

Česká zemědělská univerzita v Praze

fakulta Životného prostředí

Katedra prostorových věd



Bakalářská práce

Modelování světelného znečištění

Vedoucí práce: Ing. David Moravec, Ph.D.

Vypracoval: Jan Limpouch

© 2023 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Limpouch

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Modelování světelného znečištění

Název anglicky

Modeling of light pollution

Cíle práce

Cílem práce je ověřit, zda noční satelitní snímkování České republiky může sloužit jako zdroj dat nočního světelného znečištění v ČR. Student pomocí přímého měření ověří shodu mezi pozemním a satelitním měřením. Následně analyzuje vliv různých povětrnostních podmínek na noční světelné znečištění.

Metodika

Sběr dat bude prováděn přístrojem SQM a mobilní aplikací Field Maps v okolí okresu Příbram. Tato pozorování budou uskutečněna za tří různých stavů počasí (jasná obloha, oblačnost a mlha). Data budou následně porovnána se satelitními snímky. Bude vytvořen matematický model vztahu mezi satelitními daty a pozemním měření za různých stavů počasí. Práce bude podpořena literární rešerší problematiky světelného znečištění v životním prostředí.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

dálkový průzkum Země, světelné znečištění, noční osvětlení

Doporučené zdroje informací

- DE MIGUEL, Alejandro Sánchez, et al. Colour remote sensing of the impact of artificial light at night (I): The potential of the International Space Station and other DSLR-based platforms. *Remote sensing of environment*, 2019, 224: 92-103.
- GUK, Edna; LEVIN, Noam. Analyzing spatial variability in night-time lights using a high spatial resolution color Jilin-1 image—Jerusalem as a case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 163: 121-136.
- CHALKIAS, C., et al. Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS. *Journal of environmental management*, 2006, 79.1: 57-63
- KATZ, Yali; LEVIN, Noam. Quantifying urban light pollution—A comparison between field measurements and EROS-B imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177: 65-77.
- LEVIN, Noam, et al. Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237: 111443.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. David Moravec, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2023

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Modelování světelného znečištění vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne datum odevzdání

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Davidu Moravcovi, Ph.D. za jeho nevyčerpatelnou trpělivost a mnohé poznatky, bez kterých by tato práce nikdy nevznikla. Také bych chtěl poděkovat Terezce, Vojtovi a Romanovi za společnost při sběru dat za bezesných nocí. A v neposlední řadě patří mé veliké díky mamince a všem, co mi doplňovali palivo dobrou kávou.

Modelování světelného znečištění

Abstrakt:

Bakalářská práce vychází z literárních pramenů a zabývá se problematikou světelného znečištění. Zabývá se jeho zdroji a popisuje rizika, která přináší. V druhé části práce je popsán princip pozemního sběru dat světelného znečištění. Měření bylo uskutečněno na území okresu Příbram. Na jeho základě jsou následně sestaveny modely světelného znečištění pro různé meteorologické podmínky. To nám pomáhá porozumět tomu, jak se rozptyl antropogenního světla chová při různých situacích. Zároveň jsou popisovány některé rušivé vlivy, které mohou měření výrazně ovlivnit. Ručně sebraná data jsou porovnávána s daty ze sensoru dálkového průzkumu Země-VIIRS. Výsledkem práce je sestavení tří unikátních modelů, které reprezentují chování umělého světla za různých atmosférických podmínek. Zároveň jsou odhalena mnohá rizika, která při sběru dat i při samotném modelování vznikají.

Klíčová slova: dálkový průzkum Země, světelné znečištění, noční osvětlení

Light pollution modeling

Abstract

The bachelor thesis is based on literary sources and deals with the light pollution problematic. It deals with its sources and describes the risk it brings. In the second part of the thesis, the principle of ground-based data collection of light pollution is described. The measurement was carried out in the territory of the Příbram district. On its basis light pollution models for various meteorological conditions are subsequently compiled. This helps us to understand how anthropogenic light scattering behaves in different situations. At the same time, some disturbing influences that can significantly affect the measurement are described. Manually collected data is compared with data from the remote sensing sensor – VIIRS. The result of the work is the compilation of three unique models that represent the behavior of artificial light under different atmospheric conditions. At the same time, many risks are revealed that arise during data collection and during the modelling itself.

Keywords: remote sensing, light pollution, night lighting

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce	2
3 Literární přehled.....	3
3.1 Definice	3
3.2 Detekce a měření	4
3.2.1 Bortleova stupnice	5
3.2.2 Strojové měření.....	5
3.2.3 Přístroje.....	5
3.2.4 Dálkový průzkum Země	6
3.2.5 Faktory ovlivňující měření.....	7
3.3 Zdroje světelného znečištění	8
3.3.1 Typy zářičů umělého osvětlení	9
3.3.2 Druhy zdrojů světelného znečištění	11
3.4 Dopady na živé organismy	13
3.5 Dopady na lidské zdraví	14
3.6 Možnosti regulace	14
3.7 Výzkum	16
3.7.1 Současný výzkum	17
4 Metodika	18
4.1 Sběr dat.....	18
4.1.1 Zásady	19
4.1.2 Příprava měření.....	20
4.2 Zpracování dat.....	21
4.3 Interpolace a zpřesňování výsledků	23
4.4 Spolehlivost sensoru VIIRS	24
4.5 Vlastní modelování světelného znečištění	25
5 Výsledky	26
5.1 Modelování světelného znečištění	28
5.2 Proměnlivé světelné znečištění v čase	31
6 Diskuse	33
7 Závěr.....	35
8 Seznam použitých zdrojů	36

8.1	Seznam literárních zdrojů	36
8.2	Seznam obrázkových zdrojů	39
9	Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk	40
9.1	Seznam obrázků	40
9.2	Seznam tabulek	40
9.3	Seznam grafů.....	40
9.4	Seznam použitých zkratk.....	41

1 Úvod

Světelné znečištění se stává stále větším problémem ve světě. Jedná se o nadměrné a neadekvátní osvětlení, které má negativní dopad na životní prostředí, lidské zdraví a biodiverzitu. Zbytečné noční osvětlení způsobuje nerovnováhu v přírodních cyklech a ruší biologické funkce, jako je migrace zvířat nebo vegetace (Maria Cheung, 2009).

Navzdory tomu, že mnoho lidí vnímá světlo jako pozitivní a příjemné, existují důkazy, že nadměrné osvětlení má vážné důsledky na zdraví a spánek lidí. Nedostatek tmy může vést k narušení přirozeného rytmu spánku a hormonálního systému, což má negativní vliv na zdraví a kvalitu života (Gary Steffy, 2001).

Pro správné pochopení světelného znečištění je důležité se naučit ho kvantifikovat a následně vizualizovat. K tomu můžeme přistupovat buď pomocí ručně naměřených pozemních dat, anebo díky datům ze sensorů dálkového průzkumu Země. Významný vliv na šíření světelného znečištění mají meteorologické podmínky (P. Cinzano, F. Falchi, 2014). Pochopení jejich vlivu a dalších ovlivňujících faktorů by nám mohlo dovolit modelovat šíření antropogenního světla i za oblačné oblohy.

2 Cíl práce

Cílem práce je ověřit, zda by se na základě ground-based dat s daty DPZ, dal vytvořit model světelného znečištění pro unikátní stavy počasí. Dále také prověřit, jak velký vliv má přítomnost aerosolů v ovzduší na šíření umělého světla. Případně nalézt faktory, které by takové modely mohly zlepšovat.

3 Literární přehled

Abychom se mohli ponořit do problematiky světelného znečištění, tak je nutné nejdříve tomuto pojmu správně porozumět. V odborné literatuře existuje řada definic, které světelné znečištění popisují. Důležité je, vyvarovat se záměně s příbuznými pojmy světelných jevů v atmosféře, jako je rušivé světlo.

3.1 Definice

Encyclopaedia Britannica vymezuje pojem světelného znečištění jako „*unwanted or excessive artificial light. Like noise pollution, light pollution is a form of waste energy that can cause adverse effects and degrade environmental quality.*“ (Britannica 2021), tedy jako nežádoucí nadměrné množství umělého světla. Toto světlo vzniká plýtváním energiemi a má nežádoucí vlivy na životní prostředí. Oproti tomu Oxfordský slovník nám popisuje světelné znečištění jako „*the existence of too much artificial light in the environment, for example from street lights, which makes it difficult to see the stars.*“ (Oxford Dictionaries 2021). Poukazuje na skutečnost, že umělé světlo antropogenního původu nás omezuje v pozorování noční oblohy. Ministerstvo životního prostředí České republiky chápání světelného znečištění ještě zjednodušuje „*Světelné znečištění lze chápat jako souhrnné označení všech negativních jevů, které s sebou umělé osvětlení přináší*“ (mzp.cz 2022). Můžeme najít desítky dalších definic. Striktní definice termínu neexistuje s ohledem na množství vědních oborů a sociálních problémů, kterých se světelné znečištění týká.

Světelné znečištění je tedy široký pojem označující negativní dopady antropogenního osvětlení. Pro světelný přesah osvětlovaného objektu můžeme použít termín **neužitečné světlo**. Takové světlo se může stát rušivým pro okolí, neboť záře dopadá na místa, která pro ni nebyla určena. V takových případech se bavíme o **rušivém světle**. Zájem o světelné znečištění roste v mnoha oblastech vědy. Sahá od tradičního oboru astronomie až po fyziku atmosféry, vědy životního prostředí, a dokonce i sociální vědy (C. Chalkias a kol. 2006). Problematiku světelného znečištění také podtrhuje fakt, že mezi lety 2012 a 2016 světová míra světelného znečištění zvýšila o téměř 2 % (Edna Guk, Noam Levin 2020).

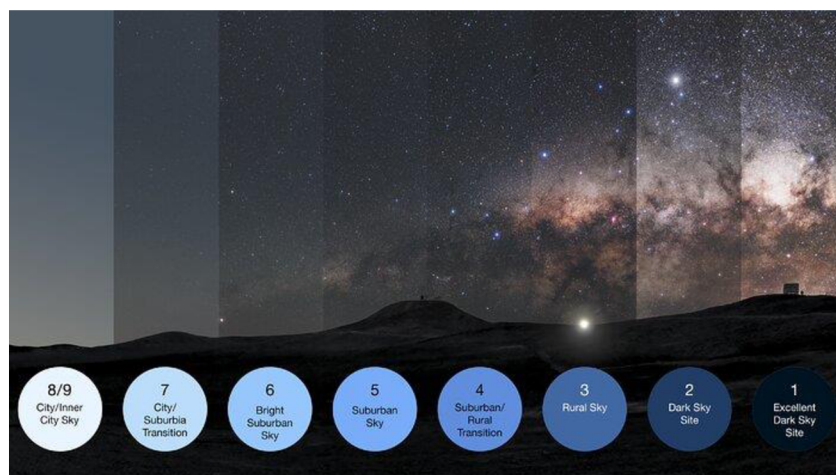
3.2 Detekce a měření

Lidský zrak je pro nás nejpřirozenější detektor světla. Dokáže detekovat i velice slabé světlo a je pro člověka nejvýznamnějším smyslem (Šajdíková, Maďa, Fontana 2018). O kvantifikaci světelného znečištění se pozorovatelé snaží za pomoci lidského oka metodou **mezní hvězdné velikosti** (*naked-eye limiting magnitude*). Tato metoda spočívá v určení nejslabší hvězdy, kterou je možné vidět na obloze pouhým okem. Je možno konstatovat, že čím, je kontrast mezi nejjasnější hvězdou a jasnem oblohy vyšší, tím více takových slabších hvězd můžeme nalézt. Andrew Curmey (2014) vymyslel vztah se kterým můžeme určit vizuální velikost nejslabší hvězdy:

$$m_{\text{lim}} = 0,426\mu - 2,365 - 2,5 \log F$$

Parametr m_{lim} značí hvězdnou velikost v magnitudách (jednotka jasnosti), μ je jas oblohy v $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ (jednotka plošné jasnosti). Parametr F označuje hodnotu od 1,4 – 2,4 na základě přisouzení pozorovatelem. (Curmey 2014)

Obrázek 1 Bortleova stupnice



Zdroj: ESO.org

3.2.1 Bortleova stupnice

Metoda mezní hvězdné velikosti však není pro individuální používání úplně vyhovující. Proto Americký astronom John E. Bortle sestavil škálu o devíti bodech, která pomáhá rovnoměrně rozdělit jas nočního nebe. Jeho metoda je dostupnější a spolehlivější při zkoumání světelného znečištění než určování hvězdné velikosti (Bortle 2001). Je důležité podotknout, že využití této metody vyžaduje znalost pozorovaných objektů a dobrou orientaci na noční obloze viz Obrázek 1.

První stupeň Bortleovy stupnice značí dokonale tmavou oblohu, kterou můžeme označit za přirozenou tmu. Devátý stupeň nám označuje noční oblohu městských aglomerací, kde hvězdy na osvětlené noční obloze úplně zanikají.

