebo periodicky zvýšené osvětlení, nečekané změny v osvětlení a přímé oslňování.
- Živočichové mohou být vlivem přídavného osvětlení ve větší míře orientovaní nebo naopak dezorientovaní a mohou být přitahováni nebo odpuzováni oslňováním, což ovlivňuje potravní chování, reprodukci, komunikaci a ostatní důležité životní projevy.
- Uměle přidané světlo narušuje mezidruhové interakce, které se vyvinuly v přírodních podmínkách střídání světla a tmy, což má závažné důsledky pro ekologii společenstev.

The Urban Wildlands Group, PO Box 24020, Los Angeles, CA 90024-0020 (longcore@urbanwildlands.org)



Obrázek 1: Schéma ekologického a astronomického světelného znečištění

Rozsah ekologického světelného znečištění je globální ([13, Elvidge a kol. 1997]; obr. 2). První atlas umělého jasu oblohy ilustruje, že astronomické světelné znečištění dosahuje na všechny obydlené kontinenty ([7, Cinzano a kol. 2001]). Cinzano a kol. [7, 2001] vypočítali, že jen polovina Američanů žije v místech, kde v noci nastává dostatečná tma na to, aby zrak přešel zcela z čípkového vidění na tyčinkové, a že 18,7 % pevného povrchu Země má nad sebou noční oblohu, která je podle astronomických měřítek znečištěná. Takovými hladinami osvětlení mohou být ekosystémy ovlivněny; navíc i světla, která nepřispívají ke zvýšené záři oblohy, mohou mít stále ještě ekologické dopady, takže ekologické světelné znečištění se týká ještě větší části Země. Osvětlené rybářské flotily, mořské ropné těžní plošiny i výletní lodě přinášejí rozvrat působený umělým nočním svícením do světových oceánů.

Tropy mohou být na změny přírodního denního střídání (tj. s periodou 24 h) světla a tmy zvláště citlivé, protože denní cykly jsou tam po celý rok stejné ([21, Gliwicz 1999]). U tropických druhů adaptovaných na diánní změny s minimálními sezónními výkyvy je ovlivnění zkrácenou nebo světlejší nocí pravděpodobnější. Samozřejmě, druhy mírných nebo polárních zón, které jsou aktivní jen v části roku, jsou na tom podobně. I druhy mírného pásma budou náchylné k narušení, pokud závisejí na sezónních změnách délky dne jakožto podnětech k zahájení příslušných důležitých typů chování.

Měření a jednotky

Měření ekologického světelného znečištění často zahrnuje zjištění intenzity osvětlení na daném místě. Intenzita osvětlení je množství světla dopadající na jednotkovou plochu – není to jediné měření relevantní pro ekologické světelné znečištění, ale je nejběžnější. Světlo kolísá co do intenzity (počtu fotonů na jednotkovou plochu) a spektrálního složení (vztahového na vlnovou délku). Ideálně

by ekologové měli měřit osvětlení ve fotonech na čtvereční metr za sekundu s doprovodnými měřeními vlnových délek přítomného světla. Častěji se osvětlení měří v luxech (nebo v jednotkách zvaných footcandle, nepatřících do SI), které vyjadřují množství světla vnímaného lidským zrakem. Vyjádření v luxech klade větší důraz na vlnové délky světla, které lidský zrak vnímá nejvíce, a menší důraz na vlnové délky vnímané lidmi jen málo. Protože jiné organismy vnímají světlo odlišně, a k tomu vnímají i vlnové délky pro lidi neviditelné, měl by budoucí výzkum ekologického světelného znečištění takové odlišnosti identifikovat a měřit světlo příslušným způsobem. Například Gal a kol. [17, 1999] vypočítal křivku citlivosti vidloňozce jezerního na světlo a udával intenzitu osvětlení v luxech přízvisobných spektrální citlivosti tohoto druhu.

Ekologové se střetávají s praktickými obtížemi, když vyjadřují informace o světelných podmínkách. Lux je standard užívaný takřka všemi světelnými návrháři, světelnými inženýry a lidmi zabývajícími se ochranou prostředí; komunikace s nimi vyžaduje používat při vyjadřování tuto jednotku. Ale použití luxu opomíjí biologicky relevantní informaci. Vysokotlaká sodíková světla například přitahují noční motýly vlivem přítomnosti ultrafialových vlnových délek, zatímco nízkotlaká sodíková světla stejné intenzity, ale neprodukující ultrafialové záření, je přitahují výrazně méně ([43, Rydell 1992]). My zde nicméně luxy používáme, jak kvůli potřebě komunikace s profesionály v aplikovaných oborech, tak kvůli jejich běžnosti v minulosti i současnosti. Jak se toto pole výzkumu bude vyvíjet, mělo by se nicméně měřit záření a spektrum relevantní pro zkoumané organismy, i když lux zůstane asi preferovanou jednotkou pro komunikaci s profesionály z jiných disciplín.

