

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Dominiki Karpińskiej
z tytułu

„Analiza uwarunkowań czasowej i przestrzennej zmienności zanieczyszczenia światłem w obszarach
zurbanizowanych na przykładzie Torunia”

przygotowanej pod kierunkiem
dr. hab. Mieczysława Kunza, prof. UMK (promotor), oraz
dr. inż. Krystiana Erwińskiego (promotor pomocniczy)

Podstawa recenzji

Recenzję sporządziłem w odpowiedzi na uchwałę nr 19/2023, podjętą przez Radę Dyscypliny Nauki o Ziemi i Środowisku Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, datowaną na 27 czerwca 2023 roku.

Charakterystyka formalna

Recenzowana rozprawa doktorska ma formę cyklu artykułów, tj. 7 publikacji anglojęzycznych, wydanych w latach 2021–2023 w recenzowanych periodykach naukowych, ujętych na liście czasopism punktowanych Ministerstwa Edukacji i Nauki. Trzy z siedmiu czasopism posiadają przypisany wskaźnik cytowań: w wariantach pięcioletnim waha się on od 3,2 do 4,4. Wybrane przez Doktorantkę czasopisma są rozpoznawalne w dyscyplinie nauk o Ziemi, inżynierii środowiska, urbanistyki czy geografii społeczno-ekonomicznej – najczęściej drugi kwartył najlepszych czasopism w tych obszarach.

Recenzowana rozprawa ma wybitnie multidyscyplinarny charakter. Publikacje stanowiące część naukową, oznaczone przez Doktorantkę jako P4, P5 i P7, dotyczą zagadnienia zanieczyszczenia światłem, co plasuje pracę w dyscyplinie nauk o Ziemi i środowisku. Część techniczna (publikacje P1, P2, P3 i P6) obejmuje zagadnienia z obszaru optoelektroniki i teleinformatyki (ITC). Ze względu na to, iż Doktorantka ubiega się o stopień doktora w zakresie nauk o Ziemi i środowisku, moja recenzja skupi się na tej tematyce, zgodnie z obszarem moich kompetencji. W dalszej części recenzji dla wygody dokonuję rozróżnienia pomiędzy grupami artykułów – prace P4, P5 i P7 nazywam „naukowymi”, podczas gdy prace P1, P2, P3 i P6 – „technicznymi”.

Analizując objętość poszczególnych artykułów, odniosłem wrażenie, że ciężar rozprawy często przechyła się ku zagadnieniom inżynierskim. Nie tylko stanowią tematykę przewodnią czterech publikacji technicznych, ale również znajdują szereg odniesień w artykułach naukowych. W mojej ocenie z korzyścią dla rozprawy byłoby podanie treści technicznych w sposób zwięzły, w postaci np. tylko dwóch artykułów, z których jeden mógłby dokumentować fotometr i sprawność jego działania, a drugi charakteryzować sieć pomiarową i jej rozwój. Pozostałe artykuły (naukowe) mogłyby do tych prac już tylko się odwoływać.

Żadna z publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej nie została napisana przez Doktorantkę samodzielnie. Sześć artykułów (w tym trzy naukowe) zostało przygotowanych wspólnie z promotorem, a jeden powstał w zespole pięcioosobowym. Oświadczenia o wkładzie autorskim wskazują, że zakres odpowiedzialności Doktorantki i promotora był zbliżony. Niemniej jednak Doktorantka jest pierwszym autorem sześciu prac, a także autorem korespondencyjnym czterech z nich (w tym trzech naukowych). Na tej podstawie wnoszę, że rola Doktorantki w organizacji i realizacji badań oraz przy opisywaniu ich wyników była wiodąca.

Aspekty językowe rozprawy doktorskiej

Rozprawa jest poprawna pod względem językowym, treści zostały przekazane w sposób jednoznaczny i zrozumiały. Doktorantka nie ustrzegła się jednak kilku błędów terminologicznych. Przykładowo myli metodykę (ang. *methods*; zbiór metod) z metodologią (ang. *methodology*; nauka o metodach). Na określenie stopnia zachmurzenia używa terminu *oktan* (ang. *octane*) zamiast *oktant* (ang. *ocat* lub *okta*). Oktan to związek chemiczny, składnik paliwa, natomiast oktant to ósma część całości (tu: nieboskłonu). Błędy te nie mają jednak wpływu na ogólny odbiór poszczególnych artykułów czy całości rozprawy.

