

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-14-0017**

Zovšeobecnený model jasú/žiary nočnej oblohy a jeho aplikácia pri získavaní emisnej funkcie miest

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

Príjemca **Ústav stavebníctva a architektúry SAV**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav stavebníctva a architektúry SAV
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Neformálna medzinárodná spolupráca v rámci projektu bola uvedená v dokumente VPP v časti 6.8.
Zahraničné pracoviská neboli priamou súčasťou riešiteľského kolektívu.

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. Retrieval of angular emission function from whole-city light sources using night-sky brightness measurements. In *Optica*, 2017, vol. 4, no. 2, p. 255-262. (7.727 - IF2016). (2017 - Current Contents). ISSN 2334-2536. Typ: ADCA.
2. KOCIFAJ, Miroslav. Multiple scattering contribution to the diffuse light of a night sky: A model which embraces all orders of scattering. In *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2018, vol. 206, p. 260-272. (2.600 - IF2017). ISSN 0022-4073. Typ: ADCA
3. KOCIFAJ, Miroslav. Towards a comprehensive city emission function (CCEF). In *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2018, vol. 205, p. 253-266. (2.600 - IF2017). ISSN 0022-4073. Typ: ADCA
4. AUBÉ, Martin - KOCIFAJ, Miroslav - ZAMORANO, J. - SOLANO LAMPHAR, H. A. - SANCHEZ DE MIGUEL, A. The spectral amplification effect of clouds to the night sky radiance in Madrid. In *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2016, vol. 181, p. 11-23. (2.859 - IF2015). (2016 - Current Contents). ISSN 0022-4073. Typ: ADCA
5. BARENTINE, John C. - WALKER, Constance E. - KOCIFAJ, Miroslav - KUNDRACIK, F. - JUAN, Amy - KANEMOTO, John - MONRAD, Christian K. Skyglow changes over Tucson, Arizona, resulting from a municipal LED street lighting conversion. In *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2018, vol. 212, p. 10-23. (2.600 - IF2017). ISSN 0022-4073. Typ: ADCA

Uplatnenie výsledkov projektu

Projekt bol svojim zameraním a cieľmi veľmi aktuálny a dosiahnuté výsledky si našli takmer okamžité uplatnenie. Modernizácia verejného osvetlenia v mnohých mestách v Európe je často spojená s prechodom na nové technológie, prevažne LED. Odhliadnuc od spektrálnych vlastností svetelných zdrojov, hlavným problémom je aj nedostatočné tienenie, takže mnohé zdroje emitujú časť svetelnej energie priamo do horného polpriestoru, čo vedie k šíreniu svetla na veľké vzdialenosti mimo miest. CIE prišlo so smernicou 150:2003: „Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations“ pre riešenie problematiky svetla produkovaného umelými zdrojmi. Kvalifikovaná predpoveď zmien difúzneho svetla oblohy pri rekonštrukcii starých alebo pri inštalácii nových svietidiel nie je jednoduchá. Nami vyvinutý model umožnil kvantitatívne hodnotenie dopadov na svetelné znečistenie pre akúkoľvek lokalitu / mesto / obec pri zohľadnení parametrov svetelných zdrojov, včítane ich spektier alebo funkcií svietivosti. Vôbec prvýkrát bol realizovaný kontrolovaný experiment, počas ktorého v USA v meste Tucson bola časť svetelných zdrojov vymenená za LED, pričom detailná inventarizácia 20000 individuálnych zdrojov umožnila tiež kontrolovaný numerický experiment, ktorého cieľom bolo predpovedať dopady tejto konverzie na svetelné znečistenie vo vybraných lokalitách v meste i mimo mesta. Naš model ako jediný uspel v riešení tohoto problému a predpoveď sa výborne zhodovala s experimentami, ktoré boli priebežne vykonávané US tímom. To malo zásadný dopad na ďalšie využívanie nášho modelu, o čom svedčí nielen obrovský nárast počtu citácií (viď. VPP dokument), ale aj rozhodnutie Illuminating Engineering Society of North America použiť naše riešenie ako základ pre novo vytváraný celosvetový koncept modelovania šírenia svetla z umelých zdrojov v prostredí nočnej atmosféry. CCEF – komplexný model emisnej funkcie miest, ktorý sme vyvinuli v rámci riešenia projektu, sa stal ďalším produktom, ktorý je v súčasnosti analyzovaný Sky Glow Committee IES ako potenciálny základ pre štandard. V priebehu projektu sme boli vyzvaní na spoluprácu s Pacific Northwest National Laboratory (USA), ktorá v tom čase v rámci Solid-State Lighting programu pre U. S. Department of Energy riešila problém, ako kvantifikovať dopady svetelných zdrojov na svetelné znečistenie na veľkej doméne, teda pre veľký súbor zdrojov s rôznymi spektrami, uhlovou redistribúciou svetelných emisií a heterogénnym rozložením zdrojov v priestore. Riešením bol náš teoretický a numerický model, na základe ktorého bol v apríli 2017 pod vedením B. Kinzeyho z PNNL tento problém úspešne vyriešený a momentálne sa výsledky používajú v USA a tiež v iných častiach sveta. Okrem týchto priamych aplikácií, má projekt zásadný dopad na ďalší vývoj v oblasti výskumu svetelného znečistenia, pretože otvoril priestor úplne novým možnostiam, napr. pre diaľkový pozemný monitoring atmosféry a kumulatívnych svetelných emisií v noci, ktoré doterajšími metódami bolo možné skúmať len letecky, čo nesmierne zvyšovalo náklady a znemožňovalo rozšírenie takého monitoringu v globálnom meradle. Celosvetový monitoring emisných funkcií by umožnil po prvýkrát systematickejšie predpovedať úroveň svetelného znečistenia v oblastiach s vysokým počtom miest rozptýlených v teritóriu a predpovedať dopady na spektrálne charakteristiky jas oblohy, čo má nesmierny význam pre astronómov, ale aj biológov, ekológov, a svetelných inžinierov, ktorí intenzívne hľadajú riešenie pre postupné znižovanie negatívnych dopadov neustále sa rozširujúceho presvetlenia nočného prostredia.

