

Rušivé svetlo

Časť 12 – Modelovanie úrovne rušivého svetla a rozloženia jasů na nočnej oblohe

Mgr. Miroslav Kocifaj, PhD., Astronomický ústav SAV

Úvod

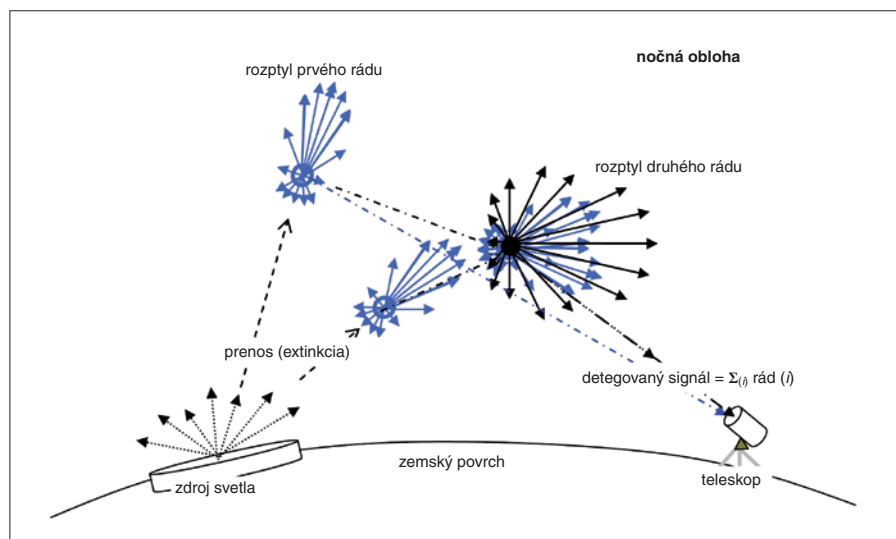
Rušivé svetlo sa stalo dôležitým problémom hlavne v niekoľkých posledných desaťročiach, a to predovšetkým v silne industrializovaných a husto osídlených oblastiach sveta. Problémom svietenia je neúmerne presvetlenie nočnej oblohy. To do značnej miery znemožňuje astronomické pozorovania. Ak ešte pred pár desiatkami rokov boli astronomické pozorovania v mnohých lokalitách Európy viac-menej bezproblémové, dnes sa každý môže stretnúť s problémom rušivého svetla takmer všade (vysokohorské observatória nevynímajúc). Rušivé svetlo treba s určitou povážnosťou považovať za vedľajší „produkt“ rýchleho ekonomického rozvoja aj v mnohých regiónoch Slovenska a Čiech. Záujem o problematiku rušivého svetla preto z roka na rok neustále rastie. Svetlo môže narušovať prirodzený stav nočného prostredia hlavne za podmienok zamračenej oblohy, kedy sa prudko zvyšuje úroveň svetelného toku smerujúceho k zemi. Pre možnosť aplikovať požiadavky na obmedzenie rušivého svetla v praxi je nutné problém objasniť a kvantifikovať. Až na základe získaných poznatkov bude možné skôr či neskôr navrhovať alternatívy vedúce k zníženiu úrovne rušivého svetla.

Vzhľadom k uvedenému má poznanie príčin premenlivosti rozloženia difúzneho svetla na oblohe veľký význam. Ak sa hovorí o zdrojoch generujúcich difúzne svetlo oblohy, prevažne sú myslené veľkoplošné objekty, akými sú napr. priemyselné komplexy, ale aj celé mestá či väčšie aglomerácie. Jedným z hlavných cieľov medzinárodného výskumu v tejto oblasti je vypracovanie metód výpočtu rozloženia žiary/jasu na nočnej oblohe v závislosti na fyzikálnych charakteristikách pozemných zdrojov svetla. To umožní astronómom teoreticky odhadnúť „svetelný šum“ v rôznych častiach oblohy, a tak eliminovať tento špecifický zdroj chýb. Týmto spôsobom by potenciálne bolo možné zlepšiť kvalitu observačných údajov, čo následne umožní presnejšie vyhodnocovať napr. fotometrické merania vzdialených objektov. Z tradičných dôvodov sa funkčnosť akéhokoľvek teoretického riešenia testuje pri hraničných podmienkach, čo v uvádzanom prípade pred-

stavuje dva extrémny: jasná a homogénne zamračená obloha. Je zrejmé, že zamračená obloha je pre astronomické účely absolútne nezaujímavá, ale predstavuje ideálny základ pre overenie principiálnej funkčnosti navrhovaného algoritmu. V prípade, že sa aj pri tomto modeli oblohy preukáže správnosť konceptu riešenia, je algoritmus pripravený na použitie za astronomicky relevantných (teda bezoblačných) podmienok. Pre kvantitatívny popis prenosu viditeľného žiarenia v zem-