3.2.2 Strojové měření

Přesná měření veličin souvisejících se světelným znečištěním se provádějí strojovým měřením. Abychom takové měření mohli označit za validní, tak musí splňovat některé zásady. Měli bychom se vyhnout rušivým jevům jako jsou zdroje umělého osvětlení v blízkosti místa měření. Při opakovaném měření bychom se také měli snažit nasimulovat vždy stejné podmínky. Měření může ovlivnit různá oblačnost nebo i měsíc v úplňku. Ideální případ je měření v Astronomické noci, tzn. Taková noc, kdy je jasné nebe a měsíc odrazem světla neovlivňuje jas oblohy.

Přístroje pro měření využívají hned několik druhů fotodetektorů. Jedná se o senzor, který generuje elektrický signál na základě intenzity zachyceného světla. To znamená, že podle síly elektromagnetického záření bude součástka generovat jeden nebo jiný signál (E.Belas 2011).

3.2.3 Přístroje

Luxmetr (viz Obrázek 3) je přístroj, který nám dokáže změřit intenzitu osvětlení E (v luxech). Tento měřič vyhodnocuje míru osvětlení na základě přijímače s korigovaným křemíkovým fotočlánkem. Existují laboratorní i volně dostupné varianty. Dostatečně citlivé senzory jsou však velmi drahé.

Sky Quality Meter (SQM), nebo také jasoměr, je přístroj, který měří míru jasů na obloze (viz Obrázek 2). Jas je měřen pod různými úhly a měří se v $\text{mag}/\text{arcsec}^2$. Jasoměry se staly nejběžnějším zařízením pro sledování jasů oblohy po celém světě (A.Sánchez de Miguel et al. 2017).

Obrázek 3 - Luxmetr



Zdroj: promertech.cz

Obrázek 2 - SQM



Zdroj : supradalekohledy.cz

Díky pokrokovým software programům již můžeme kvantifikovat míru jasů i za pomoci speciálních **digitálních fotoaparátů**. Snímky se dají snadno transformovat do jasových map, ze kterých lze míru jasů vyčíst (Kolláth, Dömeny 2017).

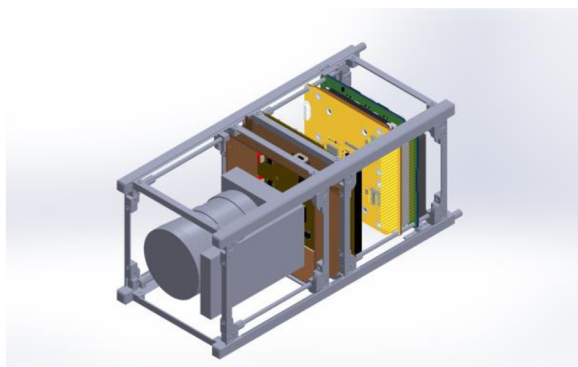
3.2.4 Dálkový průzkum Země

Další metodou měření je využití dálkového průzkumu Země. Na rozdíl od předešlých metod měření zde využíváme satelitů nebo letadel a soustavy pozemních stanic. Satelity pomocí velmi citlivých optických senzorů snímají povrch Země. Tento způsob je ideální pro sledování dlouhodobých trendů a změn světelného znečištění.

Veliký úspěch slavil americký systém **Defense Meteorological Satellite Program**, který vypustil svou první družici v roce 1962. V roce 2014 soustava sčítala již 44 družic, které obíhaly Zemi po heliosynchronních drahách. Systém dokázal pořizovat noční snímky v rozlišení 0.55 až 2.7 km/pixel. Celý program měl za úkol monitorovat meteorologické a oceánografické jevy. Tyto družice byly vybaveny oscilujícím radiometrem (OLS) snímajícím v pásmech TIR a VIS (tepelné infračervené a viditelné pásmo) (Eldvidge a kol. 1997).

K výzkumu světelného znečištění se používají také snímky z **Mezinárodní kosmické stanice (ISS)**. Snímky, které pořizuje posádka ISS mají velmi dobré rozlišení v rozsahu 1 m–1 km/ pixel. Po zpracování RAW snímků navíc máme k dispozici tři RGB pásma, která nám dávají informaci o barvě a intenzitě světla. Můžeme navíc i rozpoznat jednotlivé druhy zářičů. Například modré světlo se na snímcích projevuje velmi silně a rozkládá se v atmosféře nejdál od povrchu (A. Sánchez de Miguel a kol. 2013).

Obrázek 4 – Mise NITESat



Zdroj: nanosats.eu

Zajímavým projektem je také mise **NITESat** (Night Imaging and Tracking Experiment Satellite). NITESat je pilotní mise testující potenciál jednoduchého a levného (<500 000 US\$) satelitu, který by v noci poskytoval třibarevná regionální data o umělém osvětlení s vysokým rozlišením (100 m / pixel) (Ken Walczak a kol. 2017). V současnosti je mise soustředěna pouze pro sběr snímků ze středozápadu USA. Pokud ale bude počáteční mise úspěšná, existuje potenciál rozšířit program na nízkonákladovou konstelaci satelitů schopných poskytovat globální pokrytí (viz Obrázek 4).

3.2.5 Faktory ovlivňující měření

Samotné měření může být ovlivněno mnoha nežádoucími faktory. Jedním z nich může být měsíc a jeho jednotlivé fáze. Světlo Slunce, které měsíc odráží může výrazně ovlivnit jas noční oblohy. Proto je důležité měření zahajovat při konstantní fázi měsíčního cyklu či při astronomické noci. Jedná se o takovou noc, kdy vliv měsíce na jas oblohy je minimální (A. Hänel a kol. 2018).

Dalším faktorem může být i terén, ve kterém je měření prováděno. To se týká zejména ground-based měření. Oblasti se členitým terénem výrazně ovlivňují výsledky měření.

Jedná se především o vrcholky kopců nebo odlehlá údolí. Také se může jednat o blízký vysoký porost, který zatemňuje část horizontu a zabraňuje mu mít vliv na noční oblohu v měřeném místě. V těchto oblastech může dojít k výrazným zlomům v měření a mohou zde být naměřeny extrémní hodnoty (Sciezor T., 2012).

Důležitým faktorem při měření v některých zeměpisných šířkách může být i sluneční aktivita. Po západu Slunce je obloha téměř 10 000 000krát temnější než během dne. I přesto se ale vliv slunce po jeho západu nedá zanedbat. Při vysoké míře sluneční aktivity je možné naměřit až o 0,4 magnitud vyšší jas v noční oblohy oproti normálnímu stavu (C.R. Benn, S.L Ellison, 1998).

3.3 Zdroje světelného znečištění

Již od pradávna světlo sloužilo člověku jako nástroj. Ohně dodávaly rodinám teplo. V noci navozovaly pocit bezpečí a chránily kolonie před predátory a šelmami. Dnes můžeme díky zdrojům světla bezpečně cestovat i pod rouškou noci a naučili jsme se vnímat výstražné světelné signály.

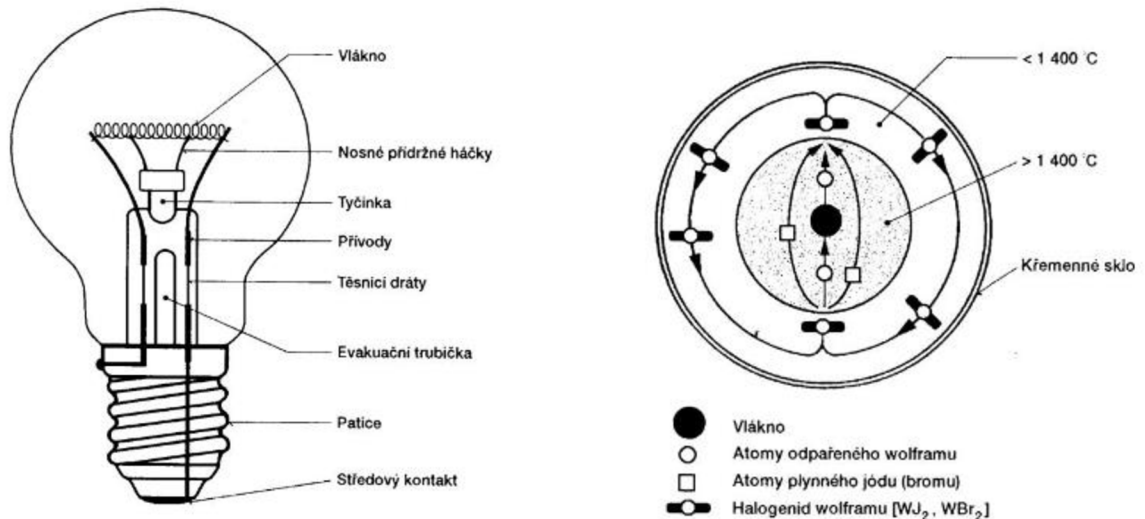
Revoluční bylo efektivní využívání elektrického proudu. Objevy, které nám to umožnily jsou pevně spjaty s 19. stoletím. Pokusy o sestrojování plynových či lihových lamp byly zastíněny vynálezem žárovky. Žárovka s uhlíkovým vláknem, kterou přinesl Thomas Alva Edison (1879) se stala nejpraktičtější alternativou denního i nočního svícení (Krtilová, Matoušek, Monzer 1981).

V současnosti umělé osvětlení má na starosti 19 % světové spotřeby elektřiny. To odpovídá emisím 1900 Mt skleníkových plynů za rok (OECD/IEA 2006).

3.3.1 Typy zářičů umělého osvětlení

Ještě před více jak sto lety se umělé osvětlení skládalo pouze z pálení fosilních paliv, zapalování tuků nebo olejů. **Žárovka** přinesla přímo světelnou revoluci. Ve své době představovala velice ekonomicky výhodnou alternativou k osvětlování.

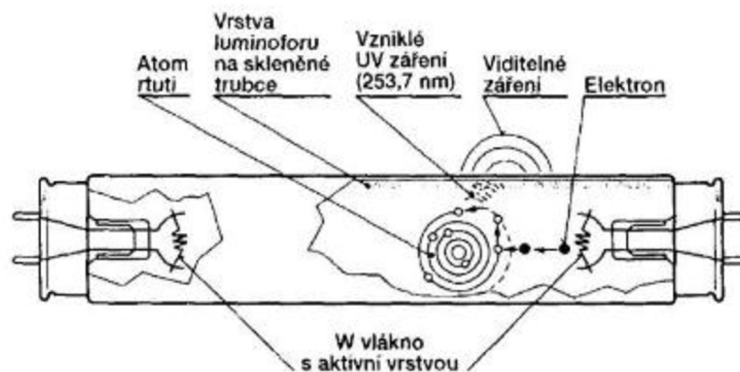
Obrázek 5 – popis klasické a halogenové žárovky



Zdroj: Lenka Janečková – upraveno

První žárovky se skládaly z uhlíkového vlákna ve vakuovaném skleněném obalu. Vlákno bylo vedeno přes utěsněný uzávěr ke zdroji elektrického proudu. Zahříváním uhlíkové vlákno pak začalo zářit. Právě v technologii materiálů došlo k největšímu pokroku. Například dnes ve všech žárovkách nalezneme výhradně vlákno z wolframu, které má lepší chemicko – fyzikální vlastnosti (Masclsaac, Kanner and Anderson 1999).

Obrázek 6 – popis zářivky



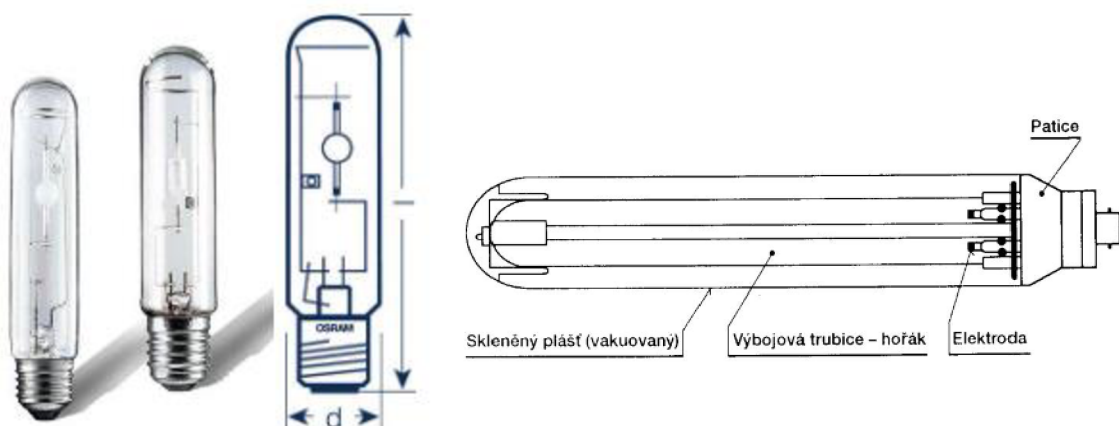
Zdroj: Lenka Janečková – upraveno

Můžeme se dnes také setkat s halogenovými žárovkami. Ty mají typicky menší baňku a wolframové vlákno v nich dosahuje vyšší teploty než u klasických žárovek. Popis žárovky viz Obrázek 5.