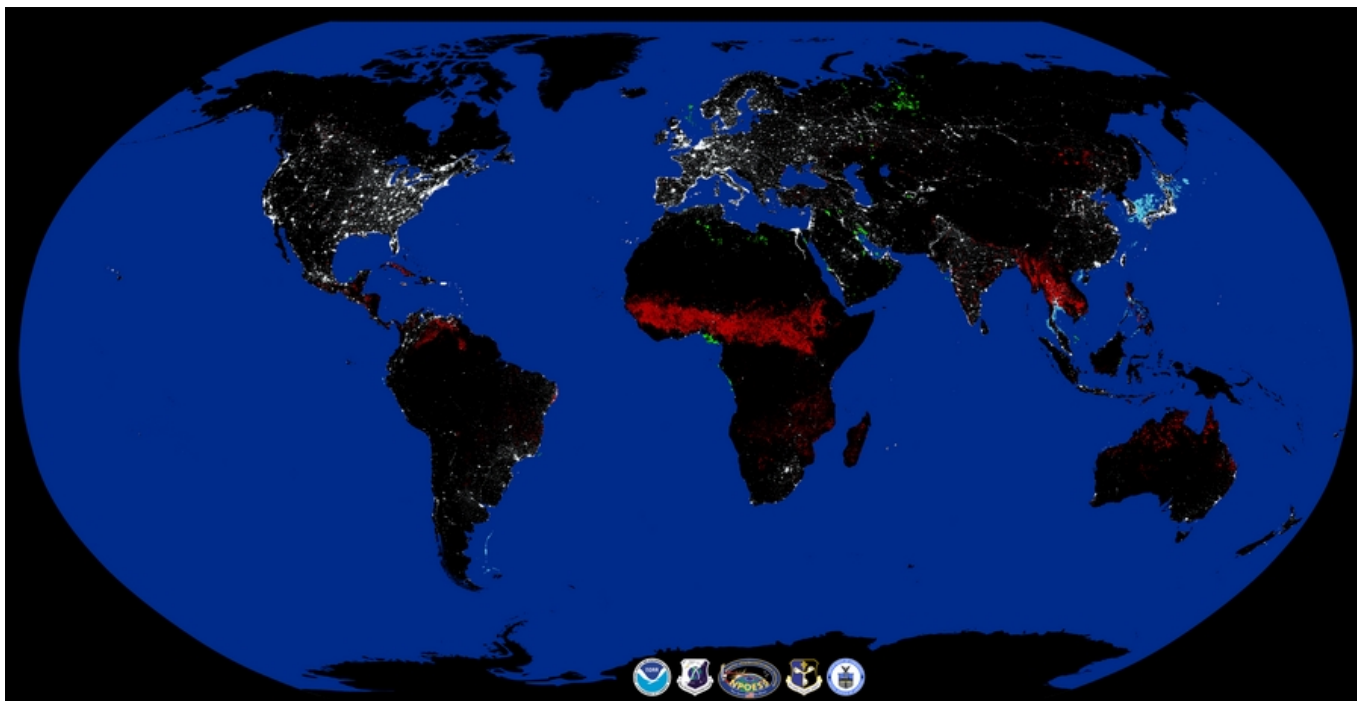
Ekologové také měří další aspekty světelného prostředí kromě absolutní intenzity osvětlení. Pro některé druhy je rušivá náhlá změna v osvětlení ([5, Buchanan 1993]), takže může být relevantní procentuální změna v osvětlení, tempo změny nebo jiné podobné vyjádření. Ekologové mohou také měřit jas a jasnost světelných zdrojů, které jsou pro organismy viditelné.

Behaviorální a populační ekologie

Ekologické světelné znečištění má prokazatelné vlivy na behaviorální a populační ekologii organismů na přírodních stanovištích. Jako celek se tyto vlivy odvozují od změn v orientaci, od dezorientace nebo mylné orientace a od přitahování nebo odpuzování změněným světelným prostředím, které pak mohou ovlivnit příjem potravy, rozmnožování, migraci a komunikaci.

Orientace/dezorientace a přitahování/odpuzování

Orientace a dezorientace jsou odpověďmi na okolní osvětlení (tj. množství světla dopadajícího na objekty v prostředí). Naopak atrakce a repulze se vyskytují jako reakce na světelné zdroje samotné a jsou tedy odpověďmi na jas nebo jasnost zdroje světla ([26, Health Council of the Netherlands 2000]).



Obrázek 2: Rozmístění umělých světel viditelné z vesmíru. Vytvořeno s použitím dat bezoblačných oblastí snímků slabého světla, které pořídil US Air Force Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System. Jsou označeny čtyři typy světla: (1) lidská sídliště – města a vesnice (bíle), (2) ohně – definované jako pomůjivá světla na zemi (červeně), (3) plynové fakule (zeleně) a (4) silně osvětlené rybářské lodě (modrá). Podrobnosti viz Elvidge a kol. [14, 2001]. Obrázek, zpracování dat a popis: National Oceanic and Atmospheric Administration's National Geophysical Center.

Zvýšené osvětlení může prodlužovat denní nebo soumrakové typy chování do noční doby zlepšením schopnosti živočicha orientovat se. Mnoho jinak denních ptáků ([27, Hill 1990]) a plazů ([48, Schwartz a Henderson 1991]) se například živí pod umělými světly. Schwartz a Henderson [48, 1991] to pro plazy označili za „noční světelnou niku“ – ta se zdá být prospěšná pro druhy, které ji umí využít, ale ne pro jejich kořist.