Problematika teoretického modelovania difúzneho svetla nočnej oblohy

Väčšina hviezd žiari v prvom priblížení ako absolútne čierne teleso (t. zn. že ich spektrá sú spojené v zmysle Planckovho zákona). Hviezdy sú považované za bodové izotropné zdroje a ich žiarivý výkon možno formulovať v jednotkách žiarivého výkonu Slnka. Svetelný výkon hviezd pritom možno počítať zo známej hodnoty bolometrického jasů. Z tradičných dôvo-



Obr. 1. Princíp viacnásobného rozptylu svetla v atmosfére

skej atmosfére je bezpodmienečne nevyhnutné do modelu zakomponovať špecifické vlastnosti prostredia, ako sú napr. optické charakteristiky aerosólových častíc či molekulárnej atmosféry [1]. Tento fyzikálny prístup umožní počítať spektrálnu aj integrálnu žiaru oblohy a tiež jas oblohy za rôznych meteorologických podmienok a deklarovať tak možnosti astronomických pozorovaní v okolí vybraných lokalít.

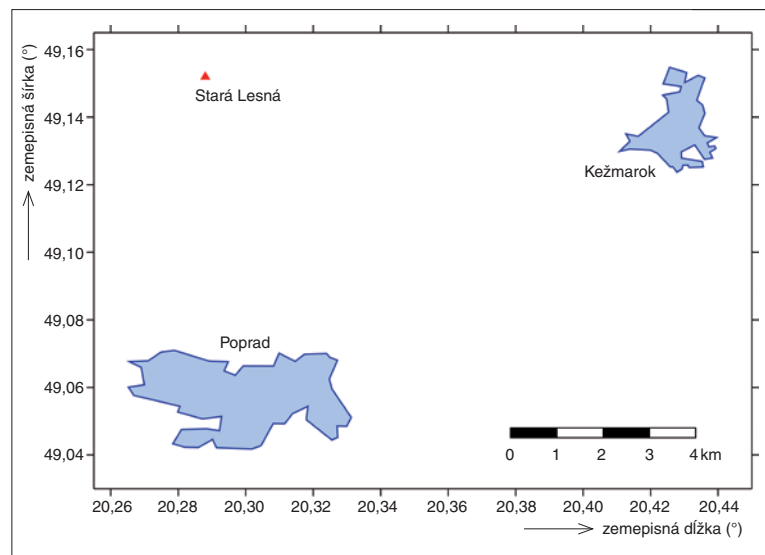
Poznámka: Keďže v oblasti profesionálnej astronómie sa prevažne pracuje s energetickými veličinami, ako sú spektrálna žiara, žiarivý tok, žiarivý výkon a pod., budú na tých miestach, kde to bude potrebné, používané práve tieto pojmy. Inak bude pozornosť sústredená na svetelné charakteristiky, akými sú jas, svetelný tok, svetelný výkon a pod.

dov sa však v astronómii používa pojem hviezdnej veľkosti, ktorá sa meria v magnitúdach. Ak je v praxi použitý detektor s filtrom, ktorého krivka priepustnosti kopíruje spektrálnu citlivosť ľudského oka, sú merané veličiny označované za vizuálne. Je dôležité pripomenúť, že funkcia spektrálnej odozvy ľudského oka závisí na svetelných podmienkach. V nočných hodinách, pri jasoch menších než zhruba $10^{-2} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ je ľudské oko citlivé hlavne na zeleno-modré svetlo s maximom na vlnovej dĺžke 498 nm. Funkcia popisujúca spektrálnu odozvu ľudského oka za týchto podmienok sa označuje ako $V'(\lambda)$. S narastajúcou úrovňou jasů sa maximum citlivosti presúva do zelenej časti spektra s maximom na vlnovej dĺžke 555 nm. Krivka spektrálnej odozvy sa potom symbolicky označuje ako $V(\lambda)$. Na viditeľnosť

