

SZACOWANIE PROMIENIOWANIA CAŁKOWITEGO PRZY UŻYCIU DANYCH POMIAROWYCH Z SĄSIEDNICH STACJI METEOROLOGICZNYCH NA TERENIE POLSKI

Jacek Leśny✉  0000-0002-0681-6225, Leszek Kuchar  0000-0002-4157-0910,
Paulina Stanek  0000-0002-4494-9694

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

ABSTRAKT

Cel pracy

Celem pracy było porównanie dwóch metod szacowania dobowej sumy promieniowania całkowitego (SR) na podstawie pomiarów z sąsiednich stacji meteorologicznych, z uwzględnieniem odległości między stacjami.

Materiał i metody

Na podstawie danych pochodzących z pięciu stacji zlokalizowanych na terenach nizinnych Polski zaproponowano dwie metody szacowania dobowego promieniowania całkowitego dla dowolnej stacji, wykorzystujące pomiary ze stacji sąsiedniej. Pierwsza metoda opiera się na bezpośrednim wykorzystaniu danych pomiarowych promieniowania z sąsiedniej stacji, natomiast druga wykorzystuje wzór szacowania promieniowania całkowitego wyznaczony na podstawie dobowych wartości temperatury i opadów z tej stacji. Dla obu metod przeanalizowano błąd szacowania jako funkcję odległości od stacji referencyjnej, co umożliwiło wyznaczenie odległości krytycznej, pozwalającej na wybór zalecanej metody.

Wyniki i wnioski

Wyniki wskazują, że szacowanie SR za pomocą danych pomiarowych jest rekomendowane dla lokalizacji oddalonych do około 100 km od stacji referencyjnej. Powyżej tej odległości korzystniejsze jest stosowanie metody opartej na zmiennych meteorologicznych i wyznaczonym wzorze dla najbliższej stacji. Zalecane odległości krytyczne różnią się w zależności od pory roku i mieszczą się w przedziale od 50 do 150 km. Do analizy wybrano stacje położone na podobnej szerokości geograficznej.

Słowa kluczowe: promieniowanie całkowite, metody i błędy szacowania, temperatura powietrza, opady

WPROWADZENIE

Szacowanie promieniowania całkowitego umożliwia uzupełnianie brakujących danych ze stacji aktywności oraz pozyskiwanie informacji o promieniowaniu w miejscach, gdzie nie są prowadzone bezpośrednie pomiary. Wielkość promieniowania sł-

onecznego wpływa na podaż i popyt energii, co jest szczególnie istotne w kontekście funkcjonowania i dynamicznego rozwoju systemów fotowoltaicznych. Dane te mogą wspierać planowanie wielkości oraz rozmieszczenia nowych instalacji fotowoltaicznych (Bac i in., 2008; Lu i in., 2005; Fischer i in., 1985; Deng i in., 2015; Garofalo i in., 2015; Granier

✉ e-mail: jacek.lesny@upwr.edu.pl

i in., 1999; Döll i in., 2003; Šúri i in., 2004; Šúri i in., 2007; Evrendilek i in., 2008; Page, 2018). Ponadto, wielkości promieniowania są wykorzystywane do określania bilansu wodnego oraz produktywności upraw. Przykładowo, szacowanie ewapotranspiracji stanowi kluczowy element modeli wzrostu roślin oraz planowania zasobów wodnych i systemów nawadniania. Do jej obliczania niezbędne są jednak dane promieniowania, które często bywają ograniczone lub niedostępne. W związku z tym podejmowano już próby szacowania promieniowania całkowitego (Bechini i in., 2000; Bellocchi i in., 2003; Zhou i in., 2024; Archontoulis i Miguez, 2015; Sabe-rali i in., 2022; Goodin i in., 1999; Karaca i in., 2023; Zhang i in., 2018; Qian i in., 2019; Van Wart i in., 2015; Urban i in., 2022).

Według informacji na stronie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/) na terenie Polski są rozmieszczone 63 stacje synoptyczne oraz 900 klimatologicznych i opadowych. Spośród nich jedynie 27 stacji prowadziło lub prowadzi obecnie pomiary aktynometryczne (nie wliczając stacji pomiarowych innych instytutów). Dodatkowo, regularne pomiary promieniowania całkowitego (SR) są prowadzone stosunkowo od niedawna, bo głównie od 1990 roku (dla kilku stacji od 1964 roku), i charakteryzują się krótkimi szeregami czasowymi. Oznacza to, że w wielu przypadkach dla wybranych lokalizacji zachodzi potrzeba oszacowania dobowej sumy promieniowania całkowitego. Co więcej, nawet na stacjach dokonujących pomiarów promieniowania często istnieje konieczność jego szacowania, ponieważ ciągi pomiarowe bywają niepełne lub zawierają błędy. Wynika to z automatycznego trybu pomiarów, awaryjności urządzeń oraz błędnych odczytów, które wymagają weryfikacji i uzupełnienia.

Literatura szeroko opisuje wiele dostępnych modeli empirycznych, które były stosowane i weryfikowane m.in. w Chinach, Indiach i USA. Są to przede wszystkim wzory służące do szacowania dobowych sum promieniowania całkowitego, wykorzystujące różne zmienne meteorologiczne, takie jak usłonecznienie, wilgotność względna, prędkość wiatru, opad oraz temperatura (Ball i in., 2004; Chen i in., 2019; Adamala i in., 2019). Bardzo dobre wyniki osiąga-

ją modele oparte na usłonecznieniu i zachmurzeniu – pozwalają one na wiarygodne odtworzenie promieniowania całkowitego za pomocą wzoru Blacka (Bryś i Bryś, 2007). W pracy skupiono się na prostych metodach szacowania promieniowania słonecznego, które wykorzystują tylko takie zmienne meteorologiczne, jak minimalna i maksymalna temperatura dobowa powietrza oraz opad (Prescott, 1940; Samani, 2000).

Przedstawiona praca koncentruje się na porównaniu dwóch metod szacowania promieniowania całkowitego dla wybranej stacji, bazując na pomiarach meteorologicznych i aktynometrycznych pochodzących z sąsiedniej stacji. Dodatkowo uwzględniono odległość od stacji referencyjnej oraz błędy szacowań obu metod, co pozwoliło na określenie zakresów dystansów, dla których zalecane jest stosowanie pierwszej lub drugiej metody.

