

**Maciej Kryza\*,  
Mariusz Szymanowski\*\*,  
Krzysztof Migala\***

**ZASTOSOWANIE MODELU R.SUN DO OKREŚLENIA  
DOBOWYCH SUM PROMIENIOWANIA RZECZYWISTEGO  
NA LODOWCU WERENSKJOLDA (SW SPITSBERGEN)**

**Estimation of the real-sky total solar irradiation for the Werenskjold  
glacier (SW Spitsbergen) with the r.sun model**

**Summary.** The r.sun model was applied to assess the spatial and temporal changes in incoming total (beam + diffused) real sky radiation. Presented approach accounts for aerosol, precipitable water content and cloudiness effects on attenuation of solar radiation. The results are compared with the measurements gathered at Polish Polar Station, showing good agreement.

**Słowa kluczowe:** promieniowanie rzeczywiste, r.sun, GIS

**Key words:** real-sky radiation, r.sun, GIS

W niniejszym artykule badania terenowe i ich analizy wykonano w ramach projektu finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (N N306 179737) pt. „Model zmian systemu drenażu in- i subglacialnego politermalnych lodowców na Svalbardzie w warunkach ocieplania klimatu (na przykładzie Werenskioldbreen)”

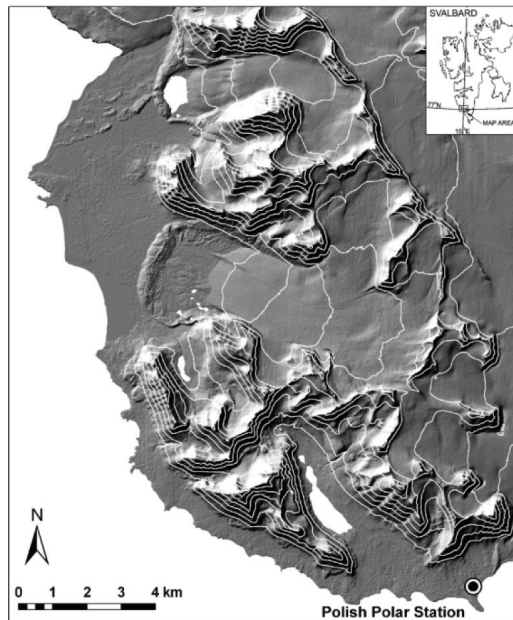
**WSTĘP**

Wielkość promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi zależy od szeregu czynników: astronomicznych, atmosferycznych i uwarunkowanych rzeźbą terenu. Modelowanie czasowej i przestrzennej zmienności dopływu promieniowania słonecznego do obszaru Spitsbergenu jest dodatkowo utrudnione ze względu na małe wysokości Słońca nad horyzontem w ciągu roku oraz na złożoną rzeźbę terenu i konieczność uwzględnienia wywołanych nią

---

\* Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery, 51–670 Wrocław, ul. Kosiby 6/8, e-mail: maciej.kryza@uni.wroc.pl, krzysztof.migala@uni.wroc.pl

\*\* Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Zakład Kartografii, 50–137 Wrocław, pl. Uniwersytecki 1, e-mail: mariusz.szymanowski@uni.wroc.pl



**Ryc. 1.** Cyfrowy model terenu obszaru badań oraz lokalizacja Polskiej Stacji Polarnej PAN (PPS; © Norsk Polarinstitute and University of Silesia)

**Fig. 1.** Digital elevation model for the study area and location of the Polish Polar Station

zasłoneń. Dodatkowo na wielkość promieniowania docierającego do powierzchni terenu ma wpływ zjawisko tzw. zamglenia arktycznego (ang. *Arctic Haze*; Krzyścin i Sobolewski 2001, Lund Myhre i in. 2007), występujące szczególnie często w okresie wiosny. Podczas zamglenia arktycznego występują duże wielkości takich parametrów stanu atmosfery, jak AOT (*Aerosol Optical Thickness*), a efektem jest zmniejszenie dopływu promieniowania do powierzchni ziemi.