Jedním z alternativních zdrojů záření je i **zářivka** nebo její kompaktní varianta. Ta vznikla jako výsledek pokusů s rtuťovými náboji v kombinaci se soli kovů. Světlo zde vzniká při rtuťovém výboji za vysokého tlaku. Typické jsou svým podlouhlým, obloukovým nebo spirálovitým tvarem viz Obrázek 6. Tento zářič měl delší dobu záření než obyčejná žárovka. Dlouho se však potýkal s problémy, kdy některé soli kovů napadaly obal zářiče a narušovaly ho. Nakonec se však jedná o spolehlivý zářič, který dokáže stabilně zářit v delších vlnových délkách (David DiLaura 2008). Kvůli využívání toxické rtuti zde nastává problém se složitou likvidací.

Sodíkové výbojky se řadí mezi neúčinnější světelné zdroje, které známe. Světlo v nich vzniká reakcí sodíkových plynů pod relativně nízkým tlakem. Existují však i vysokotlaké varianty. Jejich sytě oranžové záření se blíží maximu spektrální citlivosti lidského oka. Dobrá životnost a snadná údržba dělá ze sodíkových výbojek jeden z nejoblíbenějších světelných zářičů. Nalezneme je při osvětlování venkovních ploch, podél dopravních komunikací i v rozsáhlé městské zástavbě (Trčňák 2013). Názorná ukázka sodíkové výbojky se nachází na Obrázku 7.

Obrázek 7 – popis a schéma sodíkové výbojky



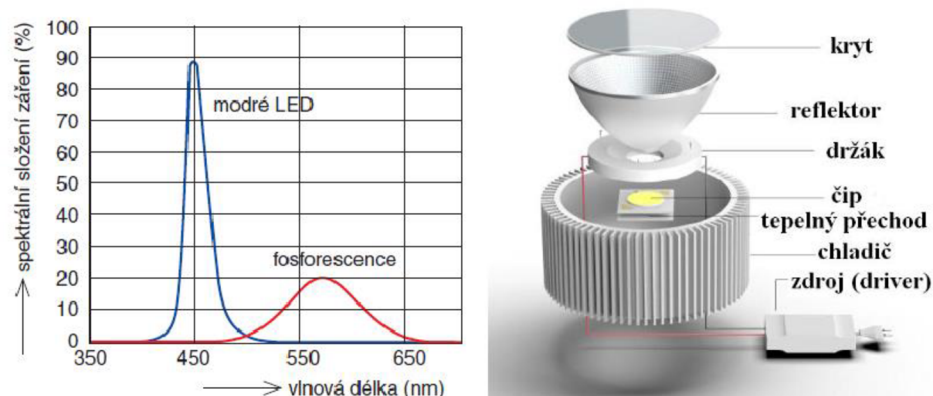
Zdroj: Lenka Janečková – upraveno

Polovodičové osvětlení pomocí **světelných diod (LED)** představuje zásadně jinou technologii oproti plynovým výbojkám. Vlastnosti jako spektrální kontrola složení a vysoký světelný výkon s malým sálavým teplem činí z této technologie potenciálně jeden z nejvýznamnějších pokroků v osvětlení (Robert C. Morrow 2008). Princip LED osvětlení viz Obrázek 8.

Charakteristická je modrá až bílá barva vydávaného světla. LED technologie také disponuje dobrým měrným výkonem a dlouhou životností. Tato technologie tak postupně nahrazuje většinu světelných zdrojů s výjimkou sodíkových výbojek.

Další běžně využívané typy zářičů jsou například: **indukční výbojky, rtuťové výbojky, halogenidové výbojky, laserové diody nebo elektroluminiscenční zdroje světla.**

Obrázek 8 – princip světelných diod



Zdroj: Lenka Janečková – upraveno

3.3.2 Druhy zdrojů světelného znečištění

Veřejné osvětlení je největším zdrojem světelného znečištění. Pouliční osvětlení je důležitou součástí měst. Často se světly podél ulic vytvářejí důležité koridory pro dopravu i pro pěší. Světlem jsou také označeny důležité body, u kterých se lidé setkávají. Může se jednat o náměstí, pomníky, historické budovy a památky, parky, nábřeží nebo fontány. Hustota světelného znečištění je proto ve městech nejvyšší a pomocí světla lze městskou zástavbu jednoduše odlišit od okolního krajinného rázu. Světlo dodává obyvatelům pocit bezpečí a jedná se o důležitou součást městského života.

Díky světelným zdrojům můžeme během noci bezpečně využívat i dopravu. **Dopravní osvětlení** je typické svým pásovitým rozložením podél koridorů. Může se jednat o signální světla na nádraží či na letištích. Světelné křižovatky usnadňují plynulost provozu a osvětlené přechody dávají chodcům větší pocit bezpečí. Světelné výstražné dopravní značení má velký vliv na pozornost řidičů a dělá noční cestování výrazně bezpečnějším (Kohei Narisada and Duco shreuder 2004).

Do dopravního osvětlení můžeme zařadit i rušivé světlo vydávané přímo dopravními prostředky. Ve většině případů se ale nejedná o výrazný podíl celkového antropogenního osvětlení. Díky klopeným světlometům automobilů není rozptýl světla v atmosféře tak patrný. Můžeme ale sledovat také jevy, kde se na výrazných dopravních uzlech objevují kolony. V takovém případě může být rušivé světlo stejně dobře pozorovatelné jako třeba požáry.

Mezi nadbytečné užívání umělého osvětlení můžeme zařadit **i osvětlení kulturních a sportovních událostí**. Především světlometry, které se při takových událostech používají, mají velmi vysoký výkon a světelnou sílu.

Ve všedních dnech mnoho lidí má možnost se věnovat sportu až po práci. Proto bylo zapotřebí vybudovat celou řadu rekreačních sportovních zařízení, která musela být kvůli bezpečnosti dobře osvětlena (Kohei Narisada, Duco Schreuder 2004).

Jako příklad můžeme uvést lyžařské areály či autodromy. Mnoho lidí se také baví sledováním sportovních událostí. Proto bylo vybudováno množství stadionů. Ty mnohdy doprovází celé rozsáhlé sportovní tréninkové komplexy, které jsou z vrchu osvětlovány výkonnými halogenovými světly. Tím se zajišťuje komfort pro diváky přímo na stadionech i pro sledující v domácnostech díky televizním přenosům.

Světlo poutající pozornost ve tmě má také rozsáhlé **komerční využití**. Osvětlení patřící k reklamním billboardům v komerčních čtvrtích, stejně jako dekorativní osvětlení, má výrazný podíl na míru světelného znečištění ve městech a na předměstích (Hong Soo Lim a kol. 2017). Právě v takových oblastech je možné naměřit vůbec nejvyšší míru antropogenního světla během noci. Osvícené reklamní plochy se nyní již začínají regulovat. Je to reakce na zhoršující se kvalitu nočního života v těchto oblastech.

3.4 Dopady na živé organismy

Studie z posledních dob také prokazují, že světelné znečištění má výrazný negativní vliv na životy mnoha organismů. Jedná se o obojživelníky, ptáky, savce, hmyz, a dokonce i některé rostliny. Návyky tisíců organismů závisí na intervalech denního světla a tmy. Přidáním dalších zdrojů světla do blízkostí jejich přirozených habitatů riskujeme, že dojde ke změnám jejich behaviorálních, reprodukčních i imunitních funkcí. Zmizení nebo zkrácení intervalu skutečné tmy má pro takové organismy vážné následky (The International Dark-Sky Association, 2012).

Zavedení umělého světla do ekosystému může poškodit druh různými způsoby. Může se jednat o vyvolání falešného období páření a v důsledku toho i narušení reprodukčních cyklů organismu. Mnoho organismů, které navigují své trasy podle světla mohou být antropogenním světlem dezorientováni. To může vést k úplnému vysílení a následnému uhynutí. Narušení se také může týkat příjmu potravy a výživy. Obzvláště rostliny v mírných až polárních ekosystémech používají délku dne k zahájení sezonních fenologických fází jako je klíčení, tvorba pupenů nebo prasknutí (Kevin G. Jaston a kol. 2013). Některé studie dokonce potvrdily, že umělé světlo během noci ovlivňuje pohyby stěhovavých ptáků a čerstvě vylíhnutých želv. Také narušuje páření a chování světlušek a žab (The International Dark-Sky Association, 2012).

Vliv světelného znečištění se nepodepisuje pouze na konkrétní druhy organismů. Může se jednat o narušení celých ekosystémů a rovnováhy která v nich panuje. Například stromy jsou významným habitatem pro mnoho organismů. Důsledkem narušení fenofáze stromu může být opoždění opadu listů. Mnoho druhů žijících v tomto habitatu se řídí právě přeměnou habitatu v čase a na základě opadaného listů vyhlíží a připravuje se na zimu. Doba přípravy se tím pro organismus výrazně zkracuje (Dr. Jasna Rajkhowa, 2012).

Další ranou pro ekosystém může být vliv pouličního osvětlení na populace nočních motýlů. Existují hypotézy, které popisují tzv. efekt pasti a efekt vysavače. (Eisenbeis, G. & Hänel, A. 2009). Efekt vysavače nastává po vystavení nového světelného zdroje. Noční motýli jsou pak světlem stahováni z okolí právě k tomuto místu. Efekt pasti je jev, kdy jedinci krouží kolem zdroje světla ve snaze se k němu dostat co nejbližší. Jedinec je „v pasti“ pokud není kvůli vyčerpání schopen světelný zdroj opustit. Může pak dojít k jeho

uhynutí z důvodu celkového vyčerpání nebo k popálení od zdroje světla. Procento takto uvězněných jedinců může činit až 33 % z celkově nalákaného hmyzu (Eisenbeis, 2006).

U některých larev hmyzu bylo dokonce prokázáno, že umělé světlo má negativní vliv na jejich vývoj. U larev z čeledi můrovitých byly prováděny pokusy, kdy samci larev *M. brassicae* byli každou noc vystaveni LED osvětlení o síle 7 luxů. Na konci vývojového stádia larvy se ukázalo, že jedinci pod LED zářením dosáhli výrazně nižší tělesné hmotnosti než larvy, které se vyvíjeli v zatemněném prostředí během noci (van Geffen a kol. 2014).

3.5 Dopady na lidské zdraví

Mnoho lékařských výzkumů se zabývalo tím, jaký vliv má umělé osvětlení na zdraví člověka. Existují celé příručky o designu interiérového osvětlení, které apelují na pravidla umístování světelných zářičů a na jejich konfiguraci. V důsledku nadměrného světla v místnosti, nebo jeho nesprávného spektrálního složení může docházet k závažným zdravotním komplikacím. Mezi takové patří: migrény, zvýšená míra stresu, únava, pokles sexuálních funkcí a úzkostné stavy (Gary Steffy, 2001).

Je rovněž dokázané, že běžné zářivky v kancelářských prostorech mohou zvyšovat krevní tlak pracovníků až o 8 jednotek. Existují i studie, které tvrdí že ženy, které jsou vystaveny umělému světlu během noci mají vyšší šanci na onemocnění rakovinou prsu. Je to zapříčiněno potlačením noční produkce melatoninu v těle (Maria Cheung, 2009). U mužů se může jednat o onemocnění rakovinou prostaty. Podle průzkumů je možnost onemocnění vyšší u mužů, kteří pracují během noci anebo mají alespoň párkrát do týdne střídavé noční směny (I.Kloog a kol., 2009).

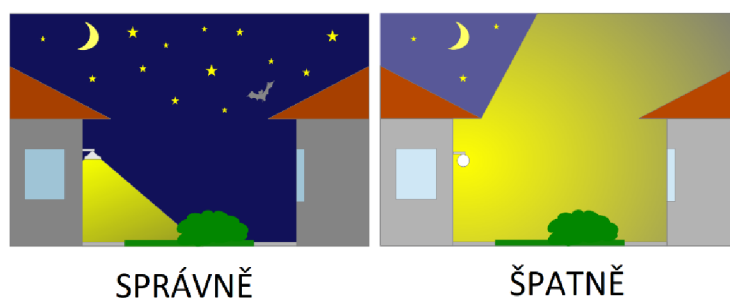
V publikaci Pineal Research (2007) je seznam znalostí o vlivech umělého osvětlení na lidské zdraví. Jsou zde popsány také základní principy narušených mechanismů a možnosti jejich léčby.

3.6 Možnosti regulace

Postupů, jak zlepšit současnou situaci na poli světelného znečištění je mnoho. Motivaci mají jak ekologové, tak i ekonomové nebo astronomové. Prvním krokem by mohlo být zamyšlení se nad tím, u jakých objektů je umělé osvětlení skutečně nezbytné. Následně bychom měli hledat způsoby, jak zamezit úniku zbytečného světla od těchto objektů. Měli

bychom tedy osvětlovat pouze určený prostor a používat co nejvýhodnější svítidla z hlediska technických a světelných vlastností. Zároveň bychom měli reflektovat i poměr ceny a výkonu a šetrnost k životnímu prostředí (Lenža, Suchan, 2006). Ideální světlo pro venkovní osvětlování by mělo být uloženo v hlubokém krytu, který by světlo klopil směrem k zemi. Tím by se zamezilo úniku nadbytečného osvětlení do atmosféry viz Obrázek 9.