Ocena wyboru tematu rozprawy doktorskiej

Doktorantka w swej rozprawie podejmuje temat zanieczyszczenia światłem. Choć zagadnienie to nie jest jeszcze szeroko rozpoznawalne w odbiorze społecznym, w świecie nauki uchodzi za problem aktualny, istotny i – niestety – szybko narastający (por. Sánchez de Miguel i in., 2021; 10.3390/rs13163311). Zasadność podjęcia tematu przez Doktorantkę oceniam więc bardzo wysoko. Recenzowana rozprawa wpisuje się w ważny współczesny trend w naukach o Ziemi. O aktualności podjętego tematu niech świadczy fakt, że w trzech artykułach naukowych niemal 75% cytowanej literatury to pozycje opublikowane w ciągu ostatniej dekady (z czego 35% w ciągu ostatnich 5 lat).

Chciałbym również podkreślić trafność doboru skali przestrzennej, w jakiej Doktorantka podejmuje temat zanieczyszczenia światłem. Nie ogranicza się do pomiaru punktowego i swymi badaniami obejmuje terytorium całego miasta. Obszar ten można przyrównać do powierzchni gminy. Uważam to za szczególnie istotne, gdyż polityka oświetleniowa, która odpowiada za występowanie zanieczyszczenia światłem, kształtowana jest najczęściej właśnie na poziomie gminy. Najbardziej wiarygodne wyniki oszacowania stopnia skażenia światłem można osiągnąć prowadząc obserwacje w takiej samej skali przestrzennej.

Teza rozprawy doktorskiej

Zgodnie z deklaracją Doktorantki celem głównym rozprawy było zbadanie zmienności czasowej i zróżnicowania przestrzennego zanieczyszczenia światłem nad Toruniem. Dla osiągnięcia tego celu konieczne było zebranie stosownych danych obserwacyjnych. Ich pozyskanie, a zarazem wszelkie aspekty techniczne z tym związane, Doktorantka uznała za cel pośredni. Artykuły stanowiące treść rozprawy doktorskiej dowodzą, że zarówno cel naukowy, jak i inżynierski zostały osiągnięte.

W mojej ocenie praca zyskałaby na jakości, gdyby z celów ogólnych wyprowadzone zostały konkretne hipotezy lub pytania badawcze. Na stronie 13 autoreferatu Doktorantka podaje 5 tez szczegółowych, jednak są one sformułowane w sposób bardzo ogólnikowy i asekuracyjny. Ich prawdziwość można orzec bez konieczności przeprowadzenia szczegółowych badań. Przykładowo, pierwsza teza głosi, że „zanieczyszczenie światłem nocnego nieba można skutecznie zmierzyć i istnieją wielkości fizyczne bezpośrednio przedstawiające jego wartość”. Potwierdzenie jej prawdziwości przynoszą badania cytowane przez Hänela i in. (2019; 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008), Kocifaja i in. (2023; 10.1126/science.adg0473) czy Mandera i in. (2023; 10.1016/j.scs.2023.104465). Pozostałe tezy wzbudziły u mnie podobne zastrzeżenia.

Uwagi polemiczne i krytyczne nasuwające się przy lekturze rozprawy

Nie ulega wątpliwości, że realizacja celu naukowego pracy była możliwa dzięki wykorzystaniu odpowiednich danych obserwacyjnych. Aby je pozyskać, Doktorantka założyła terenową sieć pomiarową w obrębie Torunia i wyposażyła ją w fotometry własnej konstrukcji. Artykuły P1, P2, P3 i P6 dokumentują prace inżynierskie związane z konstrukcją urządzeń pomiarowych oraz rozwojem i konfiguracją sieci. Moje główne spostrzeżenia na temat części inżynierskiej pracy są następujące:

- Charakterystykę autorskiego instrumentu przynoszą prace P2 (opis elektroniki) i P3 (opis precyzji pomiarów). W największym przybliżeniu urządzenie kopiuje podstawową funkcjonalność SQM. Istotnym usprawnieniem jest użycie detektora TSL2591, a co za tym idzie lepsze dopasowanie czułości spektralnej fotometru do czułości ludzkiego oka. W pracy Doktorantki nie znalazłem jednak wykresu, który pokazywałby, jak faktycznie wygląda krzywa czułości spektralnej autorskiego urządzenia i jak wpasowuje się ona w krzywą czułości fotonowej lub skotopowej. Równie ważne byłoby zestawienie ze sobą krzywej czułości spektralnej własnego fotometru z analogiczną krzywą dla SQM (por. Sanchez de Miguel i in. 2017; 10.1093/mnras/stx145).
- Doktorantka definiuje kalibrację jako „sprawdzenie poprawności działania wszystkich urządzeń” („*To calibrate, i.e. to check the correctness of operation of all devices*”, publikacja P3, str. 7). Nie jest to definicja, która do mnie przemawia. Jako kalibrację rozumie się zwyczajowo porównanie wskazań instrumentu ze wzorcem o znanej dokładności. Porównanie wskazań 35 instrumentów w pewnym sensie informuje o ich precyzji. Została ona oszacowana na $\pm 0,3$ mag/arcsec², trzy razy mniej, niż wynosi wartość podawana dla SQM (Sánchez de Miguel i in. 2017, 10.1093/mnras/stx145). Odbieram ten szacunek jako wstępny i wymagający weryfikacji. Ryc. 9 w pracy P3 sugeruje bowiem, że osie optyczne fotometrów mogły nie być równoległe. Dodatkowo czas wykonania obserwacji nie był identyczny dla wszystkich urządzeń. Istnieje zatem uzasadnione ryzyko, że „cel kalibracyjny” mógł być nieco inny dla każdego z instrumentów. Jest to o tyle istotne, że dane zebrano przy zachmurzeniu częściowym, które wypełnia chwilowe pole widzenia instrumentów w sposób niejednorodny i może znacznie się zmienić w przeciągu zaledwie kilkunastu sekund. Ze względu na potencjał rozwojowy urządzenia, zalecałbym wykonanie pełnej procedury kalibracyjnej w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych.
- W artykule P6 Doktorantka porównuje jasność nieba nad Toruniem do jasności nieba nad dwiema lokalizacjami poza miastem. Zabieg ten uzasadnia chęcią ustalenia wartości referencyjnej (tła) zanieczyszczenia światłem. Analiza tego typu może mieć jednak wyłącznie charakter względny. Skąd bowiem pewność, że wartości notowane nad najciemniejszym z punktów reprezentują niebo wolne od zanieczyszczenia światłem (a więc poszukiwane tło)? W badaniach zanieczyszczenia światłem za wartość referencyjną przyjmuje się jasność nieba z zakresu od 21.4 do 22.0 mag/arcsec² (patrz Hänel i in. 2018; 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008).
- W artykule P6 Doktorantka prowadzi rozważania teoretyczne nad liczbą i lokalizacją punktów pomiarowych. Zagadnienie to sygnalizowała też w pracy P5 z 2022 roku (ryc. 13). Odczułem niedosyt z powodu pominięcia w dyskusji kwestii realności wykonania sieci w sugerowanym kształcie, szczególnie biorąc pod uwagę wariant faktycznie zrealizowany (ryc. 3 w artykule P7). Nie znalazłem również w dyskusji odniesienia otrzymanych wyników do wyników innych prac, które wykorzystywały wielopunktowe i sieciowe pomiary jasności nieba, np. Pun i So (2012; 10.1007/s10661-011-2136-1), Tahar i in. (2017; 10.1088/1674-4527/17/4/37), Caruana i in. (2020; 10.1016/j.jenvman.2020.110196), Baharim i in. (2022; 10.46754/jssm.2022.02.012).

Zagadnieniom *stricte* naukowym poświęcone są trzy artykuły: P4, P5 i P7. W pierwszym (P4) Doktorantka wyznacza empirycznie zależność między jasnością nocnego nieba a wysokością nad poziomem gruntu, na jakiej umieszczony jest przyrząd pomiarowy. W drugim (P5) określa zależność nocnego nieba od cech zachmurzenia. W trzecim (P7) kreśli rozkład przestrzenny jasności nocnego nieba. Układ

ten poprawnie oddaje zawarty w tytule doktoratu postulat badania czasowej zmienności i przestrzennego zróżnicowania zanieczyszczenia światłem. Moje główne spostrzeżenia na temat części naukowej pracy są następujące:

- W swoich publikacjach Doktorantka stosunkowo niewiele uwagi poświęca dyskusji wokół otrzymanych wyników. Rozdział „Dyskusja” nie pojawia się w żadnym z „naukowych” artykułów (P4, P5, P7) – opis wyników przechodzi tam płynnie w podsumowanie. Podobna sytuacja ma miejsce w artykułach „inżynierskich”, gdzie rozdziału „Dyskusja” albo nie ma, ale ma charakter bliższy podsumowaniu, a odwołania czynione są wyłącznie do prac własnych. Elementy dyskusji – na dość ogólnym poziomie – można znaleźć jedynie w rozdziałach poświęconych opisowi wyników. W mojej ocenie pełniejsze przedyskutowanie wyników pomogłoby Doktorantce w dookreśleniu znaczenia otrzymanych rezultatów, zaakcentowaniu autorskiego wkładu w rozwój dyscypliny, jak i zasygnalizowaniu możliwych konsekwencji poczynionych odkryć.
- Analizę statystyczną wyników oceniam jako bardzo skromną. Doktorantka posługuje się wyłącznie miarami parametrycznymi, nie podając, czy spełnione zostały przesłanki do ich użycia. Nie wyznacza marginesu niepewności oszacowań (np. przedziałów ufności), nie weryfikuje, czy zaobserwowane różnice są istotne statystycznie. Podobnie brakuje informacji, czy wyznaczone współczynniki korelacji (Pearsona?) były statystycznie istotne. Konstruując modele matematyczne nie ocenia ich jakości. Brakuje m.in. współczynników determinacji, przedziałów ufności modelu regresji, wartości błędu standardowego estymacji, parametrów rozkładu reszt z modelu. Zastosowanie tych miar byłoby ogromnym ułatwieniem przy ocenie trafności użytych narzędzi i stwierdzeniu wiarygodności zaobserwowanych prawidłowości.
- Jedną z najważniejszych miar zanieczyszczenia światłem jest jasność nocnego nieba określana w zenicie, w czasie bezchmurnej i bezksiężycowej nocy astronomicznej. To w pewnym sensie uniwersalna miara skażenia światłem, możliwa do określenia w dowolnej lokalizacji na Ziemi (Deverchère i in., 2020; 10.1038/s41598-022-21460-5), będąca podstawą do porównywania różnic w intensywności zanieczyszczenia światłem. Stanowi wspólny mianownik z modelami jasności nieba (np. Netzel i Netzel, 2016, 10.1016/j.jqsrt.2016.03.014; Flachi i in., 2016, 10.1126/sciadv.1600377). W przedstawionych artykułach Doktorantka ani razu nie podaje tej wartości wprost. Domyślnie uśrednia pomiary z nocy bezchmurnych i tych z zachmurzeniem, przez co bezpowrotnie traci informację o jasności nieba referencyjnego. Można się jej domyślać, pośrednio analizując ryc. 8 i ryc. 9 w artykule P5 czy czyniąc pewne założenia co do danych zawartych w tab. 1 w pracy P7. W mojej opinii referencyjna jasność nocnego nieba powinna być podana wprost, dla każdego z analizowanych punktów, z uwzględnieniem niepewności szacunku. Zróżnicowanie jasności w ciągu nocy o różnym stopniu zachmurzenia doskonale oddałyby histogramy na wzór tych z prac: Posch i in. (2018; 10.1016/j.jqsrt.2018.03.010; patrz ryc. 7), Kyba i in. (2015; 10.1038/srep08409; patrz ryc. 5) czy Deverchère i in. (2020; 10.1038/s41598-022-21460-5; patrz ryc. 2).
- W artykule P5 Doktorantka poruszyła zagadnienie związku jasności nocnego nieba z zachmurzeniem. Jak sama trafnie zauważa, temat ten był już szeroko analizowany w pracach innych badaczy i badaczek. Nakreślając tło problemu pomija jednak dwa bardzo istotne studia: Kyba i in. (2011; 10.1371/journal.pone.0017307) i Kyba i in. (2012; 10.1111/j.1365-2966.2012.21559.x). Są to jedne z pierwszych badań, w których kompleksowo i w sposób ilościowy wykazano związek jasności nocnego nieba z obecnością chmur, i to w warunkach klimatycznych zbliżonych do klimatu Torunia. Doktorantka pomija też opracowanie Kotarby i in. (2019; 10.1016/j.jqsrt.2019.06.024), które szczegółowo wykazuje interesujące ją relacje – dla Warszawy, lokalizacji o 200 km oddalonej od Torunia (praktycznie identyczne warunki nefologiczne). Podobna w charakterze praca Ścieżora (2020; 10.1016/j.jqsrt.2020.106962) została przywołana tylko we wstępie artykułu P5 i niewykorzystana podczas dyskusji wyników otrzymanych przez Doktorantkę. Uważam, że uwzględnienie wymienionych opracowań na etapie

