#### Zrecenzowany artykuł naukowy

mgr inż. MICHAŁ KWIATKOWSKI (ORCID: 0009-0007-6509-2494) mgr inż. MARTA ŁOWCEWICZ (ORCID: 0009-0008-7383-4854) mgr inż. ANDRZEJ PAWLAK (ORCID: 0000-0003-2735-2199) dr inż. JACEK M. KUBICA (ORCID: 0000-0001-6636-7372) Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy *Kontakt: mikwi@ciop.pl* DOI: 10.54215/BP.2025.1.2.Kwiatkowski

Pomiar parametrów naturalnego promieniowania nadfioletowego w zależności od współczynnika pokrycia liściowego (LAI)



W artykule omówiono zagrożenia wynikające z ekspozycji na naturalne promieniowanie UV (promieniowanie nadfioletowe) oraz przedstawiono przegląd wyników badań przeprowadzonych w różnych miejscach na świecie i dotyczących wpływu zielonej infrastruktury miejskiej na poziom tego promieniowania. Ponadto zaprezentowano spektroradiometryczną metodę pomiaru naturalnego promieniowania UV – powiązaną z parametryzacją roślinności za pomocą współczynnika pokrycia liściowego *LAI* (ang. *leaf area index*), wyznaczanego na podstawie zdjęć hemisferycznych – oraz uzyskane tą metodą wyniki pomiarów przeprowadzonych w środowisku miejskim o różnym poziomie zadrzewienia. Pomiary te wykonano w ramach projektu realizowanego w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym, a ich wyniki potwierdziły, że zielona infrastruktura miejska wpływa na redukcję promieniowania UV, a w konsekwencji – na zmniejszenie zagrożeń dla zdrowia ludzi w aglomeracjach miejskich. *Słowa kluczowe: promieniowanie UV, zielona infrastruktura miejska, współczynnik pokrycia liściowego (LAI)* 

Measurement of natural UV radiation parameters in dependence on the leaf area index (LAI)

The paper discusses the threats resulting from exposure to natural UV radiation (ultraviolet radiation) and presents an overview of the results of studies conducted in various places around the world and concerning the impact of urban green infrastructure on the level of this radiation. In addition, a spectroradiometric method of measuring natural UV radiation was presented – associated with the plant parameterization using the leaf area index (*LAI*), determined on the basis of hemispherical images – and the results of measurements carried out in the urban environment with different levels of tree cover. These measurements were performed as part of a project carried out at the Central Institute for Labour Protection – National Research Institute, and their results confirmed that urban green infrastructure reduces UV radiation and, consequently, reduces the risks to human health in urban agglomerations.

Keywords: UV radiation, green urban infrastructure, leaf area index (LAI)

## Wstęp

Współczesne miasta systematycznie przekształcają się w coraz bardziej złożone i zrównoważone struktury urbanistyczne, które zaspokajają potrzeby społeczne i gospodarcze, a przy tym nie zagrażają środowisku naturalnemu i zdrowiu mieszkańców. Jednym z kluczowych elementów tej ewolucji jest rozwój zielonej infrastruktury miejskiej, która obejmuje parki, zieleńce, bulwary oraz tzw. małe obszary zielone towarzyszące lokalnej zabudowie miejskiej. Zielona infrastruktura nie tylko poprawia estetykę otoczenia, lecz także oddziałuje na wiele czynników fizycznych obecnych w środowisku miejskim, które są istotne z punktu widzenia zdrowia ludzi. Różne elementy zielonej infrastruktury mogą wpływać na temperaturę i wilgotność powietrza oraz ograniczać poziom hałasu, sztucznego promieniowania elektromagnetycznego czy naturalnego promieniowania UV. To stawia przed urbanistami istotne wyzwania związane z planowaniem zrównoważonych i zdrowych środowisk miejskich, w którym powinno się uwzględniać parametry zielonej infrastruktury miejskiej jako bariery dla niepożądanych czynników fizycznych występujących w tych środowiskach. W związku z tym pojawia się też konieczność opracowania metod pomiarowych, umożliwiających ocenę wpływu parametrów roślinności na te czynniki.

Promieniowanie UV, będące nieodłącznym składnikiem promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi, ma istotne znaczenie dla procesów biologicznych i fizykochemicznych w ekosystemach. W zależności od pory roku, pory dnia, wysokości nad poziomem morza czy czynników atmosferycznych człowiek może być narażony na znaczną ekspozycję na to promieniowanie. Mimo że może ono mieć korzystny wpływ na życie i zdrowie człowieka, np. poprzez produkcję witaminy D3 przeciwdziałającej powstawaniu krzywicy, nadmierna jego dawka może prowadzić do wielu skutków zdrowotnych dla oczu i skóry. Ochroną człowieka przed promieniowaniem UV w naturalnym środowisku są drzewa, krzewy i inne rośliny miejskie. Liście roślin pełnią funkcję naturalnych filtrów UV, a ilość absorbowanego promieniowania zależy od gatunku i gęstości roślinności. Tym samym obszary z dużą ilością drzew i innego rodzaju zieleni mają niższy poziom UV w porównaniu z obszarami uboższymi w zieleń. W celu oceny barierowości różnych rodzajów roślinności względem promieniowania UV niezbędne jest opracowanie metody pomiaru tego promieniowania wraz ze sposobem parametryzacji badanej roślinności.

