

Herman Mikuž, Tomaž Zwitter
Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerze v Ljubljani

Širjenje umetne svetlobe v atmosferi in vpliv na svetlobno onesnaženje nočnega neba s primeri iz Slovenije.

The propagation of artificial light in the atmosphere and its influence on light pollution of the night sky. Examples from Slovenia.

Povzetek

Opazovanja nočnega neba iz različnih lokacij po Sloveniji kažejo, da je nebo onesnaženo tudi nad področji, ki so razmeroma daleč od glavnih virov umetne svetlobe. Enake ugotovitve dajejo tudi študije, ki so jih naredili na inštitutu ISTIL⁽⁴⁾ (Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso). To nekoliko presenetljivo ugotovitev si lahko pojasnimo z naravo širjenja umetne svetlobe v atmosferi. Na nenaseljenih področjih namreč večino onesnaženja prispevajo oddaljeni viri, ki sevajo svetlobo pod majhnimi koti nad horizontom. Ti viri so v veliki večini nezasenčene ali delno zasenčene svetilke zunanje razsvetljave. Študije inštituta ISTIL⁽⁵⁾ nadalje kažejo, da na razdalji vsega 20 km od svetlobnega vira kar 95% svetlobnega onesnaženja v zenitu prispeva svetloba, ki prihaja pod majhnimi koti nad horizontom.

To ugotovitev potrjujejo tudi posnetki nočnega neba nad Slovenijo, ki smo jih naredili s standardno opremo ter osvetlitvijo in so zato med seboj primerljivi. Tudi na posnetkih, ki smo jih naredili iz oddaljenih, nenaseljenih področij je vidno žarenje neba, ki sega nekaj deset stopinj nad obzorje in očitno prihaja iz gosto naseljenih področij z veliko gostoto zunanje razsvetljave.

Omenjena tuja študija in domači primeri nakazujejo, da je umetna svetloba polutant, ki v nasprotju z drugimi, kot so na primer hrup, emisije škodljivih plinov, ipd., vpliva na zelo velika področja in je dejansko omejena le z ukrivljenostjo Zemlje. Tej posebnosti bi morali biti prilagojeni tudi ukrepi. Če želimo na tako majhnem ozemlju ohraniti temno nebo bodočim generacijam, ohraniti biotsko raznovrstnost in okolje nasploh, bi morali poskrbeti za zasenčeno razsvetljavo na celotnem ozemlju države. Poleg tega je razsvetljava pod majhnimi koti v bivalnih okoljih odgovorna tudi za bleščanje, na katerega so še zlasti občutljivi starejši ljudje. Končno pa so zasenčene svetilke tudi primernejše zaradi manjše porabe električne energije, saj nimamo svetlobnih izgub nad vodoravnico, zato lahko z uporabo sijalk manjše moči dosežemo enako osvetlitev.

Abstract

Night sky observations from the various locations accross Slovenia show the light polluted sky even in the areas that are relatively far away from the main artificial light sources. The same conclusions were found by the Light Pollution Science and Technology Institute (ISTIL)⁽⁴⁾ in Padova. Somewhat surprising conclusion can be explained by the nature of light propagation in the atmosphere. Over unpopulated areas,

the majority of light pollution is contributed by distant sources, emitting light at low angles over the horizon. Mainly it comes from the unshielded or badly shielded luminaires. It is estimated that at only 20 km from the light source the 95% of the zenith night sky brightness is due to the light emitted at small angles over the horizon.

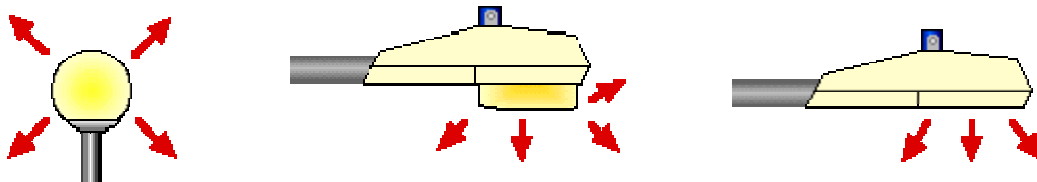
The same results were found by analyzing the night sky images, obtained from various remote locations in Slovenia. They were taken with a standard equipment setup, so that they can be compared directly. Even on images obtained from remote locations we found the presence of skyglow, extending some ten degrees over the horizon. They were identified with densely populated areas, which have also high density of outside light sources.

These studies show that contrary to some other pollutants like noise or air pollutants, the artificial light is affecting very large areas, being efficiently limited only by the curvature of Earth. All possible measures or regulations for the reduction and control of the light pollution should be adopted according to these findings. If we really want to preserve the night sky for future generations, the only effective measure would be to use the fully shielded fixtures accross the whole territory of Slovenia. Also it should not be neglected that in more populated areas, the light emission at low angles is causing disability glare that affects mostly older persons.