hviezd majú vplyv predovšetkým dva faktory. Svetlo hviezd je vo všeobecnosti oslabované atmosférou [2] a charakter tohto oslabenia sa môže v čase meniť [3]. Druhý faktor súvisí s rastom závojového jasu oblohy vplyvom rozptylu svetla, ktoré bolo pôvodne emitované pozemskými

k rozptylu dochádza na každej vlnovej dĺžke. Oba procesy, absorpcia aj rozptyl, sú zodpovedné za deformáciu pôvodného spektra. Preto spektrum hviezd na hornej hranici atmosféry nemusí byť (a ani nie je) totožné s tým na zemskom povrchu. Zmena spektra sa však prejaví aj u pozem-

rozptylu [7], [8]. Táto metóda má jednoduchý koncept a počíta aj s t. zv. samoožarovaním atmosféry, čo možno objasniť nasledovne. Predpokladajme, že pozemný svetelný zdroj emituje isté množstvo energie do horného polopriestoru. Svetelný lúč podlieha rozptylu v každom elementárnom objeme atmosféry. Táto „prvotne“ rozptýlená časť svetelnej energie sa vracia smerom k zemskému povrchu a môže byť detegovaná meracím prístrojom alebo pozorovateľom. Časť prvotne rozptýlených lúčov však opäť interaguje s atmosférou, a skôr než dosiahnu zemský povrch, podliehajú „druhotnému“ rozptylu. Meraný signál je teda vlastne súčtom všetkých príspevkov (obr. 1), ktoré sa zvyčajne nazývajú „rády rozptylu“ [9]. V prípade opticky hustých prostredí je takýto model pomaly konvergentný, nakoľko zložky vyšších rádo rozptylu môžu prevýšiť príspevok nižších rádo rozptylu. Pre získanie dostatočne presného výsledku by v takom prípade bolo potrebné počítať sumu cez nemalý počet členov radu (n -tý člen radu pritom zodpovedá n -tému rádu rozptylu). V opticky riedkom prostredí, akým je aj bezoblačná alebo podoblačná atmosféra, je táto me-



Obr. 2. Geografické umiestnenie observatória v Starej Lesnej

zdrojmi a následne rozptýlené v zemskej atmosfére do všetkých smerov (teda aj smerom k zemi [4]). Zvyšovanie množstva svetla, napr. v procese dynamicky sa rozširujúcej urbanizácie či industrializácie prostredia [5], vedie k rastu jasu pozadia, a tým k znižovaniu kontrastu objektov (hviezd) pozorovaných na nočnej oblohe. Ak napr. vzrastie jas pozadia 2,5krát, zníži sa viditeľnosť hviezd o jednu magnitúdu. Ukazuje sa, že priemerná extinkcia sa v posledných niekoľkých rokoch príliš nemení, a tak súčasným faktorom znižovania viditeľnosti hviezd a kvality astronomických pozorovaní je predovšetkým difúzne svetlo oblohy generované pozemskými zdrojmi.

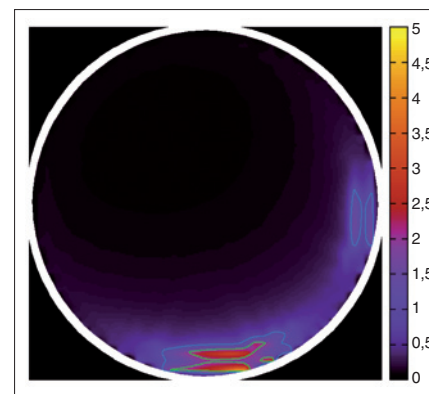
Snahy v tejto oblasti výskumu evidentne smerujú k zostaveniu realistického modelu, ktorý by dokázal predpovedať úroveň difúzneho svetla v rôznych častiach oblohy za premenlivých meteorologických podmienok a pri ľubovoľnom rozložení svetelných zdrojov v okolí miesta pozorovania. Aby bolo možné takýto model vytvoriť, je potrebné pochopiť procesy prenosu a transformácie elektromagnetickej energie v prostredí nehomogénnej atmosféry.