planowania badań pomogłoby Doktorantce na istotne poszerzenie i pogłębienie zakresu analiz zawartych w artykule P5.

- Doktorantka zbadała związek jasności nieba ze stopniem zachmurzenia ogólnego oraz wysokością podstawy chmur (do pułapu 2,5 km). W obydwu przypadkach zasadniczą metodą uchwycenia tych relacji było wyznaczenie współczynników regresji i korelacji liniowej. O ile w przypadku badania wpływu zachmurzenia ogólnego jest to podejście akceptowalne, o tyle dla analizy wpływu wysokości podstawy chmur już niekoniecznie. Jak wykazały badania teoretyczne Aubé i in. (2016; 10.1016/j.jqsrt.2016.01.032) i empiryczne Kotarby i in. (2019; 10.1016/j.jqsrt.2019.06.024), jasność zachmurzonego nieba rośnie wraz ze wzrostem wysokości podstawy chmur do ok. 600–700 m nad poziomem gruntu, po czym maleje. Posłużenie się prostym modelem regresji liniowej nie pozwoliło Doktorantce na dostrzeżenie tej prawidłowości i zwerifikowanie, czy występuje ona także w Toruniu.
- Źródłem informacji o wysokości podstawy chmur w pracy P5 były obserwacje IMGW. Praca nie podaje jednak charakterystyki tych danych. Czy były to dane typu SYNOP, czy inne, np. z ceilometru? Jeśli SYNOP, to czy użyto informacji z sekcji pierwszej czy trzeciej raportów? W jaki sposób Doktorantka interpretowała wartości kodowe? Jeśli użyte zostały dane z sekcji trzeciej, dlaczego zrezygnowano z potencjalnie ciekawej analizy uwzględniającej poszczególne rodzaje chmur, na wzór pracy Ścieżora (2020; 10.1016/j.jqsrt.2020.106962)? Jeśli natomiast wykorzystano dane z innego źródła, to jakie to było źródło?
- W pracy P5 Doktorantka podzieliła przypadki według pór roku. Zauważyła przy tym, że poza okresem zimy relacja jasność nieba–zachmurzenie ogólne/ wysokość wierzchołków chmur jest w zasadzie taka sama. Odmiennosć zaobserwowaną zimą wytłumaczyła hipotezą zwiększonej zawartości cząstek stałych w atmosferze. W mojej ocenie prostszym i bardziej prawdopodobnym wytłumaczeniem jest sezonowa zmienność struktury i stopnia zachmurzenia nad Polską (dostrzegalna również na ryc. 7 i ryc. 9). Zawartość cząstek stałych może również wpłynąć na jasność nocnego nieba (patrz: Ścieżor i Czaplicka, 2020, 10.1016/j.jqsrt.2020.107168). Ich ilość znajduje odbicie w widzialności poziomej, parametrze meteorologicznym analizowanym przez Doktorantkę. Wartości współczynników korelacji, zawarte w tab. 1–5 pracy P5, pokazują, że związek jasności nieba z widzialnością był znikomy, a wartość współczynnika korelacji zimą nie odbiegała od wartości obserwowanych w pozostałych porach roku. Jeśli więc zawartość cząstek stałych miała znaczenie, to było ono dalece mniej istotne niż rola zachmurzenia (i jego sezonowej zmienności).
- Na ryc. 8 i ryc. 9 zauważyłem obecność wartości „9 oktantów” na osi pionowej. Skala oktantowa zawiera się w przedziale od 0 (niebo bezchmurne) do 8 oktantów (niebo całkowicie zachmurzone). Oznaczenie kodowe „9” w depeszach SYNOP wskazuje sytuację, gdy stan nieba nie został określony, nie zaś wartość o stopień większą od 8 oktantów (zachmurzenie nie może być większe niż 100%). Wartość 9 oktantów powinna być wyłączona z analizy.
- W artykule P7 Doktorantka interpoluje dane punktowe do rozkładu ciągłego. Moje zastrzeżenia budzi selekcja danych wejściowych. Z ryc. 3 i ryc. 4 w artykule P7 wynika, że w interpolacji uwzględniono 21 lokalizacji, przy czym treść artykułu i informacje zawarte w tab. 1 jednoznacznie pokazują, że długość serii obserwacyjnych dla poszczególnych punktów była różna: od 5 do 23 miesięcy. Ponieważ dane dotyczą nieba zachmurzonego, tak ogromna dysproporcja może prowadzić do rażących błędów. Warunki nefologiczne w ciągu kilku miesięcy (1–3 pór roku) będą zupełnie inne, niż wynosi średnia dla dwóch lat. Jako że zachmurzenie i jego charakterystyka silnie wpływają na jasność nieba, otrzymane mapy mogą dać zafałszowany (niehomogeniczny) obraz rozkładu jasności nieba.