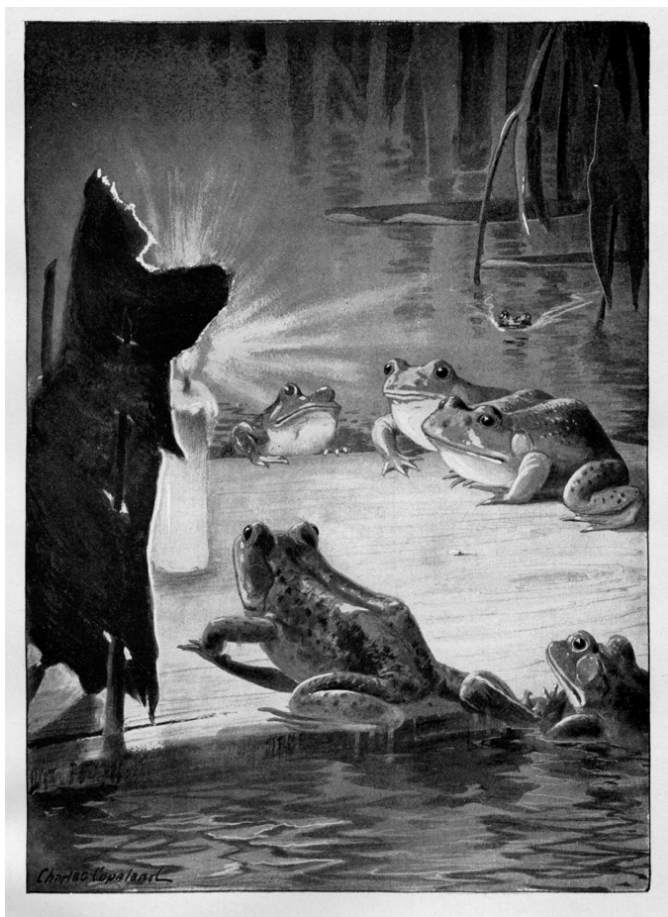
Kromě získávání potravy může orientace pod umělým osvětlením vyvolávat další chování, jako teritoriální zpěv u ptáků ([3, Bergen a Abs 1997]). U severního drozdece mnohohlasého *Mimus polyglottos* samečci v noci zpívají před spálením, ale po spáření zpívají v noci jen v uměle osvětlených oblastech ([9, Derrickson 1988]) nebo za úplňku. Vliv těchto světlem vyvolaných chování na kondici je neznámý.

Stálé umělé osvětlení může také dezorientovat živočichy přivyklé navigaci v nočním prostředí. Nejlépe známým příkladem je dezorientace čerstvě vylíhlých mořských želv, které vylézají z hnízd na písčiny plážích. Za normálních okolností se želvičky pohybují pryč od nízkých temných siluet (historicky jde o vegetaci na dunách), což jim umožňuje plazit se rychle k oceánu. S osvětlením pláží přestávají být patrné siluety, které by jinak byly nápovědou k pohybu, což má za následek dezorientaci ([46, Salmon a kol. 1995]). Osvětlení také ovlivňuje chování mořských želv pokud jde o kladení vajec. (Přehled vlivů na mořské želvy viz [45, Salmon 2003] a [54, Witherington 1997].)

Změny množství světla mohou narušit orientaci nočních živočichů. Rozsah anatomických přizpůsobení, která umožňují noční vidění, je široký ([40, Park 1940]) a rychlé nárůsty intenzity osvětlení působí pokles schopnosti vidění, ze kterého se zrak může zotavovat minuty až hodiny ([5, Buchanan 1993]). Ale např. žáby poté, co se světlu přizpůsobí, jím mohou být také přitahovány ([28, Jaeger a Hailman 1973]; obr. 3).

Ptáci mohou být nočními světly dezorientováni a zachyceni ([15, Evans Ogden 1996]). Když se pták dostane v noci do osvětlené zóny, může být jaksi „lapan“ a neopustí osvětlenou oblast. V důsledku toho jsou ovlivněny velké počty ptáků táhnoucích v noci, pokud je povětrnostní podmínky přivedou blízko ke světlům, např. při špatném počasí nebo pozdě v noci, když mají sklon letět níže. Uvnitř takové sféry světla se ptáci mohou srážet vzájemně nebo narážet na nějaké konstrukce, vyčerpat se nebo být uloveni predátory. Ptáci, kteří jsou v noci v městských oblastech zastaveni budovami, často umírají při nárazech na okna, když se pak snaží ve dne uniknout. Umělé osvětlení přitahovalo v noci ptáky ke komínům, majákům ([49, Squires a Hanson 1918]), vysílačům ([15, Evans Ogden 1996]), lodím ([10, Dick a Donaldson 1978]), skleníkům, ropným těžními plošinám ([53, Wiese a kol. 2001]) a dalším strukturám, což vedlo k přímé úmrtnosti a tak narušovalo migrační trasy.

Mnoho skupin hmyzu je přitahováno ke světlům, zvláště dobře známým příkladem jsou noční motýli ([16, Frank 1988]). Další taxony, u kterých se takové přitahování pro-



Obrázek 3: Přitahování žab ke svíčke posazené na malém voru. Ilustrace Charlese Copelanda, dle pokusu v severním Maine nebo v Kanadě, jak jej popsal William J Long [35, (1901)]. Na malý vor se vyšplhalo dvanáct či patnáct skokanů volských (*Rana catesbeiana*), než se překlopil.

jevuje, jsou sífokřídli, brouci, ploštice, chrostíci, tiplice, pakomáři, pestřenky, vosy a kobylky ([12, Eisenbeis a Hassel 2000]; [31, Kolligs 2000]; obr. 4). Atrakce závisí na spektru světla (sběratelé hmyzu užívají ultrafialové záření, které přitahuje nejvíce) a na vlastnostech dalších světél v okolí.

Nelétaví členovci se ve svých reakcích na světla liší. Někteří noční pavouci jeví negativní fototaxi (tj. jsou světlem odpuzováni), zatímco jiné světlo, pokud je k dispozici, využívají ([38, Nakamura a Yamashita 1997]). Některé druhy hmyzu mají vždy pozitivní fototaxi jakožto adaptivní chování a jiné jsou vždy fotonegativní ([50, Summers 1997]). U členovců mohou být tyto odpovědi ovlivněny také častými korelacemi mezi světlem, vlhkostí a teplotou.