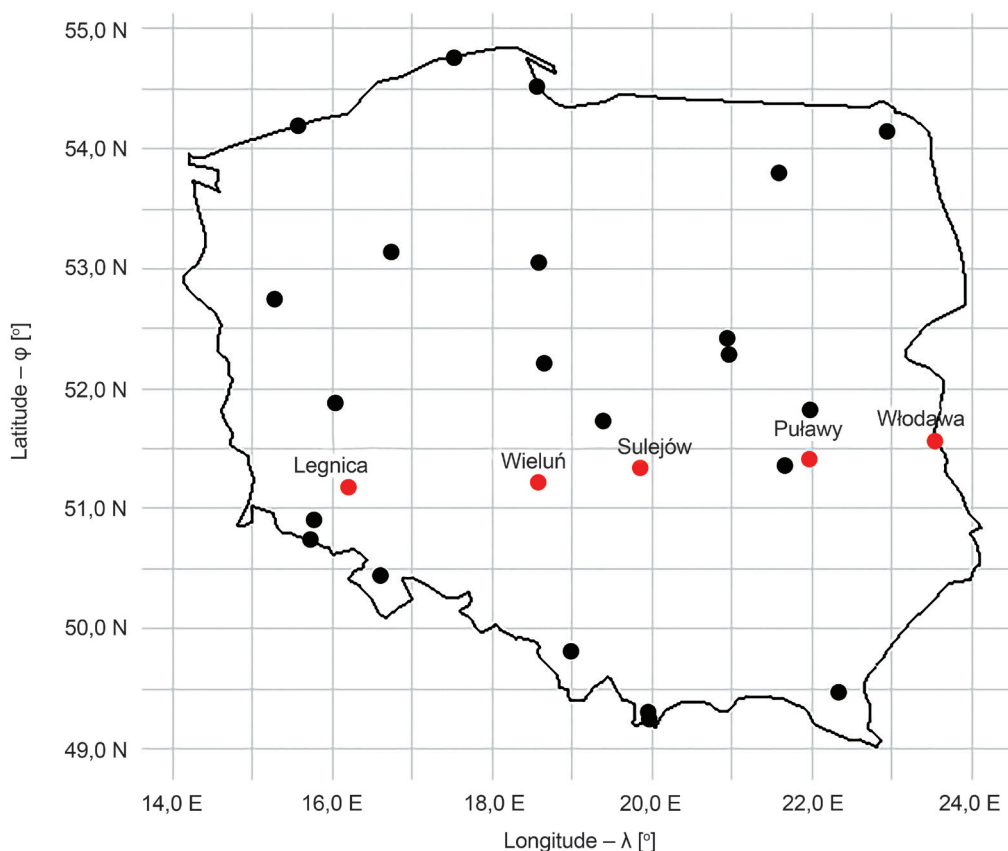
Metoda 1 (dalej M1) polega na bezpośrednim zastąpieniu wartości promieniowania całkowitego dla danej lokalizacji pomiarami z sąsiedniej stacji. Oznacza to, że korzystając z danych obserwacyjnych promieniowania ze stacji B (stacja referencyjna), można je traktować jako dane dla stacji A (stacji szacowania). Takie rozwiązanie jest najprostsze i wydaje się uzasadnione dla bliskiego sąsiedztwa, ponieważ wraz ze zmniejszaniem się odległości między stacjami A i B jakość szacowania ulega poprawie.

Metoda 2 (dalej M2) szacuje dobową sumę promieniowania dla stacji A (stacji szacowania), wykorzystując wzór szacowania oraz dane o temperaturze i opadach ze stacji A. Współczynniki tego wzoru są natomiast oszacowane na podstawie danych meteorologicznych pochodzących z sąsiedniej stacji B (stacji referencyjnej).

METODYKA

Dane

W pracy wybrano pięć stacji z sieci Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego, położonych na podobnej szerokości geograficznej (51°11'33"–51°33'12"): Legnica, Wieluń, Sulejów, Puławy, Włodawa (ryc. 1, tabela 1). Dane zostały zebrane za pomocą pakietu „climate” programu R (Czernecki i in., 2020). Warto



Ryc. 1. Rozmieszczenie stacji aktynometrycznych IMGW w Polsce oraz wybrane stacje do badań (Źródło: opracowanie własne na podstawie pakietu „maps” oraz „ggplot2” w programie R (Becker i in., 2024; Wickham 2016))

Fig. 1. Spatial distribution of IMGW actinometric stations in Poland and selected stations for research (Source: own elaboration based on the „maps” oraz „ggplot2” packages in R programme (Becker i in., 2024; Wickham 2016))

dodać, że wysokość nad poziomem morza rozważanych stacji również jest zbliżona i wynosi od 122 do 199 m n.p.m. Rozważane stacje zlokalizowane są na terenach nizin środkowopolskich, obejmujących obszary od Niziny Śląskiej, przez Nizinę Wielkopolską, aż po Nizinę Mazowiecką. Najbardziej wysuniętą na zachód stacją jest Legnica, natomiast na wschód – Włodawa; odległość między nimi wynosi 510 km. Na rycinie 1 przedstawiono lokalizację wszystkich dostępnych stacji meteorologicznych IMGW-PIB prowadzących (obecnie lub w przeszłości) pomiary aktynometryczne oraz zaznaczono pięć wybranych stacji.

Tabela 1. Współrzędne geograficzne dla wybranych stacji aktynometrycznych (λ – długość geograficzna, ϕ – szerokość geograficzna) wraz z wysokością nad poziomem morza (Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW)

Table 1. Geographical coordinates for selected actinometric stations (λ – longitude, ϕ – latitude) along with elevation above sea level (Source: own elaboration based on IMGW data)

Stacja Station	Współrzędne Coordinates		Wysokość n.p.m. Height above sea level
	λ	ϕ	
Legnica	16°12'28"	51°11'33"	122
Wieluń	18°33'24"	51°12'37"	199
Sulejów	19°51'59"	51°21'12"	188
Puławy	21°57'58"	51°24'46"	142
Włodawa	23°31'46"	51°33'12"	177

Odległości pomiędzy poszczególnymi stacjami (tabela 2) zostały obliczone na podstawie ich współrzędnych geograficznych oraz wzoru odległości na sferze (wzór 1).

$$d_{ij} = R \cdot \arccos(\sin(\varphi_i) \cdot \sin(\varphi_j) + \cos(\varphi_i) \cdot \cos(\varphi_j) \cdot \cos(\Delta\lambda_{ij})) \quad (1)$$

gdzie:

d_{ij} – odległość w km pomiędzy i -tą i j -tą stacją,
 φ_i, φ_j – szerokości geograficzne i -tej oraz j -tej stacji,

R – promień Ziemi (ok. 6371 km),

$\Delta\lambda_{ij}$ – różnica długości geograficznych pomiędzy i -tą oraz j -tą stacją, $i, j = 1, 2, \dots, 5$.

Warto zauważyć, że stacje aktynometryczne na odcinku Legnica–Włodawa rozmieszczone są dość równomiernie, a odległości między najbliższymi stacjami wynoszą od 92,6 km do 163,8 km (tabela 2). Dobre dane meteorologiczne i aktynometryczne z lat

2002–2004 uzyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego. Dane dla każdej z pięciu stacji obejmują: $t_{\min}$ – temperaturę minimalną, $t_{\max}$ – temperaturę maksymalną, P – dobową sumę opadów, SR – dobową sumę promieniowania całkowitego.