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

Projekt mal ambiciózny cieľ: vyvinúť všeobecný teoretický model šírenia umelého svetla v nočnej atmosfére a využiť toto riešenie pri získavaní emisnej funkcie miest (CEF). Táto idea vzišla z našich predchádzajúcich zistení, že charakteristiky rozptýleného svetla veľmi citlivo závisia na vlastnostiach atmosféry a tiež na smerovom rozdelení svetelnej energie emitovanej z mestských zdrojov. Hnacím motorom pre tento výskum bol fakt, že CEF pre rôzne mestá sú doposiaľ prakticky neznáme, ale pritom nevyhnutné pre akékoľvek rozumné predpovede difúzneho svetla nočnej oblohy. V projekte sme sa zamerali na vplyv atmosféry a špeciálne aerosólu, ktorý je za bezoblačných podmienok najvýznamnejším modulátorom rozloženia jas oblohy. Ukázali sme, že príspevok veľkých miest na jas oblohy možno matematicky formulovať cez integrálny operátor pôsobiaci na CEF a teda, že vzťah medzi jasom a CEF možno vyjadriť analyticky a CEF získať riešením Fredholmovej integrálnej rovnice. Inými slovami, z meraných dát jas nočnej oblohy vieme určiť CEF veľkých miest v

okolí. To je v súčasnosti bezprecedentný revolučný výsledok, ktorý zrejme povedie k výraznému progresu v charakterizovaní CEF po celom svete. Analytická formulácia viacnásobného rozptylu svetla v nočnej atmosfére osvetlenej heterogénne rozmiestnenými mestami umožnila tiež vytvoriť prvý všeobecný parametrizovaný model jasů / žiary oblohy majúci fyzikálny základ. Taký model umožňuje analyzovať a pochopiť mieru vplyvu každého fyzikálneho parametra (napr. úlohu rozmerov, chemického zloženia, alebo celkovej koncentrácie častíc aerosólu) bez toho, aby sa táto informácia stratila v rušivom vplyve ostatných parametrov. To umožní navrhovať účinnejšie opatrenia a predvídať dopady prevládajúcich pomerov v lokálnej atmosfére na svetelné znečistenie a pochopiť rozdiely medzi mestami s vysokou koncentráciou absorbujúcich častíc produkovaných priemyslom alebo intenzívnou automobilovou dopravou a mestami, v ktorých bola produkcia takých častíc výrazne potlačená.

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

The project goals were to develop a generalized model for propagation of the artificial light into nocturnal environment and to use this model for retrieval of the City Emission Function (CEF). Our previous research suggests that the light field strongly depends on the state of the local atmosphere and the directional characteristics of light emitted from all of the city's light sources. It is of paramount importance to make accurate skyglow predictions through determination of the city-specific CEFs. We paid particular attention to the atmospheric effects, especially to the aerosols that are arguably the largest modulators of the clear-sky radiance/luminance distributions. We have shown that the contribution from largest cities to the night sky brightness can be formulated mathematically as an integral equation with an integral operator acting on the CEF. In other words, the CEFs for dominant cities can be obtained from the radiance or luminance data by solving the Fredholm integral equation of the first type. This method provides an unprecedented opportunity to revolutionize the retrieval of the CEF for almost any city in the world. Our analytical solution provides a first comprehensive parametrized skyglow model of multiple scattered artificial light when the night sky is illuminated from below. The key advantage of our solution is that it provides the means to analyze the influence of different parameters (e.g. particle sizes, chemistry, concentration) on the skyglow while holding all other factors fixed. This allows us to propose better measures to reduce the negative effects of light pollution and to predict the effects of the atmospheric conditions on the skyglow. Furthermore, our results can be applied to compare skyglow levels we can expect from a city with long experience in fighting pollution with those measured in a heavily polluted city.