Treba si uvedomiť, že prenos elektromagnetického žiarenia v disperznom prostredí je sprevádzaný nielen poklesom intenzity pôvodného lúča, ale i vznikom novej zložky – rozptýleného žiarenia [6]. Zatiaľ čo absorpcia žiarenia má selektívny charakter (čo značí, že v niektorých častiach spektra sa takmer vôbec neprejavuje),

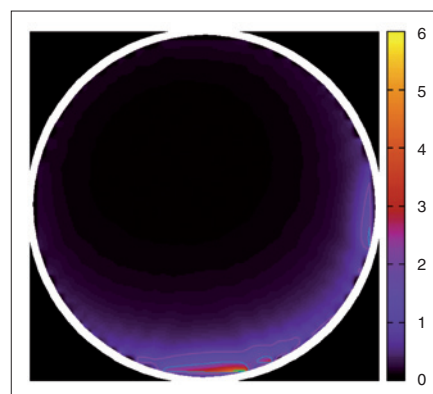
ných zdrojov svetla, a teda u difúzneho svetla oblohy. Z dôvodu rozptylu možno na oblohe pozorovať isté typické rozloženie jasov, pričom funkcia popisujúca zmeny jasu s uhlovou vzdialenosťou od zdroja svetla sa zvykne nazývať *indikatrixou*.

Modelovanie prenosu viditeľného žiarenia v atmosfére je jedným zo spôsobov predurčovania priestorovej štruktúry žiary alebo jasu. V súčasnosti existuje viacero metód pre výpočet charakteristík rozptýleného monochromatického aj polychromatického žiarenia. Voľba tej-ktorej metódy závisí na požadovanej presnosti simulácie. Najmenšou presnosťou sa vyznačujú parametrické (tokové) metódy.

Dostatočne presné výsledky poskytuje metóda rozkladu na jednotlivé rády



Obr. 4. Teoretický jas homogénne zamračenej nočnej oblohy v Starej Lesnej simulovaný pomocou single-scatter algoritmu; hodnoty jasu sú uvádzané v mcd^{-2} , výška spodnej hranice oblakov je 2 km



Obr. 3. Teoretický jas nočnej oblohy v Starej Lesnej simulovaný za bezoblačných podmienok pomocou single-scatter algoritmu; hodnoty jasu sú uvádzané v $\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2}$

tóda stále veľmi výhodná. Rozdiel medzi konvergenciou pre anizotropný a izotropný rozptyl pritom nie je príliš veľký. Pripomeňme, že k izotropnému rozptylu dochádza vtedy, ak každý elementárny objem atmosféry emituje do všetkých smerov rovnaké množstvo svetelnej energie, nezávisle na tom, ako je tento objem osvetlený. Takýto model je však príliš idealistický a je možno ho v istom priblížení uplatniť len pre oblaky alebo hustú hmlu. Takmer výhradne sa preto hovorí o anizotropnom – to značí na smere závislom, rozptyle.

Vstupom do teoretického modelu popisujúceho transformáciu svetelnej energie v atmosfére sú zvyčajne mikrofyzikál-