Tabela 2. Odległości pomiędzy stacjami aktynometrycznymi (Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW)

Table 2. Distances between actinometric stations (Source: own elaboration based on IMGW data)

d [km]	Legnica	Wieluń	Sulejów	Puławy	Włodawa
Legnica	0,0				
Wieluń	163,8	0,0			
Sulejów	255,4	92,6	0,0		
Puławy	401,4	238,3	146,0	0,0	
Włodawa	510,2	347,5	255,0	109,5	0,0

Tabela 3. Średnia miesięczna temperatura, miesięczna suma opadów oraz średnia dobową sumą promieniowania całkowitego w podziale na miesiące w latach 2002–2004 dla wybranych 5 stacji (Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW)

Table 3. Average monthly temperature, monthly precipitation and average daily sum of total radiation by month in the years 2002–2004 for 5 selected stations (Source: own elaboration based on IMGW data)

Miesiąc Month	$t_{\min}$ [°C]		$t_{\max}$ [°C]		SR [MJ · m ⁻²]		P [mm]	
	Avg	Sd	Avg	Sd	Avg	Sd	Avg	Sd
1	–5,5	6,8	0,1	5,6	2,6	1,4	28,4	6,7
2	–3,5	6,5	3,4	5,4	5,4	3,0	34,9	20,6
3	–0,3	4,1	8,2	5,6	9,6	4,4	26,9	12,8
4	3,0	3,9	13,6	5,1	14,9	5,7	30,8	17,8
5	9,3	3,4	20,7	4,3	19,7	6,4	57,7	32,7
6	11,5	2,8	23,0	3,5	20,7	6,5	52,5	27,4
7	13,8	2,9	25,5	4,1	19,1	5,9	70,7	22,6
8	13,4	2,7	26,0	3,3	17,4	5,3	52,0	23,1
9	8,1	3,5	19,6	4,7	12,5	4,8	30,4	11,7
10	4,4	4,3	12,0	5,0	6,2	3,1	51,4	23,4
11	1,9	3,7	7,8	4,5	3,0	1,7	39,6	20,2
12	–3,5	5,7	1,8	4,4	2,1	1,3	21,2	12,0
Rok (Year)*	4,4	7,9	13,5	10,1	11,1	8,2	41,4	24,6

*Wartość obliczona na podstawie wszystkich wartości dobowych ($t_{\min}$, $t_{\max}$, SR) lub sum miesięcznych w roku (P) w latach 2002–2004 dla pięciu wybranych stacji

W tabeli 3 przedstawiono charakterystyki liczbowe (wartości średnie, odchylenie standardowe oraz sumy opadów) dla każdej zmiennej, rozbite na miesiące w okresie 2002–2004 (uśrednione dla pięciu stacji). W przypadku opadów podano średnią z sumy miesięcznej. Średnia dobową temperaturę minimalną waha się od $-5,5^{\circ}\text{C}$ w styczniu do $13,8^{\circ}\text{C}$ w lipcu, natomiast średnia dobową temperaturę maksymalną od $0,1^{\circ}\text{C}$ w styczniu do $26,0^{\circ}\text{C}$ w sierpniu. W porównaniu do dobowej temperatury minimalnej, dla dobowej temperatury maksymalnej odnotowuje się większe odchylenie standardowe w miesiącach od marca do listopada, natomiast mniejsze w miesiącach zimowych, tj. od grudnia do lutego. Średnia miesięczna suma opadów znajduje się w przedziale od 21,2 mm w grudniu do 70,7 mm w lipcu. Zakres średniej dobowej sumy promieniowania całkowitego dla miesięcy wielolecia wynosi od $2,1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ w grudniu do $20,7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ w czerwcu.

Niewielka liczba stacji w Polsce prowadzi pomiary promieniowania – stanowią one niecałe 3% wszystkich stacji meteorologicznych IMGW. Mimo to, do badań udało się wybrać pięć stacji rozmieszczonych na podobnej szerokości geograficznej. Ma to istotne znaczenie ze względu na wartość SR_0 (*extraterrestrial solar radiation*) czyli ilość promieniowania słonecznego docierającego do górnej granicy atmosfery ziemskiej, zanim zostanie ono zmienione przez warunki atmosferyczne. SR_0 odgrywa kluczową rolę w szacowaniu całkowitego promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi. Wartość SR_0 jest determinowana przez kąt padania promieni słonecznych, który z kolei zależy od szerokości geograficznej, dnia roku oraz pory dnia. W konsekwencji, dla lokalizacji leżących na tej samej szerokości geograficznej średnia dobową wartość SR_0 w tym samym dniu roku będzie identyczna.

Metody szacowania promieniowania całkowitego

Wielu autorów opracowało modele szacujące promieniowanie całkowite na podstawie różnicy między maksymalną a minimalną temperaturą powietrza (Bristow i Campbell, 1984; Hunt i in., 1998; Wu i in., 2007). Opierają się one na zależności pomiędzy przepuszczalnością atmosferyczną a dobową amplitudą temperatury powietrza. Do szacowania dobowego promieniowania całkowitego w metodzie 2 wybrano

wzór (2) oparty o podstawowe dane meteorologiczne: opad i temperaturę. Jest to jeden z wielu możliwych do wyboru wzorów, jednakże dobrze szacujący promieniowanie. Został on zweryfikowany w warunkach klimatycznych Polski, a zarazem jest prosty i używa łatwo dostępnych danych meteorologicznych (Stanek i in., 2018; Stanek i in., 2024).

$$SR = SR_0 \left(a_1 (t_{\max} - t_{\min})^{\frac{1}{2}} + a_2 B \ln(1 + t_{\max} - t_{\min}) + a_3 \right) + a_4 P + a_5 t_{\max} \quad (2)$$

gdzie:

B – zmienna binarna, wskazująca wystąpienie opadu w danym dniu; przyjmuje wartość 1 w przypadku wystąpienia opadu oraz 0 w przypadku jego braku.

Dla każdej z pięciu stacji aktynometrycznych oraz każdego miesiąca w analizowanym okresie współczynniki a_1 , a_2 , a_3 , a_4 i a_5 ze wzoru (2) zostały wyznaczone za pomocą regresji liniowej w programie R (funkcja „lm”) z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów (MKN). W wyniku tego procesu uzyskano łącznie 60 równań szacujących dobowe promieniowanie całkowite, przy czym każdej stacji przypisano po 12 zestawów równań.

W celu porównania obu metod, M1 i M2, szacujących promieniowanie całkowite (SR), dla każdej stacji i każdego dnia w okresie 2002–2004 przeprowadzono oszacowanie promieniowania w pięciu wariantach dla metody 2: na podstawie wzorów szacujących dla analizowanej stacji oraz na podstawie wzorów z pozostałych czterech stacji sąsiednich, z uwzględnieniem danych meteorologicznych stacji analizowanej. Natomiast dla metody 1 dokonano oszacowania SR również w pięciu wersjach: przy użyciu danych SR z analizowanej stacji oraz danych SR z czterech pozostałych stacji. W ten sposób dla każdego dnia i każdej metody uzyskano łącznie $n = 25$ odrębnych oszacowań ($5 \text{ stacji} \times 5 \text{ wariantów oszacowań}$).

WYNIKI

Po skompletowaniu oszacowań promieniowania z obu metod, M1 i M2, porównano je za pomocą wartości Root Mean Square Error (RMSE).