Podstawowym celem artykułu jest prezentacja spektroradiometrycznej metody pomiaru naturalnego promieniowania UV, powiązanej ze sposobem wyznaczania współczynnika pokrycia liściowego LAI, który określa powierzchnię liści odpowiadającą powierzchni gruntu i jest kluczowym wskaźnikiem struktury roślinnej, wykorzystywanym w badaniach naukowych do charakteryzowania struktury roślinności. W artykule zaprezentowano także wyniki pomiarów wykonanych tą metodą w środowisku miejskim o zmiennym poziomie zadrzewienia.

#### Naturalne promieniowanie nadfioletowe

Najważniejszym z punktu widzenia życia na kuli ziemskiej naturalnym źródłem promieniowania optycznego jest Słońce. Promieniowanie słoneczne przy powierzchni Ziemi podczas niezachmurzonego nieba zawiera ok. 7% promieniowania UV, 43% promieniowania widzialnego i 50% promieniowania podczerwonego. Wartości te zmieniają się zależnie od szerokości geograficznej, pory dnia i roku, stanu pogody itp. Promieniowanie UV można podzielić na trzy pasma w zależności od długości fali elektromagnetycznej: UV-A – o długości fali 320–400 nm, UV-B – o długości fali 280–320 nm, UV-C – o długości fali 100-280 nm. Promieniowanie UV-A stanowi aż 95%, a promieniowanie UV-B – zaledwie 4–5% promieniowania UV docierającego do Ziemi. Jednak z uwagi na wysoką energię promieniowanie UV-B znacznie silniej oddziałuje na żywe organizmy niż UV-A. W całym zakresie promieniowania UV najbardziej niebezpieczne dla organizmów żywych jest promieniowanie UV-C – ze względu na najniższą długość fali i najwyższą energię. Na szczęście nie dociera ono do Ziemi – jest w całości pochłaniane w warstwie stratosfery, głównie dzięki obecności warstwy ozonowej. Dlatego tak ważne jest ograniczanie powstawania tzw. dziur ozonowych ze względu na ich niekorzystny wpływ na zdrowie człowieka i rozwój roślinności.

# Zagrożenia wynikające z ekspozycji na naturalne promieniowanie UV

Nadmierna ekspozycja na naturalne promieniowanie UV stwarza wiele poważnych zagrożeń dla zdrowia i życia człowieka [1–5]. Działanie promieniowania UV na człowieka ma charakter fotochemiczny, a jego skutek biologiczny zależy od ilości pochłoniętego promieniowania, długości fali i rodzaju eksponowanej tkanki. W naturalny sposób najbardziej narażone są oczy oraz skóra odsłoniętych części ciała.

Ekspozycja oka na naturalne promieniowanie UV jest związana z potencjalnym uszkodzeniem powiek, rogówki, spojówki, soczewki oraz siatkówki. W odróżnieniu od skóry powierzchnia oka jest w naturalny sposób chroniona przed ekspozycją na naturalne promieniowanie UV, docierające do niej z różnych kierunków. Ta ochrona jest zapewniona przez głębokie osadzenie oka w oczodole oraz zakrycie jego dużej powierzchni powieką. W związku z tym oko eksponowane jest jedynie na bezpośrednie promieniowanie padające z kierunku pokrywającego się z jego osią optyczną, ewentualnie padające pod niewielkim kątem względem tej osi. Promieniowanie UV może być w różnym stopniu transmitowane przez gałkę oczną. Promieniowanie UV-B jest prawie w całości pochłaniane przez rogówkę, natomiast promieniowanie z zakresu 300-370 nm jest pochłaniane dopiero w soczewce. Część bliskiego nadfioletu (UV-A) z zakresu 380-400 nm, który pokrywa się z początkiem zakresu widzialnego, dociera do siatkówki oka (rys. 1).



