

# Co je světelné znečištění a jak je kvantifikujeme?

Jan Hollan

(Překlad anglického originálu z let 2006 až 2009, jak byl dostupný jen coby pdf; překlad pořízen pomocí pdftohtml, ruční editace anglického html, google translate a nutných úprav pro srozumitelnost českých vět, srpen 2023; křížové odkazy obdobné originálu těžkopádně vytvořeny v listopadu 2023. Originální anglický text je od r. 2023 i ve formátu html:

[https://amper.ped.muni.cz/light/lp\\_what\\_is.html](https://amper.ped.muni.cz/light/lp_what_is.html)

Autorova tehdejší afiliace byla Hvězdárna a planetárium Mikuláše Koperníka v Brně, od r. 2010 je jeho působištěm [CzechGlobe – Ústav výzkumu globální změny AV ČR](#), v.v.i.)

## Obsah

1. Úvod do znečištění.....	1
2. Definice.....	3
2.1. – venku.....	3
2.2. – uvnitř.....	3
3. Jak se to dá vyčíslit.....	4
3.1. – absolutně.....	4
3.2. – relativně.....	5
3.3. – dvojnásobně relativně.....	5
3.4. – se zvláštním ohledem na fyziologii vidění.....	6
4. Kde hraje roli směr nebo spektrum.....	6
5. Reference a další odkazy.....	7
6. Změny (2006 až 2009):.....	8
7. Poznámky.....	8
7.1. O umělých zdrojích světla.....	8
7.2. Světlo přidané v interiéru.....	9
7.3. O nepříznivých účincích.....	9
7.4. O modrém jasu.....	9
7.5. O polutantech.....	11

## 1. Úvod do znečištění

Znečištění obecně narušuje čistotu životního prostředí [10]. Jako čistý, referenční stav životního prostředí je třeba uvažovat jeho přirozený stav, pokud je to vhodné a přiměřené – jako v případě ovzduší a přírodních vodních útvarů v exteriéru. Pak se za znečištění považuje například i antropogenní změna jeho teploty: [tepelné znečištění](#).

Pro vnitřní vzduch může být referenční stav stejný, zvláště pokud je interiér velkoryse propojen s exteriérem okny – jistě v případě chemického znečištění nebo znečištění ovzduší částicemi.

V mnoha případech uvnitř budov mohou představovat čistotu, tj. nepřítomnost znečištění, jiné referenční hodnoty. Interiéry budov záměrně upravujeme tak, aby nebyly přirozené. Dokonce i částice přirozeně se vyskytující venku, jako je pyl, mohou být filtrovány ventilačním systémem, aby se dosáhlo čistšího vzduchu v interiéru. Je zřejmé, že vnitřní vzduch obsahující na jaře nebo v létě pyl může být alergiky považován za znečištěný; referenční hodnota, když tam někdo považuje vzduch za čistý, může být mnohem nižší než ta, která se přirozeně vyskytuje venku. Totéž by mohlo platit pro zvukovou bariéru představovanou stěnami a okny proti přirozeným venkovním zvukům – lidé spící po noční práci by mohli právem považovat hlasité zpěvy ptáků za [hlukové znečištění](#) svého umělého prostředí ložnice, která má zůstat potichu i ráno. Dalším příkladem je vnitřní

vzduch, který je v zimě teplejší než venkovní vzduch, ale není považován za tepelně znečištěný. Spíše než čistý stav je referencí žádoucí stav umělého vnitřního prostředí. Definice žádoucího stavu je samozřejmě subjektivní. Opačným příkladem z tepelné oblasti může být příjemný chladný ranní vzduch, pronikající okny kanceláře, která byla právě otevřena na začátku slunečného letního dne – pokud v kanceláři nebylo během noci masivně větráno a od odpoledne zůstala horká, venkovní vzduch vstupující do místnosti je sice žádoucí, ale brzy se tepelně znečišťuje a ztrácí osvěžující účinek...

Takže pro vnitřní prostředí účelově upravené lidmi nemusí být referenčními hodnotami reprezentujícími neznečištěný stav ty, které by byly přítomné v okolní přírodě, ale jiné, které preferují lidé v interiéru – kdykoli tak neohrožují své zdraví. . Zápach, zvuk a světlo, které zhoršují lidské zdraví, i když jsou (případně ostatními) vítány, jsou jistě považovány za polutanty (viz o nich poznámku 7.5).

Znečištění jako narušení čistoty (přirozená čistota v exteriéru nebo požadovaná čistota v interiéru) je kvalitativní kategorií. Kvantitativně může být neměřitelné, nepostřehnutelné, jen znatelné, zanedbatelné, nevýznamné, tolerovatelné, velmi zjevné, závažné, nebezpečné, dokonce život ohrožující... Tato klasifikace je velmi závislá na pozorovateli. Jak by mělo být množství znečištění klasifikováno a zda by mělo být dále tolerováno, je věcí kultury, výzkumu, dohody a rozvoje znalostí. Znečišťujeme naše životní prostředí a nedokážeme odstranit většinu druhů znečištění. Měli bychom je však zmírnit.

Znečištění lze dále kategorizovat podle znečišťovaného prostředí (vzduch, voda, půda, krajina) a podle typu znečišťující látky (biologické, chemické, fyzikální). Obvyklé fyzikální znečišťující látky způsobující znečištění ovzduší jsou: pevné nebo kapalné částice, energie ve formě zvuku, elektromagnetické vlny/kvanta nebo teplo, radionuklidy.

Pokud je referenčním rámcem přírodní stav, je znečištění výhradně antropogenní, za předpokladu situací, kdy lidé nejsou jen malou, sotva znatelnou součástí širší přírody (jako ve velmi dávných dobách). Jako referenční rámec však lze místo něj vzít obvyklý přírodní stav nebo dokonce obvyklý stav prostředí ovlivněného člověkem. Pak by změna tohoto obvyklého stavu přírodními silami, například sopečnými erupcemi, bouřemi nebo záplavami, mohla být také nazývána znečištěním. Další informace najdete na francouzské wikipedii v položce [znečištění](#).