Kompleksowe oddziaływanie różnych czynników warunkujących dopływ promieniowania do powierzchni ziemi skutkuje dużą zmiennością przestrzenną i czasową tego elementu meteorologicznego. Z tego względu, a także z uwagi na zwykle małą gęstość sieci pomiarowej, nie jest możliwe uzyskanie przestrzennej informacji o dopływie promieniowania na podstawie interpolacji wielkości obserwowanych. Zastosowanie znajdują tu modele fizyczne, zaimplementowane m.in. w systemach informacji przestrzennej GIS. Pozwalają one na obliczenie dopływu promieniowania słonecznego na podstawie cyfrowego modelu terenu i parametryzacji procesów atmosferycznych. Przykładami takich narzędzi są modele *r.sun* w systemie GIS GRASS (Šuri, Hofierka 2004), *SolarFlux* w ArcInfo (Dubayah, Rich 1995) czy *Solei* w systemie Idrisi (Mikłanek 1993).

Celem pracy jest określenie czasowej i przestrzennej zmienności dobowych sum dopływu rzeczywistego (z uwzględnieniem zachmurzenia) promie-

niowania całkowitego (bezpośrednie + rozproszone) na obszarze Lodowca Werenskjolda (SW Spitsbergen) z zastosowaniem modelu r.sun. Analizę przeprowadzono w odniesieniu do sezonów ablacyjnych (okres czerwiec-sierpień) w latach 2007–2008, a wyniki zweryfikowano przez porównanie z pomiarami dobowych sum promieniowania całkowitego prowadzonymi na Polskiej Stacji Polarnej PAN.

## OBSZAR BADAŃ

Obszar analizy obejmuje „szerokie” otoczenie Lodowca Werenskjolda (SW Spitsbergen), o powierzchni całkowitej 288 km<sup>2</sup> (ryc. 1). Wysokość terenu zmienia się na tym obszarze od poziomu morza do 948 m n.p.m. W południowej części rejonu znajduje się Polska Stacja Polarna PAN (PPS), z której dane obserwacyjne posłużyły do weryfikacji wyników.

## METODYKA BADAŃ

Zastosowany w pracy model r.sun jest częścią systemu informacji geograficznej GRASS (GRASS Development Team 2010). Szczegółowy opis modelu zawierają prace Hofierki (1997) oraz Šuriego i Hofierki (2004). Model pozwala na uzyskanie informacji przestrzennej o dopływie promieniowania bezpośredniego, rozproszonego, całkowitego (bezpośrednie + rozproszone) oraz odbitego w warunkach czystego i zachmurzonego nieba. Model może pracować w dwóch trybach, pozwalających na uzyskanie informacji o dopływie promieniowania dla zadanej daty i czasu (tryb chwilowy) oraz o sumach dobowych. W pracy zastosowano drugi tryb (sumy dobowe), co wiązało się z dostępnością danych pomiarowych do weryfikacji wyników.

Model r.sun wymaga na wejściu dostarczenia przestrzennej informacji o wysokości nad poziomem morza oraz obliczonych na jej podstawie pochodnych: nachyleń i ekspozycji stoków. Opcjonalnie model pozwala na uwzględnienie zasłoneń terenowych, określonych na podstawie DEM. Wszystkie wyniki prezentowane w pracy zostały uzyskane z włączoną opcją dla zasłoneń terenowych, co było uzasadnione złożoną rzeźbą obszaru badań. Model terenu zastosowany w pracy miał rozdzielczość przestrzenną 10 m x 10 m. Niezbędne parametry astronomiczne, takie jak deklinacja Słońca, są obliczane wewnętrznie przez model. Parametryzacja elementów atmosferycznych pozwala na określenie osłabienia promieniowania słonecznego ze względu na zawartość aerozolu atmosferycznego i pary wodnej przez współczynnik zmętnienia Linkego (*Linke Turbidity Factor*, LTF). Dodatkowo program pozwala na wprowadzenie

parametrów charakteryzujących osłabienie dopływu promieniowania wynikające z zachmurzenia. Zastosowany w pracy sposób parametryzacji LTF i zachmurzenia opisano poniżej.