- Tab. 1 w artykule P7 pokazuje, że punkty pomiarowe były zlokalizowane na różnej wysokości względem poziomu gruntu: od poziomu parteru (np. punkt 31) po piętro 10. (punkt 23). Z wyników przedstawionych w pracy P4 jasno wynika, że niewielka zmiana wysokości w przypowierzchniowej warstwie atmosfery ma ogromne znaczenie dla mierzonej jasności nocnego nieba. W artykule P7 nie znajduję informacji, w jaki sposób dane – przed ich interpolacją – zostały znormalizowane do wspólnej wysokości. Jeśli natomiast nie zostały, finalna mapa jest dodatkowo skażona niepewnością wynikającą z niejednorodnej wysokości umieszczenia przyrządów pomiarowych. Ta sama uwaga odnosi się do analizy danych w pracy P5, gdzie jasność nieba była badana w odniesieniu do zachmurzenia – również bez poprawki na wysokość, na jakiej zainstalowano fotometrię.

- W pracy P7 Doktorantka porównuje dwa rozkłady przestrzenne wskaźnika jasności nieba. Pierwszym jest mapa opracowana w oparciu o pomiary fotometrem SQM (dane z lat 2017–2018), drugim – mapa będąca efektem prac własnych Doktorantki (dane z lat 2021–2022; autorski fotometr). Zestawiając ze sobą obie mapy Doktorantka stwierdza silne podobieństwo. Nie podaje jednak żadnej miary ilościowej dla tego podobieństwa (np. współczynnika korelacji między rozkładami lub wykresu rozproszenia). W mojej ocenie – niestety tylko wizualnej – podobieństwo między mapami jest w najlepszym razie umiarkowane. Obydwie mapy pokazują zróżnicowanie wschód–zachód, jednak na tej starszej wyraźnie jaśniejsze jest ściśle centrum Torunia. W nowszym opracowaniu wyraźnie jaśniejsza jest wschodnia część miasta. Z pracy P7 nie wynika, czy warunki wykonania obydwu map były porównywalne. Czy obydwie sporządzono dla nieba z chmurami? Czy długość serii obserwacyjnych dla wszystkich lokalizacji w starszym opracowaniu była taka sama? Czy struktura zachmurzenia w uwzględnionych okresach była identyczna? Szybkie porównanie ryc. 1 i ryc. 3 z mapą zawartą w *The New World Atlas of Artificial Sky Brightness* (Falchi i in. 2016; 10.1126/sciadv.1600377) ujawnia, że bliższa tej ostatniej jest mapa z lat 2017–2018. Dane na temat promieniowania z instrumentu satelitarnego VIIRS (www.lightpollutionmap.info) wskazują, że lokalizacja źródeł światła w Toruniu w latach 2012–2022 była stosunkowo niezmienna. Jaka jest zatem przyczyna rozbieżności między mapami jasności nieba z lat 2017–2018 i 2021–2022?