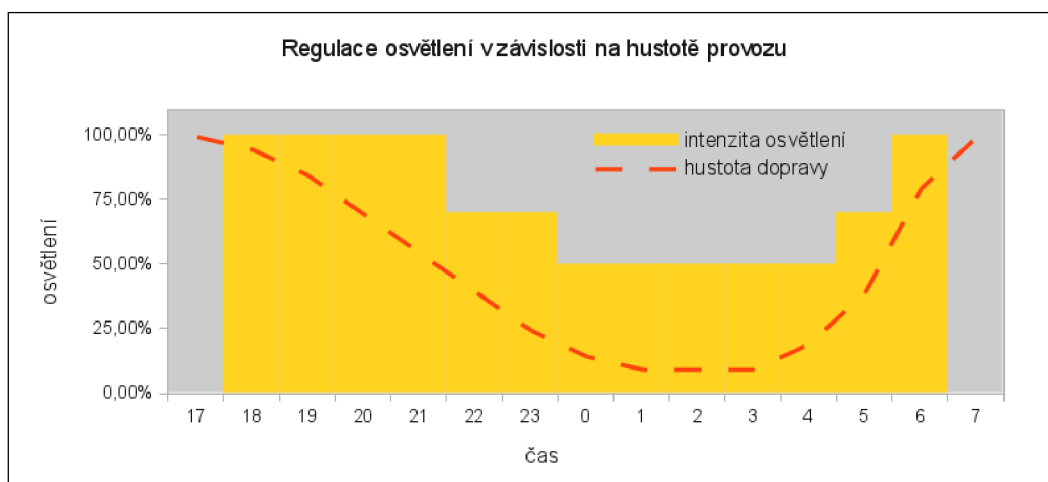
Obrázek 9 – prevence úniku zbytečného světla



Zdroj: Světelné znečištění.cz – upraveno

Další možností regulace umělého osvětlení je vypínání některých zdrojů během noci. Regulace poskytující toto řešení již ve světě existují. Principem je vyselektovat ty objekty, které přes noc nemusí být osvětlené nebo by stačilo osvětlení pouze jejich částí. Také existují postupy, kdy se na část noci světla ztlumí (viz Graf 1). Tím se ušetří náklady na energie a zároveň se omezí i míra antropogenního světla. Dokonce už pro to byly přímo navrženy některé technologie. Klasické ovládání zapínání osvětlení fotobuňkou nebo spínacími hodinami je možné nahradit moderními systémy a rozvaděči umožňujícími tlumení osvětlení (Hollan 2011).

Graf 1 – Vývoj intenzity osvětlení během noci



Zdroj: Světelné znečištění.cz – upraveno

3.7 Výzkum

Samotné povědomí o problémech světelného znečištění se mezi vědci rozšířilo ve 30. letech 20. století. Tehdy slavný matematik a filosof Bernard Russel varoval před problematikou takto: „*V ulicích moderních měst je nebe zcela neviditelné. Po předměstích jezdíme v autech se silnými světlomety. Vymazali jsme nebesa a jen málo vědců si je stále vědomo hvězd, planet, meteorů a komet nad námi.*“ (Russel, 1935).

Většina prvních vědeckých prací, zabývajících se problematikou světelného znečištění, se snažila především poukázat na bariéru pro astronomická měření. V roce 1972 vznikla první práce, která se začala zabývat i dalšími problémy antropogenního osvětlení. Zmíněny zde byly vlivy na člověka i přírodu (Burne, 1972).

Jedno z nejslavnějších pozorování umělého světla z vesmíru se odehrálo 20. února 1962. V tento den se na orbitě nacházel americký astronaut Jonh Glenn. Ten spatřil a popsal jasně viditelný světelný prstenec na území Austrálie. Jednalo se o město Perth. Obyvatelé města v jeden okamžik rozsvítili všechny možné světelné zdroje, které byly ve městě k dispozici a tím podpořili tuto vesmírnou misi (T. Streissguth, 2005).

Pro vytváření modelů světelného znečištění a světelných map se využívají data sebraná z různých sensorů. Povětšinou se jedná o data dálkového průzkumu Země, protože mají větší pokrytí území. Jedním z prvních sensorů, který poskytoval vhodná data pro analýzu umělého světla byl vyslán na orbitu v rámci DMSP (*Defence Meteorological Satellite System*). Na tomto programu se začalo pracovat v 60. letech 20. století.

Hlavním cílem bylo mapování oblačnosti. Poskytovaná data během noci však byla vhodná i pro analýzy noční oblohy. Dalším důležitým systémem bylo OLS (*Operational Linescan System*). Data z těchto systémů byly v roce 1992 veřejně zpřístupněny. Současné výzkumy využívají data ze sensorů Landsat 8, VIIRS nebo Nightsat. Některé experimentální měření využívali pro sběr dat i letadla, drony či sondážní balóny (Fiorentini a kol. 2018).

3.7.1 Současný výzkum

V současnosti již senzory dálkového průzkumu Země dokáží zachytit světelné znečištění v dostatečně vysokém rozlišení pro jeho mapování. Můžeme tak pomocí snímků z vesmíru detekovat například požáry, hromadné úniky skleníkových plynů nebo vývoj měst v rozvojových zemích. Některé multispektrální sensory jsou schopné i rozlišit typ zářiče podle vlnové délky světla rozkládajícího se v atmosféře. Například LED světla proniknou mnohem dále a intenzivněji skrze atmosféru (modré spektrum záření). Každopádně i takové určování má své limity. Různé zdroje stejného světelného charakteru nelze jednotlivě od sebe odlišit. (Sanchez de Miguel a kol. 2019b).

Pomocí dat světelného znečištění lze mapovat i některé přírodní katastrofy. Může se jednat o jevy doprovázející zemětřesení, záplavy, tropické bouře nebo hurikány doprovázené blesky (Aubrecht a kol. 2009) Stejným způsobem se dají monitorovat i ozbrojené konflikty nebo požáry.

Pozemním měřením můžeme měřit jas určitých nebeských bodů. Stejně tak ale existují i širokouhlé optické sensory, který zachycují jas celé nebeské klenby. Často se využívá také efekt "rybího oka".

Pokrok ve zkoumání světelného znečištění nemusí nutně souviset s technickým zdokonalením optických sensorů. Několik vědeckých prací již prokázalo, že vysoké prostorové rozlišení (<5 m) nám nepřináší přesnější poznatky o fungování šíření antropogenního světla v naší atmosféře. Mnohdy právě komerční sensory s nižším rozlišením přináší uspokojivější výsledky, ze kterých mnoho prací vychází. Vyšší rozlišení nám ale může dát cenné informace o možnostech klasifikací jednotlivých světelných zdrojů (Metcalf 2012, Hale a kol. 2013).

4 Metodika

Za účelem zhotovení modelů světelného znečištění dochází v této analýze k porovnání ground-based dat a dat ze senzoru dálkového průzkumu Země. Ručně naměřená data jsou rozdělena do tří kategorií podle meteorologických stavů, při kterých byla pořízena. Následně dochází k hledání závislostí mezi daty DPZ a naměřenými daty pro každý unikátní stav počasí. Výsledné předpisy funkcí jsou pak využívány pro transformaci rastrových hodnot dat DPZ a následnému modelování pro každý unikátní stav. Tato analýza vychází z předpokladu, že čím je míra oblačnosti nebo mlhy větší, tím více je vliv umělého osvětlení patrný. To je zapříčiněno tím, že se světlo skrze aerosoly odráží zpět k povrchu a neuniká tak jednoduše do vrchních vrstev atmosféry.

4.1 Sběr dat

Pro analýzu byla využita data ze senzoru VIIRS. DNB – cloud free kanál. Senzor VIIRS se nachází na je na palubě společných satelitů NASA/NOAA Suomi National Polar-orbiting Partnership a NOAA-20. Tato data jsou volně dostupná a jsou připravena ke stažení pro každý celý měsíční cyklus. Data jsou rozdělena do šesti velkých snímků naší planety. Pro Evropu byl využit snímek předzpracovaných dat Tile 2 (60W75N). V době zpracovávání této práce byla dostupná data ze září roku 2022. To neodpovídá ručním měřením, která začala až v prosinci téhož roku. Měření však bylo prováděno v oblasti, kde nedošlo k žádným výrazným změnám krajinného rázu či výstavbě větších osvětlených objektů. Tato data byla tedy shledána pro účely bakalářské práce jako dostačující.

Data pozemního měření byla sbírána přístrojem SQM. Sběr probíhal v nočních hodinách kolem půlnoci, kdy senzor VIIRS snímal odpovídající část zemského povrchu. Došlo k opakovaným měřením světelného znečištění na území okresu Příbram (viz Obrázek 10). Měření byla rozdělena do tří kategorií podle oblačnosti, která v tu dobu panovala. Jedná se o měření za **jasné oblohy**, měření za **vysoké oblačnosti** a měření za **mlhavého počasí**. Data byla sbírána v rozmezí cca jednoho měsíce.

Důležitým faktorem je, že se pozemní měření od toho dálkového liší i jednotkami. Senzor DPZ měří v $\text{nW/cm}^2/\text{sr}$. Jedná se o míru plošné radiance vyzařované ze Země. Zatímco SQM měří $\text{mag}/\text{ArcSec}^2$. Zde se jedná o jednotku plošného jasu. Tyto jednotky nelze jednoduše převádět. Důležité je také poznamenat, že stupnice magnitud je převrácená.

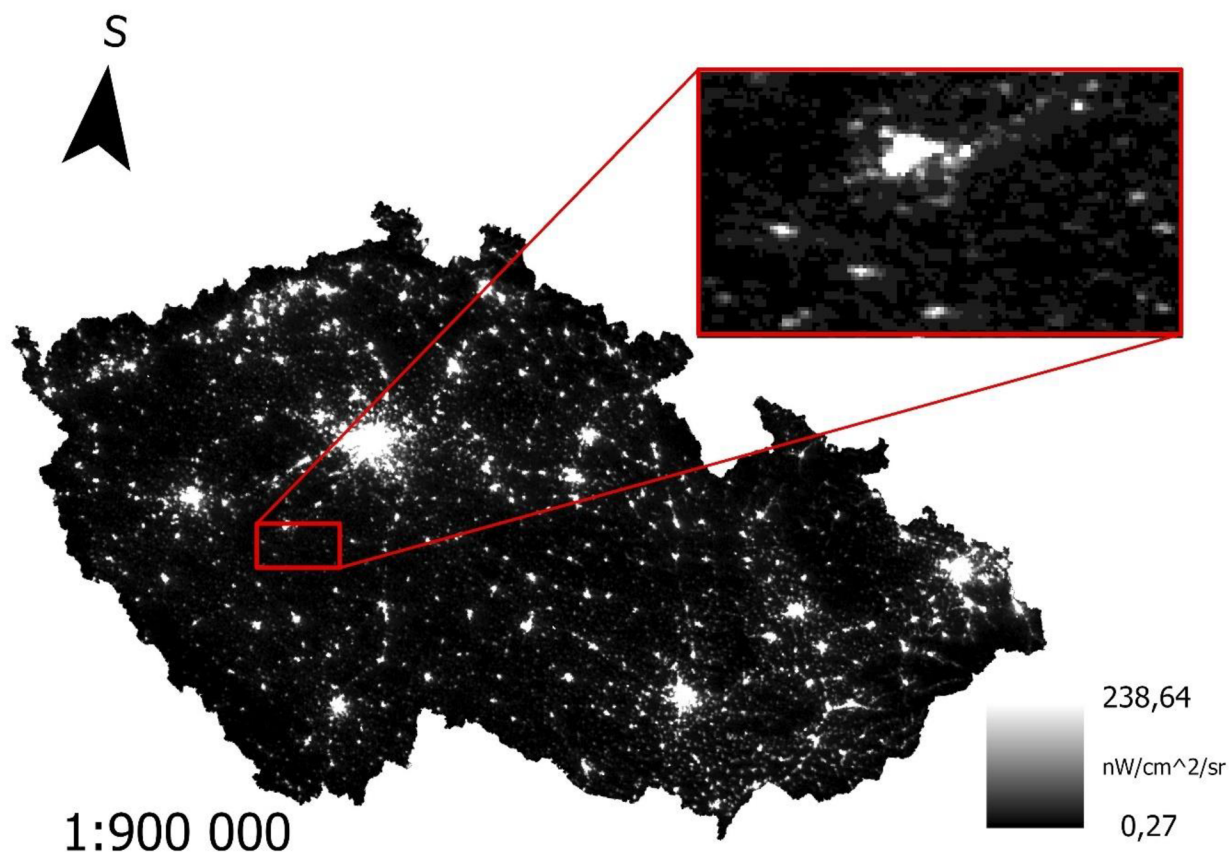
To znamená, že čím je hodnota SQM vyšší, tím nižší míra umělého světla se na obloze vyskytuje.

4.1.1 Zásady

Přístroj SQM měří v magnitudách/ArcSec². Jedná se tedy o pomyslný kužel, který vychází kolmo vzhůru z optického aparátu přístroje a zaznamenává jas nebeské klenby. Přístroj je tedy nutné umístit pro správné měření do vodorovné polohy. Při snímání je také důležité se vyvarovat rušivým zdrojům osvětlení nedaleko místa měření. Měření by mělo probíhat dostatečně daleko od pouličních lamp nebo světlometů aut.