V případě světla jsou znečišťujícím agens fotony odpovídající energie nebo elektromagnetické vlny odpovídající frekvence, uměle přidané do prostředí. Referenční stav (protože nějaké světlo je vždy přítomno) se mění podle přirozeného cyklu den/noc. Neznečištěný stav venku je prostředí s pouze přírodními zdroji světla. Zní to příliš restriktivně? Pak si vzpomeňte na příklad jiného druhu znečištění, znečištění vnitrozemských vod. Jakákoli řeka by v ideálním případě měla být bez vážného biologického, chemického a fyzikálního znečištění: ve stavu, kdy by její voda byla pitná – jako tomu bylo ve většině Evropy ještě před 200 lety.

Samotný termín *znečištění* byl používán převážně v náboženském kontextu před moderní dobou. Svůj současný vědecký význam začal nabývat od 19. do 20. století, stále častěji po roce 1950, např. v případě [eutrofizace](#) vod. To bylo doprovázeno vznikajícím a rostoucím vědomím, že vypouštění odpadů do životního prostředí je znehodnocuje, omezuje jejich využití a je nebezpečné pro lidské zdraví. Pesticidy se začaly být považovány za skutečný zdroj znečištění až po vydání knihy [Tiché jaro Rachel Carsonové](#) v roce 1962, v případě umělých hnojiv to bylo ještě později.

Pojem *znečištění* zůstává značně emotivní. Jak se může stát, že někdo znečišťuje, když se chová slušně a snad jediným možným nebo známým způsobem? Dalo by se namítnout, že domorodci žijící v divočině, nebo dokonce chudí, nevzdělaní lidé žijící v přelidněných oblastech neznečišťují, protože jsou jen součástí přírody, bojující o přežití a štěstí. Dalo by se dále tvrdit, že pojem znečištění se stává vhodným až poté, co se lidé rozvinou nebo získají povědomí o tom, že některé z jejich činností mají negativní důsledky a že existují lepší alternativy s méně škodlivými důsledky

pro volně žijící zvířata, jejich vlastní zdraví a blahobyt. budoucí generace. V tomto smyslu by bylo nevhodné hovořit o CO<sub>2</sub> z fosilních paliv jako o znečišťující látce, pokud jej vypouštějí lidé, kteří o zvyšování skleníkového jevu nic nevědí. To byl případ celého lidstva (s výjimkou [Svante Arrhenia](#) a několika dalších) před sto lety. Rostoucí uhlíkové znečištění atmosféry je však smutnou realitou, i když mnoho lidí stále neví, že při spalování fosilních paliv vážně znečišťují. To ukazuje, že je stěží udržitelné omezovat pojem znečištění pouze na činnosti, jejichž původci vědí, že „existuje problém“.

Světlo a hluk mohou být nejnovějšími příklady této obtížnosti. Pokud se někdo domnívá, že je nutné co nejčastěji sekat trávu pomocí velmi hlasité motorové sekačky, nebo že by na jeho domě měla být v noci světla od soumraku do úsvitu, která oslepují každého, kdo se přiblíží (a přitahují hmyz na velké vzdálenosti), může být obtížné mu vysvětlit, že produkuje nepřijatelné znečištění, které by se mělo a lze je snadno zmírnit. Inženýři silničního osvětlení by mohli souhlasit s tím, že ve skutečnosti není nutné osvětlovat okolní koruny stromů nebo hory stejně jako silnici, ale trvali by na tom, že samotné osvětlení silnice nelze považovat za znečištění, protože „je potřeba a nikomu neublíží“... Je zřejmé, že je obtížné používat znečištění jako neutrální termín, který nepředpokládá žádný „hřích“, pokud je nevědomě vytvořen, a žádnou „hrůzu“, pokud není příliš velká nebo škodlivá (viz poznámku [7.3](#)).

## 2. Definice

### 2.1. – venku

**(Venkovní) Světelné znečištění je změna světelných úrovní ve venkovním prostředí (od těch přirozeně přítomných) v důsledku umělých (viz [7.1](#)) zdrojů světla.**

Recenzovaný článek (2000), kde byla definice publikována s mírně odlišným zněním, je [\[1\]](#). Předtím byly běžné protichůdné koncepty světelného znečištění, které se omezovaly pouze na „nežádoucí účinky“ (viz [7.3](#)), „zvýšení jasu noční oblohy“ atd. Tato praxe bohužel pokračuje dodnes. Některé důsledky takového znečištění (znečištění světlem a znečištění přirozeného světla) někteří vítají a jiní je nemají rádi; některé důsledky jsou všemi považovány za nepříznivé. Mnoho důsledků zatím není známo: příslušná disciplína (skotobiologie) [\[2\]](#) teprve vzniká. Nejobecnějším důsledkem je narušení cyklu dne a noci, jak na Zemi existuje po miliardy let.

### 2.2. – uvnitř

Přirozené vnitřní světelné podmínky díky oknům a venkovnímu prostředí s jeho přirozenými světelnými zdroji nabízejí analogickou základní linii. To je adekvátní pro chvíle, kdy si lidé uvnitř nepřejí měnit své prostředí umělým osvětlením, jako během spánku nebo když si užívají výhled z oken. Pak je adekvátní mírně upravená verze výše uvedené definice:

**Světelné znečištění (ložnic během spánku) je změna úrovní světla v místnosti (od těch přirozeně přítomných) v důsledku umělých světelných zdrojů.**

Významnou součástí našeho života v budovách je však používání umělého osvětlení. Pak je třeba použít další definici:

**Světelné znečištění interiéru je taková změna úrovně osvětlení ve vnitřním prostředí vlivem zdrojů světla, která ohrožuje lidské zdraví.**

Pro zdraví se má použít oficiální definice Světové zdravotnické organizace: "Zdraví je stav úplné fyzické, duševní a sociální pohody, nikoli pouze nepřítomnost nemoci nebo vady." (viz článek [na Wikipedii Zdraví s citací WHO](#)).