Finally, the fully cut-off fixtures are more suitable because they have no waste of light over the horizontal. The same intensity of light flux on lighted surfaces can be achieved with the luminaire having lower capacity, resulting in lower energy consumption.

1. Širjenje umetne svetlobe v atmosferi

Ker večina umetne svetlobe prihaja neposredno ali posredno od svetilk zunanje razsvetljave si poglejmo kako njihova konstrukcija vpliva na svetlobnotehnične lastnosti in posledični vpliv na okolje. Med tipi zunanjih svetilk razlikujemo nezasenčene, delno zasenčene in popolnoma zasenčene (glej sliko 1).



Slika 1: Nezasenčena, delno zasenčena in popolnoma zasenčena svetilka

Kakšen je vpliv posameznega tipa svetilke na širše okolje, svetlobno onesnaženje in porabo energije? Pri tem je pomemben kriterij delež svetlobnega toka, ki ga svetilka oddaja nad horizontalno ravnino. Del svetlobnega toka, ki gre nad vodoravnico je namreč okoljsko problematičen, ker povzroča bleščanje, osvetljuje nočno nebo in je obenem tudi nekoristno izgubljena energija. Že na osnovi skic lahko sklepamo, da je okoljsko najmanj sprejemljiva nezasenčena svetilka saj več kot polovico svetlobnega toka oddaja

nad vodoravnico, navzgor v nebo. Najbolj sprejemljiva pa je popolnoma zasenčena svetilka, ki nima emisije nad vodoravnico. Na širše okolje vpliva le preko odboja svetlobe od tal (običajno med 5 in 10%). Nekatere vmes so delno zasenčene svetilke, ki preko razpršilnega pokrova (lom, odboj in sipanje svetlobe) oddajajo nad vodoravnico do 5% celotne emisije.

V celotni populaciji svetilk javne razsvetljave, v Sloveniji daleč prevladujejo delno zasenčene tipa CX, proizvajalca Siteco. Najdemo jih tako v mestnih središčih, ob glavnih prometnicah, avtocestah, ipd. V zadnjih desetih letih so v veliki meri zamenjale različne starejše tipe svetilk. Hkrati je to najpogosteje uporabljena svetilka pri novih instalacijah. Zaradi svoje konstrukcije pošiljajo znaten del svetlobnega toka nad vodoravnico in so bistveno prispevale k povečanju svetlobnega onesnaženja v Sloveniji v preteklem desetletju.

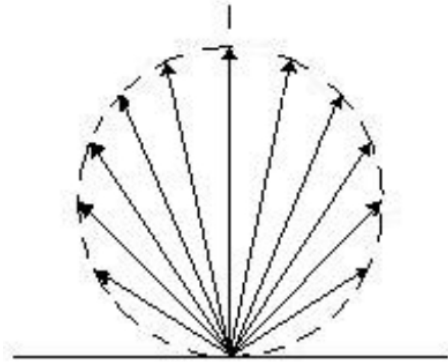


Slika 2: V Sloveniji najpogostejše zunanje svetilke – levo z izbočeno kapo in emisijo nad vodoravnico – desno z ravnim steklom in brez emisije nad vodoravnico. Proizvajalec Siteco.

V zadnjem času je proizvajalec Siteco ponudil na trgu ekološko primernejše svetilke z ravnim steklom tipa CX in ST. Primer so nekatere ulice v Ljubljani, z njimi je v celoti opremljen mednarodni mejni prehod v Jelšanah, ipd. To je vsekakor vzpodbudno, vendar bi morali za bistveno izboljšanje stanja tovrstne svetilke uporabljati kjerkoli je to možno.

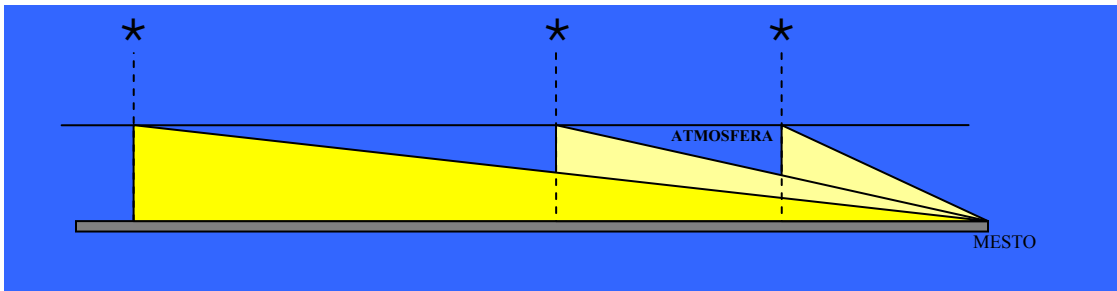
Nekateri standardi, npr. UNI-10819⁽⁸⁾ dopuščajo emisije nad vodoravnico od nekaj % do 23%, kar morda na prvi pogled ni veliko. V primerjavi s popolnoma zasenčeno svetilko ob upoštevanju 10% odboja od cestišča to pomeni 230% povečanje emisije nad vodoravnico. Podobne vrednosti emisij nad vodoravnico so tudi v osnutku uredbe o svetlobnem onesnaženju, ki je v pripravi na Ministrstvu za okolje in prostor.