Správci využívání přírodních zdrojů mohou tyto reakce živočichů na světlo využít. Světla jsou občas používána pro lákání k rybochodům, které rybám umožňují obejít hráze a elektrárny ([25, Haymes a kol. 1984]). Světla mohou také přilákat rybí potěr ke korálovým útesům ([37, Munday a kol. 1998]). Vezmeme-li terestrické prostředí, dospívající pumy americké, které se rozcházejí od svých matek, se osvětleným oblastem vyhýbají do takové míry, že Beier ([1, 1995]) navrhuje instalaci světél, která by je odradila od vstupu do habitatů končících v oblastech, kde žijí lidé.

Rozmnožování

Umělým nočním osvětlením může být pozměněno reprodukční chování. Například samičky žáby *Physalaemus pustulosus* jsou méně vybíravé při volbě samečka, když je hladina světla zvýšená; lze předpokládat, že dávají přednost tomu, spářit se rychle a vyhnout se zvýšenému predančnímu riziku během páření ([41, Rand a kol. 1997]). Noční osvětlení může také zabránit pohybu obojživelníků na místa a z míst, kde se rozmnožují, a to stimulací fototaktického chování. Bryant Buchanan (soukromé sdělení) udává, že žáby v pokusném prostoru zastavily pářící činnosti během nočních fotbalových utkání, když světla z nedalekého stadionu zvýšila zář oblohy. Žabí chór se obnovil, jen když byl pokusný prostor zakryt a žáby před světlem ochráněny.

U ptáků jsou známy náznaky, že umělé noční osvětlení ovlivňuje výběr hnízdiště. DeMolenaar a kol. [8, 2000] zkoumal vlivy silničního osvětlení na břehouše černoocasé (*Limosa l. limosa*) v mokřích travnatých habitatech. Hnízdní hustoty břehoušů byly zaznamenávány po dva roky, přičemž se porovnávala osvětlená a neosvětlená místa v blízkosti silnice a v blízkosti světél na stožárech instalovaných v mokré louce mimo dosah vlivu silnice. Pokud se vzaly v potaz všechny ostatní faktory habitatu, hustota hnízd byla mírně, ale statisticky významně nižší až do vzdálenosti 300 m od silnice a srovnávacích stanovišť. Badatelé také zaznamenali, že ptáci, kteří zahnízdili dříve, si vybrali místa dále od světél, zatímco ti, kteří hnízdili později, zaplnili místa blíže ke světlům.

Komunikace

Zraková komunikace uvnitř druhů a mezi nimi může být také ovlivněna umělým nočním osvětlením. Některé druhy komunikují pomocí světla, a jsou tudíž zvláště zranitelné. Nelétavé samičky světlušek přitahují samečky až ze vzdálenosti 45 m záblesky bioluminiscence; přítomnost umělého osvětlení dosah takové komunikace snižuje. Obdobně, rozptýlené světlo může poškodit složitou zrakovou komunikaci svatojánských mušek ([34, Lloyd 1994]).



Obrázek 4: Tisíce jepic pokrývá zemi kolem „bezpečnostního světla“ na Millecoquins Point v Naubinway na Horním Michiganském poloostrově.



Obrázek 5: Zoborožec čelenkový (*Tockus alboterminatus*) lovcí hmyz u světla v národním parku Kibala Forest v Ugandě.

Umělé noční osvětlení může také pozměnit vzorce komunikace coby druhotný vliv. Kojoti (*Canis latrans*) skupinově vyjí a skupinově štekavě vyjí (yip-howl) více za novoluní, když je nejtmavěji. Komunikace je nezbytná ke snížení vniků z ostatních smeček nebo ke shromáždění smečky k lovu větší kořisti ve tmavých podmínkách ([2, Bender a kol. 1996])). Umělá zář oblohy by mohla zvýšit osvětlení prostředí až k eliminaci takového vzorce chování v postižených oblastech.

Vzhledem k ústřední roli zraku při orientaci a chování většiny živočichů není překvapivé, že umělé osvětlování má vliv na chování. U některých druhů to představuje bezprostřední pobídku k jejich ochraně, zatímco pro jiné se vliv může zdát přínosný. Takové „pozitivní“ vlivy mohou mít ale negativní důsledky v kontextu ekologie společenstev.

Ekologie společenstev

Chování projevovaná jednotlivými živočichy jako odpověď na okolní osvětlení (orientace, dezorientace) a na jas (přitahování, odpuzování), ovlivňují komunitní interakce, kupříkladu soutěž a predaci.

Kompetice

Umělé noční osvětlení může narušit interakce skupin druhů, u nichž se projevuje dělení zdrojů napříč gradienty osvětlení. V přírodních společenstvech jsou například některé doby krmení rozděleny mezi druhy, které preferují různé úrovně osvětlení. Rosnička hádavá (*Hyla squirella*) se dovede orientovat a žít při intenzitách osvětlení klesajících k 10^{-5} lx a v přírodních podmínkách typicky přestává s příjmem potravy při osvětlenosti nad 10^{-3} lx ([6,

Buchanan 1998]). Ropucha západoamerická (*Bufo boreas*) se žije jen při osvětlenostech mezi 10^{-1} lx a 10^{-5} lx, zatímco ocasatka americká (*Ascapus truei*) se žije jen v nejtmaší části noci při méně než 10^{-5} lx ([24, Hailman 1984]). I když tyto tři druhy nejsou nutně sympatrické (tj. obývající totéž území) a liší se v dalších rozměrech svých nik, ilustrují rozdělení podle gradientu světla při získávání potravy.