Světla, která někoho obtěžují, by měla být rozhodně považována za znečišťující. Ale i když nikomu interiérové světelné podmínky nepřijdou rušivé nebo nepříjemné (např. proto, že je vnímá jako nutné, běžné nebo dokonce žádoucí), prostředí může být stále považováno za světlem znečištěné,

kdykoli dojde k posunu některých metabolických parametrů organismu v důsledku umělého osvětlení mimo rozmezí, které je považováno za vhodné pro zdravou funkci organismu. Typickým parametrem je koncentrace hormonu melatoninu, která by měla mít přirozený průběh řízený přírodním denním cyklem světla a tmy. V naší epoše elektrického osvětlení tomu tak není. Mimo sezónu přirozeně krátkých nocí netrvá produkce melatoninu u člověka celou „civilní noc“, která ve střední Evropě v prosinci činí až 15 hodin. Soudí se, že nedostatek melatoninu má vážné zdravotní následky a další a další studie tuto hypotézu podporují. Viz poznámku 7.2.

Při bližším zkoumání se zdá, že poslední a prostřední definice se značně překrývají: pronikání světla z venkovních umělých zdrojů do místnosti v noci může ohrozit zdraví lidí, pokud to považují za nepříjemné (tj. nejsou již ve stavu naprosté duševní pohody), nemluvě o případech, kdy je narušen jejich spánek.

### 3. Jak se to dá vyčíslit

Text v této části se zabývá případem, že referenční neznečištěnou situací je prostředí pouze se světlem přírodního původu. Pro vnitřní prostory s umělým osvětlením by referenční neznečištěný stav byl stav, kdy světlo neohrožuje zdraví; tyto úrovně může být obtížné s jistotou najít. Některé směrné hodnoty jsou navrženy v poznámce 7.2.

#### 3.1. – absolutně

Stejně jako u všech znečišťujících látek lze světlo uměle přidané do životního prostředí měřit pomocí

**koncentrace** polutantu v určitém objemu prostředí (vzduchu nebo vody). Pro světlo je pro tento účel vhodnou jednotkou [lumen](#) na metr čtvereční (lze ji dále vydělit rychlostí světla, abychom získali skutečnou objemovou koncentraci). Lze ji vypočítat z dvojice snímků rybího oka (integrací jasu v celém prostorovém úhlu). Pro světlo je takové veličina málo užívaná.

**emise** – množství znečišťujícího agens vypuštěné do životního prostředí za časový interval některým zdrojem. Pro světlo vyjádřené nejsnáze v lumen-sekundách. Na obalech svítidel (žárovkových, zářivkových a jiných výbojkových i diodových) je obvykle uveden jejich jmenovitý světelný tok (tempo emisí) v lumenech.

Pro světlo jako polutant jsou důležité dvě další vlastnosti: jeho **směr a spektrum**. Kompletní charakterizace rychlosti emisí (z libovolného povrchu) nebo přítoku polutantu (do jakéhokoli ozářeného objemového elementu) je dána veličinou zvanou [spektrální zář](#). Ta je funkcí směru i vlnové délky (nebo alternativně vlnového čísla, frekvence nebo energie fotonu). Watty na steradián na metr čtvereční na nanometr ( $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ ) patří k jeho obvyklým jednotkám. Z této veličiny lze vypočítat parametr („jak světlý je tento zdroj, přesněji element prostorového úhlu“) zvaný [jas](#) jako integrál součinu spektrální záře a spektrální citlivosti lidského vnímání denního světla (fotopické vidění); jeho jednotkou je kandela na metr čtvereční.

Obecně lze jako míru světelného znečištění v určité situaci použít jakoukoli radiometrickou nebo fotometrickou veličinu. Například jakýkoli zdroj znečištění (např. jediné svítidlo) lze charakterizovat integrálně (jako celek) určením, jak velkou [svítivost](#) má v každém směru. To je adekvátní parametr pro velmi vzdálené zdroje jevící se jako body. Pokud je však viditelný zdroj tak blízko, že se nejeví jako bod, větší druhy světla (jako dlouhé zářivky místo malých výbojkových vysokotlakých „hořáků“) se stejnou svítivostí mohou být méně znečišťující, protože jejich jas je nižší (stejnou svítivost produkuje větší plocha).

Množství polutantu dopadající na nějaký povrch je pro světlo užitečným souhrnným měřítkem. Za sekundu a metr čtvereční se měří přímo luxmetrem; veličinou je pak [osvětlenost](#), její jednotkou je lux. Orientace povrchového elementu způsobuje, že se osvětlenost liší od nesměrové koncentrace polutantu (jas je integrován jen nad správnou polovinou plného prostorového úhlu a násoben

kosinem úhlu [dopadu k](#) povrchovému elementu – např. světlo tečné k povrchu nepřispívá k jeho osvětlenosti). Pro celou plochu a časový interval může být množství polutantu vyjádřeno v lumen sekundách.

### 3.2. – relativně

Světlo je vždy přirozeně přítomné. Z tohoto důvodu je vhodný způsob vyjádření světelného znečištění uvedením poměru:

$$\text{relativní světelné znečištění} = (\text{člověkem vytvořená část jakékoli fotometrické nebo radiometrické veličiny}) / (\text{přirozená část stejné veličiny})$$

Ve většině případů je vhodnější vyjádřit znečištění tímto způsobem: jako bezrozměrné číslo, spíše než pomocí fotometrických jednotek. Množství světla, které by v noci způsobovalo vážné znečištění, může v poledne být zanedbatelné. I když existuje ostrá hranice mezi znečištěnou a neznečištěnou částí vizuální scény, lidé si znečištění nevšimnou, pokud je umělý příspěvek k jasů znečištěného místa nižší než jedno procento jeho přirozeného jasu. V mnoha případech nemusí být zaznamenán ani desetiprocentní nárůst jasu nad přirozenou hodnotu, pokud neexistuje ostrá hranice mezi oblastmi s rozdílným jasnem – kvůli tomu je znečištění, které je menší než 10 % úrovně přirozeného světla, často považováno za bezvýznamné.