Rys. 1. Wizualizacja penetracji oka przez promieniowanie UV (opracowano z wykorzystaniem obrazu macrovector/Freepik.com) Fig. 1. Visualization of eye penetration by UV radiation (prepared using macrovector/Freepik.com image)

Najczęściej spotykanym ostrym objawem narażenia oka na nadfiolet jest stan zapalny rogówki i spojówek. Zapalenie rogówki objawia się światłowstrętem, wzmożonym łzawieniem, uczuciem obcego ciała w oku, spazmem powiek, a niekiedy upośledzeniem widzenia. W przypadku dużych dawek UV może dojść do obrzęku nabłonka, a nawet jego ubytku. Objawy zapalenia pojawiają się po okresie utajenia zależnym od widma promieniowania i wielkości pochłoniętej dawki UV. W przypadku pasma UV-B i pochłoniętych małych dawek promieniowania okres utajenia wynosi do 24 godzin. Objawy nasilają się zwykle po upływie 6-24 godzin od ekspozycji, natomiast ustępują po ok. 24-48 godzinach. Na podstawie badań wpływu promieniowania UV na rogówkę oka ludzkiego stwierdzono, że maksymalną skuteczność wywoływania zapalenia rogówki wykazują fale o długości 270 nm.

Długotrwałe narażenie soczewki oka na intensywne promieniowanie UV prowadzi do powsta-



Rys. 2. Wizualizacja penetracji skóry przez promieniowanie UV (opracowano z wykorzystaniem obrazu Freepik.com) *Fig. 2. Visualization of skin penetration by UV radiation* (prepared using Freepik.com image)

nia zaćmy, czyli trwałego zmętnienia soczewki. Rozwój zaćmy jest powolny i trwa wiele lat. Przypuszcza się, że największą skuteczność wywoływania zaćmy mają fale o długości 300–320 nm. Z kolei promieniowanie UV docierające do siatkówki oka może być przyczyną powstania schorzeń lub uszkodzeń siatkówki oka o charakterze fotochemicznym.

Szkodliwe skutki ekspozycji skóry na promieniowanie optyczne zależą od natężenia napromienienia wiązki padającej, poziomu absorpcji wynikającej z fototypu skóry, długości fali padającego promieniowania i czasu ekspozycji. Docierające do powierzchni Ziemi promieniowanie z zakresu UV-A oraz UV-B penetruje skórę stosunkowo głęboko, docierając do głębszych partii naskórka i skóry właściwej. Promieniowanie z zakresu UV-B w większości pochłaniane jest przez naskórek i tylko niewielka jego ilość (< 10%) dochodzi do skóry właściwej. Najgłębiej w skórę wnika promieniowanie UV-A, które pochłaniane jest w naskórku i skórze właściwej, a w nieznacznej ilości (< 1%) nawet w tkance podskórnej (rys. 2).

Najbardziej widocznym i najczęściej spotykanym objawem nadmiernej ekspozycji skóry na nadfiolet jest jej rumień, czyli erytema. Jej cechą charakterystyczną jest zaczerwienienie skóry ograniczone do obszaru napromienianego, spowodowane rozszerzeniem naczyń krwionośnych. Stopień zaczerwienienia i jego przebieg zależą od wielkości napromienienia i długości fali promieniowania. Promieniowanie pasma UV-B wytwarza intensywny rumień, pojawiający się po 5-6 godzinach i trwający dłużej (ok. 4-5 dni). Duże dawki promieniowania tego pasma moga doprowadzić do bolesnych obrzęków i pęcherzy skóry. Skuteczność wywoływania rumienia przez pasmo UV-A jest bardzo mała, rzędu 1000 razy mniejsza niż pasma UV-B. Mimo że powtarzająca się ekspozycja na promieniowanie nadfioletowe uodparnia skórę na jego działanie poprzez pigmentację, to długotrwałe narażenie na wysokie natężenia UV prowadzi do niekorzystnych zmian w naskórku, przyspieszając proces starzenia się skóry oraz wywołując zmiany przednowotworowe i nowotworowe (łącznie z czerniakiem). Czerniak (rys. 2) jest nowotworem wywodzącym się

z komórek barwnikowych – melanocytów, które rozwijają się z tkanki nerwowej powłok, i stanowi ok. 2% wszystkich zachorowań na nowotwory. Objawami fotostarzenia skóry są jej zgrubienia, przesuszenie i rogowacenie, tworzenie się przedwczesnych głębokich zmarszczek, utrata elastyczności, rozszerzanie i pękanie naczynek krwionośnych, a także przebarwienia i żółty odcień skóry.