Mnoho druhů netopýrů je přitahováno ke hmyzu, který se shromažďuje kolem zdrojů světla ([16, Frank 1988]). Přestože se může zdát, že to je pozitivní jev, zvýšená koncentrace potravy prospívá jen těm druhům, které využívají světelné zdroje, a mohla by tedy vyústit ve změnu struktury společenstva. Rychleji létající druhy netopýrů se shromažďují kolem světla, aby se krmily hmyzem, ale jiné, pomaleji létající druhy se světlem vyhýbají ([4, Blake a kol. 1994]; [44, Rydell a Baagøe 1996]).

Změny kompetičních vztahů ve společenstvech se objevují, když se denní druhy dostávají do „noční světelné niky“ ([48, Schwartz a Henderson 1991]). Tento koncept, jak byl původně popsán, se týká plazů, ale lze jej snadno rozšířit na další taxony, jako pavouky (Frank, soukr. sdělení) a ptáky ([27, Hill 1990]; obr. 5).

Predace

Přestože se může zdát pro denní druhy blahodárné, když mohou déle získávat potravu pod umělými světly, jakékoliv zisky z nárůstu doby aktivity mohou být převáženy vzrůstem rizika predace ([23, Gotthard 2000]). Rovnováha mezi zisky z delší doby krmení a rizika zvýšené predace je ústředním tématem pro výzkum na malých savcích, plazech a ptácích ([32, Kotler 1984]; [33, Lima 1998]). Malí hlodavci se při vysokých hladinách osvětlení žijí méně ([33, Lima 1998]), takovou tendenci jeví také někteří zajáci ([19, Gilbert a Boutin 1991]), vačnatci ([29, Julien-Laferrrière 1997]), hadi ([30, Klauber 1999]), netopýři ([43, Rydell 1992]), ryby ([18, Gibson 1978]), vodní bezobratlí ([36, Moore a kol. 2000]) a jiné taxony.

Nečekané změny ve světelných podmínkách mohou narušit vztahy predátor-kořist. Gliwitz ([20, 1986], [21, 1999]) popisuje vysokou predaci ryb na zooplanktonu v nocích, kdy úplňkový Měsíc vyšel (nad hřeben) hodiny po západu Slunce. Zooplankton se přesunul ke hladině, aby se živil pod rouškou tmy, načež byl osvětlen vycházejícím Měsícem a podroben intenzivní predaci. Taková „měsíční světelná past“ ([20, Gliwitz 1986]) ilustruje přírodní výskyt nenadálého osvětlení, ovšem obdoba z antropogenních zdrojů může interakce predátor-kořist narušit podobným způsobem, často ve prospěch predátora.

Dostupný výzkum ukazuje, že umělé noční osvětlení narušuje vztahy predátor-kořist, což je v souladu s prokázanou důležitostí přírodních světelných poměrů při zprostředkování takových interakcí. V jednom příkladu se tuleni obecní (*Phoca vitulina*) shromažďovali pod umělými světly, aby konzumovali juvenilní lososovité ryby při jejich migraci po proudu; vypnutí světla predáční hladinu snížilo ([55, Yurk a Trites 2000]). Na městských nocovištích vran byla zjištěna vyšší intenzita osvětlení než na kontrolních místech, nejspíše proto, že to pomáhá vranám

vyhnout se predaci ze strany sov ([22, Gorenzel a Salmon 1995]). Pouštní hlodavci snížili potravní aktivitu, když byli vystaveni světlu jediné táborové lucerny ([32, Kotler 1984]). Frank ([16, 1988]) podává přehled predace netopýry, ptáky, skunky, ropuchami a pavouky na nočních motýlech přilákaných k umělým světlům. Zejména rtuťové výbojky narušují interakci mezi netopýry a nočními motýly se sluchovými orgány (konkrétně píďalkami podzimními), a to tak, že interferují s tím, jak píďalky detekují ultrazvukové impulsy používané netopýry při echolokaci, což píďalkám brání, aby podnikly obvyklý únikový manévr ([51, Svensson a Rydell 1998]).

Z těchto příkladů vyplývá, že skladba společenstev se změní tam, kde světlo ovlivňuje mezidruhové interakce. „Trvalý úplněk“ působený umělými světly zvýhodní druhy tolerantní ke světlu a vyloučí ostatní. Pokud se nejméně přírodní podmínky nevyskytnou nikdy, pak druhy, které se živí nejvíce během novoluní, by případně mohly být ohroženy, vystaveny riziku, že nezvládnou naplnit měsíční energetický rozpočet. Výsledná struktura společenstva by se zjednodušila, a takové změny mohou pak mít vliv na charakteristiky ekosystému.

Ekosystémové efekty

Pokud se vlivy změn chování na soutěž a predaci, vyvolané umělým nočním osvětlením, kumulují, mohou narušit klíčové ekosystémové funkce. Ilustrací je průnik ekologického světelného znečištění do vody a jeho vliv na vodní bezobratlé. Mnoho vodních bezobratlých, jako zooplanktonu, se zvedá a spouští ve vodním sloupci během 24-hodinové periody, tomuto chování se říká „diánní vertikální migrace“. O diánní vertikální migraci se předpokládá, že vyplývá z potřeby vyhnout se predaci během doby, kdy je hladina osvětlena, takže spousta zooplanktonu se živí blízko hladiny jen v podmínkách tmy ([20, Gliwitz 1986]). Světlo slabší než od „půlměsíce“ ($< 10^{-1}$ lx) stačí, aby ovlivnilo vertikální distribuci některých vodních bezobratlých, a vzorce diánní vertikální migrace se vskutku mění s lunárním cyklem ([11, Dodson 1990]).