Poglejmo si natančneje kako se umetna svetloba širi v atmosferi in prispeva k svetlobnemu onesnaženju. V osnovi prihaja iz dveh virov: prvi so svetila, ki zaradi svoje konstrukcije oddajajo del svetlobe navzgor, nad vodoravnico in to praviloma pod majhnimi koti nad horizontalno ravnino (slika 3 levo). Drugi vir pa je odboj svetlobe od tal. Značilnost odboja svetlobe od tal (asfalta) je, da ima takoimenovano Lambertovo porazdelitev (glej sliko 3 desno), za katero je značilna majhna intenziteta pri majhnih kotih in velika intenziteta v smeri zenita.⁽¹⁾



Slika 3: (desno) odbita svetloba s tal predstavlja obsežno vendar nizko postavljeno in vodoravno svetilo. Tako tla svetijo predvsem navzgor, manj pa postrani. Svetlobo v poševni smeri dodatno blokirajo zgradbe, drevesa, ograje,...ipd. Stranska ploskvice ne povsem zasenčene svetilke (levo) pa je svetilo, ki je postavljeno visoko (na vrhu droga) in ima skoraj navpično izhodno površino. Te svetlobe zidovi, grmovje in celo drevesa ne blokirajo, ker so preprosto nižji. Obenem gre večino svetlobe s te ploskvice v smeri blizu vodoravnice, zato se to svetilo zlahkoto vidi kilometre daleč.

Torej prihaja svetloba, ki je oddana pod majhnimi koti nad horizontom večinoma neposredno od nezasenčenih svetilk. Zaradi geometrije, ki jo je enostavno razumeti (glej sliko 4) se emisija svetlobe pod majhnimi koti glede na vodoravnico širi zelo daleč od vira, medtem ko svetloba, ki je oddana pod velikimi koti onesnažuje le dele atmosfere v bližnji okolici vira.



Slika 4: ker ima zemeljska troposfera (plast atmosfere, kjer poteka vremensko dogajanje) končno debelino (cca 10km) na osvetljenost nočnega neba nad oddaljenimi območji odločilno vplivajo svetila, ki oddajajo svetlobo pod majhnimi koti nad vodoravnico. Red velikosti teh kotov je $0-10^\circ$. Prikazani so emisijski koti svetil, ki osvetljujejo nebo opazovalcu, ki gleda zvezdo v zenitu na treh različnih razdaljah od vira umetne svetlobe.

Čim bližje je opazovalec svetlobnemu viru (npr. mesto), tem večji so emisijski koti svetil, ki osvetljujejo nebo nad njim. V mestih pa igra pomembno vlogo tudi odboj od tal. Z oddaljevanjem opazovalca od svetlobnega vira, nebo nad njim osvetljujejo le še izvori, ki sevajo pod majhnimi koti nad horizontom. Odboj od tal na velikih razdaljah praktično ne igra več nobene vloge.

V prvem primeru gre za osvetljevanje atmosferskih delcev, ki so zelo oddaljeni od vira, pri čemer se ta svetloba združi s preostalo svetlobo, ki prihaja iz oddaljenih virov ter tako povzroča seštevalni učinek in pomembno povečanje nivoja svetlosti nočnega neba. Druga pa predvsem osvetljuje področje nad virom, se pa ne širi daleč in nima kumulativnih učinkov.⁽⁵⁾

Kot žarka nad vodoravnico (°)	Razdalja, kjer zapusti troposfero za h=5km (km)	Razdalja, kjer zapusti troposfero za h=10km (km)
1	165	263
3	85	155
5	55	105
7	40	78
10	28	56
15	19	37
20	14	27

Tabela 1: Simulacija širjenja svetlobe iz umetnih virov pod majhnimi koti nad vodoravnico in za debelino troposfere 5 in 10 km. Emisija svetlobe pod koti 0-5 stopinj je posebej problematična, ker se širi zelo daleč in je praktično omejena le z ukrivljenostjo Zemlje. Če uporabimo simulacijo na ozemlju Slovenije je jasno, da vsaka posamezna nezasenčena svetilka osvetljuje nebo nad celotno državo. Čeprav gre pri posamezni svetilki za majhne svetlobne tokove pa le-ti ob upoštevanju kumulativnega učinka celotne populacije zunanje razsvetljave nikakor niso zanemarljivi. Pomen uporabe cut-off svetilk je očiten. Pri izračunu razdalj je upoštevana ukrivljenost Zemlje. Ker je ob jasnih nočeh v troposferi na višinah nad 5 km zelo malo vlage in prašnih delcev ocenjujemo, da je simulacija za višino troposfere 5 km bližje dejanskemu stanju.