Důležitým faktorem je také doba, kdy je vůbec vhodné měření provádět. V ideálním případě by neměl být měsíc nad horizontem a neměl by oslňovat noční oblohu. Mimo měsíční fáze může měření narušovat i silná sluneční aktivita, která nemusí být pouhým okem patrná. Údaje o stavu sluneční aktivity byly čerpány z portálu paceweatherlive.com.

Obrázek 10 – Zkoumané území dle dat VIIRS

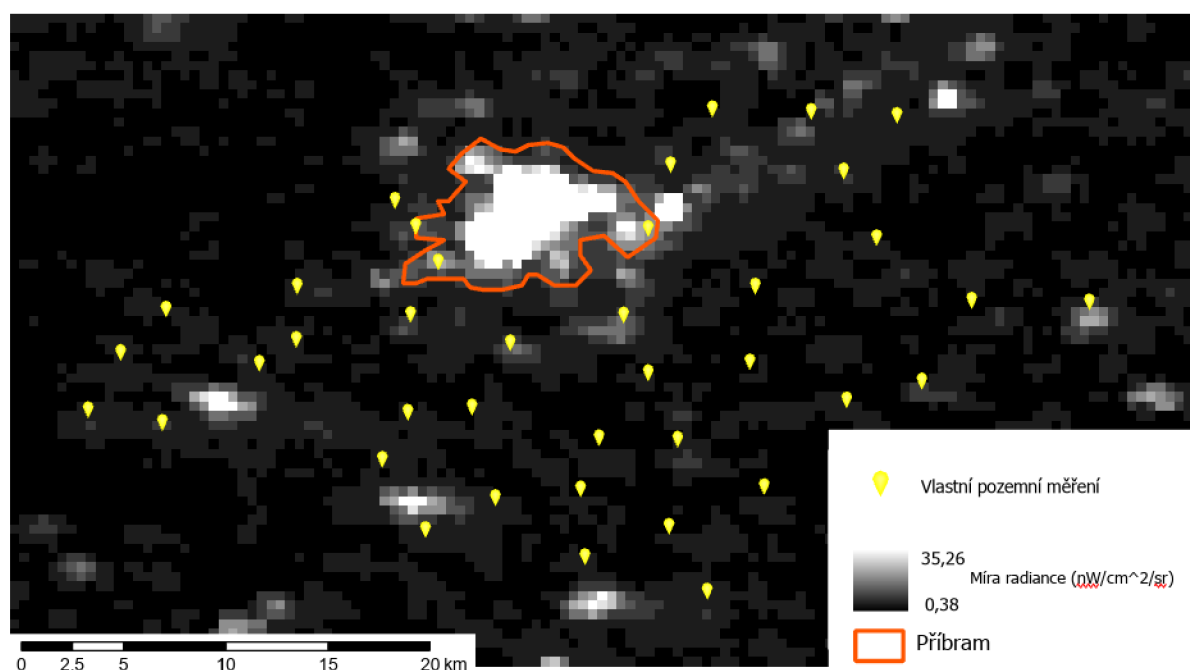


Pásma DNB a sensoru VIIRS snímá planetu Zemi v rozlišení 300 x 300 m/pixel. Z toho důvodu je nutné provádět měření s dostatečně velkými rozestupy. Zamezí se tím opakovanému měření v daném pixelu. Pro účely této bakalářské práce byla zvolena hodnota vzdálenosti jednotlivých bodů od sebe cca 3 kilometry.

4.1.2 Příprava měření

Před samotným měřením se okres Příbram rozdělil na referenční územní celky. Každý celek měl čtvercový tvar o velikost $a = 3$ km. V každém celku se pak hledalo vhodné místo pro zhotovení unikátního měření, tak aby se nacházelo co nejbližně těžiště referenčního území. Po zvolení 40 unikátních bodů byl celý okres rozdělen do tří částí, které se separátně za vhodných podmínek měřily ve stejnou noc. Místa zvolená pro sběr jsou znázorněná na Obrázku 11.

Obrázek 11 – Místa na kterých byla prováděna vlastní ground-based měření pomocí SQM



Pro sbírání dat v terénu byl využit nástroj Field Maps. Jedná se o produkt od společnosti ESRI, který využívá GPS lokátory mobilních zařízení. Nejprve byl vytvořen nový projekt v ArcGIS online, do kterého se měla naměřená data online nahrávat. Pro měření tedy bylo nutné zůstat v dosahu internetového připojení. Také bylo nutné definovat bodovou vrstvu budoucích měření. Poté bylo potřeba k vrstvě přidat i atributy obsahující údaje o hodnotách za každého stavu počasí a také informaci o časovém údaji, kdy byl záznam pořízen.

4.2 Zpracování dat

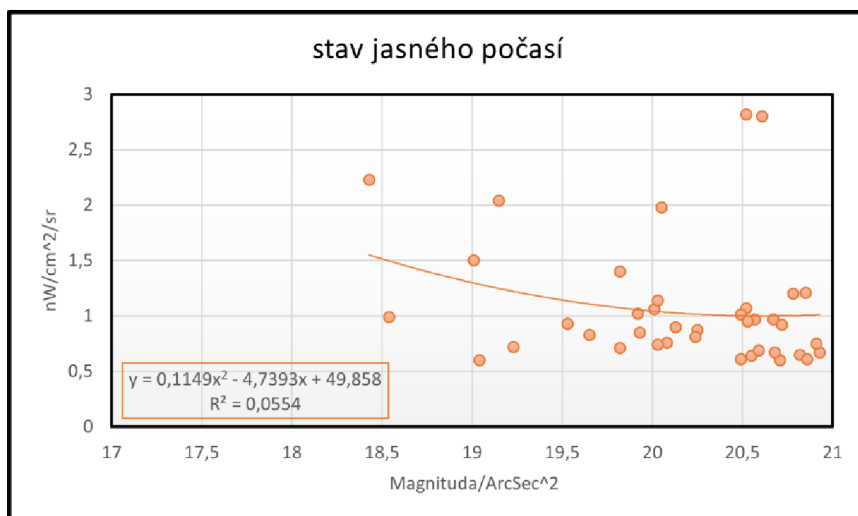
Data naměřená senzorem VIIRS v DNB pásmu, jsou volně dostupná na oficiálních stránkách Earth Observation Group (eogdata.mines.edu). Zde byla stažena data ze srpna, září a října roku 2022. Data jsou zde dostupná podle dlaždic pro celý svět. Pro území zahrnující oblast vlastního měření byla stažena dlaždice Tile 2 (60W75N). Jedná se o předzpracovaná data bez vlivů oblačnosti.

Data byla následně nahrána ve formátu *GeoTIFF*. do *ArcGIS Pro*. Zde byla oříznuta pouze na oblast České republiky z důvodů rychlejší práce s menším množstvím dat. Originální data jsou dostupná v souřadnicovém systému **WGS84**. Protože analýza probíhá na území České republiky, byla zvolena transformace do, pro nás přirozenějšího, souřadnicového systému **SJTS-K**.

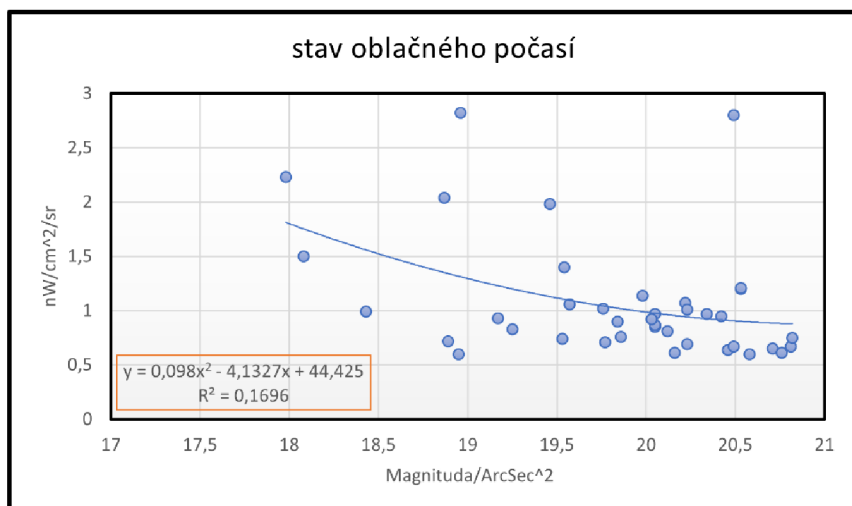
Pomocí funkce *XY Table to Points* byla do prostředí *ArcGIS Pro* nahrána i data naměřená pomocí SQM. Nyní jsme docílili překryvu rastrové i vektorové bodové vrstvy vlastních měření. Dalším krokem bylo dostat hodnoty z rastru do atributové tabulky bodové vrstvy. Tento krok nám dokáže vytáhnout hodnoty z pixelů rastru, kterým náleží konkrétní bodové měření. Toho docílíme funkcí *Extract values to points*, kterou sada nástrojů *ArcGIS Pro* nabízí. Tento krok nám může posloužit i jako kontrola rozvržení našich ground-based měření. Pokud každý pixel rastru odpovídá rozlišení 300x300 metrů, tak by se v žádném unikátním pixelu neměly nacházet dvě či více vlastních měření z bodové vrstvy.

Výsledná bodová vrstva obsahuje v atributové tabulce data nejen o ground-based měřeních, ale také hodnoty zachycené senzorem DPZ. Dalším krokem bylo hledání závislosti mezi ground-based daty a daty DPZ. Naším cílem je nalezení předpisů funkcí, pro spojnice trendů, za všech naměřených meteorologických podmínek. Průběžné výsledky jsou zaznamenány v grafech viz Graf 3-5.

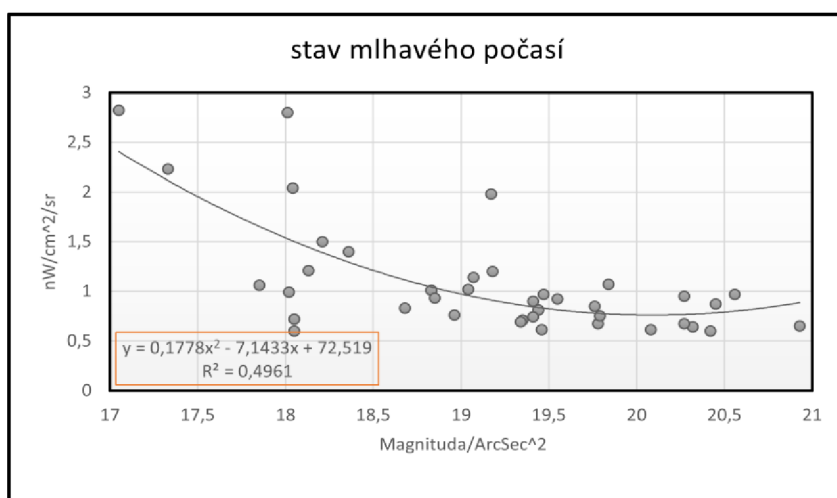
Graf 4 závislost VIIRS a ground-based za jasného počasi



Graf 3 závislost VIIRS a ground-based za oblačného počasi



Graf 2 závislost VIIRS a ground-based za mlhavého počasi

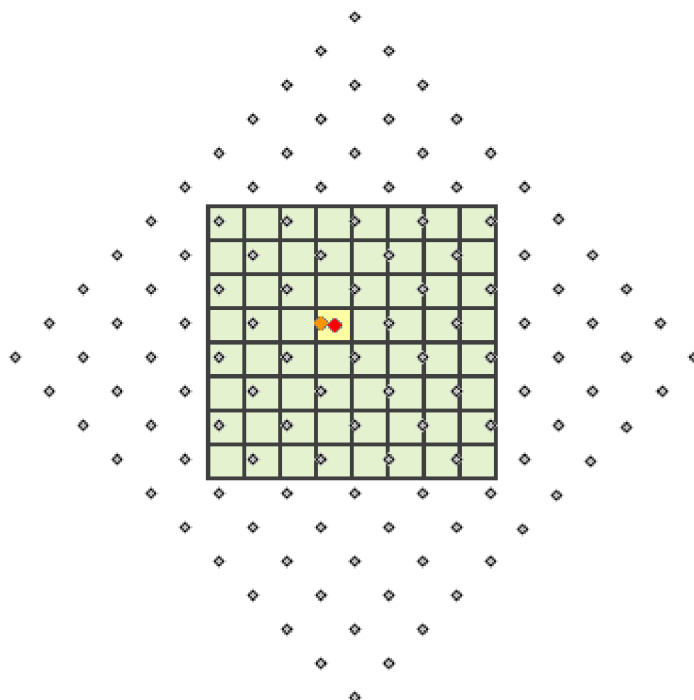


4.3 Interpolace a zpřesňování výsledků

Z průběžných výsledků lze vypočítat jisté trendy. Kvůli velkému množství extrémních hodnot však nelze označit výsledný předpis funkce na základě R^2 za uspokojivý. Původní rastr hodnot může svým rozlišením (300x300 metrů) způsobovat nežádoucí chyby v průměrování hodnot pixelů. Například se jedná o situace, kdy měření bylo prováděno v přirozené tmě, ale většina plochy pixelu se nacházela v osvětlené zástavbě. Z tohoto důvodu bylo důležité dosavadní rastr převzorkovat a zvýšit jeho rozlišení. K tomu posloužilo porovnání několika interpolačních metod, ze kterých pak byla vybrána ta nejvíce vyhovující pro aplikaci. Interpolací se rozumí nalezení přibližné hodnoty funkce v bodě, který je nedaleko vzdálený od hodnot definovaných. K porovnání došlo u těchto druhů interpolací: Nearest neighbor, Bilineární interpolace, Kubická interpolace.