Moore a kol. ([36, 2000]) dokumentoval vliv umělého světla na diánní migraci planktonních perlooček rodu *Daphnia* v přírodě. Umělé osvětlení snížilo velikost vertikálních migrací, jak co do rozsahu vertikálního pohybu, tak co do počtu migrujících jedinců. Badatelé předložili hypotézu, že toto narušení diánní vertikální migrace může mít podstatný škodlivý vliv na zdraví ekosystému. Pokud ke hladině migruje za potravou méně zooplanktonu, mohou vzrůst populace řas. Takový rozkvet řas by pak měl řadu nežádoucích dopadů na kvalitu vody ([36, Moore a kol. 2000]).

Rezonující vlivy změn společenstev způsobených umělým nočním osvětlením mohou ovlivnit ostatní funkce ekosystému. Přestože důsledky zatím nelze předpovědět, a přestože redundance ekosystému může tlumit jeho změny, existují náznaky, že ekosystémy ovlivněné světlem utrpí významné změny, které lze připsat umělému osvětlení buď samotnému nebo kombinovanému s dalšími poruchami. I vzdálené oblasti mohou být vystaveny zvýšenému

osvětlení vlivem záře oblohy, ale nejzřejmější vlivy se objeví v těch oblastech, kde jsou světla blízko k přírodním habitatům. To může být tam, kde jsou v divočině budována letoviska, podél expandujícího okraje suburbanizace, blízko mokřadů a ústí řek, které jsou často posledními otevřenými plochami ve městech, nebo na volném oceánu, kde osvětlují noc dopravní lodě, čluny lovící sépie a ropné těžní věže.

Závěry

Plnému rozsahu ekologických důsledků umělého nočního osvětlování dosud moc nerozumíme. Je to pole mnoha příležitostí pro základní a aplikovaný výzkum. Pro zkoumání hypotéz vytvořených v laboratoři jsou nezbytné studie přírodních populací, je potřeba sledovat v nich vliv lunárních cyklů, stejně jako zaznamenat postupné změny. Pokud dosavadní trend bude pokračovat, vliv rozptýleného světla na ekosystémy bude expandovat co do zeměpisného rozsahu a intenzity. Dnes je 20 % rozlohy Spojených Států (bez Aljašky) vzdáleno do 127 m od silnice ([42, Riitters a Wickham 2003]). Světlo se šíří podél silnic a podíl ekosystémů neovlivněných změnou světelného režimu klesá. Máme za to, že moc ekologů doposud nedbalo na to, aby uvažovali umělé noční osvětlení jako významný environmentální faktor. A jsme si jistí, že ochrana přírody opomíjela zahrnovat noční prostředí do návrhu rezervací a biokoridorů.

Úspěšné zkoumání ekologického světelného znečištění si vyžádá spolupráci s fyziky a inženýry na zlepšení vybavení k měření světelných charakteristik na ekologicky relevantních úrovních a za různorodých terénních podmínek. Badatelé by měli věnovat zvláštní pozornost tropům, kde stálost vzorců střídání dne a noci pravděpodobně vyústila v malou šířku nik, pokud jde o osvětlení. Vodní ekosystémy rovněž заслужují zvýšenou pozornost, protože přes ústřední důležitost světla ve sladkovodní a mořské ekologii bylo až dosud umělé osvětlení bráno v úvahu jen omezeně. Výzkum vlivů umělého nočního osvětlenílepší porozumění urbánním ekosystémům – obě současné městské lokality Národní vědecké nadace (NSF) zahrnuté do programu *Dlouhodobého ekologického výzkumu* takovým snahám ideálně vyhovují.

Pečlivý výzkum zaměřený na umělé noční osvětlení pravděpodobně odhalí, že jde o mohutnou sílu strukturující místní společenstva narušením kompetice a vztahů predátor-kořist. Badatelé budou před výzvou rozplést spolupůsobící a kumulativní vlivy ostatních složek lidského rušivého vlivu, se kterými bude umělé noční osvětlení často korelovat, jako jsou silnice, expanze výstavby, hluk, exotické druhy, masový odlov a těžba surovin. Aby to zvládli, měla by být měření světelného narušení zahrnuta jako rutinní součást monitorování prostředí, jako třeba v Národní síti ekologických observatoří (NEON) zřízené NSF. Lze očekávat, že budoucí výzkum ukáže umělé noční osvětlování jako důležitý, nezávislý a kumulativní faktor narušující přírodní ekosystémy a jako velkou výzvu pro jejich ochranu.

Ekologové studovali diánní a lunární vzorce v chování organismů po větší část minulého století (viz [40, Park 1940])

a odkazy odtud) a úmrtí ptáků vinou světla téměř také tak dlouho ([49, Squires a Hanson 1918]). Lidé nyní tak změnili přírodní střídání světla a tmy, že těmto novým podmínkám musí být přiznána ústřednější role ve výzkumu druhů a ekosystémů sahající dál než k případům, kde zůstávají na zemi ležet mrtvolky.