Ocenjujejo, da na razdalji vsega 20 km od svetlobnega vira kar 95% svetlobnega onesnaženja v zenitu prispeva svetloba, ki prihaja pod majhnimi koti nad horizontom (med 90° in 135° takoimenovanega kota gama). Ker se svetloba prosto širi preko 200km daleč, jo praktično zastira le ukrivljenost Zemlje. Nad večjimi območji je onesnaženje neba z umetno svetlobo v veliki meri rezultat seštevanja učinkov oddaljenih virov, ki sevajo svetlobo pod majhnimi koti. Ocenjujejo, da znotraj Padove (300000 prebivalcev), prispevajo 20% svetlosti neba v zenitu ob jasnih nočeh svetlobni viri, na širšem območju.⁽⁵⁾

2. Vpliv sevanja pod majhnimi koti na svetlobno onesnaženje nad Slovenijo

V Sloveniji je svetlobno onesnaženje v hitrem porastu. Tako v mestih, primestjih in na podeželju se postavljajo nove instalacije zunanje razsvetljave. Ocenjujemo, da gre v 95% primerov za nezasenčene ali delno zasenčene svetilke, ki svetijo tudi neposredno v nebo in ga osvetljujejo do stopnje, ko so tako amaterska kot tudi profesionalna astronomska opazovanja resno ogrožena. Delež popolnoma zasenčenih svetilk je zelo majhen in po naših ocenah ne presega 5% vseh zunanjih svetilk. Poleg stalnega večanja števila svetilk zbuja skrb tudi povečevanje izseva sijalk, kar neposredno vpliva na povečanje svetlobnega onesnaženja. Cestni razsvetljavi je treba dodati še dekorativno razsvetljavo

cerkva in ostalih objektov ter osvetljene reklamne panoje, katerih število se hitro povečuje in mu ni videti konca. V zadnjem času posebej zaskrbljuje postavljanje takoimenovanih "jumbo" panojev vzdolž avtocestnega križa, ki so orjaških dimenzij (100 m²) in so tako močno osvetljeni (800 lx)⁽⁷⁾, da jih opazimo že iz nekajkilometerske razdalje. Tako dekorativna, kot tudi reklamna razsvetljava sta okoljsko problematični. Večina fasad in panojev je namreč osvetljenih od spodaj navzgor, pri čemer gre velik del svetlobe neposredno v nebo. Ker področje svetlobnega onesnaženja še ni regulirano v nobeni od okoljskih uredb, je stanje skrb zbujujoče.

Ugotovitve iz prejšnjega poglavja smo želeli preveriti z instrumentalnim monitoringom iz več lokacij po Sloveniji. S standardizirano opremo bomo dokumentirali stanje svetlobnega onesnaženja neba nad lokacijami obstoječih astronomskih observatorijev ter potencialnih lokacij, kjer bi se zaradi relativno temnega neba lahko izvajala astronomska opazovanja. Prvi rezultati monitoringa so predstavljeni v tem članku, z njimi pa bomo seznanili tudi Ministrstvo za okolje in prostor.