Tabela 4. Porównanie RMSE dla dwóch metod szacowania promieniowania względem sąsiedniej stacji, w podziale na porę roku; M1 – metoda wykorzystująca wprost dane promieniowania całkowitego z sąsiedniej stacji, M2 – metoda oparta o wzór szacowania z sąsiedniej stacji, $n = 25$ (Źródło: opracowanie własne)

Table 4. Comparison of RMSE for two methods of estimating total radiation in relation to a neighboring station, by season; M1 – method using direct total radiation data from a neighboring station, M2 – method based on the estimation using the formula from a neighbor station, $n = 25$ (Source: own elaboration)

		Wiosna / Spring					Lato / Summer					Jesień / Autumn					Zima / Winter				
RMSE (MJ · m ⁻²)		Legnica	Wieluń	Sulejów	Puławy	Włodawa	Legnica	Wieluń	Sulejów	Puławy	Włodawa	Legnica	Wieluń	Sulejów	Puławy	Włodawa	Legnica	Wieluń	Sulejów	Puławy	Włodawa
M1	Legnica	0,0					0,0					0,0					0,0				
	Wieluń	4,1	0,0				4,1	0,0				1,9	0,0				2,0	0,0			
	Sulejów	5,7	3,9	0,0			6,2	5,2	0,0			2,5	2,1	0,0			2,1	1,1	0,0		
	Puławy	6,7	5,1	4,8	0,0		6,2	5,0	6,0	0,0		2,7	2,2	2,2	0,0		2,6	2,0	1,6	0,0	
	Włodawa	6,8	5,5	5,4	4,1	0,0	6,3	5,3	6,3	3,8	0,0	2,9	2,5	2,5	1,3	0,0	2,6	2,0	1,8	1,6	0,0
M2	Legnica	3,7	4,0	3,8	4,2	3,8	3,3	3,9	4,1	3,8	3,9	1,5	1,7	1,8	1,8	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,8
	Wieluń	3,6	3,2	3,6	4,0	3,4	3,7	3,2	4,2	3,7	3,5	1,6	1,4	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6	1,8	1,8	1,6
	Sulejów	4,4	4,5	4,1	4,6	4,6	5,0	5,4	4,3	5,0	5,3	2,2	2,1	1,9	2,3	2,3	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5
	Puławy	3,9	4,1	4,0	3,6	4,0	3,8	3,9	4,2	3,3	4,0	1,8	1,6	1,8	1,5	1,6	1,9	1,9	1,8	1,7	1,9
	Włodawa	3,9	3,8	4,0	4,1	3,6	3,6	3,2	4,3	3,4	3,0	1,9	1,7	1,8	1,8	1,6	1,7	1,6	1,7	1,8	1,6

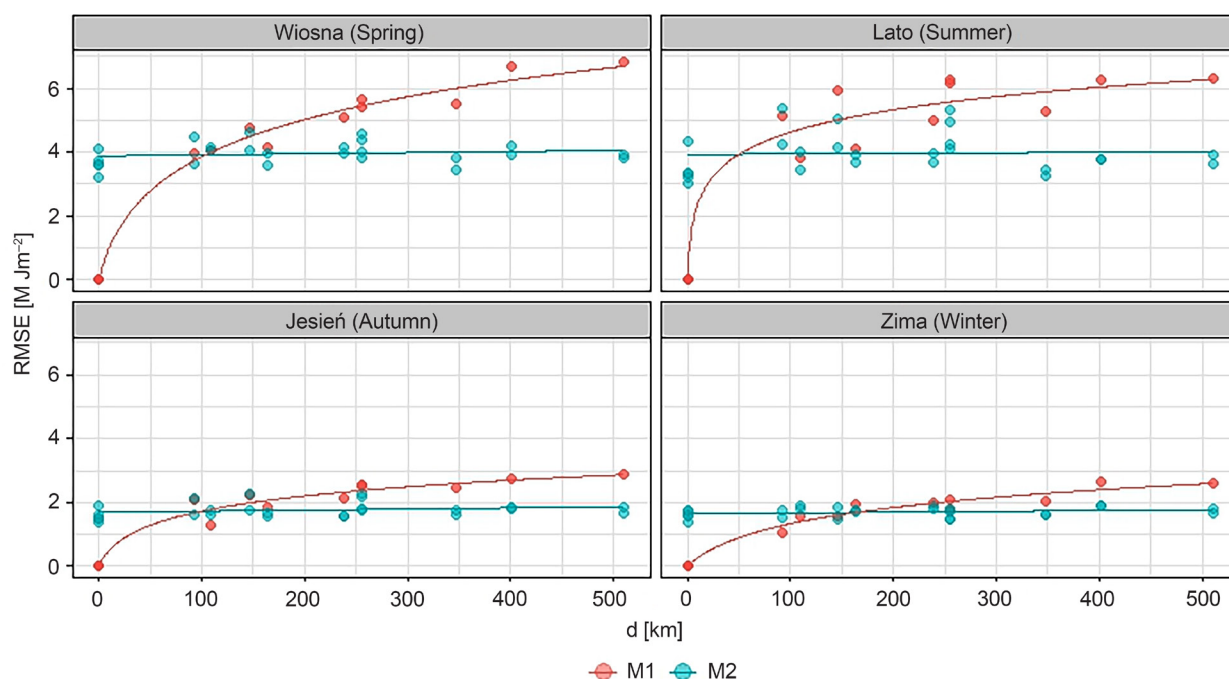
W celu poprawy przejrzystości tabeli 4, dla metody 1 wartości leżące ponad górną przekątną zostały pominięte. Należy zwrócić uwagę, iż metoda M1 jest symetryczna – błąd RMSE będzie taki sam, niezależnie od tego, czy szacujemy wartość stacji A na podstawie stacji B, czy odwrotnie. W obu przypadkach obliczenie RMSE sprowadza się do tych samych rachunków. Średnia wartość RMSE w badanym okresie, rozpatrywana w ujęciu sezonowym, wyniosła około 3,0 MJ · m⁻² dla M1 oraz 2,8 MJ · m⁻² dla M2. Wartości RMSE były wyższe w sezonach letnim i wiosennym, osiągając średnio około 4,1 MJ · m⁻², podczas gdy w sezonach jesiennym i zimowym wyniosły średnio około 1,7 MJ · m⁻². Zjawisko to można przypisać wyższym wartościom obserwowanego promieniowania całkowitego w okresach z dłuższym dobowym uśłonecznieniem.

Z całego rozważanego zagadnienia najciekawsze wydaje się pytanie: dla jakiej odległości pomiędzy sta-

cją A i B warto zastosować metodę pierwszą, a kiedy lepsza będzie metoda druga?

Za pomocą błędu szacowania RMSE podjęto próbę określenia granicznej odległości od sąsiedniej stacji, powyżej której korzystniejsze staje się szacowanie z wykorzystaniem wzoru (M2) zamiast danych pomiarowych sąsiednich stacji (M1). Zagadnienie to obrazuje rycina 2, która przedstawia dane z tabeli 4 po uwzględnieniu odległości pomiędzy stacjami.

