



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-18-0014

Globálna charakterizácia svetelného znečistenia

Zodpovedný riešiteľ **Mgr. Miroslav Kocifaj, PhD.**

Príjemca **Ústav stavebníctva a architektúry SAV, v. v. i.**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav stavebníctva a architektúry SAV, v.v.i.
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

1. A. Astronómica 'Ío', 15005 A Coruña, Galicia
2. Consortium for Dark Sky Studies, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

žiadne

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

1. KOCIFAJ, Miroslav – KÓMAR, Ladislav – LAMPFAR, Héctor – BARENTINE, John C. – WALLNER, Stefan. A systematic light pollution modelling bias in present night sky brightness predictions. In Nature Astronomy, 2023, vol. 7, p. 269-279. (14.100 - IF2022). ISSN 2397-3366. Typ: ADCA.
2. KOCIFAJ, Miroslav - SOLANO LAMPFAR, H. A. - VIDEEN, Gorden. Night-sky radiometry can revolutionize the characterization of light-pollution sources globally. In Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, vol. 116, no. 16, p. 7712-7717. (9.580 - IF2018). ISSN 0027-8424. Typ: ADCA.
3. KOCIFAJ, Miroslav – WALLNER, Stefan – BARENTINE, John C. Measuring and monitoring light pollution: Current approaches and challenges. In Science, 2023, vol. 380, p. 1121-1124. (56.900 - IF2022). ISSN 0036-8075. Typ: ADCA
4. KOCIFAJ, Miroslav - BARÁ, Salvador. Aerosol characterization using satellite remote sensing of light pollution sources at night. In Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2020, vol. 495, p. L76-L80. (5.356 - IF2019). ISSN 1745-3925. Typ: ADCA
5. KOCIFAJ, Miroslav - KUNDRACIK, F. - BARENTINE, John C. - BARÁ, Salvador. The proliferation of space objects is a rapidly increasing source of artificial night sky brightness. In Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2021, vol. 504, p. L40-L44. (5.287 – IF2020). ISSN 1745-3925. Dostupné na: <https://doi.org/10.1093/mnras/lsab030>. Typ: ADCA
6. KOCIFAJ, Miroslav - BARENTINE, John C. Air pollution mitigation can reduce the brightness of the night sky in and near cities. In Scientific Reports, 2021, vol. 11, art. no. 14622. (4.379 - IF2020). ISSN 2045-2322. Dostupné na: <https://doi.org/10.1038/s41598->

021-94241-1. Typ: ADCA

7. KOCIFAJ, Miroslav - KUNDRACIK, F. - BARÁ, Salvador - BARENTINE, John C. - WALLNER, Stefan. Nighttime Atmospheric Scattering Phase Function Derived From the Scattered Light of a Laser Beam. In Geophysical Research Letters, 2022, vol. 49, art. no. e2022GL098608. (5.576 - IF2021). ISSN 0094-8276. Dostupné na:

<https://doi.org/10.1029/2022GL098608>. Typ: ADCA

8. KOCIFAJ, Miroslav - BARÁ, Salvador - FALCHI, F. Towards a global map of the artificial all-sky brightness. In Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 2022, vol. 513, no. 1, p. L25–L29. (5.235 - IF2021). ISSN 1745-3925. Dostupné na:

<https://doi.org/10.1093/mnrasl/slac029>. Typ: ADCA

9. KOCIFAJ, Miroslav - BARÁ, Salvador. Diffuse light around cities: New perspectives in satellite remote sensing of nighttime aerosols. In Atmospheric Research, 2022, vol. 266, art. no. 105969. (5.965 - IF2021). ISSN 0169-8095. Dostupné na:

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105969>. Typ: ADCA

10. WALLNER, Stefan - KOCIFAJ, Miroslav. Aerosol impact on light pollution in cities and their environment. In Journal of Environmental Management, 2023, vol. 335, 117534. (8.910 - IF2022). ISSN 1095-8630. Typ: ADCA

Uplatnenie výsledkov projektu

Najznámejší prejav svetelného znečistenia (SZ) je prežiaranie nočnej oblohy, čo je výsledok súhry pôsobenia vonkajšieho umelého svetla a procesov elektromagnetického rozptylu v atmosfére Zeme. Logicky možno očakávať, že zníženie úrovni SZ je možné dosiahnuť intervenciou v jednom alebo v oboch uvedených procesoch. Tradične sa potlačenie negatívnych dopadov SZ rieši modernizáciou technológií osvetlenia, ale tento typ intervencie má svoje limity a málokedy dosiahne benefit 10-20%. Systematickým výskumom sme preukázali, že redukciou alebo zmenou typu aerosólového znečistenia ovzdušia dokážeme znížiť jas nočnej oblohy o desiatky percent v mestách a ich blízkom okolí.