Bilineární interpolace určuje hodnotu pixelu na základě vzdálenostně váženého průměru čtyř nejbližších pixelů. Jedná se o vhodnou metodu pro kontinuální data. Bilineární interpolací se předpis polynomické funkce zpřesnil. To vede k obecnému zlepšení koeficientu determinance pro všechny naměřené situace. Pokud se v průběžných výsledcích vyskytnou nějaké extrémní hodnoty, tak jejich příčinu musíme hledat nejen v jejich zpracování ale i přímo ve vstupních datech.

Obrázek 12 – princip bilineární interpolace



Zdroj: arcgis.com

4.4 Spolehlivost sensoru VIIRS

V rámci srovnání se senzorem VIIRS, se vyskytovalo několik odlehlých hodnot. Je pravděpodobné, že sensor VIIRS při snímání z vesmíru zachytil jinou míru jasů než SQM. Nejprve bylo na místě si rámcově zjistit stálost světelného znečištění v čase. Toho bylo docíleno srovnáním námi využívaného měření s měřeními z ostatních měsíců. Jako použitá srovnávací data byla použita měření z měsíců srpen a říjen.

Nyní bylo zapotřebí vybrat vzorek dat, u nichž se budou porovnávat hodnoty skrze měsíce. Sledována byla jejich podobnost a případné změny. Jako tato trénovací data byla využita naše ground-based bodová měření.

Pro zjištění stálosti (chybovosti) měření mezi jednotlivými měsíci bylo důležité mezi jednotlivými daty vypočítat **RMSE**. Jedná se o výpočet střední kvadratické chyby, která ukazuje míru spolehlivosti a konstantnost měření VIIRS. Samotný výpočet RMSE byl proveden podle definované rovnice vždy pro dvojice měsíčních dat:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

4.5 Vlastní modelování světelného znečištění

Na základě již zjištěných vzájemných vztahů ground-based měření a dat DPZ byly převzaty předpisy námi vytvořených funkcí. Rovnice byly přepočteny tak, že hodnota X symbolizuje vstupní data se senzoru VIIRS. Naše modely založené na měření jasu v magnitudách tedy představují hodnoty Y . Podoba výsledných rovnic viz Výsledky.

Rastr našeho zkoumaného území byl nahrán do programu SNAP, kde se pomocí *Bend Maths* provedly výše zmíněné matematické operace. Zde nastal problém při přepočtu hodnot, které odpovídaly extrémnímu množství umělého světla. Typicky se tento problém projevoval v centru Příbrami a v přilehlých městech či obcích.

Hodnoty zde nabíraly velmi vysokých hodnot, což je pro škálu magnitud nesmyslné. Pomocí prahování byly tyto hodnoty překlasifikovány pro hodnoty vysoké míry jasu. Hodnoty pixelů u každého modelu reprezentují množství **magnitud/ArcSec²**, které by odpovídaly pozemnímu měření v odpovídající oblasti.

5 Výsledky

Vůbec nejvyšší míru jasu noční oblohy vykazuje měření prováděné za mlhavého stavu počasí. Jedná se o 17,05 magnitud. Toto měření bylo prováděno nedaleko důlního komplexu, který byl osvětlen halogenovým osvětlením. Právě rozptyl tohoto silného světla v aerosolech má za příčinu tuto extrémní hodnotu. Naopak místo s největší přirozenou tmou se nachází nedaleko obce Pečičky. SQM zde naměřil hodnotu jasu 20,93 magnitud. Toto místo bylo velice odlehlé od jakékoli hlavní silnice nebo větší vesnice. Měření probíhalo na rozmezí dvou zemědělských polí. Po nanesení naměřených hodnot do intervalových histogramů bylo patrné, že tvar histogramu se s přibývajícím oblačností mění viz Graf 5-7.

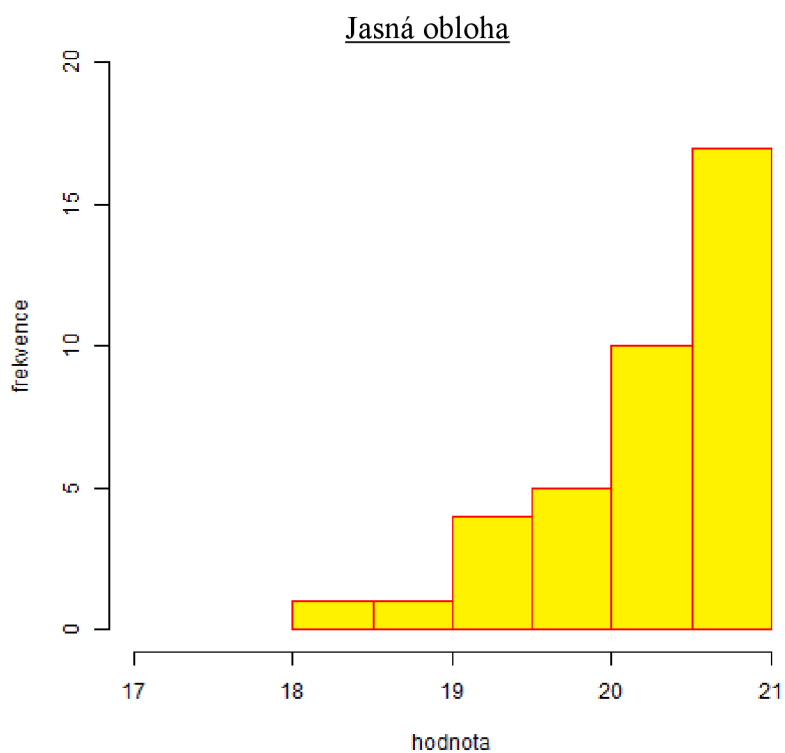
Výsledkem naší analýzy jsou rovnice popisující vztah mezi satelitním měřením a ground based daty.

$$\text{MLHAVO: mag/ArcSec}^2 = 0,3729 * (\text{VIIRS_DNB})^2 - 2,3178 * (\text{VIIRS_DNB}) + 21,124$$

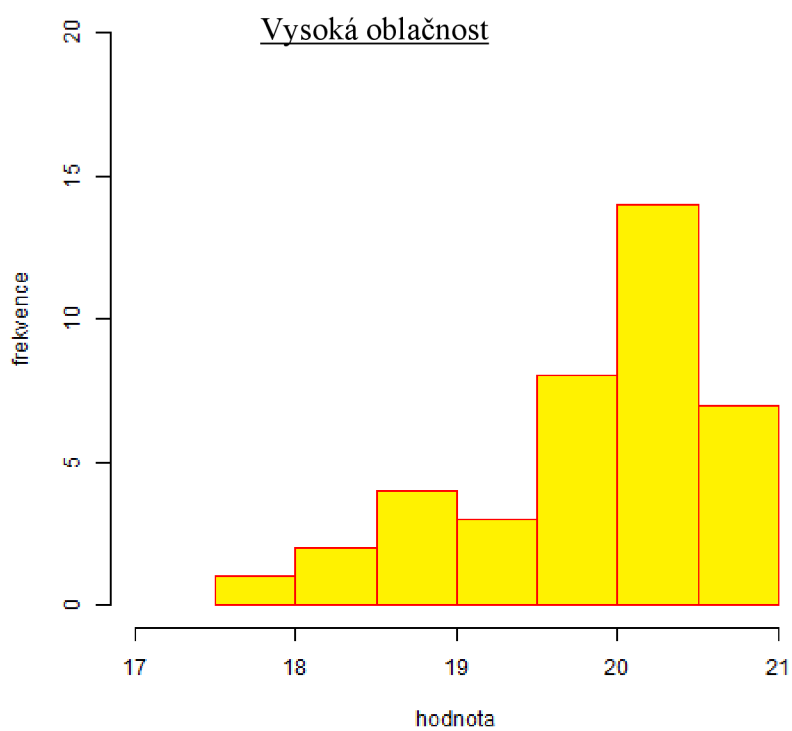
$$\text{OBLAČNO: mag/ArcSec}^2 = 0,4715 * (\text{VIIRS_DNB})^2 - 2,106 * (\text{VIIRS_DNB}) + 21,442$$

$$\text{JASNO: mag/ArcSec}^2 = 0,6317 * (\text{VIIRS_DNB})^2 - 2,3314 * (\text{VIIRS_DNB}) + 21,749$$

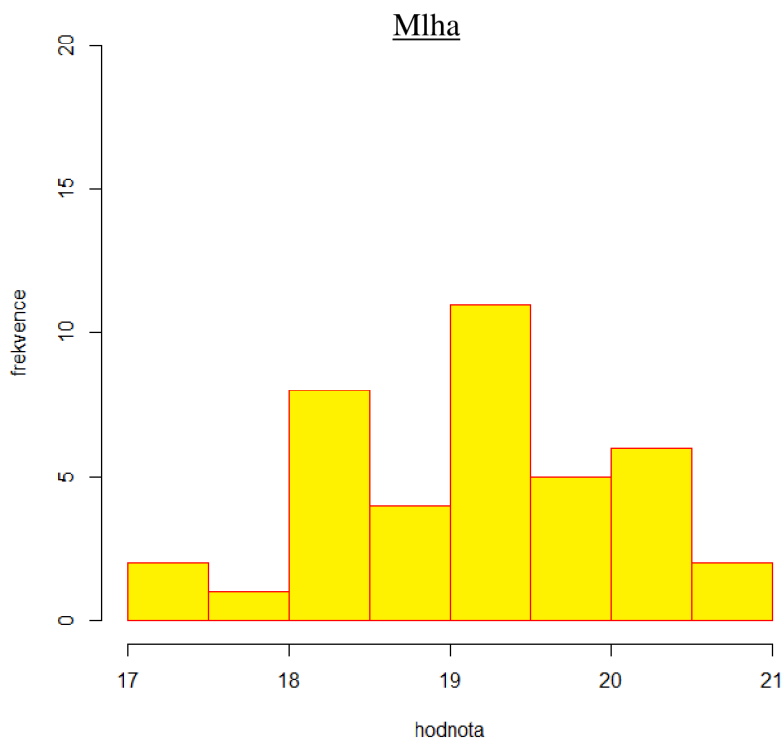
Graf 6 rozložení naměřených hodnot za jasné oblohy



Graf 5 rozložení naměřených hodnot za vysoké oblačnosti



Graf 7 rozložení naměřených hodnot za mlhy



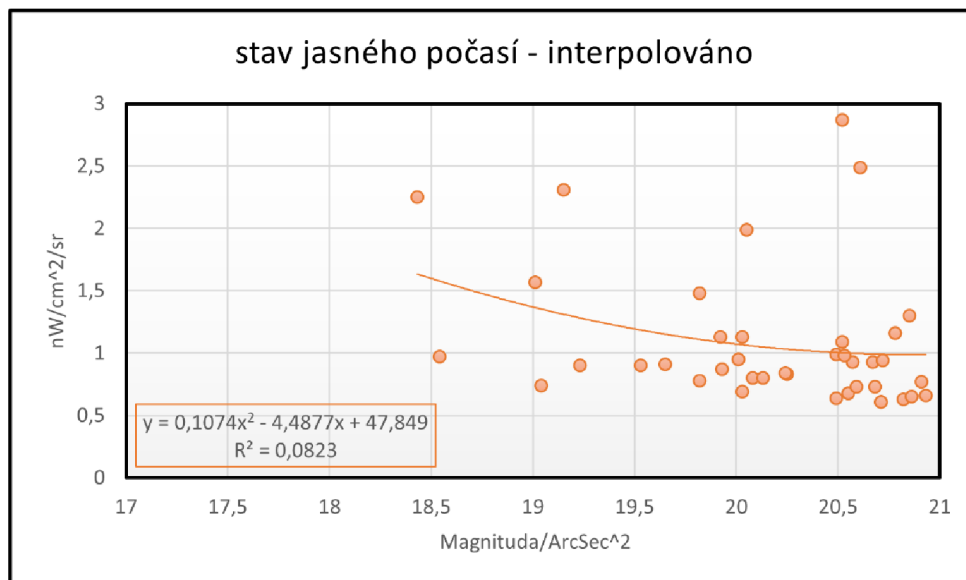
5.1 Modelování světelného znečištění

Důležité je si připomenout, že stupnice magnitud je oproti plošné radianci převrácená. To znamená, že čím je hodnota magnitud vyšší, tím nižší míra umělého světla byla naměřena. Pro každou takovou funkci je nutné určit správný koeficient determinance „**R kvadrát**“. Ten nám prozradí spolehlivost našeho předpisu funkce vůči naměřeným bodům. Jedná se o ukazatel, jak moc jsou veličiny na sobě závislé.