W celu wyznaczenia granicznej odległości d , sugerującej wybór metody szacowania, do danych punktowych dopasowano odpowiednie krzywe. W przypadku metody 2 (szacowania za pomocą wzoru) najzasadnicze wydaje się dopasowanie liniowe. Współczynnik kierunkowy wyznaczonej prostej regresji jest bliski 0 oraz jest nieistotny statystycznie, $R^2 < 8\%$, co oznacza, że można przyjąć stałe średnie RMSE, tj. błąd szacowania za pomocą wzoru z sąsiedniej stacji



Ryc. 2. Błąd szacowania RMSE dla dwóch metod (M1, M2), w podziale na porę roku, z uwzględnieniem odległości pomiędzy stacjami, $n = 25$ (Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW)

Fig. 2. RMSE estimation error for two methods (M1, M2), in branches per season, taking into account the distance between stations, $n = 25$ (Source: own elaboration based on IMGW data)

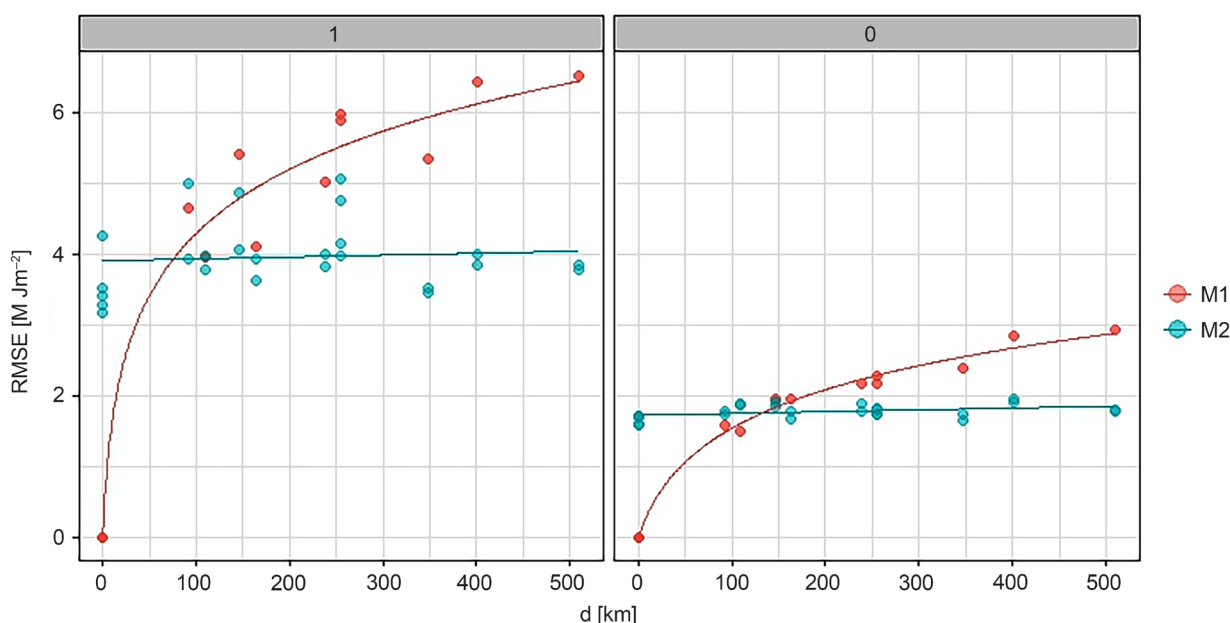
nie zmienia się wraz z odległością od niej. Wniosek ten jest pozytywny, oznacza, że mając wzór z odległych stacji Polski, można go zastosować do danych dla stacji z podobnej szerokości geograficznej, spodziewając się umiarkowanych i stabilnych błędów. Do danych z metody 1 dopasowano krzywą logarytmiczną o wzorze:

$$y = c_1 \ln(c_2 x + c_3) \quad (3)$$

Dla każdej pory roku współczynnik c_3 jest bardzo bliski 1 (w zakresie 0,999–1,003), co jest zgodne z założeniami działania modelu 2: krzywa przechodzi przez punkt (0, 0), czyli dla zerowej odległości błąd szacowania wynosi 0. Oznacza to, że szacując promieniowanie tymi samymi danymi pomiarowymi, nie popełniamy błędów. Dopasowanie logarytmiczne cechuje się wysokim R^2 , wynoszącym od 93% do 98%, co wskazuje na bardzo dobre dopasowanie modelu do danych. Na podstawie wszystkich dopasowanych krzywych dla każdej pory roku obliczono punkty prze-

cięcia, interpretowane jako graniczne odległości określające wybór metody wraz z podaniem błędu szacowania: wiosna (104,2 km; 3,9 MJ · m⁻²), lato (50,5 km; 3,9 MJ · m⁻²), jesień (100,1 km; 1,7 MJ · m⁻²) oraz zima (163,1 km; 1,7 MJ · m⁻²). Oznacza to, że na przykład dla jesieni do odległości 100 km mniejszy błąd (RMSE do 1,7 MJ · m⁻²) uzyskujemy, stosując metodę 1, czyli korzystając bezpośrednio z danych pomiarowych promieniowania sąsiedniej stacji. Powyżej tej odległości (na wschód lub zachód od stacji analizowanej) rekomendowana jest metoda 2, oparta na wzorze szacowania.

Warto zauważyć, że im cieplejsza pora roku, tym rekomendowana graniczna odległość jest mniejsza. Podobny wniosek wyciągnięto w ujęciu półrocznym, przedstawionym na rycinie 3. Dla okresu wegetacyjnego, uproszczonego jako okres od kwietnia do września, punkt przecięcia krzywych przypada na 75 km z RMSE 3,93 MJ · m⁻², natomiast dla półrocza chłodnego graniczna odległość wynosi niemal dwukrotnie więcej – 133 km – z RMSE 1,76 MJ · m⁻².



Ryc. 3. Błąd szacowania RMSE dla dwóch metod, w podziale na półrocza, z uwzględnieniem odległości pomiędzy stacjami, $n = 25$; 1 – okres wegetacyjny (IV–IX), 0 – półrocze chłodne (X–III) (Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW)

Fig. 3. RMSE estimation error for two methods, divided into half-years, taking into account the distance between stations, $n = 25$; 1 – vegetation period (IV–IX), 0 – cold half-year (X–III) (Source: own elaboration based on IMGW data)

Analogicznie przeliczono wartości RMSE w ujęciu miesięcznym, a następnie uśredniono je, co pozwoliło wyznaczyć średni roczny błąd RMSE dla dostępnych odległości, przedstawiony na wykresie 5. Dla metody 1 oszacowano parametry krzywej (3), uzyskując dobre dopasowanie do danych obserwacyjnych:

$$y = 1,10234 \cdot \ln(0,115235x + 1,00262) \quad (4)$$

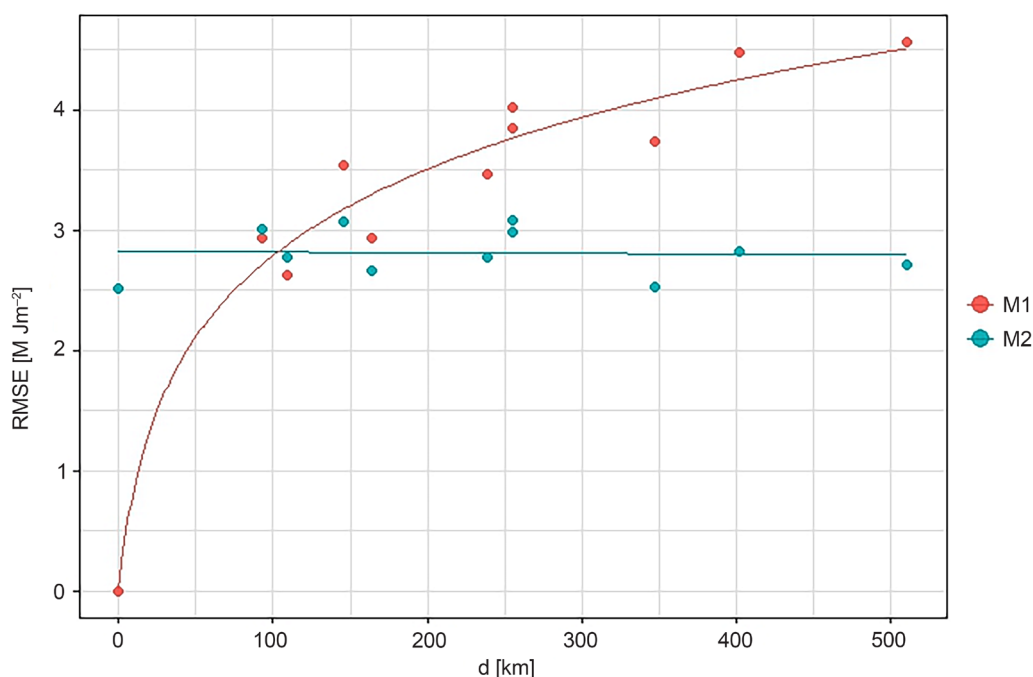
gdzie $R^2 = 0,9557$. Natomiast prosta regresji uzyskana dla metody 2, charakteryzująca się nieistotnym statystycznie współczynnikiem kierunkowym oraz niskim współczynnikiem determinacji ($R^2 = 0,0019$), ma postać:

$$y = -0,00006x + 2,8229$$

Punkt przecięcia obu krzywych o współrzędnych (103 km; $2,82 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) oznacza, że przy szacowaniu promieniowania dla dowolnego dnia w roku z wykorzystaniem danych pomiarowych promieniowania stacji sąsiedniej, oddalonej maksymalnie o 100 km,

przeciętny błąd szacowania nie powinien przekroczyć $2,82 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$. Natomiast przy korzystaniu z danych stacji bardziej oddległych rekomendowana jest metoda 2, dla której przeciętny błąd oszacowania wynosi około $2,82 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$.

Uwzględniając rozmieszczenie stacji aktynometrycznych oraz wyniki błędów RMSE, opracowano przestrzenną rekomendację dotyczącą wyboru metody szacowania promieniowania w zależności od sezonu. Na rycinie 5 zaznaczono obszary w odpowiednim promieniu od każdej stacji aktynometrycznej, gdzie zaleca się stosowanie metody M1, natomiast na pozostałym obszarze Polski korzystniejsze jest szacowanie promieniowania całkowitego za pomocą wzoru (metoda M2). Dla małych promieni (50–133 km) kształt każdego wyznaczonego obszaru na mapie jest bardzo zbliżony do koła, jednak w rzeczywistości bardziej przypomina sklezione półelipsy. Można również zauważyć, że obszary na południu Polski różnią się od tych na północy. Obszary te wyznaczono przy użyciu pakietu „geosphere” programu R (Hijmans, 2024).

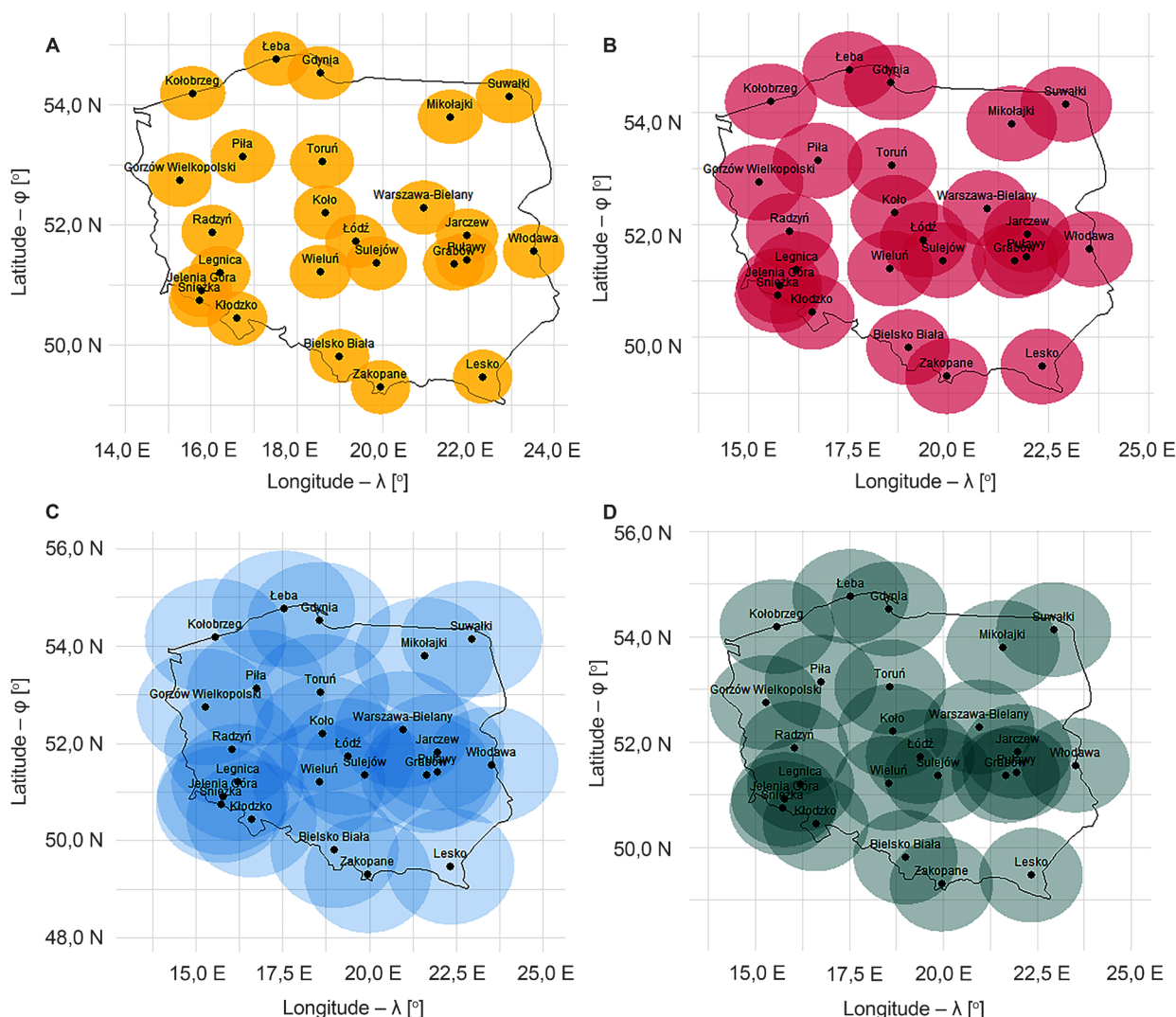


Ryc. 4. Średnie roczne błędy szacowania RMSE dla dwóch metod z uwzględnieniem odległości pomiędzy stacjami, $n = 11$ (Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW)

Fig. 4. The mean annual estimation errors RMSE for the two methods considering the distance between the stations, $n = 11$ (Source: own elaboration based on IMGW data)

Dla półrocza chłodnego na obszarze Polski (oznaczonego kolorem niebieskim) zaleca się stosowanie metody 1, która zapewnia pełne pokrycie. W każdej lokalizacji znajduje się choć jedna stacja pomiarowa promieniowania całkowitego w odległości do 133 km. Natomiast w okresie wegetacyjnym (półrocze ciepłe),

gdy promieniowanie słoneczne odgrywa kluczową rolę w modelowaniu wzrostu upraw, metoda 1 okazuje się mniej dokładna w wielu rejonach Polski. W takich przypadkach rekomenduje się stosowanie metody 2. Obszary te zlokalizowane są głównie w południowo-wschodniej oraz północno-wschodniej części kraju.