- W opisie metod w artykule P7 jedyną informacją podaną na temat zastosowanej techniki interpolacji jest wzmianka, iż był to empiryczny kriging bayesowski. Doktorantka nie podaje konfiguracji modelu oraz wyników jego ewaluacji – brak chociażby informacji o błędzie standardowym estymacji. W mojej opinii informacja ta byłaby o tyle zasadna, że wartości wskaźnika jasności nieba (tab. 1) przyjmują inne wartości niż na ryc. 3. Przykładowo, trzy najjaśniejsze punkty (nr 9, nr 35 i nr 7) charakteryzuje odpowiednio średnia jasność: 16,1 mag/arcsec², 16,2 mag/arcsec² i 16,3 mag/arcsec² (dane z tabeli). Na mapie punkty nr 9 i nr 7 znajdują się w klasie korespondującej z tymi wartościami, tymczasem punkt nr 35 jest 2,5–3 razy ciemniejszy, niż wskazują pomiary fotometryczne. Skąd ta rozbieżność?

Zalety i silne strony rozprawy doktorskiej

Zanieczyszczenie światłem jest problemem złożonym i w badaniach wymaga podejścia interdyscyplinarnego, a przynajmniej multidyscyplinarnego. Przed takim wyzwaniem stanęła też Doktorantka. O sukcesie jej pracy świadczą następujące rezultaty:

- Cel badań ze sporym prawdopodobieństwem można było osiągnąć opierając się na komercyjnych fotometrach SQM. Doktorantka zdecydowała się jednak zaprojektować, wykonać, przetestować i operacyjnie wdrożyć urządzenie własnej konstrukcji. Takie podejście zawsze zwiększa ryzyko niepowodzenia projektu. Niemniej jednak Doktorantka w pełni sprostала wyzwaniu: instrumenty zadziałały poprawnie, a w swych wskazaniach nie odbiegały od pierwowzoru (tj. SQM). Sukces operacyjny fotometru własnej konstrukcji może być punktem wyjścia do dalszego rozwoju i udoskonalania urządzenia i jego potencjalnej komercjalizacji. Obecne usprawnienia względem SQM dają instrumentowi wyraźną przewagę konkurencyjną na rynku (lepsz

czułość spektralna, transmisja danych w czasie rzeczywistym). Mam nadzieję, że prace inżynierskie nad autorskim fotometrem nie skończą się z chwilą zakończenia prac nad doktoratem.