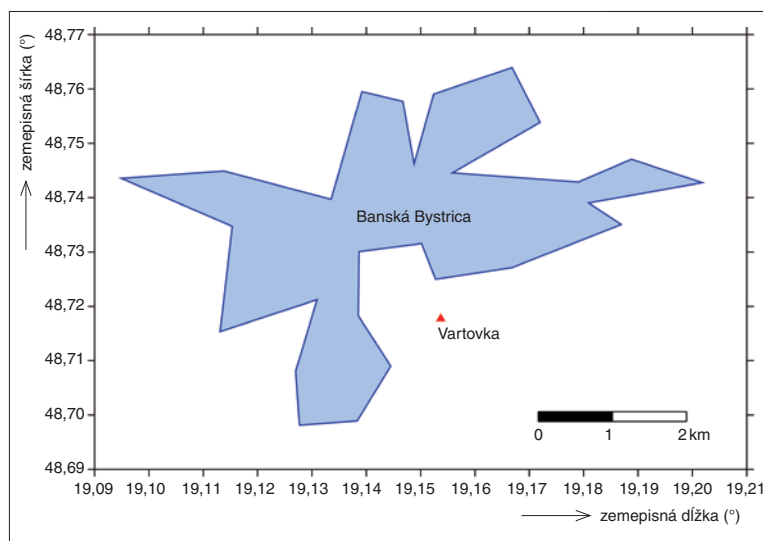
ne charakteristiky atmosféry v danej lokalite. Okrem vlastností plynných zložiek sú to predovšetkým koncentrácia, rozmerová distribúcia a index lomu aerosólových častíc, spektrálne albedo zemského povrchu ako aj spektrálne albedo spodnej hranice oblačnej vrstvy (v prípade zamračenej oblohy), vertikálna stratifikácia koeficienta extinkcie (resp. oslabenia) a pod. U oblačnosti treba počítať s premenlivou odrazivosťou (albedom) [10], s premenlivou výškou spodnej hranice oblakov a tiež s vplyvom celkovej geometrie (pozorovateľ – oblačnosť – pozemné svetelné zdroje).

S ohľadom na rozmanitú štruktúru zdrojov svetla vo vonkajšom prostredí sa svetlo produkované týmito zdrojmi šíri do všetkých smerov [16]. Značné množstvo svetelného toku je vyžiarené do hornej hemisféry, a to ako u neclonených, tak aj u clonených svetidiel. Dôvodom je odraz od okolitých prekážok alebo od zemského povrchu. Garstang [17] navrhol model priestorového diagramu svetivosti veľkej mestskej aglomerácie. Tento model je vhodný pre simulovanie distribúcie svetla produkovaného komunálnymi zdrojmi [18]. Jeho nedostatkom je však to, že nezohľadňuje napr. spektrum pre-

ponduje s modelmi prezentovanými Mizonom [22] alebo Narisadom a Schreuderom [23]. Ukážkové výpočty boli realizované pre dve observatória, ktoré sú situované v odlišných lokalitách s odlišnými podmienkami. V prvom prípade ide o observatórium v Starej Lesnej, ktoré je v dostatočne veľkej vzdialenosti od významných svetelných zdrojov – teda od miest Poprad a Kežmarok (pozri obr. 2).

Nadmorská výška pozorovacieho stanovišta je 560 m, pričom vzdialenosť od Popradu aj Kežmarku je zhruba 10 km. Výpočty, ktoré boli realizované single-scatter algoritmom zohľadňujú stredný zákal atmosféry okolo 4 až 5. Zjednodušene povedané, je predpokladané, že reálna atmosféra oslabuje svetelný tok v takej miere ako štyri až päť čistých molekulárnych atmosfér. Táto hodnota je typická pre prímestské a vidiecke regióny. Z výpočtov vyplýva, že efekt oboch miest je za bezoblačných podmienok zreteľný hlavne na horizonte (ako dokumentuje obr. 3).

V prípade oblačnosti s výškou spodnej hranice oblakov 2 km sa na horizonte, tesne nad svetelnými zdrojmi, objavuje svetelný stĺp. Je zrejmé, že takýto efekt vzniká v dôsledku difúzneho odrazu na oblakoch (obr. 4). Hoci je pojem difúzneho odrazu široko zaužívaný, treba si uvedomiť, že v podstate ide o rozptyl v hustých oblačných vrstvách. Takýto rozptyl vykazuje slabú smerovú závislosť, a preto sa