Ryc. 5. Rozmieszczenie stacji aktynometrycznych IMGW w Polsce wraz z zaznaczonymi obszarami z rekomendowaną M1 dla: lata (A), okresu IV–IX (B), X–III (C), roku (D) (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 5. Spatial distribution of IMGW actinometric stations in Poland, along with the highlighted areas with the recommended M1 for: summer (A), IV–IX (B), X–III (C), annual (D) (Source: own elaboration)

DYSKUSJA

Możliwość szacowania promieniowania całkowitego w dowolnym punkcie terenu oraz określanie wartości błędu dla różnych metod są niezwykle istotne. Znajomość rozkładu promieniowania całkowitego ma szerokie zastosowanie, ponieważ opisuje ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi. Od tej wielkości zależy intensywność wielu procesów sro-

dowiskowych – zarówno fizycznych, jak i biologicznych. Do procesów fizycznych zalicza się głównie parowanie, konwekcyjne ogrzewanie powietrza oraz ogrzewanie gleby. Natomiast procesy biologiczne obejmują zjawiska związane z funkcjonowaniem roślin, w szczególności transpirację i fotosyntezę. Wymienione procesy – podobnie jak wiele innych – mogą być modelowane na różne sposoby, jednak promieniowanie słoneczne zawsze stanowi jedną z kluczowych

zmiennych wejściowych. Efektem końcowym takich modeli mogą być między innymi prognozy plonów roślin, klimatyczny bilans wodny, a także prognozowanie suszy i warunków hydrologicznych. W ostatnich latach dane o promieniowaniu nabrały szczególnego znaczenia w kontekście odnawialnych źródeł energii, zwłaszcza w odniesieniu do instalacji fotowoltaicznych i kolektorów słonecznych.

Celem prowadzonych badań było porównanie dwóch metod szacowania dobowego całkowitego promieniowania słonecznego, wykorzystujących pomiary z sąsiednich stacji aktynometrycznych, z uwzględnieniem odległości punktu szacowania od tych stacji. Do oceny metod wykorzystano dane z pięciu stacji aktynometrycznych zlokalizowanych w Polsce: Legnica, Wieluń, Sulejów, Puławy oraz Włodawa. Pierwsza metoda (M1) polega na bezpośrednim wykorzystaniu danych aktynometrycznych z najbliższej stacji pomiarowej. Druga metoda (M2) korzysta ze wzoru, którego parametry są wyznaczane na podstawie danych z najbliższej stacji. Ocena obu metod została przeprowadzona poprzez szacowanie promieniowania w punktach lokalizacji istniejących stacji, z wykorzystaniem danych pomiarowych ze stacji sąsiednich. Pozwoliło to na porównanie oszacowań z rzeczywistymi pomiarami. Wyniki uzyskane za pomocą obu metod porównano, stosując błąd szacowania RMSE, co umożliwiło określenie granicznych odległości, dla których można rekomendować stosowanie jednej z metod (przedstawione na rycinach 2–4).

Wyniki badań wskazują, że w przypadku rocznych wartości promieniowania metoda M1 (szacowanie promieniowania na podstawie danych ze stacji sąsiedniej) przynosi lepsze rezultaty dla punktów oddalonych od najbliższej stacji do 100 km. Powyżej tej odległości metoda M2 (oparta na prostych zmiennych meteorologicznych) okazuje się korzystniejsza, charakteryzując się niższymi wartościami błędu RMSE. W przypadku oszacowań miesięcznych efektywność metody M1 zmienia się sezonowo. Dla miesięcy letnich jest ona optymalna jedynie do 50 km. Zasięg ten zwiększa się do 100 km w miesiącach wiosennych i jesiennych, natomiast w okresie zimowym osiąga nawet 150 km. Ze względu na podział na okres wegetacyjny (kwiecień–wrzesień), skuteczność M1 utrzymuje się do 133 km, a dla okresu chłodnego (październik–marzec) spada do 75 km. Metoda M1 jest prostsza w implementacji

i skuteczna, gdy punkty szacowania danych znajdują się w relatywnie bliskiej odległości od stacji pomiarowej, co umożliwia bezpośrednie wykorzystanie jej danych. Z kolei metoda M2 charakteryzuje się większą stabilnością, a jej błąd szacowania nie wzrasta wraz z odległością. Czyni to M2 korzystniejszym rozwiązaniem w przypadku większych odległości od stacji pomiarowej, ponieważ zastosowanie M1 w takich warunkach prowadziłoby do istotnego wzrostu błędów szacowania.

Na rycinie 5 zaprezentowano cztery mapy Polski, ilustrujące zasięg optymalnego zastosowania metody M1 (szacowanie promieniowania z wykorzystaniem danych ze stacji sąsiedniej) w porównaniu do metody M2. Mapy przedstawiono dla różnych okresów: lata kalendarzowego (A), okresu kwiecień–wrzesień (B), październik–marzec (C) oraz całego roku (D). Z analizy map wynika, że w okresie letnim (mapa A) obszar, na którym metoda M1 zapewnia lepsze rezultaty niż M2, jest wyraźnie mniejszy. W tym przypadku widoczne są również luki w pokryciu, wskazujące na brak stacji aktynometrycznych. W okresie od kwietnia do września (mapa B) zasięg metody M1 znacznie się zwiększa, obejmując większość terytorium kraju. Niemniej jednak, nadal istnieją niepokryte obszary, choć są one zdecydowanie mniejsze niż latem. Natomiast w przypadku okresu październik–marzec (mapa C) oraz całego roku (mapa D), szacowanie promieniowania całkowitego z wykorzystaniem danych z najbliższej dostępnej stacji pomiarowej (metoda M1) okazuje się skuteczne praktycznie na całym obszarze Polski. Warto podkreślić, że w wielu lokalizacjach obszary optymalnego zastosowania M1 pokrywają się, co oznacza możliwość szacowania promieniowania z wykorzystaniem danych z kilku stacji aktynometrycznych.

WNIOSKI

W niniejszym badaniu określono zasięg przestrzenny danych pomiarowych promieniowania całkowitego ze stacji aktynometrycznych, w kontekście ich bezpośredniego wykorzystania do oszacowania wartości tego promieniowania w innym punkcie. Analiza wykazała, że zasięg ten jest zależny od rozpatrywanego sezonu. Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że dla kalendarzowego lata bezpośrednio

wykorzystanie danych pomiarowych jest uzasadnione w promieniu 50 km od stacji aktynometrycznych, co obejmuje 43% powierzchni Polski (135 918 km²). Na pozostałym obszarze zaleca się stosowanie wzoru, którego parametry wyznaczone są na podstawie danych z najbliższej stacji. W półroczu ciepłym (kwiecień–wrzesień) zasięg ten wzrasta do 74% powierzchni kraju (231 601 km²), co odpowiada granicznej odległości 75 km. Natomiast w półroczu chłodnym (październik–marzec) bezpośrednie wykorzystanie danych pomiarowych jest możliwe na 99,5% obszaru Polski, co odpowiada granicznej odległości 133 km. W skali rocznej zasięg danych pomiarowych wynosi 100 km, umożliwiając bezpośrednie wykorzystanie danych na 92,64% powierzchni kraju.