Existuje například obava z umělého nárůstu světla bezoblačné noční oblohy kvůli ztrátě viditelnosti hvězd (typickou uváděnou veličinou je jas oblohy v zenitu nebo uměle způsobené zvýšení jasu dělené přirozeným jasnem). Relativní znečištění však může být pod zataženou oblohou mnohem vyšší, což znamená obrovské narušení přírodního prostředí.

Pojďme to spočítat. Pod zataženou noční oblohou bez měsíce je přirozené množství světla asi desetkrát menší než pod jasnou oblohou. Pokud by bylo absolutní množství uměle přidaného světla v obou případech stejné, v relativním vyjádření by tedy pod zataženou oblohou lokálně způsobilo desetkrát větší znečištění. Avšak daleko od zdrojů emisí může stoupat i vnikající absolutní množství světla, protože světlo nemůže uniknout do vesmíru a je odraženo zpět k zemi mraky. To může být ještě umocněno sněhem. Pak stejné emise, které způsobují zvýšení množství světla dopadajícího dolů řekněme o 100 % pod jasnou oblohou (to znamená, že umělá a přírodní část jsou přibližně stejné, znečištění je v relativním vyjádření 1, velmi významné a nápadné), způsobují relativní znečištění nejméně stokrát větší (10 000 %...) pod zataženou oblohou! Faktor 10 pochází z desetkrát nižších množství přirozeného světla v důsledku mraků, další faktor 10 nebo více z odrazů uměle vytvořeného světla od mraků, sněhu, znovu mraků... transportujíc to světlo efektivně i docela daleko od jeho zdroje. Příklad: v odlehlých oblastech největšího českého národního parku byla relativní koncentrace škodliviny (světla) pod zataženou oblohou třístokrát větší než pod jasnou oblohou, jak bylo [naměřeno v zimě 2005](#).

*Radiometrická nebo fotometrická veličina může být sama o sobě poměrem, číslem bez jednotky, jako je [kontrast](#). Znečištění umělým světlem pak lze vyjádřit i jako úbytek veličiny od její přirozené hodnoty. Stačí říci, že hvězdy slábnou v důsledku světelného znečištění: to znamená, že jejich kontrast k okolní obloze se snižuje, když se jas této oblohy zvyšuje vlivem umělého světla. Abychom to přesně vypočítali, každé hvězdě lze přiřadit prvek prostorového úhlu, který je naším zrakem vnímán jako bod (v závislosti na ostrosti zraku, jasu oblohy a jasu hvězdy to může být kruh o průměru 1' až 5'. od jedné do pěti úhlových minut pro mladé lidi s dobrým zrakem). Můžeme tedy mluvit o jasu hvězdy, jako o jasu jakéhokoli cíle, který chceme vidět. Pak je (Weberův) kontrast cíle*

$$\text{kontrast} = (\text{jas cíle} - \text{jas pozadí}) / (\text{jas pozadí})$$

### 3.3. – dvojnásobně relativně

$$\text{Poměr dvou kontrastů} = \text{kontrast}_{\text{znečištěný}} / \text{kontrast}_{\text{čistý}}$$



pro znečištěné a neznečištěné situace tím nejlepším měřítkem znečištění, pokud jde o viditelnost slabých světél. Patří mezi ně hvězdy a další nebeské jevy, světlušky a světélkující červi nebo hojně slabé jiskřičky světla ([bioluminiscenční plankton](#)), které jsou v moři tak nádherné, ale většinou neznámé lidem v oblastech, kde je silné umělé osvětlení všudypřítomné.

Nejde jen o jejich viditelnost pro lidi. V případě světélkujícího hmyzu se jedinci ve znečištěném prostředí na velké vzdálenosti nerozeznávají, nenacházejí si partnery, přestávají se rozmnožovat a jejich populace nakonec kolabují (bohužel běžný jev ve městech). Pro mořský život nejsou dosud známy ekosystémové důsledky ztráty viditelnosti bioluminiscenčních signálů za bezměsíčných nebo zatažených nocí, ale jen stěží mohou být zanedbatelné.

Snížení kontrastu může vymazat celá pozemská panoramata, dokonce i samotné obrysy obřích hor, jako Studniční horu při pohledu ze svahu jižně od Pece pod Sněžkou [3].

### 3.4. – se zvláštním ohledem na fyziologii vidění

Zrak špatně registruje absolutní úrovně; díky [adaptaci](#) se přizpůsobí převládajícím úrovním osvětlení. Například hvězdy jsou vnímány jako slabší, pokud do našich očí přichází nějaké další, dodatečné světlo. Toto přidané světlo může pocházet z plošek s vysokým jasem, např. ze svítidel, oken osvětlených místností, světél vozidel a záměrně osvětlených venkovních ploch. Hvězdy se stávají neviditelnými v urbanizovaných prostředích nejen kvůli zvýšenému jasů oblohy, ale také kvůli oslnění (včetně závojevého jasu produkovaného rozptylem světla uvnitř oka) a většinou kvůli změně adaptaci vidění kvůli zvýšeným světelným úrovním. Ve skutečnosti může být obloha z takto silně znečištěných míst vnímána jako černá nebo velmi tmavá, na rozdíl od přírody, kde se vidění přizpůsobuje jasů nebe během soumraku a noci: přirozená jasná noční obloha není mezi hvězdami nikdy tmavá, protože je hlavním zdrojem osvětlení pozemské krajiny.