# Wpływ zielonej infrastruktury miejskiej na poziom promieniowania UV

Zagadnienie wpływu roślin na poziom promieniowania UV w środowisku było przedmiotem wielu badań naukowych [6–12]. Wyniki analizy skuteczności tłumienia promieniowania UV-B poprzez liście z różnych grup roślin przedstawiono w artykule [12]. W ramach tych badań za pomocą mikrosondy światłowodowej wykonano pomiary transmitancji naskórka liścia i głębokości penetracji w strukturę liścia promieniowania UV-B emitowanego przez Słońce. W ten sposób przebadano próbki wybranych gatunków liści z dwóch grup roślin wiecznie zielonych (nagonasiennych i okrytozalążkowych) oraz z czterech grup roślin okrytozalążkowych liściastych (drzew, krzewów i winorośli, roślin dwuliściennych zielnych oraz traw). Stwierdzono duże różnice w przepuszczalności naskórka i głębokości penetracji UV-B pomiędzy gatunkami. Przepuszczalność naskórka wahała się od ok. 0% do ok. 40% u roślin zimozielonych i od 28% do 50% u roślin liściastych. Najbardziej zauważalne różnice w skuteczności penetracji UV-B występowały pomiędzy grupami roślin zimozielonych i liściastych. Stosunkowo nieskuteczne filtrowanie UV-B przez liście wielu roślin liściastych sugeruje, że mogą one być bardziej wrażliwe na zwiększone promieniowanie UV-B niż gatunki zimozielone. Właściwości strukturalne i biochemiczne związane ze wsparciem mechanicznym i z odpornością na ścieranie wiecznie zielonych liści mogą się przyczyniać do ich stosunkowo skutecznego ekranowania UV-B. Jedną z takich właściwości strukturalnych jest grubość liścia, która ma tendencję do zwiększania się wraz z długością życia rośliny. Grubsze liście, a zwłaszcza grubszy naskórek, prawdopodobnie nie tylko pomagają wytrzymać wysychanie i ścieranie, ale wydają się ważnym czynnikiem w tłumieniu UV-B, o czym świadczy stosunkowo silny związek pomiędzy grubością naskórka i przepuszczalnością tego promieniowania. Zwłaszcza w przypadku wiecznie zielonych liści znaczne stężenie ligniny jest ważnym czynnikiem zapewniającym odporność liści na wysoki poziom promieniowania UV-B [13, 14]. Jednocześnie absorbuje ona dawki UV-B otrzymywane przez te liście.

W publikacji [15] opisano mechanizm regulacji poziomu promieniowania UV przez różne rodzaje roślinności. W tym celu zmierzono współczynnik odbicia widmowego i przepuszczalność liści roślin za pomocą spektrofotometru. Liść rośliny ma wiele mechanizmów ochronnych przed pro-

mieniowaniem UV. Substancje pochłaniające promieniowanie UV, takie jak flawonoidy w komórkach naskórka liści, osłabiają promieniowanie UV. Pigmenty fotosyntetyczne (chlorofile) przyczyniają się do rozpraszania energii UV i chronią wewnetrzne tkanki liści. Mechanizm rozpraszania energii UV odgrywa ważną rolę w bilansie promieniowania UV na powierzchni Ziemi. Na podstawie badań stwierdzono, że padające promieniowanie UV jest redukowane do 5% w wyniku odbicia od liścia rośliny i jest bliskie zeru w wyniku penetracji przez liść rośliny. Ponadto stwierdzono, że wyższe rośliny mają współczynnik odbicia dolnych liści ok. 5% i zasadniczo zerową przepuszczalność w całym obszarze UV, niezależnie od gatunku rośliny, od powstania młodych liści wiosna, latem i w okresie jesiennego zabarwienia, aż do obumarcia zimą. Dlatego warstwowe struktury roślinności stanowią najbardziej skuteczną ochronę przed promieniowaniem UV-B. Natomiast w celu eliminacji rozproszonego promieniowania UV, np. w otwartej, słonecznej przestrzeni, należy rozważyć stosowanie ekranowania za pomocą konstrukcji pionowych, takich jak żywopłoty, i uzupełnienie ich roślinami okrywowymi. Współczynnik odbicia roślinności wynosi ok. 2%, ponieważ powierzchnie liści zmniejszają padające promieniowanie UV poprzez odbicie, jednocześnie eliminując je poprzez absorpcję.

W publikacji [16] opisano badania mające na celu określenie czynników wpływających na poziom natężenia napromienienia promieniowaniem UV-A i UV-B w cieniu pojedynczego drzewa. Natężenia te zostały zmniejszone o 15-60% w warunkach nasłonecznienia, z mniejszą redukcją promieniowania UV-B niż UV-A. Na pionowych powierzchniach znaidujacych sie w cieniu, zwróconych w stronę drzewa i słońca, uzyskano mniejszy udział promieniowania UV-B niż UV-A, wahający się od 5% do 25% natężenia napromieniowania powyżej korony w poziomie. Badania wykazały, że zazwyczaj korona tłumi 5–15% natężenia promieniowania z zakresu UV-A i 5-30% natężenia promieniowania UV-B. Stwierdzono, że pokrywa chmur zwykle zwiększa wartość natężenia promieniowania UV-B w cieniu drzewa ze względu na zmiany w rozkładzie promieniowania na niebie. Wartość natężenia promieniowania UV-B malała, gdy chmura przemieszczała się na obszar nieba oddalony od słońca. Przezroczyste chmury typu cirrocumulus również wykazywały tendencję do zmniejszania natężenia promieniowania UV-B w przypadku zacienionych powierzchni pionowych (skierowanych w stronę słońca lub południa) w porównaniu z powierzchnią pod bezchmurnym niebem, niezależnie od tego, gdzie na niebie znajdowały się chmury. Oznacza to, że wiedza wyłącznie o obecności zachmurzenia nie wydaje się zapewniać wystarczających informacji do określenia wpływu zachmurzenia częściowego na ogólne narażenie ludzi w obszarach zacienionych.