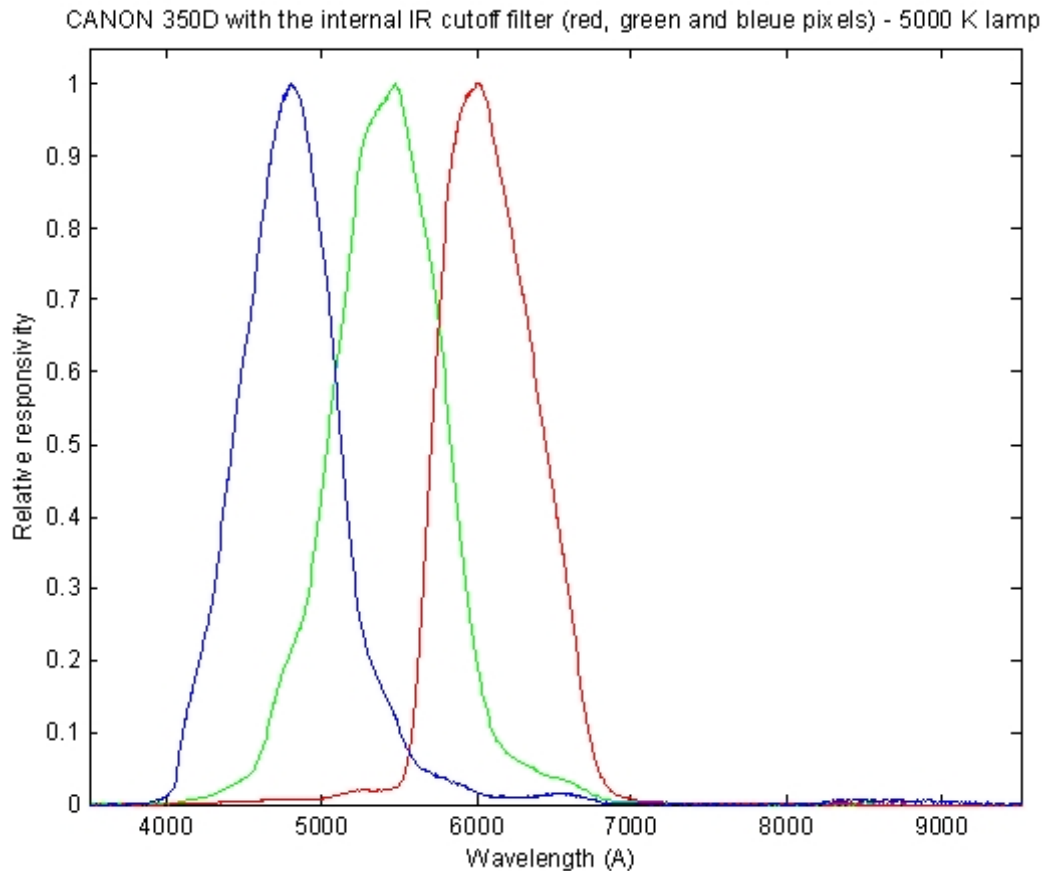
Monitoring svetlobnega onesnaženja

Monitoring se izvaja s Canon digitalnimi fotoaparati tipa EOS 1Ds⁽¹⁾, 20D in 350D, s skoraj identičnimi spektralnimi karakteristikami senzorjev in objektivom ribje oko Peleng 3.5/8 mm, pritrjenem na fiksno stojalo. Opazovanja se izvajajo ob jasnih nočeh, ne glede na opazovalne pogoje (temperatura, vlaga) z namenom, da dobimo čimbolj celovito sliko svetlobnega onesnaženja nad Slovenijo.



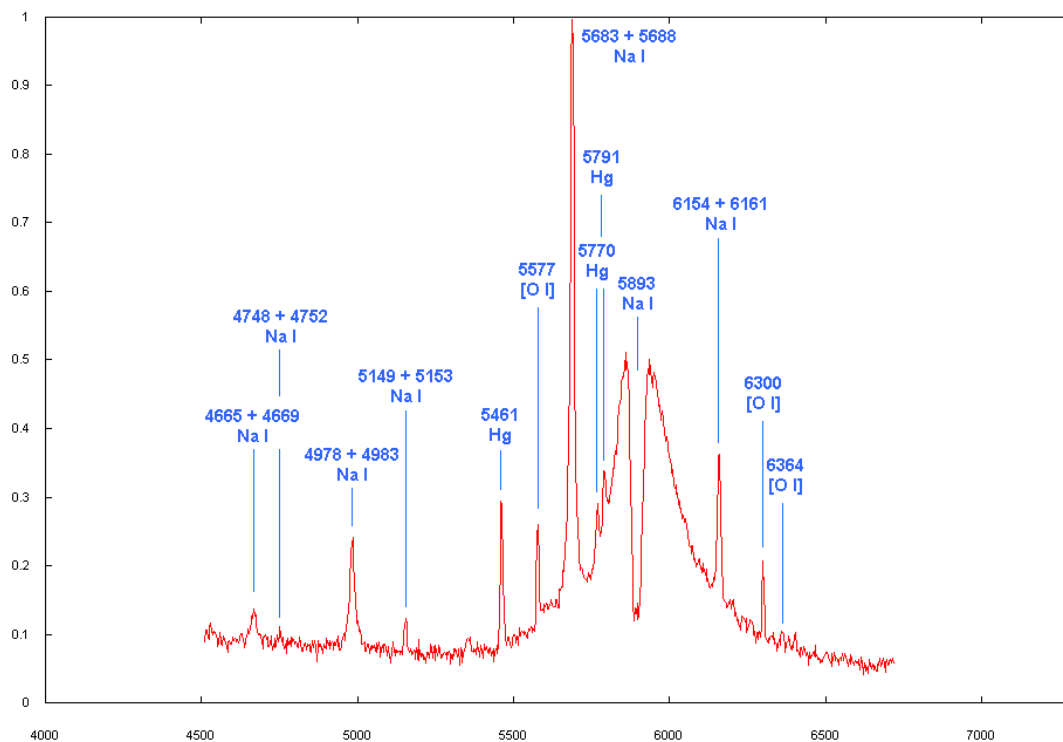
Slika 6: Digitalni fotoaparat Canon EOS 1Ds, velikost senzorja 4064x2704 pik, (25x36mm), opremljen z objektivom ribje oko Peleng 3.5/8 mm, ki naredi 180° projekcijo neba v krog s premerom 24 mm. Tako z enim samim posnetkom pokrijemo celotno vidno nebo.