Světelné znečištění tedy nejen zmenšuje kontrasty, ale vlivem toho, že se zrak zvířat a lidí přizpůsobuje uměle zvýšené hladině světla, světelné znečištění *snižuje počet fotonů registrovaných na sítnici* z přírodních zdrojů. Fyziologicky takové zdroje *slábnou* nejen v relativním, ale dokonce i v absolutním vyjádření. To dále snižuje jejich viditelnost, protože je potřeba větší kontrast, pokud si jich má člověk všimnout (kontrastní citlivost je horší na spodním konci rozpětí vnímaných jasů než v jeho středu).

## 4. Kde hraje roli směr nebo spektrum

Se zavřenými víčky sotva vnímáme směr přicházejícího světla, ale i tak je to důležité: pokud přichází pouze z jedné strany, můžeme se otočit na druhou stranu (a snížíme tak osvětlenost obličeje). Podobně stromy postižené kyselými usazeninami, které přináší vítr přicházející ze západu, jsou méně postiženy na svých východních stranách. S otevřenými očima si však všimneme i drobných míst se zvýšeným jasem. Jakýkoli uměle osvětlený terén na vzdáleném svahu kazí přirozený vzhled scény, jakékoli přímo viditelné světlo se stává jejím nápadným detailem (a velmi výrazným znečištěním), i když se na celkovém světelném příkonu do našich očí podílí jen nepatrným zlomkem. Přímá viditelná světla jsou také nejškodlivější pro divokou zvěř, bezpečnost (prostřednictvím efektu zvaného oslnění) a estetiku, nebo dokonce samotnou viditelnost skutečné krajiny včetně oblohy.

Měli bychom brát v úvahu nejen pouhé (fotopické) množství světla, ale také jeho spektrální složení (námi i mnoha dalšími organismy často vnímané jako barvu). Například čisté modré světlo (bez zelené nebo červené složky) přispívá málo k obvyklým fotopickým veličinám, vyjádřeným v lumenech nebo kandelách, ale přesto může být nápadné (měnící, tj. znečišťující přírodní scénarii). Navíc takové světlo s nejkratší vlnovou délkou je signál pro nás i pro ostatní zvířata, že je den nebo noc, a řídí tím metabolismus organismu. Zavedený způsob, jak nějak zohlednit spektrální složení světla, je udávat také „skotopický světelný tok“ (je relevantní pro hluboké noční vidění, kdy fotopické jasy nepřesahují  $1 \text{ mcd/m}^{-2}$ ), vypočítaný pomocí funkce spektrální citlivosti, která

kulminuje při 500 nm místo při 555 nm jako u fotopického vidění. Analogicky lze zavést „renormalizovaný červený, zelený a modrý světelný tok (viz 7.4)“ nebo takové barevné svítivosti. Renormalizace může spočívat v tom, že je všechny považujeme za stejné pro letní denní světlo (lze je snadno měřit pomocí digitálních RGB kamer poskytujících surová data; „B světelný tok“ je dobrým měřítkem světla relevantního pro metabolismus [5]).

Pokud potřebujeme něco v noci nasvítit, abychom viděli detaily, můžeme potlačit modrou složku (nebo ideálně celou krátkovlnnou polovinu světelného spektra), abychom ochránili své zdraví a snížili škodlivý dopad umělého osvětlení na faunu. Důležité je i vyloučit ultrafialové záření, které mnozí živočichové vnímají. Starý (venkovní) příklad je nízkotlaké sodíkové osvětlení. Mít v interiéru jen žluté světlo je velmi komfortní, modré lze odfiltrovat žlutou fólií nebo průhlednou barvou na sklo; v autorově rodině se užívalo takové samostatné osvětlení pro večery a noci již od r. 2004 (později pak též „amber“ čili jantarové LED). Pro občasně barevně náročné úkoly, jako jsou nátisky barevných časopisů, lze po omezenou dobu použít malé nefiltrované bodové světlo, pouze pro centrální část zorného pole. U osvětlení s velmi malým podílem modré je třeba určitě opatrnosti, pokud jde o osoby s určitými typy [barvosleposti](#).

Zavedení povinných geometrických a spektrálních limitů na umělé osvětlení může řádově snížit některé relevantní metriky znečištění (a jeho škodlivé důsledky), i když celkové emise (měřené jako fotopický světelný tok) zůstanou podobné jako dříve. To je při zacházení se světlem snadnější než u většiny ostatních polutantů. Samozřejmě i růst celkových emisí by měl být zastaven a zvrácen směrem k trvalému poklesu, aby se úrovně znečištění vrátily na hodnoty, které mohou být tolerovatelné, vezmeme-li v úvahu všechny nepříznivé vlivy osvětlení (u světla by mohly být dopady z konce 19. být téměř jistě považovány za udržitelné, zatímco prozatímním cílem může být pokles na úroveň z roku 1970).

## 5. Reference a další odkazy

1. „změna úrovně přirozeného světla ve venkovním prostředí v důsledku umělých světelných zdrojů“ – první publikovaná vědecká definice, jak se objevila v: Cinzano et al. 2000, *Monthly Notices of Royal Astron. Soc.*, 318, 64 (online: [Umělý jas noční oblohy mapovaný z DMSP Operational Linescan Systémová měření](#), 1MB pdf).
2. [definice skotobiologie](#) viz na stránkách konference *Ecology Of The Night* 2003: [muskokaheritage.org/ecology-night](http://muskokaheritage.org/ecology-night)
3. Brychtová J, Hollan J, Krause J: *Hodnocení vlivu umělého osvětlení vybraných lyžařských středisek na přírodu a krajinu Krkonoš*. Červenec 2005. Dostupné na <http://amper.ped.muni.cz/noc/krap> (některé anglické úryvky jsou ve [zprávě pro IDA za rok 2006](#)).
4. Stockman A, Sharpe LT, 2000: Spektrální citlivosti čípků citlivých na střední a dlouhé vlnové délky odvozené z měření u pozorovatelů známého genotypu. *Vision Research*, 40, 1711–1737. Dostupné [na ScienceDirect](#). Data fotopické citlivosti spolu se standardními skotopickými daty CIE lze stáhnout na [cvrl.org](http://cvrl.org).
5. Hollan J: *Světlo ovlivňující metabolismus: měření digitálními kamerami*. Plakát na konferenci Cancer and Rhythm, Graz 2004. Online jako [http://amper/noc/english/canc\\_rhythm/g\\_camera.pdf](http://amper/noc/english/canc_rhythm/g_camera.pdf).
6. [Save the Night in Europe](#), komplexní zdroj zaměřený nejen na jas jasné oblohy. <http://savethenight.eu>
7. [www.urbanwildlands.org](http://www.urbanwildlands.org), stránka projektu Ekologické důsledky umělého nočního osvětlení (obsahuje odkazy na vynikající článek Ekologické světelné znečištění a na sborník z konference).
8. Clark BAJ: *Odůvodnění pro povinné omezení venkovního osvětlení*. Verze dokumentu 2.4, 29. února 2008. Online jako <http://amper.ped.muni.cz/bajc/lp181.pdf>.