Na podstawie badania natężenia promieniowania UV-B w drzewostanie liściastym w stanie Maryland w USA [17] stwierdzono, że natężenie

promieniowania UV-B w pobliżu podłoża było ogólnie niskie w porównaniu z promieniowaniem UV-B padającym na zewnętrznych stronach koron drzew. Pod równomiernie rozwiniętymi i pełnymi koronami drzew średnia przepuszczalność natężenia promieniowania UV-B wynosiła tylko 1–2% padającego promieniowania, a w miejscach pod naruszonymi koronami drzew (np. w szczelinach między gałęziami) – 8–17%. Zauważono przy tym, że w tym przypadku w porze porannej lub wieczornej poziom promieniowania UV-B był wyższy. W sezonie bezlistnym średnia przepuszczalność natężenia promieniowania UV-B przez koronę drzewa wzrastała do 30%. Stwierdzono ponadto, że przepuszczalność UV-B nie miała wykrywalnej zależności od położenia słońca na nieboskłonie. Największy poziom natężenia promieniowania UV-B występuje latem w koronie drzew, a wiosną na powierzchni ziemi. Ponadto zakres zmienności geograficznej może być czasami większy niż przewidywane zmiany ekspozycji na natężenie promieniowania UV-B spowodowane utratą ozonu. Należy pamiętać o silnym zróżnicowaniu geograficznym i sezonowym w zakresie biologicznie skutecznego i padającego promieniowania UV-B o małej długości fali [10, 18].

Analiza wpływu promieniowania UV w ramach różnych typów użytkowania gruntów w mieście wymaga skonstruowania modelu matematycznego, który by w sposób ilościowy określił wpływ drzew na łagodzenie intensywności promieniowania UV. Model wykorzystujący lokalne dane terenowe, dane meteorologiczne i opracowane równania (zaczerpnięte z [19]) opisano w artykule [20]. Równania te zaprojektowano w celu prognozowania natężenia promieniowania UV na poziomie poniżej korony drzewa w stosunku do nateżenia promieniowania UV bezchmurnego nieba nad korona w przypadku zróżnicowanego zachmurzenia. Średni współczynnik ochrony przed promieniowaniem UV (UPF) dla pieszych w cieniu drzew w słoneczne południe (od maja do sierpnia) w Seulu w Korei wynosił 8,3 w przypadku gruntów parkowych i cmentarnych oraz 3,0 w przypadku gruntów komercyjnych i transportowych. Najwyższy dzienny współczynnik UPF wyniósł 11,8 w przypadku użytkowania gruntów w parkach i na cmentarzach, które charakteryzują się najwyższym procentowym pokryciem przez korony drzew.

W artykule [6] opisano z kolei opracowany, trójwymiarowy model służący do przewidywania obszarów napromieniowania promieniowaniem UV-B w koronach drzew, gdy odstępy między drzewami są równe lub większe niż szerokość koron poszczególnych drzew. Model wyznaczał względne natężenie napromienienia zarówno w nasłonecznionych, jak i zacienionych warunkach przy bezchmurnym niebie w stosunku do natężenia napromienienia nad koronami drzew. Zarówno model, jak i pomiary wykazały, że miejsca, które ludzie zwykle postrzegają jako zacienione i o niskim natężeniu promieniowania UV-B, w rzeczywistości mogą być narażone na znaczną ekspozycję na to promieniowanie (rzędu 40–60%). Związek zadrzewienia z poziomem

natężenia promieniowania UV-B w sąsiedztwie budynków mieszkalnych modelowano dla czterogodzinnego narażenia (w godzinach 10:00–14:00) w czerwcu i lipcu. Wyniki wykazały, że narażenie ludzi (w poziomie) w miastach położonych na 15° i 30° szerokości geograficznej jest prawie identyczne. W przypadku szerokości geograficznych od 15° do 60° współczynniki ochrony przed promieniowaniem ultrafioletowym (*UPF*) były mniejsze niż 2 przy pokryciu drzewami mniejszym niż 50%. Z kolei *UPF* wynoszący 10 był możliwy na wszystkich szerokościach geograficznych przy pokryciu drzewami wynoszącym 90%.