Senzorji serije digitalnih fotoaparotov Canon EOS imajo identične spektralne karakteristike in so optimizirani za detekcijo v vidnem spektru. Pri nastavitvah občutljivosti nad ISO 400 učinkovito zaznavajo tudi razmeroma majhne svetlobne tokove. Njihova spektralna občutljivost pokriva celoten vidni spekter od 400 do 700 nanometrov. To je obenem tudi spektralno območje v katerem sevajo visokotlačne natrijeve ter živosrebrne svetilke zunanje razsvetljave, ki so v Sloveniji največ v uporabi.



Slika 7: Standardna spektralna odzivnost senzorja na svetlobo halogenske svetilke v digitalnem fotoaparatu Canon 350D. Maksimum odzivnosti v posameznem spektralnem območju je normaliziran na celo enoto.⁽²⁾

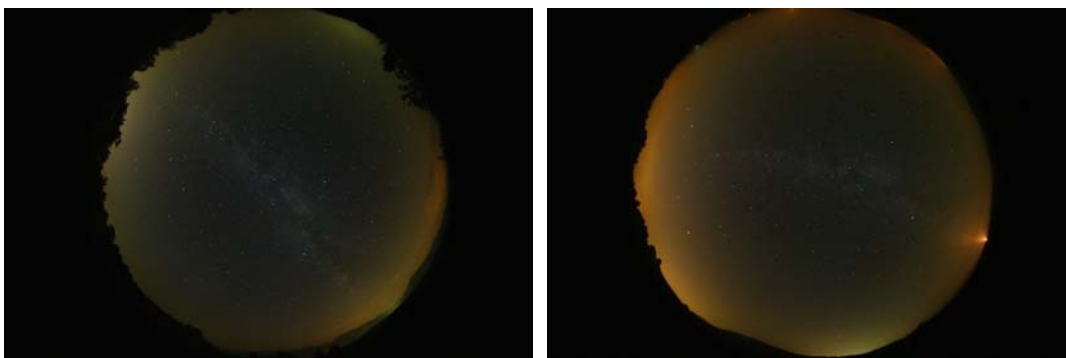
Iz slike 7 je razvidno, da je optimalna spektralna odzivnost Canonovega senzorja v območju valovnih dolžin 400 do 700 nanometrov, kar se zelo dobro ujema s spektralno porazdelitvijo emisijskih črt živosrebrnih svetilk (Hg) in visokotlačnih natrijevih svetilk (Na I) na sliki 8. Zato smatramo, da so navedeni digitalni fotoaparati primerni za snemanje svetlobnega onesnaženja.



Slika 8: Spekter nočnega neba z emisijskimi črtami živosrebrnih svetilk (Hg) in visokotlačnih natrijevih svetilk (Na I).⁽³⁾ Ordinatna os je v Angstromih.

Posnetki svetlobnega onesnaženja na lokacijah Observatorija Črni Vrh in Observatorija Zaplana

Snemanje smo izvedli v jasni noči 1.-2. september 2005 s postavitvijo, ki je prikazana na sliki 6. Kamero smo orientirali po glavnih straneh neba. Na posnetkih je sever zgoraj, vzhod pa na levi strani. Občutljivost kamere je bila nastavljena na ISO 1000, osvetlitve pa so trajale 180 sekund. Določili smo jih eksperimentalno. Da bi čimbolj ohranili verodostojnost posnetkov jih nismo dodatno procesirali. Posneli smo jih v RAW formatu, ki ohrani informacije brez izgub. Odštet je bil le termični šum kamere.



Slika 9: Posnetek neba iz observatorijev na Črnem Vrhu (levo) in na Zaplani (desno) v noči 1.-2. september 2005. Svetel trak, ki se vije čez posnetek je naša Galaksija. Nad obema lokacijama je vidno žarenje neba, ki prihaja od oddaljenih virov, ki sevajo pod majhnimi koti nad horizontom. Sevanje v oranžni barvi prihaja od visokotlačnih natrijevih, v zelenkasti barvi pa od živosrebrnih svetilk. Foto A. Mohar in H. Mikuž. Originalni posnetki so dosegljivi na spletni strani <http://www.observatorij.org/Monitoring.html>

Identifikacijo virov onesnaženja smo opravili s pomočjo karte in kotomera. Prikazani so v tabeli 2.