9. Hollan J: *Digitální zobrazovací fotometrie běžnými fotoaparáty – výsledky, metody a perspektivy*. Prezentace z přednášek pro zasedání Komise 50 IAU, Praha, srpen 2006. Online jako [http://amper.ped.muni.cz/light/lectures/06IAU50t\\_small.pdf](http://amper.ped.muni.cz/light/lectures/06IAU50t_small.pdf) (8 MB).

10. Cinzano P: *Co je světelné znečištění*. Online jako <http://www.savethenight.eu/What%20is.html>. Staženo 10. července 2008.

## 6. Změny (2006 až 2009):

1. V první verzi anglického textu byl používán termín *imise*. To však není v angličtině běžné, na rozdíl od mnoha jiných evropských jazyků (i když [to EPA uvádí](#)), kvůli problému, že jej není možné odlišit od emisí v anglické výslovnosti, protože počáteční e se v onom slově čte jako i. To naštěstí neplatí pro podobnou dvojici výrazů emigrovat – imigrovat.

2. V definici se užívá substantivum *změna* namísto *zvýšení*, aby byla plně v souladu s obecnou definicí jakéhokoli znečištění. Samozřejmě, že v případě přidaného světla (a většiny ostatních znečišťujících látek) je změna absolutních hladin většinou nárůstem. Obecně mohou poklesy z přirozených absolutních úrovní výskytu vyplývat z reakcí primárních znečišťujících látek s prostředím (např. denní světlo může být sníženo emisemi oxidů síry v důsledku indukované snížené průhlednosti ovzduší, ale nejedná se o světelné znečištění, ale řekneme sulfátové a aerosolové). Světelné znečištění však vede k absolutnímu poklesu signálu zaznamenaného očima ze slabého nočního světla v důsledku zrakové adaptace. Velmi nápadně může způsobit snížení veličiny důležité pro viditelnost: [kontrast](#).

3. Přidány poznámky k *nevizuální fotometrii a nepříznivým vlivům*, zahrnuto měření dvojité relativního (poměr kontrastů) znečištění, v lednu 2007 přidány příklady poklesu veličin (kontrastu a počtu registrovaných fotonů) z jejich přirozené úrovně v důsledku světelného znečištění.

4. Definice *interiérového světelného znečištění* zahrnuta v červenci 2008, též úvod o znečištění obecně a poznámka o umělých zdrojích světla. Poznámka o interiérovém světle byla zkrácena.

5. Poznámka o polutantech přidána v srpnu 2008.

6. Poděkování: Velkou jazykovou opravu provedl Bob Mizon 15. září 2008. Michael Tabb a Christopher Baddiley si text přečetli také. Jsem velmi vděčný těmto osobnostem [CfDS](#). Mé díky také patří Barrymu Clarkovi, Stevu Willnerovi a Pierantoniovi Cinzanovi za rady týkající se návrhů textu z počátku roku 2006 a 2007. Matěj Hollan mi pomohl s objasněním různých významů „znečištění“ v srpnu 2008. Žádný z nich samozřejmě není zodpovědný za obsah této práce.

7. Fotometrie: Špatný žargon „různých lumenů“ atd. byl nahrazen různými veličinami (v závislosti na funkcích spektrální světelné účinnosti a na normalizaci), ale pouze jednou standardní sadou jednotek (říjen 2008).

8. Relativní a dvojité relativní znečištění: vysvětlení napsána srozumitelněji, chybná/chybějící slova nahrazena na 3 dalších stránkách, vše díky návrhům Jana-Herberta Damma (duben 2009).

## 7. Poznámky

### 7.1. O umělých zdrojích světla

Převážně se jedná o zdroje spojené s elektřinou, tedy různé druhy svítidel ve vyspělých zemích. V neelektrifikovaných oblastech mohou převládat zdroje spalovací. V zásadě však mohou být zahrnuty i silné, nápadné sekundární zdroje slunečního záření, jako jsou sluneční odrazy na čelních sklech automobilů nebo ve sklopených oknech budov. Pokud bychom je vnímali jako oslňující světla, mohlo by být platnější je považovat za příčiny světelného znečištění, než je zahrnout pouze do široké kategorie vizuálního [znečištění](#) (obsahující trojrozměrné artefakty měnící požadovanou přírodní nebo kulturní krajinu).



## 7.2. Světlo přidané v interiéru

Není pochyb o tom, že světlo v interiéru je v některých případech toxické a způsobuje poruchy spánku a metabolismu. V tomto smyslu je třeba běžné úrovně osvětlení produkované dnešním umělým (elektrickým) osvětlením považovat za významné znečištění vnitřního *nočního* vzduchu, podobně jako tabákový kouř *kdykoli*. Lze rozhodně doporučit udržování B osvětlenosti (viz 7.4) očí pod 1 lx během noci když nespíme; její udržování pod 0,25 lx lze považovat za *bezpečný environmentální limit* pro člověka (to je přirozené noční venkovní maximum, které může většina organismů tolerovat díky eonům evoluce; někteří hlodavci jsou stále ještě stokrát citlivější, pravděpodobně díky tomu, že obývají tmavé niky).