- Przeanalizowane dane zostały zebrane nie w jednym punkcie, ale na terenie całego miasta. Co więcej, punkty pomiarowe stanowiły zintegrowaną sieć. To ambitne podejście do problemu pomiarów – o wiele bardziej wymagające niż pomiary na pojedynczej stacji, pomiary wielopunktowe (ale nie w sieć) czy pomiary patrolowe. Pomiar powierzchniowy jest o tyle ważny, że w zanieczyszczeniu światłem ogromną rolę odgrywają czynniki lokalne, zróżnicowanie w obrębie miasta, a nawet dzielnic. Pokazują to wyraźnie prace P4, P5 i P7. Za sprawą objęcia pomiarami całego miasta, Doktorantka mogła bardziej reprezentatywnie ocenić stan nocnego nieba nad Toruniem, co ma ogromny walor praktyczny. Ewentualne przyszłe działania samorządów, zmierzające do redukcji zanieczyszczenia światłem, będą wymagały narzędzi do empirycznego badania jego natężenia. Rozwiązanie sieciowe doskonale wpisze się w to oczekiwanie. Także i w tym przypadku liczę na to, że po zakończeniu prac Doktorantki toruńska sieć pomiarowa przynajmniej utrzyma swój kształt.
- Za najciekawszy wynik merytoryczny pracy Doktorantki uważam stwierdzoną w pracy P4 zależność między jasnością nieba a wysokością, na jakiej zainstalowany jest instrument pomiarowy. To nowe podejście, nowy kierunek badań. Swoimi obserwacjami Doktorantka *de facto* stwierdziła istnienie swego rodzaju „świetlnej warstwy granicznej”, a więc przedziału w dolnej atmosferze, w którym dominują lokalne czynniki „podłoża” (przypowierzchniowe źródła światła), a powyżej którego obserwowane jest już zanieczyszczenie „ogólne” (determinowane przez średnie warunki oświetleniowe w okolicy/regionie). Odkrycie to ma ogromne znaczenie z punktu widzenia metodyki pomiarów. Wskazuje jasno, że czujniki jasności nieba powinny być instalowane powyżej ok. 10–15 m nad poziomem gruntu, by zapewnić informację reprezentatywną dla danej lokalizacji. Dotychczas sugerowano jedynie bliżej niezdefiniowany „bezpieczny” dystans w poziomie, tj. oddalenie się na „bezpieczną” odległość od intensywnych źródeł światła. Praca Doktorantki sugeruje, że ważniejsze może być oddalenie się w pionie, a nie poziomie. Mam nadzieję, że przyszłe prace Doktorantki i/lub jej Promotora przyniosą więcej informacji na temat stwierdzonej zależności.
- Praca P5, pomimo kilku znaków zapytania, pokazała ciekawą rzecz. Doktorantka wyznaczyła relację liniową między zachmurzeniem a jasnością nieba. O ile jasność nieba była wyznaczana w wielu punktach na terenie całego miasta, o tyle dane o zachmurzeniu pochodziły z jednej lokalizacji. Wykresy zaprezentowane przez Doktorantkę pokazują, że relacja jasność–zachmurzenie i jasność–podstawa chmur są praktycznie takie same dla każdego z punktów. Oznacza to, że dane o zachmurzeniu są reprezentatywne dla całego miasta i mogą być użyte do opisu przeciętnych warunków nefologicznych – nawet dla punktów fotometrycznych oddalonych o ok. 10 km. W konsekwencji akceptowalne może być wyposażenie sieci fotometrycznej w jedno stanowisko do analizy zachmurzenia. (Wiosek ten dotyczy jedynie średnich warunków dla nocy. Do interpretacji pojedynczych pomiarów i chwilowych pól widzenia fotometru zawsze lepszy będzie obraz z kamery nieba zainstalowanej w punkcie obserwacji fotometrem.)
- Niewydzielenie nocy bezchmurnych z populacji wszystkich obserwacji czyni charakterystykę nocnego nieba nad Toruniem niekompletną. Nie oznacza to jednak, że uwzględnienie w obserwacjach nocy pochmurnych jest błędem. Wręcz przeciwnie. Jednostkowe i okazjonalne pomiary jasności nieba preferują niebo bezchmurne. Taki stan nieboskłonu jest jednak rzadki dla klimatu strefy umiarkowanej. Faktyczne nocne niebo jest najczęściej w jakimś stopniu zachmurzone, a chmury – jak pokazała Doktorantka i inne badania – istotnie zwiększają jego jasność. Z ekologicznego punktu widzenia badanie nieba zachmurzonego jest więc znacznie ważniejsze niż skupienie się na niebie bezchmurnym. Włączenie w obręb analizy danych ze wszystkich nocy (bezchmurnych i z chmurami) było bardzo trafnym pomysłem Doktorantki. Moje uznanie budzi szczególnie rezultat pracy P7 – mapa jasności nieba „rzeczywistego”, a więc bez względu na stopień zachmurzenia. Znane mi mapy tego rodzaju pokazują rozkład wyłącznie dla nocy

referencyjnej, tj. bezchmurnej. Doktorantka tymczasem kreśli mapę pokazującą faktyczne rozświetlenie nocnego nieboskłonu. Mapy tego typu (po dopracowaniu strony metodycznej) mogą stanowić bardzo cenne źródło informacji m.in. dla ekologów. Mam nadzieję, że i ten kierunek prac Doktorantki będzie przez nią rozwijany.

Konkluzje

W recenzowanej rozprawie Doktorantka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie nauki o Ziemi i środowisku, jak również szerokimi kompetencjami z zakresu nauk inżyniersko-technicznych. Wykazała się samodzielnością w prowadzeniu pracy naukowej, w efekcie której przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest zmienność czasowa i zróżnicowanie przestrzenne jasności nocnego nieba nad Toruniem. Uzyskane wyniki naukowe i techniczne mają duży potencjał zarówno w wymiarze społecznym (poprawa jakości życia w mieście), jak i ekonomicznym (komercjalizacja instrumentu pomiarowego).

Mając na uwadze powyższe, w mojej ocenie recenzowana rozprawa odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim, wynikającym z „Prawa o szkolnictwie wyższym i nauce” (ustawa z 20 lipca 2018 r., Dz. U. 2018 poz. 1668, w szczególności zapisom art. 187 tejże ustawy). Uzasadnia to dopuszczenie mgr inż. Dominiki Karpińskiej do dalszych etapów postępowania określonego przewodem doktorskim.