Čistejší mestský vzduch znižuje optickú hrúbku aerosólu, čo následne vedie k poklesu žiary oblohy. V princípe vieme cielene identifikovať najrizikovejšie zdroje znečistenia, a tak definovať opatrenia, ktoré treba vykonať v tom-ktorom regióne či meste. Už teraz však s určitosťou môžeme povedať, že vhodnými opatreniami sú lepšia kontrola a regulácia emisií konkrétnych typov aerosólových častíc. Vyvinuli sme nové metódy a prístroje na charakterizovanie častíc v prostredí nočnej atmosféry, čo nielen výrazne posunulo možnosti modelovania šírenia umelého svetla, ale poskytlo prostriedky na manažment SZ s prínosmi napr. v oblasti ekológických štúdií. Ako súčasť výskumu sme vyvinuli novú experimentálne aj ekonomicky nenáročnú metódu, pomocou ktorej môžu odborníci z celého sveta študovať vlastnosti atmosférického aerosólu nepretržite počas dňa aj v noci. Práve obrovská priepasť v dostupnosti denných a nočných údajov a chýbajúce metódy systematického nočného optického monitoringu miestneho aerosólu boli hlavnou príčinou, prečo vedci doposiaľ nedokázali komplexne predpovedať dynamiku SZ v rôznych lokalitách. Tá totiž silne závisí na miestnom aerosóle. Nami vyvinutá metóda nájde uplatnenie v rutinnom použití prakticky kdekoľvek na svete. Môže byť aplikovaná na prirodzene tmavých miestach a pochopiteľne aj v lokalitách s vysokou úrovňou svetelného znečistenia, pod jasnou aj zamračenou oblohou. Projekt tiež odhalil systematickú chybu v doterajšícj modeloch, čím umožnil korekciu celosvetovo archivovaných dát zenitového jasu. Naše modely viedli k výraznému skráteniu výpočtového času potrebného na získanie hemisférických máp jasu nočnej oblohy avšak pri zachovaní vysokého uhlového rozlíšenia. Toto otvára cestu k vytvoreniu tretieho svetového atlasu umelého jasu nočnej oblohy, kde namiesto jasu oblohy len v smere k zenitu bude pre každé miesto na Zemi k dispozícii celooblohová mapa. Výsledky projektu našli uplatnenie v pokročilých metódach diaľkového (satelitného) monitoringu pozemných zdrojov svetla, v astronómii, ale aj biológii, ekológii, či pri vývoji novej meracej techniky. Projekt inicioval tiež medzinárodnú spoluprácu naprieč viacerými vednými odborními s cieľom plnohodnotnejšie využiť informačný obsah dát žiary nočnej oblohy.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Projekt mal ambiciózne ciele: 1) zostaviť teoretické riešenie šírenia sa svetelného znečistenia (SZ) v prostredí nočnej atmosféry s ľubovoľnou konfiguráciou oblakov, 2) odhaliť spektrálne a polarizačné efekty v rôznych častiach oblohy spôsobené rôznymi typmi oblakov

a základom atmosféry a 3) zistiť mieru spolupôsobenia svetelných emisií a atmosféry na formovaní umelého svetla nočnej oblohy. V synergii týchto výsledkov sa očakával revolučný rozvoj pokročilých metód identifikácie pozemných emisií z miest a aplikácie v svetelnej technike a teórii prenosu svetla, ku ktorým neexistuje adekvátne alternatíva. Hnacím motorom pre tento výskum bol fakt, že svetelné a atmosférické podmienky sú celosvetovo príliš rozmanité na to, aby sme bez rizika veľkých nepresností mohli systematicky používať empirické modely šírenia svetelného znečistenia. V snahe dosiahnuť v tejto oblasti výraznejší pokrok sme horeuvedeným problémom venovali zvýšenú pozornosť, pričom prekvapivo jedným z hlavných výsledkov bolo zistenie, že aj presnejšie modely SZ trpia systematickou chybou. Súčasne s odstránením tejto chyby sme navrhli aj riešenie, ktoré šetrí výpočtové zdroje. Získali sme teoretické riešenia, ktoré umožnili modelovanie SZ pri ľubovoľnom zákale atmosféry a vyvinuli sme prístroje pre in-situ charakterizáciu stavu oblohy, včítane heterogénnych oblačných polí a stavu polarizácie v rôznych smeroch. Modely umožnili vývoj úplne nových metód satelitného prieskumu svetelných zdrojov a atmosféry v ich okolí. Teoretické riešenie prenosu žiarenia viedlo k rozvoju pozemných metód komplementárnych k metódam satelitného snímkovania povrchu Zeme, čo prinieslo možnosti systematického globálneho monitoringu SZ. Vývoj bol zavŕšený zostavením dvojparametrického t-g modelu, ktorý je základom pre tretí celosvetový atlas svetelného znečistenia poskytujúci informácie nielen o jase v zenite, ale aj o rozložení jasů na celej hornej hemisfére. Z pohľadu plánovaných aktivít konštatujeme, že výsledky projektu ďaleko prekročili rozsah plánovaných cieľov.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The project goals were ambitious: 1) to develop a theoretical solution to the propagation of artificial light at night (ALAN) into the cloud-varying atmospheric environment, 2) to reveal the spectral and polarization signatures within different sky segments under arbitrary atmospheric turbidity, and 3) to determine how the ground-based light emissions and the atmosphere interact to form the artificial glow of the night sky. We envisioned to make advances in the identification of light emissions from cities, and even in lighting technology and radiative transfer theory wherever adequate alternatives were needed. The impetus for this research was the fact that light sources and atmospheric conditions are both too diverse worldwide, making simple empirical models prone to large errors or uncertainties. We surprisingly found that advanced atmospheric models routinely used in current research also require remediation due to a systematic error. We suggested corrections, which also save computing resources. Our theoretical solutions enable the modeling of ALAN under arbitrary turbidity conditions and the development of instruments for in-situ characterization of sky conditions, including heterogeneous cloud fields. Those new instruments can also sense the state of linear polarization in different directions. Our satellite remote-sensing models are not only applicable to of intensely-lit ground areas (i.e., city centers), but also to their surroundings (e.g., suburbs). To complement this satellite remote-sensing avenue, our theoretical solution to the radiative transfer problem also led to the development of new methods of ground-based atmospheric sensing, thus providing the means for systematic global monitoring of ALAN. This research was completed by the development of a simplified two-parameter model, which provides the bases for the third edition of the World Atlas of Artificial Night Sky Brightness. That document will provide information on zenith brightness and hemispheric luminance maps. From the perspective of the planned activities, we conclude that the project results far exceeded the scope of the goals.