Obr. 5. Geografické umiestnenie observatória Vartovka

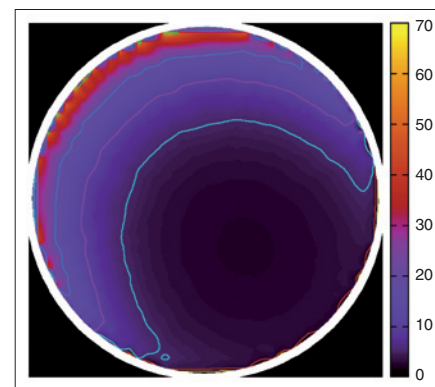
Je dobre známe, že optické vlastnosti aerosólu vykazujú veľkú priestorovú a časovú premenlivosť vzhľadom na rôznorodosť procesov vzniku, prenosu a transformácie častíc a tiež v súvislosti s prevládajúcimi meteorologickými podmienkami v danej lokalite [11]. Koncentrácia aerosólových častíc je viazaná na lokálne zdroje znečistenia a môže sa meniť z dôvodu chemickej transformácie, nárastu rozmerov – koagulácie častíc [12]. Problémom tejto doby je neustále zväčšovanie množstva prachových častočiek uvoľňovaných do atmosféry z dôvodu kontinuálneho nárastu priemyselnej činnosti [13]. V blízkosti priemyselných zón preto možno pozorovať priamu súvislosť medzi emisiou častíc a optickými vlastnosťami atmosféry [14]. Intenzita rozptýleného svetla pritom priamo odráža fyzikálny stav prostredia, predovšetkým však zmeny v aerosólovej substancii vzduchovej hmoty. Je preto evidentné, že zvláštnu pozornosť treba sústrediť na interakciu viditeľného žiarenia s aerosólom, nakoľko aerosól predstavuje najnestabilnejšiu optickú zložku atmosféry (ak sa neuvažuje oblačnosť [15]). Nestabilita populácie aerosólových častíc sa veľmi zreteľne prejaví aj na premenlivosti indikatri- sy rozptylu v rôznych vrstvách atmosféry.

vládajúcich svetelných zdrojov. Uskutočnené merania pritom ukazujú na skutočnosť, že nárast úrovne rušivého svetla nekorešponduje len s hustotou populácie, ale aj s typom svetelných zdrojov [19], [20]. V súčasnosti nie je úplne objasnené, ako sa spektrálne vlastnosti pozemných zdrojov svetla transformujú do spektrálneho zloženia difúzneho svetla nočnej oblohy, čo je výzvou pre mnohé tímy k riešeniu tohto problému.

Single-scatter algoritmus aplikovaný na modelové prípady

Rozptyl prvého rádu je zvyčajne dostatočne presný pre výpočet charakteristík svetla rozptýleného v bezoblačnej vrstve atmosféry. Keby bola modelovaná aj zamračená obloha, stav svetelného poľa v podoblačných vrstvách by mohol byť s uspokojivou presnosťou nasimulovaný tzv. single-scatter algoritmom. Vplyv oblakov sa pritom rieši separátne vo forme dodatočného integrálu [21].

V nasledovnom numerickom experimente bol čisto hypoteticky predpokladaný svetelný tok produkovaný mestom na úrovni 500 lm na jedného obyvateľa. Tento predpoklad do istej miery koreš-

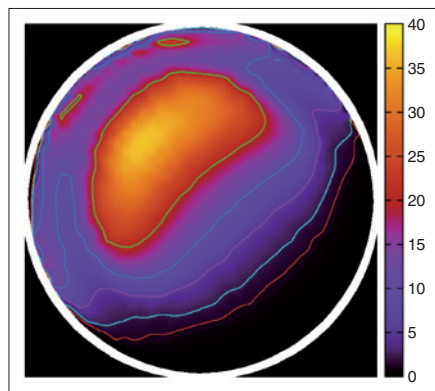


Obr. 6. Teoretický jas nočnej oblohy na observatóriu Vartovka; výpočet bol realizovaný pre bezoblačné podmienky single-scatter algoritmom; hodnoty jasu su uvádzané v $\text{mcd}\cdot\text{m}^{-2}$

zvyčajne simuluje lambertovským odrazom. Pri uvádzaných výpočtoch bola okrem iného vzatá do úvahy aj závislosť albeda oblačných vrstiev na vlnovej dĺžke. Albedo sa mení v rozsahu od 0,6 v modrej oblasti spektra až po 0,65 v červenej časti spektra. Okrem svetelných stĺpov sa prítomnosť oblačnosti prejaví aj posunom miesta s minimálnym jasom do tých častí oblohy, ktorých uhlová vzdialenosť od svetelných zdrojov je väčšia než za bezoblač-

ných podmienok (porovnaj obr. 3 a obr. 4).