Observatorij Črni Vrh (730m)			Observatorij Zaplana (600m)		
Smer neba	Naselje	Oddaljenost (km)	Smer neba	Naselje	Oddaljenost (km)
J-Z	Trst	40	J-JZ	Logatec	5
	Gorica	35	Z	cerkev	3
S-SZ	Idrija	8	S-SZ	cerkve	5
S-V	Logatec	12	SV-JV	Ljubljana	22
	Ljubljana	35	JV	Vrhnika	5

Tabela 2: Identifikacija in oddaljenost virov svetlobnega onesnaženja

Na obeh posnetkih je močno prisotno žarenje neba, ki se pokriva s smerjo naselij iz tabele 2. Na lokaciji Zaplana sega svetlobni smog v smeri Vrhnik in Ljubljane vse do višine 45° nad obzorjem, v smeri Logatca pa nekoliko manj. V ostalih smereh nebo osvetljujejo žarometi iz bližnjih cerkva. Od celotne površine neba ga je okoli 50% omejeno ali sploh neuporabno za astronomska opazovanja.

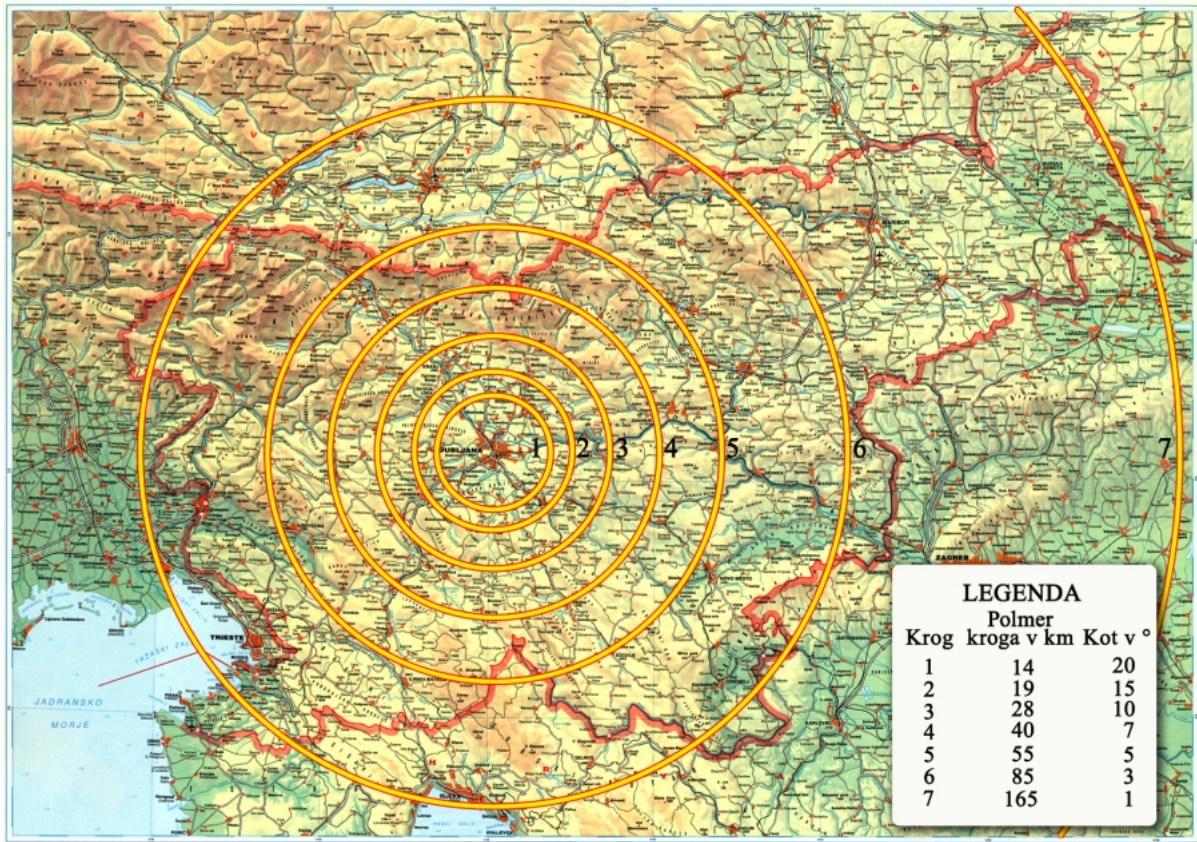
Nebo nad Črnim Vrhom je nekoliko temnejše, kot na Zaplani. Svetlobni smog v smeri Ljubljane sega do višine 30°, v smeri Trsta in Furlanije pa do višine 20°. Viden je sicer večji del Galaksije, ki pa proti obzorju izgine v soju Ljubljane in Trsta. Od celotne površine neba ga je okoli 30% omejeno uporabno za astronomska opazovanja.