Zvláštní druh světelného znečištění interiéru vzniká v situaci, kdy i přirozené venkovní zdroje světla ohrožují zdraví lidí uvnitř a mění požadované úrovně vnitřního osvětlení. Příkladem jsou lidé, kteří potřebují přes den spát. Ještě běžnější je oslnění vycházející z oken, zejména pro lidi pracující u obrazovek počítačů. To je důvod, proč byl ve druhé definici vynechán atribut „umělý“.

## 7.3. O nepříznivých účincích

Světlo bylo tak populární v celé lidské historii a prehistorii, že je stále považováno za kacířství, dokonce i některými předními zastánci snižování světelného znečištění, považovat všechno člověkem vytvořené světlo venku za znečištění. Jiná cesta však není. Můžeme schvalovat některé případy znečištění (jako je decentní osvětlení dvora, kde pořádáme párty) a můžeme dobře tolerovat cizí světlo (např. od souseda...), ale znečištění má svou definici, která nezávisí na tom, co se lidem v konkrétní chvíli líbí nebo nelíbí a co je znečišťující agens. Když je to světlo, je to světlo.

Byla aplikace DDT, široce používaného venku v padesátých a šedesátých letech, znečištěním? Jistě byla, i když to bylo v té době považováno za zcela prospěšné. Je jediná LED uprostřed Sahary znečištěním? Určitě je to tak, alespoň jako environmentální „odpadek“: měly by tam být pouze kameny a písek a nějaká (stěží viditelná) divoká zvěř v neznečištěném stavu. Kovový uzávěr pивní láhve by se také kvalifikoval jako znečištění, stejně jako samotná láhev, rozbitá nebo ne. V noci by byla svítící slabá LED viditelná nejen z bezprostřední blízkosti, jako za denního světla. I ze vzdálenosti 1 km by mohla být jasná jako hvězda Vega... jistě tolerovatelná, pokud má být životně důležitým referenčním světlem, ale stále by byla znečištěním. Pouhá existence znečištění nezávisí na tom, zda se někdo dívá nebo protestuje.

Můžeme žít s určitým znečištěním, stejně jako můžeme žít s pivem, vínem a brandy. Můžeme si užívat jejich pozitiva, aniž bychom zapomínali na jejich toxické aspekty. Jejich nepříznivé účinky bychom měli dostat pod naši kontrolu. A stejně jako u brandy a dětí nebo piva a medvědů (beer and bears...) bychom si měli být vědomi, že existují organismy, které jsou mnohem zranitelnější vůči poškození některými z těch látek, které tak milujeme. Existují například noční žáby, které nikdy nepřejdou nepřetržitě osvětlenou silnicí: jakmile se rozsvítí, stane se bariérou rozdělující dříve sousedící stanoviště.

## 7.4. O modrém jasu

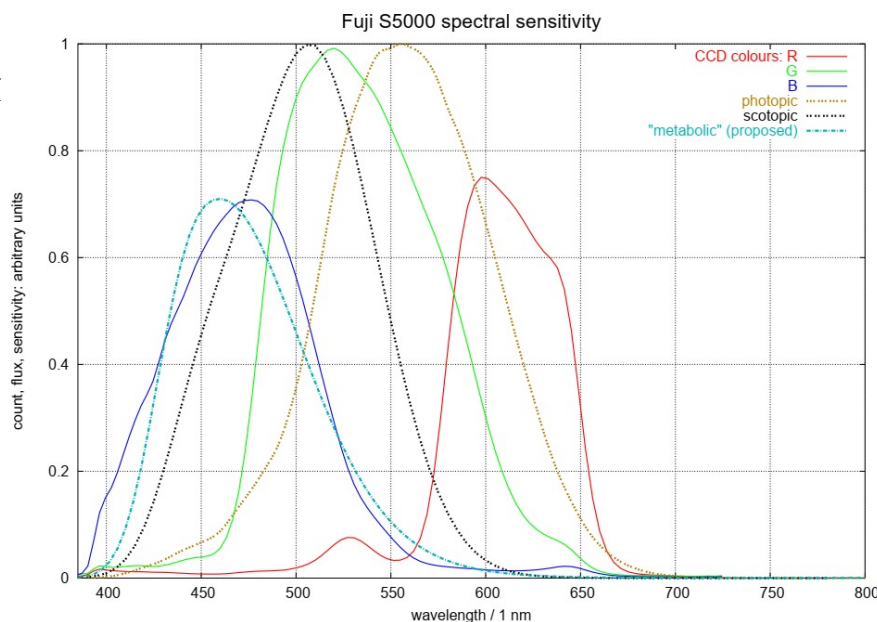
Tradiční fotometrie se zabývá lidským denním (fotopickým) viděním, lidským hlubokým nočním (skotopickým) viděním a pokouší se kvantifikovat zrakový výkon při středních světelných úrovních (mezopické vidění). V SI jsou tyto fotometrické veličiny fixovány na radiometrické právě při jediné vlnové délce 555 nm. Definice SI je

Kandela je intenzita světla v daném směru od zdroje, který vyzařuje monochromatické záření o frekvenci  $540 \times 10^{12}$  hertzů<sup>a</sup> který má zářivost v tomto směru 1/683 wattu na steradián.

Pro světlo v reálném světě, které obsahuje elektromagnetické záření různých vlnových délek, existují pouze přibližné shody mezi množstvím vnímaným lidským zrakem (skutečná fotometrie) a množstvím měřeným přístroji. To bylo zjištěno výzkumy, které vedly k různým funkcím

spektrální světelné účinnosti dvou vizuálních systémů u lidí [4]. Autor tohoto textu navrhl jiný přístup, který nám umožňuje zavést mnoho analogií těchto "funkcí svítivosti". Jedním z nich je akční spektrum nezobrazujícího zrakového systému (třetí systém u člověka) ovlivňujícího produkci melatoninu [5].