Pro zpřesnění výsledků byla využita metoda bilineární interpolace. Díky ní se nám mírně zlepšila hodnota koeficientu determinance a změnil se i předpis funkce pro každý unikátní stav počasí.

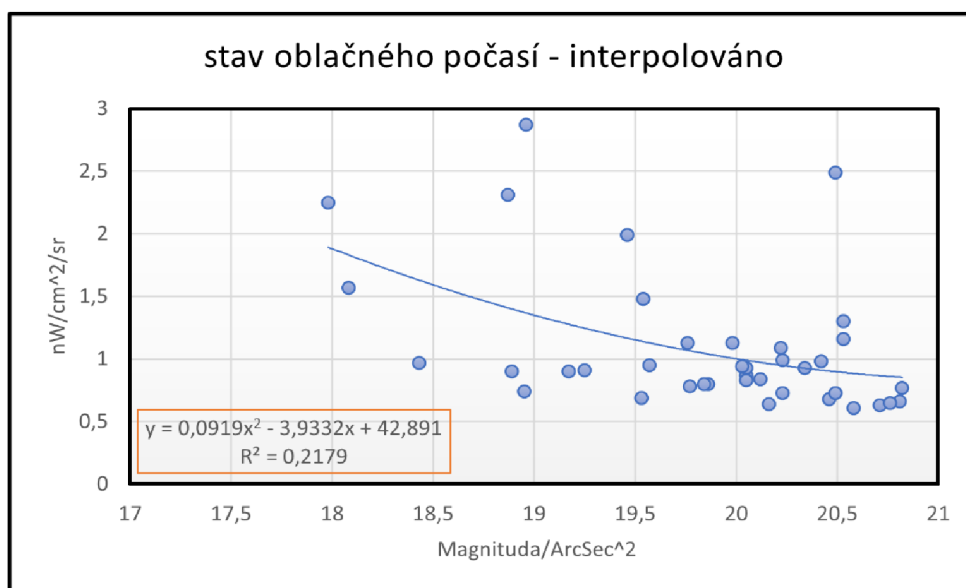
Vůbec nejméně přesných výsledků bylo docíleno při měření za jasné noční oblohy. Nachází se zde hned několik extrémních hodnot, které na první pohled nevykazují žádnou závislost mezi ground-based měřením a měřením DPZ.

Graf 8 závislost ground-based a DPZ dat po interpolaci – jasné počasí



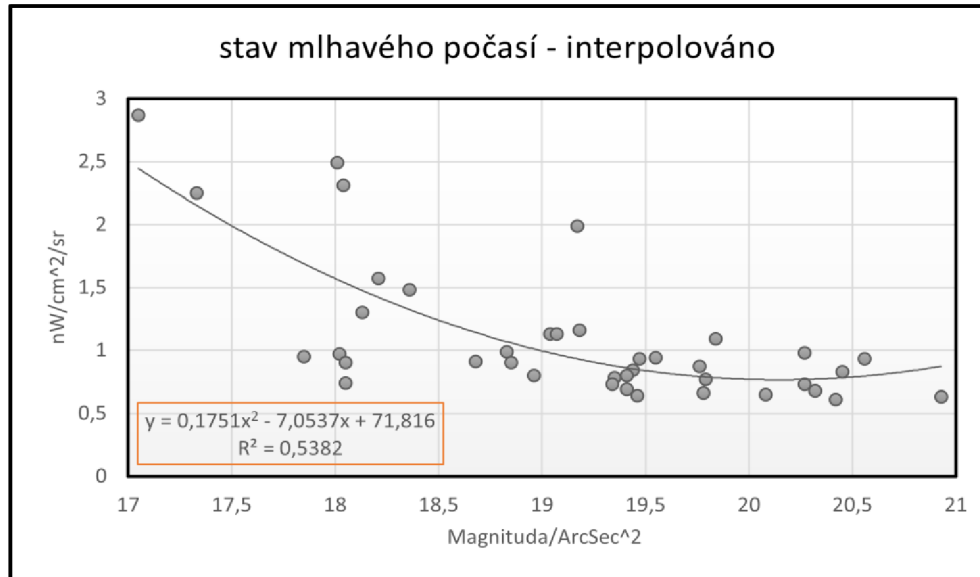
Podobně na tom byly i výsledky z oblačného stavu počasí. Problémy zde opět dělala ta samá místa měření jako u měření za jasné oblohy. Tato místa jsou charakteristická tím, že se nachází v blízkosti silných zdrojů světla. Všechna tato extrémní měření byla udělána těsně za hranicí největších obcí zkoumaného území.

Graf 9 závislost ground-based a DPZ dat po interpolaci – vysoká oblačnost



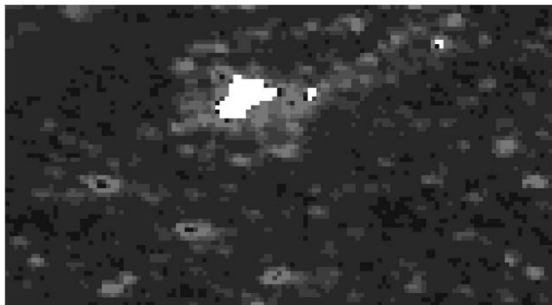
Nejlepších výsledků bylo docíleno při porovnání hodnot za mlhavého počasí. Ale i přesto nebyly závěry příliš přesvědčivé. Proto je zapotřebí zkontrolovat spolehlivost samotných vstupních dat ze sensoru VIIRS.

Graf 10 závislost ground-based a DPZ dat po interpolaci - mlhavo

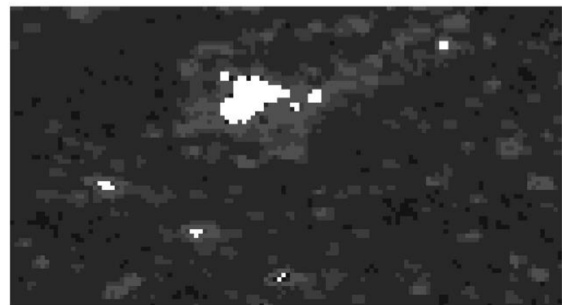


Obrázek 13 výsledné modely světelného znečištění

model pro mlhavé počasí



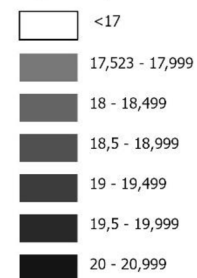
model pro vysokou oblačnost



model pro jasné nebe



Magnituda/ArcSec²



5.2 Proměnlivé světelné znečištění v čase

Při vzájemném porovnání měsíčních dat mezi sebou nám hodnota RMSE ani jednou nepřekročila hranici 0,75. To lze obecně brát jako dobrý výsledek a hodnoty naměřené senzorem VIIRS se dají označit za poměrně konstantní. Důležité je podotknout, že navýšením trénovacích dat bychom došli k přesnějším výsledkům, ale pro naše účely se spokojíme s níže uvedenými závěry.

Ve většině případů se hodnoty sensorů skrze měsíční měření přibližují, ale v několika případech dochází k silnému odchýlení. Shodou okolností se jedná ve třech případech o místa extrémních hodnot měření z našich ground-based pozorování. Jako příklad poslouží měření u obce Kamýk nad Vltavou, kde se naměřené hodnoty z VIIRS sensoru mění takto:

$$\text{Srpen} = 4,18 \text{ [nW/cm}^2\text{/sr]}$$

$$\text{Září} = 2,49 \text{ [nW/cm}^2\text{/sr]}$$

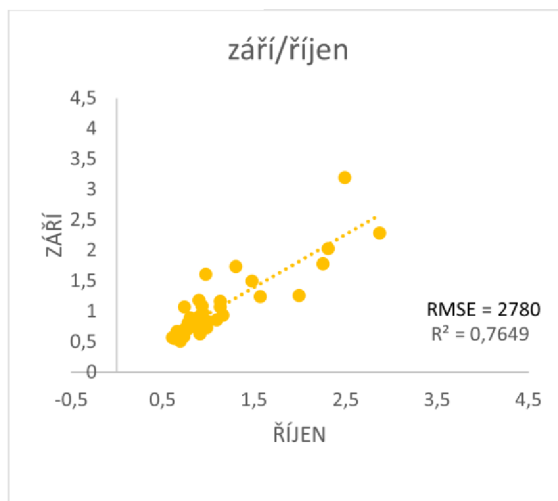
$$\text{Říjen} = 3,19 \text{ [nW/cm}^2\text{/sr]}$$

To nám ukazuje rozdíl 1,69 nW/cm²/sr skrze čtvrt roku měření. Je možné, že právě takové odchylky hodnot některých pixelů znepřesňují naši analýzu. Veliká míra nekonzistence byla změřena na pěti místech měření (viz. Tabulka 1). Tato místa mají společný výskyt silného zdroje světelného znečištění ve svém okolí. Stejná místa zároveň nevykazují korelaci s ground-based měřením v původní analýze.

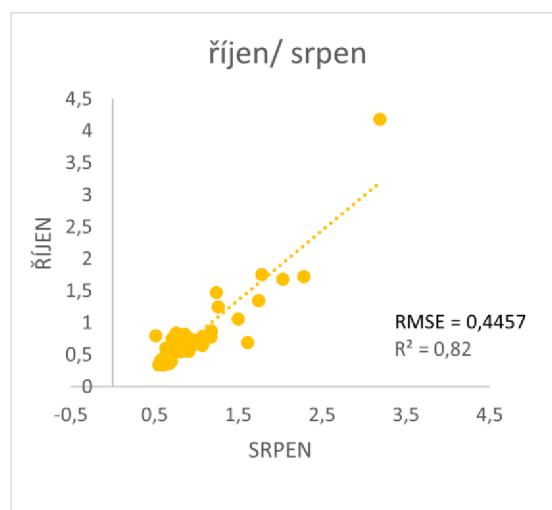
Tabulka 1 místa největších odchylek dle sensoru VIIRS

LOKALITA	data VIIRS (nW/cm ² /sr)		
	srpen	září	říjen
Tisová	2,31	2,03	1,68
Kamýk n. Vlt.	2,49	3,19	4,18
Kamenná	2,87	2,28	1,72
Háje	1,99	1,26	1,25
Milín	2,25	1,78	1,76

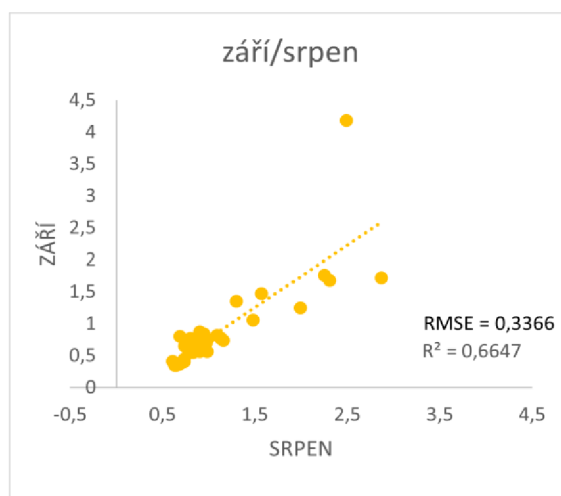
Graf 13 srovnání dat sensoru VIIRS – září/ říjen



Graf 12 srovnání dat sensoru VIIRS – říjen/srpen



Graf 11 srovnání dat sensoru VIIRS – září/srpen



6 Diskuse

Celá vlastní práce byla závislá na ručním sběru dat. Ten byl prováděn za několika předem definovaných podmínek, které byly ve všech případech dodrženy. Ačkoliv by se dal samotný sběr považovat za úspěšný, tak faktem zůstává, že pro vhodnější a přesnější zpracování problematiky modelování světelného znečištění by bylo potřeba více měření. Většina publikovaných vědeckých prací vychází z analýz prováděných na mnohem větším referenčním území s větším počtem naměřených bodů. Pro budoucí měření by bylo z časových důvodů lepší zvolit kvantitu měření nad jejich kvalitou.

Z výsledků jasně vyplývá nekonzistence měření na některých kritických místech. Tato místa mají společný fakt, že se nachází blízko silného zdroje světelného znečištění. Jedná se o měření v těsné blízkosti města Příbram, obce Milín, obce Lety a dvě měření u bývalých důlních zařízení, které jsou osvětlovány výkonnými světlomety. Lorena Nicotera (2022) ve své studii, zkoumající možnou kalibraci SQM pomocí dat DPZ, poukazuje na fakt, že nejpřesnější výsledky mezi sensory DPZ a SQM byly dosaženy na velmi odlehlých a temných místech. Ve své práci taktéž došla k závěru, že s přibližováním se k městům, či obcím mají hodnoty tendenci se více rozcházet.

Ve své práci rovněž zmiňuje vliv vlhkého prostředí na odražený slabých zdrojů světla. Vzhledem k tomu, že veškerá data SQM použita v této práci byla naměřena během zimního období, tak je vhodné zauvažovat i tento faktor. Měření probíhala vždy v období roztátého sněhu, a to vlhkost výrazně ovlivnilo.