Poděkování

Děkujeme P.J. DeVriesovi za jeho fotografie, a B. Tuttlovi a C. Elvidgeovi za satelitní snímek. Výzkum byl z části podpořen Nadačí výzkumu a ochrany (Conservation and Research Foundation). Jsme vděční za přínosné komentáře a rady, které nám dali W. Briggs, B.W. Buchanan, K.D. Frank, J.E. Lloyd, J.R. Longcore, M.V. Moore, W.A. Montevocchi, G. Perry a M. Salmon.

Reference

- [1] Beier P. 1995. Dispersal of juvenile cougars in fragmented habitat. *Journal of Wildlife Management* **59**: 228–237. 4
- [2] Bender DJ, Bayne EM, Brigham RM. 1996. Lunar condition influences coyote (*Canis latrans*) howling. *American Midland Naturalist* **136**: 413–417. 5
- [3] Bergen F, Abs M. 1997. Etho-ecological study of the singing activity of the blue tit (*Parus caeruleus*), great tit (*Parus major*) and chaffinch (*Fringilla coelebs*). *Journal für Ornithologie* **138**: 451–467. 3
- [4] Blake D, Hutson AM, Racey PA, Rydell J, Speakman JR. 1994. Use of lamplit roads by foraging bats in southern England. *Journal of Zoology (London)* **234**: 453–462. 5
- [5] Buchanan BW. 1993. Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs. *Animal Behaviour* **45**: 893–899. 2, 3
- [6] Buchanan BW. 1998. Low-illumination prey detection by squirrel treefrogs. *Journal of Herpetology* **32**: 270–274. 5
- [7] Cinzano P, Falchi F, Elvidge CD. 2001. The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **328**: 689–707. 2
- [8] De Molenaar JG, Jonkers DA, Sanders ME. 2000. Road illumination and nature. III. Local influence of road lights on a black-tailed godwit (*Limosa l. limosa*) population. Wageningen, The Netherlands: Alterra. 4
- [9] Derrickson KC. 1988. Variation in repertoire presentation in northern mockingbirds. *Condor* **90**: 592–606. 3
- [10] Dick MH, Donaldson W. 1978. Fishing vessel endangered by crested auklet landings. *Condor* **80**: 235–236. 3
- [11] Dodson S. 1990. Predicting diel vertical migration of zooplankton. *Limnology and Oceanography* **35**: 1195–1200. 6
- [12] Eisenbeis G, Hassel F. 2000. Zur Anziehung nachtaktiver Insekten durch Straßenlaternen — eine Studie kommunaler Beleuchtungseinrichtungen in der Agrarlandschaft Rheinhessens [Přitahování nočního hmyzu uličními lampami — studie soustav veřejného osvětlení v polní krajině rýnsko-hessenské]. *Natur und Landschaft* **75**: 145–156. 4
- [13] Elvidge C, Baugh KE, Kihn EA, Davis ER. 1997. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **63**: 727–734. 2
- [14] Elvidge CD, Imhoff ML, Baugh KE, Hobson VR, Nelson I, Safran J, Dietz JB, Tuttle BT. 2001. Nighttime lights of the world: 1994–95. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **56**: 81–99. 3
- [15] Evans Ogden LJ. 1996. Collision course: the hazards of lighted structures and windows to migrating birds. Toronto: World Wildlife Fund Canada and Fatal Light Awareness Program. 3
- [16] Frank KD. 1988. Impact of outdoor lighting on moths: an assessment. *Journal of the Lepidopterists' Society* **42**: 63–93. 1, 3, 5, 6
- [17] Gal G, Loew ER, Rudstam LG, Mohammadian AM. 1999. Light and diel vertical migration: spectral sensitivity and light avoidance by *Mysis relicta*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* **56**: 311–322. 2
- [18] Gibson RN. 1978. Lunar and tidal rhythms in fish. In: Thorpe JE (Ed.). Rhythmic activity of fishes. London: Academic Press. 5
- [19] Gilbert BS, Boutin S. 1991. Effect of moonlight on winter activity of snowshoe hares. *Arctic and Alpine Research* **23**: 61–65. 5
- [20] Gliwicz ZM. 1986. A lunar cycle in zooplankton. *Ecology* **67**: 883–897. 5, 6
- [21] Gliwicz ZM. 1999. Predictability of seasonal and diel events in tropical and temperate lakes and reservoirs. In: Tundisi JG, Straškraba M (Eds.). Theoretical reservoir ecology and its applications. São Carlos: International Institute of Ecology. 2, 5
- [22] Gorenzel WP, Salmon TP. 1995. Characteristics of American Crow urban roosts in California. *Journal of Wildlife Management* **59**: 638–645. 6
- [23] Gotthard K. 2000. Increased risk of predation as a cost of high growth rate: an experimental test in a butterfly. *Journal of Animal Ecology* **69**: 896–902. 5
- [24] Hailman JP. 1984. Bimodal nocturnal activity of the western toad (*Bufo boreas*) in relation to ambient illumination. *Copeia* **1984**: 283–290. 5
- [25] Haymes GT, Patrick PH, Onisto LJ. 1984. Attraction of fish to mercury vapor light and its application in a generating station forebay. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie* **69**: 867–876. 4
- [26] Health Council of the Netherlands. 2000. Impact of outdoor lighting on man and nature. The Hague: Health Council of the Netherlands. Publication No. 2000/25E. 1, 2
- [27] Hill D. 1990. The impact of noise and artificial light on waterfowl behaviour: a review and synthesis of the