Wyniki badań są zróżnicowane i mogą służyć jako podstawa do dalszych prac nad optymalizacją metod szacowania promieniowania, zwłaszcza w kontekście różnorodnych zastosowań w energetyce odnawialnej i monitoringu środowiskowym.

BIBLIOGRAFIA

- Adamala, S., Krishna Reddy, Y.V. (2019). Evaluation of Different Solar Radiation Estimation Methods for Indian Locations. In: Rathinasamy, M., Chandramouli, S., Phanindra, K., Mahesh, U. (eds). *Water Resources and Environmental Engineering II*. Springer, Singapore.
- Archontoulis, S.V., Miguez, F.E. (2015). Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agronomy Journal*, 107, 786–798.
- Bac, S., Iwański S., Kuchar, L. (2008). Estimation of potential evaporation for winter season for the needs of hydrological modelling. *Acta Agrophysica*, 12(2), 305–314.
- Ball, R.A., Purcell, L.C., Carey, S.K. (2004). Evaluation of solar radiation prediction models in North America. *Agronomy Journal*, 96, 391–397.
- Bechini, L., Ducco, G., Donatelli, M., Stein, A. (2000). Modelling, interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, 29–42.
- Becker, R.A., Minka, T.P., Deckmyn, A. *maps: Draw Geographical Maps*. R package version 3.4.2.1, (2024). <https://CRAN.R-project.org/package=maps>.
- Bellocchi, G., Donatelli, M., Fila, G. (2003). Evaluation of estimated radiation data for calculating evapotranspiration and crop biomass. *Italian Journal of Agronomy*, 7, 95–102.
- Bristow, K.L., Campbell, G.S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31, 2, 159–166.
- Chen, J.-L., He, L., Yang, H., Ma, M., Chen, Q., Wu, S.-J., Xiao, Z.-L. (2019). Empirical models for estimating monthly global solar radiation: A most comprehensive review and comparative case study in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 91–111.
- Czernecki, B., Głogowski, A., Nowosad, J. (2020). Climate: An R Package to Access Free In-Situ Meteorological and Hydrological Datasets for Environmental Assessment. *Sustainability*, 12, 394. <https://doi.org/10.3390/su12010394>
- Deng, N., Ling, X., Sun, Y., Zhang, C., Fahad, S., Peng, S., Cui, K., Nie, L., Huang, J. (2015). Influence of temperature and solar radiation on grain yield and quality in irrigated rice system. *European Journal of Agronomy*, 64, 37–46.
- Döll, P., Kaspar, F., Lehner, B. (2003). A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology*, 270, 105–134.
- Evrendilek, F., Ertekin, C. (2008). Assessing solar radiation models using multiple variables over Turkey. *Clim Dyn*, 31, 131–149.
- Fischer, R. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science*, 105(2), 447–461.
- Garofalo, P., Rinaldi, M. (2015). Leaf gas exchange and radiation use efficiency of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in response to different deficit irrigation strategies: From solar radiation to plant growth analysis. *Europ. J. Agronomy*, 64, 88–97.
- Goodin, D.G., Hutchinson, J.M.S., Vanderlip, R.L., Knapp, M.C. (1999). Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data. *Agroclimatology*, 91, 845–851.
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P., Villette, S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 269–283.
- Hijmans R. (2024). *_geosphere: Spherical Trigonometry_*. R package version 1.5–20. <https://CRAN.R-project.org/package=geosphere>.
- Hunt, L.A., Kuchar, L., Swanton C.J. (1998). Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, 293–300.
- Karaca, C. (2023). Estimation of daily global solar radiation based on different whitening applications using

- temperature in Mediterranean type greenhouses. *Italian Journal of Agrometeorology*, 1, 79–93.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D.M. (2005). A Comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States. *JAWRA (Journal of the American Water Resources Association)*, 41(3), 621–633.
- Page, J. (2018). The role of solar-radiation climatology in the design of photovoltaic systems. In: S.A. Kalogirou (ed.), *McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Academic Press, USA, 601–670.
- Prescott, J.A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 64, 114–118.
- Qian, B., Jing, Q., Shang, J., Liu, J., Dong, T., Jong, R., Zhang, X., Wan, H. (2019). Adapting estimation methods of daily solar radiation for crop modelling applications in Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 99, 533–547.
- Saberali, S.F., Shirmohammadi-Aliakbarkhani, Z., Nastari Nasrabadi, H. (2022). Simulating winter wheat production potential under near-future climate change in arid regions of northeast Iran. *Theoretical and Applied Meteorology*, 148, 1217–1238.
- Samani, Z. (2000). Estimation solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126, 265–267.
- Stanek, P., Kuchar, L., Otop, I. (2018). Estimation of diurnal total radiation based on meteorological variables in the period of plant vegetation in Poland. *ITM Web of Conferences*, 23, 1–6.
- Stanek, P., Leśny, J., Kuchar, L., Broszkiewicz-Suwaj, E. (2024). Ocena wykorzystania instalacji fotowoltaicznej w okresie jesienno-zimowym w aspekcie zmiany klimatu. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 23(2), 97–110.
- Šúri, M., Hofierka, J. (2004). A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. *Transactions in GIS*, 8(2), 175–190.
- Šúri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D., Ossenbrink, H.A. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy*, 81(10), 1295–1305.
- Urban, G., Kuchar, L., Kepinska-Kasprzak, M., Laszyca E.Z. (2022). A climatic water balance variability during the growing season in Poland in the context of modern climate change. *Meteorologische Zeitschrift*, 31(5), 349–365.
- Van Wart, J., Grassini, P., Tang, H., Claessens, L., Jarvis, A., Cassman, K.G. (2015). Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49–58, 209–210.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag, New York.
- Wu, G., Liu, Y., Wang, T. (2007). Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data. A case study in Nanchang station, China. *Energy Conversion and Management*, 48(9), 2447–2452.
- Zhang, Q., Cui, N., Feng, Y., Jia, Y., Li, Z., Gong, D. (2018). Comparative Analysis of Global Solar Radiation Models in Different Regions of China. *Advances in Meteorology*, 3894831, 21 pages.
- Zhou, J., Dong, Q. (2024). Using Temperature Models to Estimate ET₀ in Data-scarce Regions with Limited Solar Radiation Data. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 45(7), 701–714.

ESTIMATION OF TOTAL RADIATION USING MEASUREMENT DATA FROM NEIGHBOURING METEOROLOGICAL STATIONS IN POLAND

ABSTRACT

Aim of the study

The objective of this study is to compare two methods for estimating the daily total solar radiation (SR) based on measurements from neighboring meteorological stations, taking into account the mutual distance between the stations.

Material and methods

Using data from five stations located in lowland areas of Poland, two methods for estimating daily total solar radiation at any given station were proposed, both utilizing measurements from a neighboring station.

The first method relies on the direct use of radiation measurement data from the neighboring station, while the second method employs an estimation formula derived from daily temperature and precipitation values recorded at that station. The analysis of estimation errors as a function of distance enabled identification of critical distances for the application of each method.

Results and conclusions

The results indicate that estimating SR using direct radiation measurements is recommended for locations up to approximately 100 km from the reference station. Beyond this distance, the method based on meteorological variables and the derived formula for the nearest station is more advantageous. The recommended critical distances vary seasonally and range between 50 and 150 km. Stations selected for analysis were situated at similar latitudes.

Keywords: precipitation, air temperature, daily total radiation, estimation methods and errors