# Parametryzacja roślinności za pomocą współczynnika pokrycia liściowego *LAI*

Określenie wpływu zielonej infrastruktury miejskiej na wartość promieniowania UV wymaga parametryzacji badanej roślinności. W tym celu wykorzystano wskaźnik pokrycia liściowego *LAI*, który jest szeroko stosowany w badaniach nad strukturą i funkcjonowaniem ekosystemów roślinnych [21–25]. Definiuje się go jako stosunek całkowitej powierzchni liści roślin do obszaru gruntowego, na którym te rośliny występują:

$$LAI = \frac{\text{Obszar liściowy}}{\text{Obszar gruntowy}}$$
(1)

Wskaźnik *LAI* może być mierzony za pomocą specjalistycznego sprzętu pomiarowego [26, 27] lub obliczany na podstawie zdjęć przy użyciu odpowiedniego oprogramowania [28]. Do tego celu wykorzystuje się zdjęcia wykonywane konwencjonalnym sprzętem fotograficznym lub zdjęcia hemisferyczne, z których tworzy się dwuwymiarowe mapy funkcji ażurowości [29] (fot. 1).



Fot. 1. Przykład zdjęcia hemisferycznego i odpowiadającej mu mapy ażurowości

Photo 1. Example of a hemispherical photo and the corresponding gap fraction map



Rys. 3. Schemat pomiarowy parametru LAI Fig. 3. LAI parameter measurement diagram

Wyznaczenie wskaźnika LAI na podstawie tych map jest możliwe dzięki istnieniu generalnej zależności opisującej średnią gęstość listowia w koronie drzewa, zaproponowanej przez Millera w 1963 r. [30], a następnie rozwijanej w kolejnych pracach [31–33]:

$$\mu = -2 \int_{0}^{\pi/2} \frac{\ln(T(\theta))}{S(\theta)} \sin\theta d\theta$$
 (2)

Wzór (2) dotyczy rozkładu listowia w zakresie kąta widzenia  $\theta$  dla długości ścieżki  $S(\theta)$  w kierunku nieba oraz wartości funkcji ażurowości T(ang. *gap fraction*), która informuje o przesłonięciu nieboskłonu przez liście.

Przyjmując, że  $S(\theta) = z/\cos\theta$  oraz  $LAI = \mu \cdot z$  (gdzie z oznacza wysokość korony drzew), po uproszczeniu otrzymano ostateczny wzór na parametr *LAI*:

$$LAI = -2 \int^{\pi/2} \ln(T(\theta)) \cos\theta \sin\theta d\theta$$
 (3)

Dokładniejsze i szybsze pomiary współczynnika *LAI* zapewnia metoda LAI 2000, wykorzystywana w urządzeniach specjalnie przeznaczonych do bezpośredniego pomiaru tego parametru. Metoda ta polega na pomiarach wartości funkcji ażurowości przy różnych zakresach kąta widzenia, wyliczeniu wartości *LAI* dla każdego z nich, a następnie na ich zsumowaniu. Z reguły korzysta się z pięciu zakresów kąta widzenia (7°, 23°, 38°, 53°, 68°), a wtedy wzór na *LAI* przedstawia się następująco [26]:

$$LAI = -2\sum_{i=1}^{5} \ln(T(\theta_i)) \cos\theta_i w(\theta_i)$$
(4)

Wizualizację stosowanych we wzorze parametrów przedstawiono na rys. 3

Algorytm ten jest wykorzystywany m.in. w oprogramowaniu CAN\_EYE [28], które umożliwia wyznaczenie wskaźnika *LAI* z kolorowych zdjęć hemisferycznych. Oprogramowanie generuje mapy ażurowości odpowiadające analizowanym zdjęciom, dokonuje separacji zielonych elementów od nieba i wykonuje odpowiednie obliczenia.

# Pomiar promieniowania UV w funkcji współczynnika *LAI*

W celu pomiaru naturalnego promieniowania UV z uwzględnieniem parametrów zielonej infrastruktury zastosowano procedurę obejmującą analizę widmową naturalnego promieniowania optycznego, mierzonego prostopadle do powierzchni ziemi w kierunku nieboskłonu, oraz pomiar wskaźnika LAI w tych samych punktach pomiarowych. Pomiary parametrów promieniowania optycznego wykonano przy użyciu szerokopasmowego matrycowego spektroradiometru, wyposażonego w sondę połączoną światłowodem o zmniejszonej absorpcji promieniowania w zakresie nadfioletu. Sondę pomiarową ustawiono poziomo na nieruchomym statywie o wysokości 1,4 m, w cieniu, tak aby nie padało na nią bezpośrednie promieniowanie słoneczne (fot. 2). Do analizy poziomu promieniowania UV wybrano zakres 200-400 nm, a wynikiem pomiaru była wartość natężenia napromienienia w wybranym zakresie spektralnym, wyrażona w W/m<sup>2</sup>.



Fot. 2. Ustawienie sondy spektroradiometru Photo 2. Spectroradiometer probe positioning

21



Fot. 3. Ustawienie aparatu na statywie (a) i w poziomie (b) Photo 3. Positioning the camera on a tripod (a) and horizontally (b)

W celu pomiaru współczynnika *LAI* wykonano zdjęcia hemisferyczne przy pomocy obiektywu 4,5 mm f/2,8 EX DC Circular Fisheye HSM i aparatu cyfrowego ustawionego na statywie z obiektywem skierowanym prostopadle do ziemi w kierunku nieboskłonu. Układ pomiarowy przedstawiono na fot. 3.