LTF może być interpretowany jako liczba czystych, suchych atmosfer, jaka wywołałaby takie osłabienie promieniowania, jakie jest obserwowane w warunkach atmosfery rzeczywistej (Vida i in. 1999, Dogniaux 1984). Parametr ten został wyliczony dla każdego dnia indywidualnie z zastosowaniem formuły zaproponowanej przez Dogniaux (1984). Wcześniejsze prace wykazały, że ten sposób parametryzacji działa poprawnie w odniesieniu do SW Spitsbergenu i warunków czystego nieba (Kryza i in. 2010). Podstawą do obliczenia LTF są informacje o zawartości wody w atmosferze (*precipitable water content*, PWC) oraz zawartość aerozolu w atmosferze, wyrażona parametrem AOT. Informacja o PWC była dostępna z sondaży aerologicznych, wykonywanych dwa razy na dobę na stacji Bjørnøya. Pomiar AOT prowadzone są na PPS w ramach sieci AERONET ([aeronet.gsfc.nasa.gov](http://aeronet.gsfc.nasa.gov)). Ze względu na małą liczbę danych pomiarowych dotyczących AOT, przyjęto stałą wielkość na poziomie 0,05 (średnia z pomiarów w analizowanym okresie). Na podstawie tych informacji obliczono LTF dla każdego dnia analizowanego okresu.

Parametr opisujący rolę zachmurzenia (PNH) w modelu r.sun zmienia się od wielkości 1,0 (czyste niebo) do 0,35 (pełne zachmurzenie). Jego wielkość została obliczona na podstawie rzeczywistych obserwacji wielkości zachmurzenia (NH) prowadzonych na PPS, z zastosowaniem formuły:

$$\text{PNH} = 1 - 0,65 \cdot \left( \frac{\text{NH}}{8} \right)^2 \quad (1)$$

PNH został wyliczony na podstawie średniego dobowego zachmurzenia w okresie od wschodu do zachodu słońca. Zarówno LTF, jak i PNH zostały wprowadzone do modelu r.sun jako wielkości niezmiennie przestrzennie.

Dobowe sumy całkowitego promieniowania rzeczywistego obliczone przez model r.sun zostały porównane z wynikami pomiarów prowadzonych na PPS. Błąd modelu (E) został wyliczony jako różnica między wielkością modelowaną a zmierzoną. Na jego podstawie zostały obliczone sumaryczne statystyki błędu: BIAS, MAE, RMSE i normalizowany MAE. BIAS (średnia arytmetyczna E) jest miarą określającą ogólną tendencję modelu do przeszacowywania (BIAS >0) bądź niedoszacowania wielkości obserwowanych. MAE i RMSE są miarami średniego błędu. BIAS, MAE i RMSE wyrażone są, w przypadku tego opracowania, w  $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ . Normalizowana wartość MAE wyraża średni błąd w procentach, pozwalając na wykonanie analiz skuteczności działania modelu w różnych miesiącach i sezonach. Dodatkowo został wyliczony współczynnik korelacji między wielkościami modelowanymi a obserwowanymi. Wszystkie statystyki błędu wyliczono, stosując wzory przedstawione w pracy Yu i in. (2006).