Dalším důležitým faktorem při hodnocení závislosti obou přístupů sběru dat je vertikální členitost prostředí. TOMASZ ŚCIEŻOR (2012) ve své práci zkoumá světelné znečištění v horském prostředí. Dochází k závěru, že výrazná výšková členitost může silně ovlivnit pozemní měření. Může se jednat o údolí, ale rovněž i o měření blízko vysokých překážek. Tímto si odůvodňuji některé výkyvy i u svých dat. Mnoho měření bylo prováděno několik metrů od lesního pokryvu. Právě ten mohl bránit přetoku světla pře horizont a prostředí uměle ztemňoval.

I přesto se povedlo potvrdit původní myšlenku, že s přibývajícím oblačností se světelné znečištění zvyšuje. Důvodem je množství aerosolů v ovzduší, které odráží antropogenní světlo zpět k zemskému povrchu a nedovolují mu být propuštěno do vrchních pater atmosféry.

Vliv Aerosolů na šíření antropogenního světla ve své práci potvrzuje i Ming Liu (2019). Ten se zaměřil na modelování umělého světla ve velkých asijských aglomeracích, kde se vlivem znečištění ovzduší může zvyšovat míra jasů noční oblohy až dvojnásobně (Ming Liu a kol. 2019).

Při analýze výsledků bylo nutné si uvědomit, že rozlišení dat z optických sensorů DPZ není pro naše účely ideální. Pro zpřesňování výsledků bylo podstatné zvolit vhodnou interpolační metodu na základě, které dojde k převzorkování a zjemnění rastru. Metoda bilineární interpolace, která byla použita, se při srovnání výsledků z ostatních interpolací jevila jako nejvíce vyhovující a nejvíce zvyšovala koeficient determinance při porovnání ground-based dat s těmi ze sensoru VIIRS. I po zpřesnění hodnoty spolehlivosti předpisu funkcí, pro všechny případy měření, nejsou výsledky příliš přesvědčivé. Nejlepšího výsledku dosahuje vztah měření pro mlhavé počasí a to zhruba 54% spolehlivosti.

Další příčinou mohla být míra spolehlivosti sensoru VIIRS. Ta byla ověřena pro tři po sobě jdoucí měsíce. A následně byl proveden výpočet střední kvadratické chyby. Jako trénovací data byla použita bodová měření z původního sběru ground-based dat. I zde by bylo možné vybrat větší počet dat, pro zpřesnění spolehlivosti.

7 Závěr

Tato bakalářská práce měla za cíl popsat problematiku světelného znečištění ve vztahu k člověku a přírodě. Rovněž si dala za cíl poukázat na možná rizika v nadměrném nadužívání antropogenního osvětlení.

Zabývala se také možnostmi sledování trendů světelného znečištění. V dnešní době existuje mnoho způsobů, jak antropogenní světlo mapovat a kvantifikovat. Ať už jde o pozemní pozorování anebo o pozorování pomocí sensorů DPZ. Možná je i kombinace obou přístupů. Výsledky této práce potvrzují existenci silných vlivů na měření a kvantifikování světelného znečištění v atmosféře. Jedná se především o meteorologické jevy, které dokáží výrazně ovlivnit šíření umělého světla. Na základě naměřených dat byly sestaveny modely světelného znečištění pro každý unikátní stav počasí. Z těchto modelů jasně vyplývá, že množství aerosolů v ovzduší má výrazný vliv na šíření antropogenního světla. Chování světelného znečištění během noci je ale stále ještě poměrně neprozkoumané a je potřeba mu věnovat více pozornosti.

Společnost vnímá světelné znečištění jako závažný environmentální problém, který má přesah do mnoha vědeckých i sociopolitických disciplín. Na základě prováděných měření je tedy důležité usilovat o implementaci opatření na snížení šíření světelného znečištění.

8 Seznam použitých zdrojů

8.1 Seznam literárních zdrojů

Alejandro Sánchez de Miguel, Christopher C.M. Kyba, Martin Aubé, Jaime Zamorano, Nicolas Cardiel, Carlos Tapia, Jon Bennie, Kevin J. Gaston, Colour remote sensing of the impact of artificial light at night (I): The potential of the International Space Station and other DSLR-based platforms, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 224 (2019), 92-103 s.

Andreas Hänel, Thomas Posch, Salvador J. Ribas, Martin Aubé, Dan Duriscoe, Andreas Jechow, Zoltán Kollath, Dorien E. Lolkema, Chadwick Moore, Norbert Schmidt, Henk Spoelstra, Günther Wuchterl, Christopher C.M. Kyba, Measuring night sky brightness: methods and challenges, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Volume 205, 2018, Pages 278-290

Aubrecht, C., Elvidge, C.D., Ziskin, D., Baugh, K.E., Tuttle, B., Erwin, E., Kerle, N., Observing power blackouts from space-A disaster related study (2009) 1–2 s.

BORTLE, J. (2001) Introducing the Bortle Dark-Sky Scale. [online]. únor 2001 [cit. 2013-04-16] Dostupné z: <http://media.skyandtelescope.com/documents/BortleDarkSkyScale.pdf>

BURNE, B.H. (1972), Pollution by light. *The Lancet* 299 (7751), 642.

C. Chalkias, M. Petrakis, B. Psiloglou, M. Lianou, Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS, *Journal of Environmental Management*, Volume 79, Issue 1, 2006, Pages 57-63

Cheung, Maria (2009-11-29). "Graveyard Shift Work Linked to Cancer". news. University of Connecticut Health Center. <http://today.uhc.edu/headlines/2007/nov07/graveyard>. Retrieved 2012-07-06.

C.R Benn, S.L Ellison, Brightness of the night sky over La Palma, *New Astronomy Reviews*, Volume 42, Issues 6–8, 1998, Pages 503-507

Edna Guk, Noam Levin, Analyzing spatial variability in night-time lights using a high spatial resolution color Jilin-1 image – Jerusalem as a case study, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 163, 2020, Pages 121-136

E. Belas, 1.1.2011, Polovodičové detektory záření s.3. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/polovodice>

Eisenbeis, G. & Hänel, A. (2009) Light pollution and the impact of artificial night lighting on insects. *Ecology of Cities and Towns* (ed. by M. McDonnell, A. Hahs and J. Breuste), pp. p. 243– 263. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Eisenbeis, G. (2006) Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (ed. by C. Rich and T. Longcore), pp. p. 191– 198. Island Press, Washington, DC.

Fiorentin P., Bettanini C., Lorenzini E., Aboudan A., Colombatti G., Bertolo A. (2018 červen), MINLU: an instrumentál suit efor monitoring light pollution from drones or airballons (MetroAeroSpace), 274-278s.

Gary Steffy, Architectural Lighting Design, John Wiley and Sons (2001) ISBN 0-471-38638-3

Hale, J., Davies G., Fairbrass, A.J., Matthews, T.J., Rogers, C.D., Sadler, J.P., 2013 Mapping lightscapes: spatial patterning of artificial lighting in an urban landscape PLoS One 8 (5) e61460.

HOLLAN, J. (2011) Venkovní osvětlení v obcích. Brno: ZO ČSOP Veronica, 2011. 64 s.

Kloog, I; Haim, A; Stevens, RG; Portnov, BA (2009). "Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men". *Chronobiology international* 26 (1): 108-25. PMID 19142761.

LENŤA, L., SUCHAN, P. (2005) Proč se zabývat světelným znečištěním? [online]. [cit. 2013- 04-15]. Dostupné z: http://www1.asu.cas.cz/cesky/svetlo_a_tma.pdf

Metcal, J.P., 2012, Detecting and Characterizing Nighttime Lighting Using Multispectral and Hyperspectral Imaging. Doctoral dissertation NPS. s.18

Ming Liu, Weshan Li, Baogang Zhang, Qingli Hao, Xiaowei Guo, Yuchuan Liu, 2019, Research on the influence of weather conditions on urban night light environment. s.10

Nicotera, Lorena (2022) Monitoring light Pollution – Calibration of SQMs using SUOMI satellite data. s.42

P. Cinzano, F. Falchi, Quantifying light pollution, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Volume 139, 2014, s. 13-20,

RISSEL, B., (1935), *Praise of Idleness and Other Essays*. Routledge.

Sciezor, Tomasz & Kubala, Marek & Kaszowski, Wiesław. (2012). Light Pollution of the Mountain Areas in Poland / Zanieczyszczenie Światłne W Obszarach Górskich W Polsce. *Archives of Environmental Protection*. 38. 10.2478/v10265-012-0042-4. s. 4.,9.

ŠAJDÍKOVÁ, Martina, Patrik Maďa a Josef Fontana. Vývoj prvopočátečního oka. In: FONTANA, Josef a kolektiv autorů. *Funkce buněk lidského těla* [online]. Univerzita Karlova. Dostupné z: <http://fbt.cz/wp-content/uploads/2013/12/>

TOM STREISSGUTH. John Glenn. 2005. Lerner Publication Company 2005. 5 s.

van Geffen, K.G., van Grunsven, R.H.A., van Ruijven, J., Berendse, F. & Veenendaal, E.M. (2014) Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecology and Evolution*, 4, 2082– 2089.

8.2 Seznam obrázkových zdrojů

Obrázek 1 – <https://www.eso.org/public/images/dark-skies/>

Obrázek 2 – <https://promertech.cz/sonel-lxp-10a-luxmeter>

Obrázek 3 – <http://www.supra-dalekohledy.cz/jasomer-unihedron-sqml-s-optikou-3-5297.htm>

Obrázek 4 – <https://www.nanosats.eu/sat/nitesat>

Obrázek 5 – Lenka Janečková <https://adoc.pub/elektricke-zdrojesvila2d703fcfa7025b95dad55c271d6c605b71159.html> - upraveno

Obrázek 6 – Lenka Janečková <https://adoc.pub/elektricke-zdrojesvila2d703fcfa7025b95dad55c271d6c605b71159.html> - upraveno

Obrázek 7 – Lenka Janečková <https://adoc.pub/elektricke-zdrojesvila2d703fcfa7025b95dad55c271d6c605b71159.html> - upraveno

Obrázek 8 – Lenka Janečková <https://adoc.pub/elektricke-zdrojesvila2d703fcfa7025b95dad55c271d6c605b71159.html> - upraveno

Obrázek 9 – Světelné znečištění.cz, <https://svetelneznecesteni.cz/svitme-spravne/osvetleni-domu-a-zahrady/> – upraveno

Graf 1 – Světelné znečištění.cz, <https://svetelneznecesteni.cz/svitme-spravne/verejne-osvetleni/> – upraveno

Obrázek 12 – <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/performing-analysis/cell-size-and-resampling-in-analysis.htm>

9 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk

9.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Bortleova stupnice.....	4
Obrázek 2 - SQM.....	6
Obrázek 3 - Luxmetr.....	6
Obrázek 4 – Mise NITESat.....	7
Obrázek 5 – popis klasické a halogenové žárovky	9
Obrázek 6 – popis zářivky	9
Obrázek 7 – popis a schéma sodíkové výbojky	10
Obrázek 8 – princip světelných diod	11
Obrázek 9 – prevence úniky zbytečného světla.....	15
Obrázek 10 – Zkoumané území dle dat VIIRS.....	19
Obrázek 11 – Místa na kterých byla prováděna vlastní ground-based měření pomocí SQM	20
Obrázek 12 – princip bilineární interpolace	23
Obrázek 13 výsledné modely světelného znečištění.....	30

9.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 místa největších odchylek dle sensoru VIIRS	31
---	----

9.3 Seznam grafů

Graf 1 – Vývoj intenzity osvětlení během noci	15
Graf 2 korelace VIIRS a ground-based za mlhavého počasí	22
Graf 3 korelace VIIRS a ground-based za oblačného počasí	22
Graf 4 korelace VIIRS a ground-based za jasného počasí.....	22
Graf 5 rozložení naměřených hodnot za vysoké oblačnosti	27
Graf 6 rozložení naměřených hodnot za jasné oblohy	27
Graf 7 rozložení naměřených hodnot za mlhy	28
Graf 8 korelace ground-based a DPZ dat po interpolaci – jasné počasí	29
Graf 9 korelace ground-based a DPZ dat po interpolaci – vysoká oblačnost.....	29
Graf 10 korelace ground-based a DPZ dat po interpolaci - mlhavo	30
Graf 13 srovnání dat sensoru VIIRS – září/srpen	32
Graf 11 srovnání dat sensoru VIIRS – říjen/srpen.....	32
Graf 12 srovnání dat sensoru VIIRS – září/ říjen	32

9.4 Seznam použitých zkratek

DPZ.....	<i>Dávkový Průzkum Země</i>
SQM.....	<i>Sky Quaity Meter</i>
LED.....	<i>Light Emitting Diode</i>
VIIRS.....	<i>Visible Infrared Imaging Radiometer Suite</i>
DNB.....	<i>Day/Night Band</i>
RMSE.....	<i>Root-Mean-Square Deviation</i>
GPS.....	<i>Global Positioning System</i>
ESRI.....	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
WGS84.....	<i>World Geodetic System 1984</i>
SJTS-K.....	<i>Systém Jednotné Trigonometrické Síť Katastrální</i>
DMSP.....	<i>Defense Meteorological Satellite Program</i>
OLS.....	<i>Operational Linescan System</i>
TIR.....	<i>Thermal Infrared</i>
VIS.....	<i>Visible Imagery</i>

Přílohy