Rys. 4. Charakterystyki widmowe naturalnego promieniowania optycznego dla różnych wartości LAI: a) 0,01, b) 0,31, c) 0,99, d) 2,81, e) 2,96

Fig. 4. Spectral characteristics of natural optical radiation for different LAI values: a) 0.01, b) 0.31, c) 0.99, d) 2.81, e) 2.96

Pomiary wykonano w Warszawie na obszarze rzadko porośniętym roślinnością drzewiastą, w porze letniej, w godzinach 11:00–12:30, przy całkowicie bezchmurnym nieboskłonie (według klasyfikacji CIE model nieboskłonu nr 12 [34]). Wybrano pięć punktów pomiarowych o różnym stopniu zadrzewienia. Na fot. 4 zilustrowano stopień zadrzewienia w tych punktach, korzystając ze zdjęć hemisferycznych oraz z map ażurowości otrzymanych przy użyciu programu CAN\_EYE wraz ze wskaźnikiem LA/obliczonym algorytmem LAI 2000. Otrzymane charakterystyki widmowe



Fot. 4. Zdjęcia hemisferyczne oraz mapy stopnia ażurowości otrzymane przy użyciu programu CAN\_EYE Photo 4. Hemispherical photos and gap fraction maps obtained using the CAN\_EYE program

22

promieniowania optycznego w tych samych punktach zaprezentowano na rys. 4.

Z przebiegu charakterystyk można wywnioskować, że wraz ze wzrostem zadrzewienia, czyli wskaźnika *LAI*, maleje udział promieniowania UV w całym zakresie promieniowania. Można to zilustrować, obliczając stosunek napromienienia  $E_{\rm UV}$ [W/m<sup>2</sup>] do napromienienia w wybranym zakresie promieniowania widzialnego, np. do parametru  $E_{\rm PAR}$  [W/m<sup>2</sup>], czyli napromienienia w zakresie promieniowania fotosyntetycznie czynnego (ang. *photosynthetically active radiation*) o zakresie długości fali 400–700 nm. Wyniki takich obliczeń w poszczególnych punktach pomiarowych zaprezentowano na rys. 5.



Rys. 5. Zależność parametru  $E_{\rm UV}/E_{\rm PAR}$  od wartości wskaźnika LAI Fig. 5. Dependence of the  $E_{\rm UV}/E_{\rm PAR}$  parameter on the LAI index value

#### Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary przedstawiają zależność ilości promieniowania UV od poziomu zadrzewienia badanego obszaru. Im większy jest współczynnik pokrycia liściowego, tym mniejszy udział promieniowania UV. Oznacza to, że im więcej jest infrastruktury zielonej w otaczającym nas środowisku, tym mniej szkodliwego promieniowania UV dociera do naszych organizmów i tym lepsze mamy zapewnione warunki dla zdrowia i życia. Metoda pomiarowa zaproponowana w artykule może być wykorzystana w pracach obejmujących pomiary przy różnych konfiguracjach zielonej infrastruktury, w tym różnych gatunkach drzew. Może być także użyta w wieloczynnikowej analizie oddziaływania zielonej infrastruktury na różne czynniki fizyczne obecne w środowisku, które dla wielu osób jest środowiskiem pracy. Wyniki takich badań można wykorzystać przy opracowywaniu strategii projektowania krajobrazu, mającej na celu ochronę populacji miejskich przed ekspozycją na szkodliwe czynniki fizyczne, w tym naturalne promieniowanie UV.

#### BIBLIOGRAFIA

 INDULSKI J.A. (red.). Promieniowanie nadfioletowe. Kryteria zdrowotne środowiska. T. 160. IMP, 1997.
 KOLEK Z. Oddziaływanie promieniowania optycznego na człowieka. Prace Instytutu Elektrotechniki. 2006, 228: 269–280.

[3] ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation). Health Physics. 2004, 87: 171–184. [4] PN-EN 14255-3:2010. Pomiar i ocena ekspozycji osób na niespójne promieniowanie optyczne. Część 3: Promieniowanie nadfioletowe emitowane przez słońce.

[5] WOLSKA A., LATAŁA A. Ocena ryzyka zawodowego związanego z ekspozycją na naturalne promieniowanie nadfioletowe. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka. 2011, 7/8: 12–16.

[6] GRANT R.H., HEISLER G.M., GAO W. Estimation of Pedestrian Level UV Exposure Under Trees. Photochemistry and Photobiology. 2002, 75: 369–376.