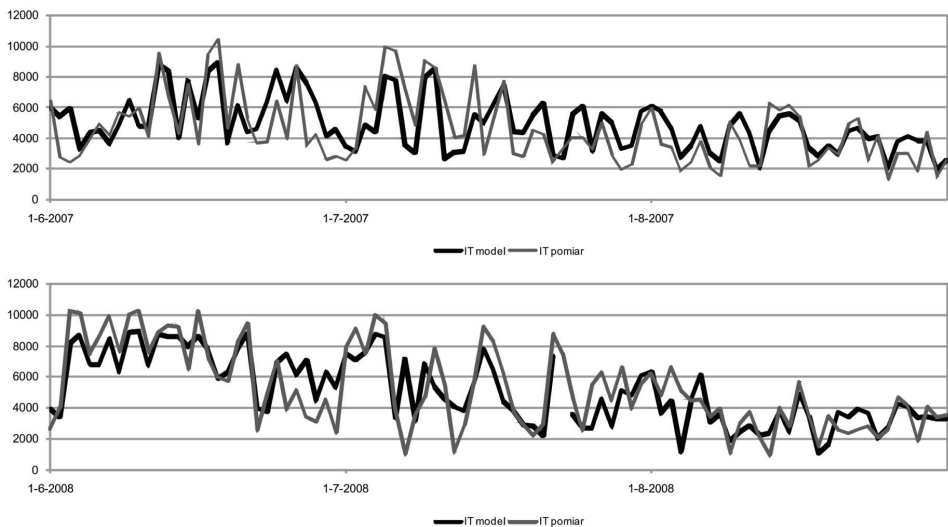
## WYNIKI BADAŃ

Wyniki modelu r.sun uzyskane dla sezonów ablacyjnych 2007 i 2008 są w dobrej zgodności z wartościami obserwowanymi na PPS, ze współczynnikiem korelacji przekraczającym 0,9 (tab. 1). Wysokie współczynniki korelacji świadczą o tym, że r.sun jest w stanie prawidłowo określić zmiany dobowych sum rzeczywistego promieniowania całkowitego na obszarze badań (ryc. 2). W roku 2007 model ma tendencję do przeszacowywania wielkości rzeczywistego promieniowania całkowitego (dodatnia wielkość BIAS), natomiast w roku 2008 do niedoszacowania. Średni błąd, określony w odniesieniu do całego okresu ablacyjnego, wynosi 27% w roku 2007 i 23% w 2008.

**Tabela 1.** Statystyki błędu wyników modelu r.sun

**Table 1.** Statistical evaluation of the r.sun model results

Rok	BIAS	MAE	RMSE	NMAE	R
2007	308,5	1517,1	1211,7	26,5	0,94
2008	-227,5	1685,5	1183,5	22,5	0,94



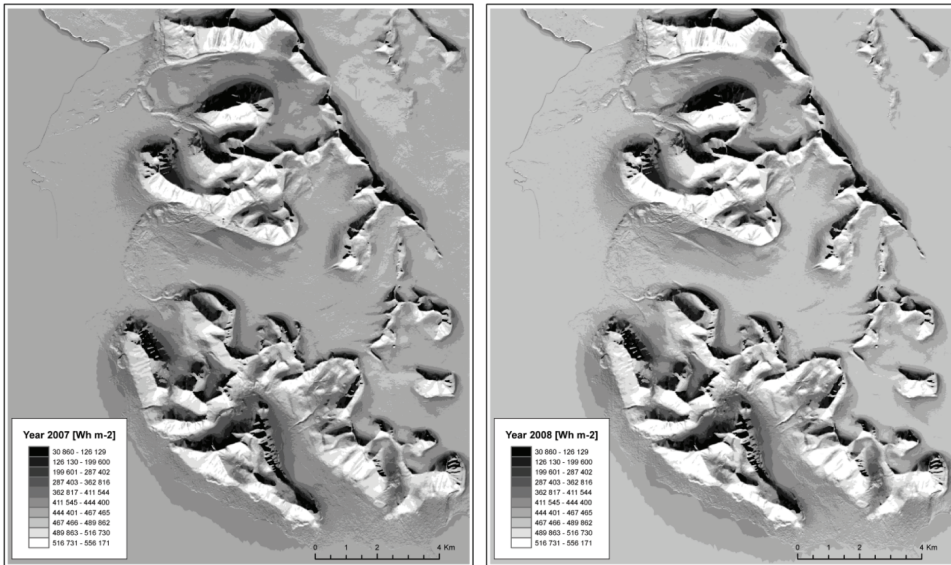
**Ryc. 2.** Porównanie zmierzonych i modelowanych wielkości dobowych sum promieniowania całkowitego w roku 2007 i 2008 ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dzien}^{-1}$ )