- available literature. Norfolk, United Kingdom: British Trust for Ornithology Report No. 61. 1, 3, 5
- [28] Jaeger RG, Hailman JP. 1973. Effects of intensity on the phototactic responses of adult anuran amphibians: a comparative survey. *Zeitschrift für Tierpsychologie* **33**: 352–407. 3
- [29] Julien-Laferrière, D. 1997. The influence of moonlight on activity of woolly opossums (*Caluromys phillander*). *Journal of Mammalogy* **78**: 251–255. 5
- [30] Klauber LM. 1939. Rattlesnakes: their habits, life histories, and influence on mankind. Berkeley: University of California Press. 5
- [31] Kolligs D. 2000. Ökologische Auswirkungen künstlicher Lichtquellen auf nachtaktive Insekten, insbesondere Schmetterlinge (Lepidoptera) [Ekologické účinky umělých světelných zdrojů na hmyz aktivní v noci, zejména motýly]. *Faunistisch-Ökologische Mitteilungen Supplement* **28**: 1–136. 4
- [32] Kotler BP. 1984. Risk of predation and the structure of desert rodent communities. *Ecology* **65**: 689–701. 5, 6
- [33] Lima SL. 1998. Stress and decision making under the risk of predation: recent developments from behavioral, reproductive, and ecological perspectives. *Advances in the Study of Behavior* **27**: 215–290. 5
- [34] Lloyd JE. 1994. Where are the lightningbugs? *Fireflyer Companion* **1**: 1, 2, 5, 10. 4
- [35] Long WJ. 1901. Wilderness ways. Boston, MA: Ginn and Company. 4
- [36] Moore MV, Pierce SM, Walsh HM, Kvalvik SK, Lim JD. 2000. Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* **27**: 779–782. 5, 6
- [37] Munday PL, Jones GP, Ohman MC, Kaly UL. 1998. Enhancement of recruitment to coral reefs using light-attractors. *Bulletin of Marine Science* **63**: 581–588. 4
- [38] Nakamura T, Yamashita S. 1997. Phototactic behavior of nocturnal and diurnal spiders: negative and positive phototaxes. *Zoological Science (Tokyo)* **14**: 199–203. 4
- [39] Outen AR. 2002. The ecological effects of road lighting. In: Sherwood B, Culter D, Burton JA, editors. *Wildlife and roads: the ecological impact*. London: Imperial College Press. 1
- [40] Park O. 1940. Nocturnalism — the development of a problem. *Ecological Monographs* **10**: 485–536. 3, 6
- [41] Rand AS, Bridarolli ME, Dries L, Ryan MJ. 1997. Light levels influence female choice in Tungara frogs: predation risk assessment? *Copeia* **1997**: 447–450. 4
- [42] Riitters KH, Wickham JD. 2003. How far to the nearest road? *Frontiers in Ecology and the Environment* **1**: 125–129. 6
- [43] Rydell J. 1992. Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology* **6**: 744–750. 2, 5
- [44] Rydell J, Baagøe HJ. 1996. Gatlampor ökar fladdermössens predation på fjärilar [Uliční lampy zvyšují predaci netopýrů na můrách]. *Entomologisk Tidskrift* **117**: 129–135. 5
- [45] Salmon M. 2003. Artificial night lighting and sea turtles. *Biologist* **50**: 163–168. 1, 3
- [46] Salmon M, Tolbert MG, Painter DP, Goff M, Reiners R. 1995. Behavior of loggerhead sea turtles on an urban beach. II. Hatchling orientation. *Journal of Herpetology* **29**: 568–576. 3
- [47] Schmiedel J. 2001. Auswirkungen künstlicher Beleuchtung auf die Tierwelt – ein Überblick (Účinky umělého osvětlení na svět zvířat – přehled). *Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz* **67**: 19–51. 1
- [48] Schwartz A, Henderson RW. 1991. Amphibians and reptiles of the West Indies: descriptions, distributions, and natural history. Gainesville: University of Florida Press. 3, 5
- [49] Squires WA, Hanson HE. 1918. The destruction of birds at the lighthouses on the coast of California. *Condor* **20**: 6–10. 3, 7
- [50] Summers CG. 1997. Phototactic behavior of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) crawlers. *Annals of the Entomological Society of America* **90**: 372–379. 4
- [51] Svensson AM, Rydell J. 1998. Mercury vapour lamps interfere with the bat defence of tympanate moths (*Operophtera* spp.; Geometridae). *Animal Behaviour* **55**: 223–226. 6
- [52] Verheijen FJ. 1985. Photopollution: artificial light optic spatial control systems fail to cope with. Incidents, causations, remedies. *Experimental Biology* **44**: 1–18. 1
- [53] Wiese FK, Montevecchi WA, Davoren GK, Huettmann F, Diamond AW, Linke J. 2001. Seabirds at risk around offshore oil platforms in the North-west Atlantic. *Marine Pollution Bulletin* **42**: 1285–1290. 3
- [54] Witherington BE. 1997. The problem of photopollution for sea turtles and other nocturnal animals. In: Clemmons JR, Buchholz R, editors. *Behavioral approaches to conservation in the wild*. Cambridge: Cambridge University Press. 3
- [55] Yurk H, Trites AW. 2000. Experimental attempts to reduce predation by harbor seals on out-migrating juvenile salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society* **129**: 1360–1366. 5

Impressum

S laskavým povolením autorů a Ecological Society of America přeložil a vsázal v systému \LaTeX Jan Hollan. Překlad mu pomohli zlepšit postupně Yvonna Gaillyová, Mojmír Vlašín, Matěj Hollan, Hana Librová a Zdeněk Laštůvka. Originální text je elektronicky dostupný na <http://urbanwildlands.org>, tento český překlad na <http://amper.ped.muni.cz/noc/krnep>.

Brno, srpen 2005