Observatórium Vartovka je na periférii Banskej Bystrice (obr. 5) v nadmorskej výške 800 m. Vzdialenosť pozorovacieho bodu od centra tohto mesta je len niečo viac ako 2 km. Vzhľadom na túto polohu možno očakávať, že absolútne hodnoty jasov nočnej oblohy budú výrazne väčšie ako v prípade Starej Lesnej a tiež že nasvetlenie horizontu sa prejaví v širokej škále azimutov, a to už aj pri jasnej oblohe. To potvrdili aj modelové výpočty, ako ukazuje obr. 6. Na rozdiel od Starej Lesnej je efekt oblačnosti v prípade observatória Vartovka markantný



Obr. 7. Teoretický jas nočnej oblohy na observatóriu Vartovka; výpočet bol realizovaný pri zamračennej oblohe single-scatter algoritmom; hodnoty jasov sú uvádzané v $\text{mcd}\cdot\text{m}^{-2}$, výška spodnej hranice oblakov je 2 km

(obr. 7). Hlavným dôvodom výrazného nasvetlenia oblohy aj v okolí zenitu je geometria optickej schémy, v ktorej Banskú Bystricu treba považovať za blízky zdroj svetla.

Širší význam teoretického modelovania

Úroveň rušivého svetla v danej lokalite je jedným z ukazovateľov celkovej aktivity populácie. Okrem verejného osvetlenia je umelé svetlo produkované prevažne priemyselnými komplexami, domácnosťami, obchodnými centrami, železničnými stavbami, reklamnými plochami alebo architektonickým osvetlením. Celkové množstvo svetelnej energie emitovanej týmito zdrojmi svetla je zhruba úmerné merateľnej spotrebe energie v danej lokalite [24]. Je dobre známe, že nadmiera rušivého svetla obmedzuje alebo celkom znemožňuje astronomické pozorovania [25]. Redukcia nočného svietenia nemôže byť realizovaná na úkor zníženia produktivity práce alebo zníženia bezpečnosti verejných priestorov a cestných komunikácií. Hľadajú sa teda také riešenia, ktoré zabezpečia požadované svetelné podmienky v nočných hodinách, ale súčasne povedú k zníženiu spotreby elektrickej energie a tiež eliminujú úroveň rušivého

svetla. V tomto zmysle sú zaujímavé nielen tvarové a výkonové charakteristiky svetidiel, ale aj spektrálne zloženie produkovaného svetla. Analýza a meranie parametrov rušivého svetla v nočných hodinách tak môžu principiálne preukázať, aké sú účinky rôznych zdrojov svetla, a dať tak odborný podklad pre navrhovanie nových, vhodnejších svetidiel použiteľných pre verejné osvetlenie. V praxi to znamená, že v danej lokalite s danou infraštruktúrou bude možné vypočítať, aký je účinok rušivého svetla vybraných zdrojov svetla (napr. pri vysokotlakových a nízkotlakových sodíkových výbojkách), pričom tieto údaje môžu byť porovnané a vyhodnotené v rôznych vzdialenostiach od zdroja svetla. Taktiež bude možné porovnať vplyv verejného osvetlenia s vplyvom ostatných svetelných zdrojov.

Podakovanie: Tento príspevok vznikol za podpory projektu SK-CZ-0014-09 a SK-CZ – 0038-07 grantovej agentúry APVV.

Literatúra:

- [1] KOCIFAJ, M.: *Numerické modelovanie rušivého svetla v prímestských a mimomestských oblastiach*. Světlo 2007, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 116-120, ISBN 978-80-248-1579-4.
- [2] MININ, N.: *Theory of Radiative Transfer in Planetary Atmospheres*. Nauka, 1988.
- [3] KOCIFAJ, M. – LUKÁČ, J.: *Using the multiple scattering theory for calculation of the radiation fluxes from experimental aerosol data*. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 1998, 60, s. 933–942.
- [4] CINZANO, P. – FALCHI, F. – ELVIDGE, C. D.: *The first world atlas of the artificial night sky brightness*. Mon. Notes Astron. Soc., 2001, 328, s. 689–707.
- [5] BARDUCCI, A. – MARCOIONNI, P. – PIPPI, I. – POGGESI, M.: *Effects of light pollution revealed during a nocturnal aerial survey by two hyperspectral imagers*. Appl. Opt. 2003, 42, s. 4349–4361.
- [6] KOCIFAJ, M.: *Fyzikálne princípy rozptylu svetla v atmosfére a ich aplikácia na podmienky dennej a nočnej oblohy*. In: Kurz osvetľovací techniky XXV, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006, s. 100-103, ISBN 80-248-1178-2.
- [7] WAUBEN, W. M. F.: *Multiple scattering of polarized radiation in planetary atmospheres*. Free University, Amsterdam, 1992.
- [8] MIN, Q. L. – DUAN, M.: *A successive order of scattering model for solving vector radiative transfer in the atmosphere*. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2004, 87, s. 243–260.
- [9] HULST van de, H. C.: *Multiple light scattering*. Academic Press, New York, 1980.
- [10] LUBIN, D. – WEBER, P. G.: *The use of cloud reflectance functions with satellite data for surface radiation budget estimation*. J. Appl. Meteorol., 1995, 34, s. 1333–1347.
- [11] LATA, K. M. – BADARINATH, K. V. S. – RAO, T. V. R. – REDDY, R. R. – AHAMMED, Y. N. – GOPAL, K. R. – AZEEM, P. A.: *Studies on aerosol optical properties over urban and semi-urban environments of Hyderabad and Anantapur*. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2003, 78, s. 257–268.
- [12] BUKOWIECKI, N. – KITTELSON, D. B. – WATTS, W. F. – BURTSCHER, H. – WEINGARTNER, E. – BALTENSPERGER, U.: *Real-time characterization of ultrafine and accumulation mode particles in ambient combustion aerosols*. J. Aerosol Sci., 2002, 33, s. 1139–1154.
- [13] LAGROSAS, N. – YOSHII, Z. – KUZE, H. – TAKEUCHI, N. – NAITO, S. – SONE, A. – KAN, H.: *Observation of boundary layer aerosols using a continuously operated, portable lidar system*. Atmosph. Environ., 2004, 38, s. 3885–3892.
- [14] KROTKOV, N. A. – BHARTIA, B. K. – HERMAN, J. R. – FIOLETOV, V. – KERR, J.: *Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols: 1. Cloud-free case*. J. Geophys. Res., 1998, 103, s. 8779–8793.
- [15] JOSEPH, J. H. – KAUFMAN, Y. J. – MEKLER, Y.: *Urban light pollution: the effect of atmospheric aerosols on astronomical observations at night*. Appl. Opt., 2001, 30, s. 3047–3058.
- [16] CRAWFORD, D. L.: *Light pollution: the problem and the potential solutions*. Baltic Astron., 1996, 5, s. 263–269.
- [17] GARSTANG, R. H.: *Model for artificial night-sky illumination*. Publ. Astron. Soc. Pac., 1986, 98, s. 364–375.
- [18] KEROLA, D. X.: *Modelling artificial night-sky brightness with a polarized multiple scattering radiative transfer computer code*. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2006, 365, s. 1295–1299.
- [19] DICK, R. – WEEKS, A.: *Fighting light pollution in the Ottawa area – technical elements*. J. R. Astron. Soc. Can., 1997, 91, s. 193–197.
- [20] PRUGNA, F. D.: *Visual measurements and spectra survey of night sky brightness in Venezuela and Italy*. Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1999, 140, s. 345–349.
- [21] KOCIFAJ, M.: *Light pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources*. Appl. Opt., 2007, 46, s. 3013–3022.
- [22] MIZON, B.: *Light Pollution. Responses and Remedies*. Patrick Moore's Practical Astronomy Series XII. Springer, Berlin, 2002.
- [23] NARISADA, K. – SCHREUDER, D.: *Light Pollution Handbook*. Springer, Dordrecht, 2004.
- [24] ELVIDGE, C. D. – BAUGH, K. E. – KIHN, E. A. – KROEHL, H. W. – DAVIS, E. R. – DAVIS, C. W.: *Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption*. Int. J. Remote Sens., 1997, 18, s. 1373–1379.
- [25] SCHWARZ, H. E., ed.: *Light Pollution: the Global View*. Kluwer, Dordrech, 2003.

Recenze: Ing. Tomáš Maixner, Siteco Lighting, spol. s r. o., předseda Skupiny Rušivé světlo při ČNK CIE