**Fig. 2.** Measured vs. modelled daily sums of total real-sky solar radiation for ablation season 2007 and 2008 ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ )

Przestrzenną zmienność dopływu promieniowania rzeczywistego do powierzchni terenu, obliczoną z zastosowaniem modelu r.sun, przedstawia ryc. 3. Średnia wielkość dopływu promieniowania całkowitego na całym obszarze



analizy wyniosła  $117024 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}$  w roku 2007 i  $98686 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}$  w roku 2008. Największe wielkości charakterystyczne są dla stoków o ekspozycji południowej, a minima charakterystyczne są dla obszarów eksponowanych na północ oraz będących w cieniu otaczających wzniesień.



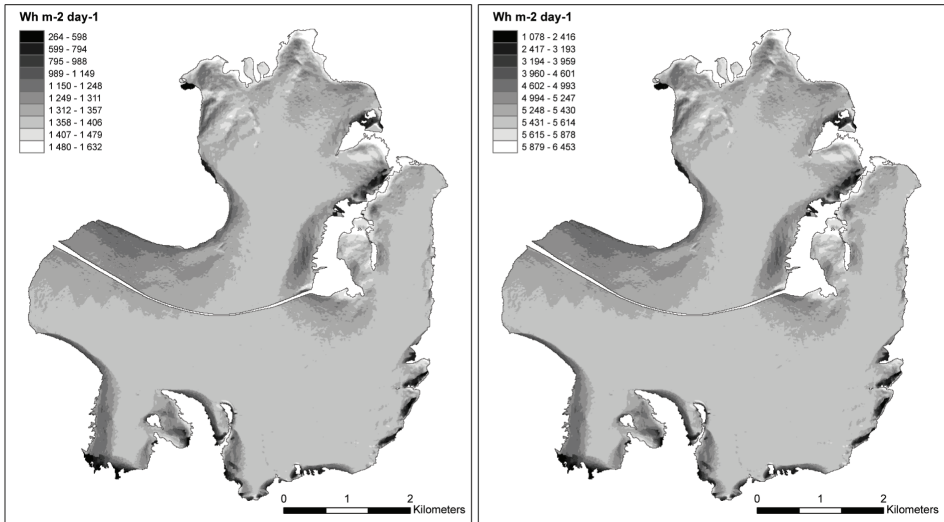
**Ryc. 3.** Suma promieniowania rzeczywistego docierająca do powierzchni terenu w sezonie ablacyjnym 2007 i 2008

**Fig. 3.** Sums of the real sky total radiation for the ablation seasons of 2007 and 2008

Przestrzenny obraz różnic w dopływie promieniowania całkowitego, wynikający z przyjętej parametryzacji zachmurzenia, obliczone dla wybranego dnia (15 czerwca), prezentuje ryc. 4. Największe różnice w dopływie promieniowania między dniem bezchmurnym i przy określonym zachmurzeniu występują na stokach o ekspozycji południowej, co wynika z istotnej redukcji dopływu promieniowania bezpośredniego przez zachmurzenie. W przypadku stoków o ekspozycji północnej zmiany między dopływem promieniowania całkowitego w dniu bezchmurnym i przy określonym zachmurzeniu są najmniejsze.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki modelowania dobowych sum promieniowania rzeczywistego docierającego do powierzchni terenu w dwóch sezonach ablacyjnych do obszaru SW Spitsbergenu. Na podstawie dostępnych danych meteorologicznych wykonano parametryzację efektu zmętnienia atmosferycz-