[7] ROBBERECHT R., CALDWELL M.M. Leaf epidermal transmittance of ultraviolet radiation and its implications for plant sensitivity to ultraviolet-radiation induced injury. Oecologia. 1978, 32: 277–287.
[8] CALDWELL M.M., ROBBERECHT R., FLINT S.D. Internal filters: Prospects for UV-acclimation in higher plants. Physiologia Plantarum. 1983, 58: 445–450.

[9] CALDWELL M.M., ROBBERECHT R., BILLINGS W.D. A steep latitudinal gradient of solar ultraviolet-B radiation in the arctic-alpine life zone. Ecology. 1980, 61: 606–611.

[10] CALDWELL M.M. Dosage Units for Biologically Effective UV-B: A Recommendation. [W:] J. Calkins (red.), The Role of Solar Ultraviolet Radiation in Marine Ecosystems. NATO Conference Series. Vol. 7. Boston: Springer; doi: 10.1007/978-1-4684-8133-4\_15.

[11] DAY T.A., VOGELMANN T.C., DELUCIA E.H. Are some plant life forms more effective than others in screening out ultraviolet-B radiation. Oecologia. 1992, 83: 513–519.

[12] DAY T.A. Relating UV-B radiation screening effectiveness of foliage to absorbing-compound concentration and anatomical characteristics in a diverse group of plants. Oecologia. 1993, 95: 542–550.

[13] MONTIES B. Lignins. [W:] J.B. Harborne (ed.), Methods in plant biochemistry. Vol. 1. 1989, s. 113–157.

[14] LOWRY B., LEE D., HEBANT C. The origin of land plants: a new look at an old problem. Taxon. 1980, 29: 183–197.

[15] GRANT R.H., HEISLER G.M., LAFAYETTE W. Ultraviolet radiation in urban ecosystems. Urban Ecosystems. 2000, 4: 193–229.

[16] GRANT R.H., HEISLER G.M. Multi-waveband Solar Irradiance on Tree-shaded Vertical and Horizontal Surfaces: Cloud-free and Partly Cloudy Skies.
Photochemistry and Photobiology. 2001, 73: 24–31.
[17] BROWN M.J., PARKER G.G., POSNER N.E.
A survey of ultraviolet-B radiation in forest. Journal of Ecology. 1994, 82: 843–854.

[18] WEBB R. Solar Ultraviolet Radiation in Southeast England: The Case for Spectral Measurements. Photochemistry and Photobiology. 1991, 5: 789–794.

[19] RYEOL H. et al. Modeling of Urban Trees Effects on Reducing Human Exposure to UV Radiation in Seoul, Korea. Urban Forestry & Urban Greening. 2014, 13: 785–792.

[20] GRANT R.H., HEISLER G.M., GAO W. Conditions on erythemal UV-B exposure under tree canopies. 16<sup>th</sup> Biometeorology and Aerobiology Conference. American Meteorological Society, 2004.

[21] CHIANUCCI F., CUTINI A. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities. iForest. 2012, 5: 290–295.

[22] JONCKHEERE I. et al. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology. 2004, 121: 19–35.

[23] WEISS M. et al. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. Agricultural and Forest Meteorology. 2004, 121: 37–53.

[24] FANG H. et al. An Overview of global Leaf Area Index (LAI): methods, products, validation, and applications. Reviews of Geophysics. 2019, 57: 739–799.

[25] GROTTIA M. et al. An intensity, image-based method to estimate gap fraction, canopy openness and effective leaf area index from phase-shift terrestrial laser scanning. Agricultural and Forest Meteorology. 2020, 280: 107.

[26] LAI-2200C Plant Canopy Analyzer Instruction Manual, LI-COR, Inc., 2023.

[27] CASA R., UPRETIB D., PELOSIL F. Measurement and estimation of leaf area index (LAI) using commercial instruments and smartphone-based systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, 275: 012006.

[28] CAN\_EYE V6.4.91 User Manual, INRA, 2017. [29] GONSAMO A., D'ODORICO P., PELLIKKA P. Measuring fractional forest canopy element cover and openness – definitions and methodologies revisited. Oikos. 2013, 122(9): 1283–1291.

[30] MILLER J.B. An integral equation from phytology. Journal of the Australian Mathematical Society. 1963, 4: 397–402.

[31] ANDERSSEN R.S., JACKETT D.R. Linear functionals of foliage angle density. Journal of the Australian Mathematical Society. 1984, 25(4): 431–442.

[32] GATES D.J., WESTCOTT M. A direct derivation of Miller's formula for average foliage density. Australian Journal of Botany. 1984, 32: 117–119.

[33] MILLER J.B. The foliage density equation revisited. Journal of the Australian Mathematical Society. 1986, 27(4): 387–401.

[34] CIE Standard General Sky Guide: Technical Report, 2015.

Opracowano i wydano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. "Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy" (projekt nr IV.PN.05 pt. "Wieloczynnikowa ocena parametrów zielonej infrastruktury miejskiej ze względu na jej potencjalne funkcje moderatora wydajności i zdrowia pracowników"), finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.