Iz posnetkov lahko zaključimo, da je na lokaciji Zaplana stanje onesnaženja neba kritično, na lokaciji Črni Vrh je nebo sicer temnejše, vendar je predvsem v smeri proti Ljubljani osvetljenost neba močno povečana in to kljub razmeroma veliki oddaljenosti od vira umetne svetlobe. To razmeroma visoko stopnjo onesnaženja pripisujemo prav svetlenju slabo zasenčenih svetilk iz oddaljenih virov pod majhnimi koti nad obzorjem.

3. Zaključek

Monitoring svetlobnega onesnaženja kaže, da je nočno nebo močno onesnaženo tudi na oddaljenih lokacijah, kjer sicer v bližini ni večjih naselij. Sem lahko prihaja umetna svetloba le iz oddaljenih urbanih področij. Ključen problem pri omejevanju onesnaženja je torej preprečevanje sevanja nad vodoravnico, ki očitno prihaja od nezasenčenih ali slabo zasenčenih svetil. To se zdi edina smiselna fizikalna razlaga za širjenje umetne svetlobe na velike razdalje. Glede na velike prostorske dimenzije širjenja svetlobe pod majhnimi koti (glej sliko 10) bo za resen in dolgoročen nadzor svetlobnega onesnaženja

nujno potrebno v čim večji meri uporabljati popolnoma zasenčene svetilke, kot edino učinkovito tehnično rešitev.



Slika 10: Prikaz prostorskega dosega sevanja svetilk pod majhnimi koti nad ozemljem Slovenije. Za izhodišče smo vzeli Ljubljano, ki je v naši državi največji vir svetlobnega onesaženja. Koncentrični krogi povezujejo točke v gornji plasti troposphere ($h=5$ km), kjer jo žarki pod značilnimi koti iz tabele 1 zapustijo.

Če se bo v Sloveniji nadaljeval sedanji trend povečevanja nezasenčene zunanje razsvetljave, resna astronomska opazovanja ne bodo več možna že v začetku naslednjega desetletja. Nujno je spoznanje, da je tudi nočno nebo del naše naravne dediščine, ki je nimamo pravice uničevati, ampak jo moramo ohraniti bodočim generacijam. Vsako drugačno ravnanje bi bilo neodgovorno in škodljivo. Za to že obstaja potrebna tehnologija cut-off svetilk, ki je na trgu dostopna in ni bistveno dražja od starejše, ki povzroča še vrsto drugih okoljskih problemov. Njihova pomembna prednost pa je tudi učinkovitejša izraba energije. Vsekakor je na potezi Ministrstvo za okolje in prostor z napovedano uredbo o zmanjšanju svetlobnega onesaženja.

4. Zahvala

Podjetju Infocona d.o.o. se iskreno zahvaljujemo za izposajo digitalnega fotoaparata Canon 1Ds. Gospodu Matjažu Gostinčarju iz Urada RS za seizmologijo pa za pomoč pri izdelavi karte prostorske razporeditve širjenja umetne svetlobe pod majhnimi koti.

5. Literatura:

1. Askey, P., Canon EOS 1Ds review , 2002
<http://www.dpreview.com/reviews/canoneos1ds/>
2. Buil, C., Canon EOS 350D IR-cut filter removal operation performances and image samples (2005), <http://www.astrosurf.org/buil/350d/350d.htm>
3. Buil, C., Spectral calibration,
<http://www.astrosurf.org/buil/us/spe2/hresol4.htm>
4. Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C.D., The first world atlas of the artificial night sky brightness, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 328, 689-707 (2001).
5. Cinzano, P., Technical measures for an effective limitation of the effects of light pollution, Proceedings of a conference light pollution and the protection of the night environment, IDA regional meeting, Venice, 193-205 (2002).
<http://dipastro.pd.astro.it/cinzano/download/ProcVenice1200.pdf>
6. CIE technical report: Guidelines for minimizing sky glow, CIE TC 4-21, draft report, 97-02-21.
7. Mohar, A., Svetlobno onesnaženje, bleščanje in primerjalne meritve, Posvetovanje razsvetljava 2005, Postojna 13. - 14. oktober 2005 (v tisku).
8. UNI 10819, Luce e illuminazione, impianti di illuminazione esterna. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano (1999).