**Ryc. 4.** Różnice dobowej sumy promieniowania całkowitego według symulacji dla bezchmurnego nieba i zachmurzenia  $NH = 4$  (lewa strona) oraz  $NH = 8$  (prawa strona), przykład dla 15 czerwca ( $Wh \cdot m^{-2} \cdot dzień^{-1}$ )

**Fig. 4.** Differences between daily sums of total solar radiation for clear sky conditions and cloudiness 4 (left) and 8 (right) – example for June 15 ( $Wh \cdot m^{-2} \cdot dzień^{-1}$ )

nego, wyrażoną współczynnikiem Linkego, oraz zachmurzenia. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że model r.sun przy zaproponowanej parametryzacji jest w stanie poprawnie (na co wskazują zaprezentowane statystyki błędu) określić ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni terenu oraz przedstawić jej zmienność czasową.

Uzyskane wyniki mogą być poprawione przez rozszerzenie parametryzacji zachmurzenia w sposób pozwalający na uwzględnienie pięter i typów chmur. Na obecnym etapie prac parametryzacja opiera się wyłącznie na zachmurzeniu ogólnym. Istotny wpływ na zgodność wyników modelowania z obserwacjami ma też poprawa parametryzacji współczynnika zmętnienia Linkego. Główne uproszczenie przyjęte w tej pracy to stała dla całego okresu analizy wielkość AOT, na której bazuje LTF.

## Literatura

Dogniaux R., 1984, *De l'influence de l'estimation du facteur total de trouble atmosphérique sur l'évaluation du rayonnement solaire direct par ciel clair. Application aux données radio-métriques de L'IRM à Uccle*. Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea – Serie C, 20.

- Dubayah R., Rich P.M., 1995, *Topographic solar radiation models for GIS*. Int. Jour. of GIS, 9, 405–419.
- GRASS Development Team, 2010, *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.0*. Open Source Geospatial Foundation.
- Hofierka J., 1997, *Direct solar radiation modelling within an open GIS environment*. Proceedings of the Joint European GI Conference 1997, Vienna, 575–584.
- Kryza M., Szymanowski M., Migala K., Pietras M., 2010, *Spatial information on total solar radiation: application and evaluation of the r.sun model for the Wedel Jarlsberg Land, Svalbard*. Polish Polar Res., 31 (1), 17–32.
- Krzyściń J.W., Sobolewski P.S., 2001, *The surface UV-B irradiation in the Arctic: observations at the Polish polar station, Hornsund (77N, 15E), 1996–1997*. Jour. of Atm. and Solar-Terrestrial Physics, 63, 321–329.
- Lund Myhre C., Toledano C., Myhre G., Stebel K., Yttri K.E., Aaltonen V., Johnsrud M., Frioud M., Cachorro V., de Frutos A., Lihavainen H., Campbell J.R., Chaikovsky A.P., Shiobara M., Welton E.J., Torseth K., 2007, *Regional aerosol optical properties and radiation impact of the extreme smoke event in the European Arctic in spring 2006*. Atm. Chemistry and Physics, 7, 5899–5915.
- Šuri M., Hofierka J., 2004, *A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments*. Transactions in GIS, 8(2), 175–190.
- Miklánek P., 1993, *The estimation of energy incoming grid points over the basin using simple digital elevation model*. Annales Geophysicae (Supplement II), 11, 296.
- Vida J., Foyo-Moreno I., Alados-Arboledas L., 1999, *Performance validation of MURAC, a cloudless sky radiance model proposal*. Energy, 24, 705–721.
- Yu S., Eder B., Dennis R., Chu S., Schwartz S.E., 2006, *An unbiased symmetric metrics for evaluation of fair quality models*. Atmos. Sci. Letters, 7, 26–34.