Pokud má konkrétní akční spektrum při 555 nm hodnotu, jejíž relativní nejistota je podstatně větší než u maxima jeho spektrální křivky, nastavení jeho pevného bodu právě na 555 nm by vedlo k velké nejistotě takto definovaného světelného toku a dalších fotometrických



*Spektrální citlivosti kamery Fuji S5000 s pixely R, G a B. Vyznačena je i standardní spektrální citlivost fotopická a renormalizovaná skotopická, spolu s navrženou citlivostí „metabolickou“ – ta je, jak patrně, velmi blízká citlivosti B pixelů kamery.*

veličin. V některých případech může být celé spektrum špatně známé. Odezvy systému vnímání (živočišného nebo přístrojového), který má tak málo známou spektrální citlivost, lze ale překalibrovat jejich nastavením na stejné (snadno měřitelné) fotopické veličiny pro některé dobře známé světelné spektrum brané jako referenční. Autor k tomu navrhuje [5] přirozené sluneční světlo. Na příkladu digitálního fotoaparátu s R, G a B pixely: „Nastavením jasu B na fotopický (měřený luxmetrem nebo astronomicky vypočtený) se fotoaparát jednoduše zkalibruje.“ Aby se výběr referenční kompozice světla ještě více omezil, může být za standard považováno globální sluneční světlo AM1.5. Tímto způsobem lze dosáhnout opakovatelnosti na úrovni jednoho procenta.

Podobný systém existuje v astronomické fotometrii. Vychází ze skutečné vizuální fotometrie, která byla rozšířena na fotografické nástroje pro snímání světla a nakonec na elektrická zařízení. Všechna měření založená na filtrech (dokonce i samotný detektor se chová jako filtr, reagující odlišně na různé vlnové délky) jsou kalibrována na hvězdách spektrální třídy A0V: uváděné hodnoty pro každou takovou hvězdu (jako primární standard se používá Vega) by měly být vždy stejné, bez ohledu na to, zda detektor zaznamenává část UV, vizuální nebo infračervené domény. Hvězdy A0 jsou dobrým standardem pro hvězdnou fotometrii, ale sluneční světlo se snáze používá pro pozemskou vícebarevnou fotometrii. Výsledky astronomické fotometrie jsou většinou vyjádřeny jako bezrozměrné logaritmické veličiny (s jednotkou zvanou magnituda, rozdíl 2,5 mag odpovídá 10 decibelům v akustické analogii, tj. poměru hustot světelného toku 10; hvězda mající 0 mag dává hustotu světelného toku  $2,56 \mu\text{lm}/\text{m}^2$ ), terestrická fotometrie by ale měla používat jen fotometrické jednotky jako lux, aby byly uváděné hodnoty snadno srozumitelné.

Veškerá fotometrie týkající se vlnových délek světla v přírodě obvyklých (denní světlo, záření vzduchu, měsíční světlo) by se mohla a měla stát obdobou fotometrie založené na lidském fotopickém vidění. Namísto řádné radiometrické normalizace SI při  $540 \times 10^{12}$  Hz, která by vedla

k velmi odlišným hodnotám pro různé funkce spektrální světelné účinnosti aplikované na běžné světelné zdroje, lze pro většinu účelů doporučit fotometrické veličiny renormalizované na AM1,5 globálního světla jasné oblohy. U skotopických by renormalizace vedla k dělení hodnot SI koeficientem 2,5. Pro další funkce spektrální světelné účinnosti může být takový koeficient ještě méně známý. Přesto lze správně renormalizované fotometrické hodnoty brát vážně.

## 7.5. O polutantech

V typickém technickém smyslu je znečištění způsobeno polutantem, nějakou mikroskopickou „látkou“ rozptýlenou v prostředí. Německé slovo Schmutz (znamenající špína) tento názor dobře naznačuje, stejně jako termín Verschmutzung pro znečištění, pojem který není vnímán s náboženským podtextem. Znečištění však mohou představovat i makroskopické objekty. Častým případem jsou odpadky. Někdy mohou jen kazit krásu prostředí. Někdy mohou být i smrtelné pro zvířata, jako v případě „igelitových“ tašek v moři. I předměty, které někteří považují za nutné nebo vítané, mohou být považovány za kazící nebo znečišťující životní prostředí, přesněji řečeno, náš způsob, jak prostředí vnímáme – elektrická vedení, silnice, billboardy, auta atd. Viz [http://en.wikipedia.org/wiki/Vizuální\\_znečištění](http://en.wikipedia.org/wiki/Vizuální_znečištění). Do této kategorie patří také viditelná nepřirozená světla a osvětlené objekty v noci, které hluboce mění krajinu.

To nás přivádí zpět k náboženskému kontextu: svět je poškozen přítomností nežádoucích jevů vytvořených člověkem. Noční tmu lze spolu s jejími nebeskými světly snadno považovat za posvátnou. Extrémní pojem znečištění, který je také třeba respektovat, je čistě náboženský: něco (trvale) znečištěného kvůli pouhé minulé přítomnosti rušivého faktoru, například člověka, který vstoupil na vrchol posvátné hory. Čistota může být nakonec obnovena patřičným rituálem...

Neznám žádný takový postoj ke světlu. Znečištění světlem lze vyčistit bez jakéhokoli takového obřadu, jednoduše vypnutím světelných zdrojů. Důsledky minulého světelného znečištění však mohou přetrvávat po celá desetiletí: jako nepřítomná zvířata závislá na tmě nebo lidé bez zkušeností s hvězdným nebem v dětství – a tedy bez zájmu o tento fenomén. Vystavit celé populace růstu a životu bez noci, bez nebes, je největší sociální experiment všech dob. Světlo v noci může být mnohem závažnějším polutantem než mnoho jiných...