

MODELOWANIE DOPŁYWU PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DO OBSZARÓW O UROZMAICONEJ RZEŻBIE TERENU W SYSTEMACH INFORMACJI GEOGRAFICZNEJ

KAMIL LEZIAK

Zakład Klimatologii, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,
Uniwersytet Warszawski
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

Abstract: The inflow of solar radiation to the active surface is among the crucial factors determining its radiation balance and thus the climate conditions. Due to limited research and a multitude of surfaces, the determination of the spatial distribution of solar radiation on the basis of *in situ* research is hampered. Therefore actinometrical models are used to calculate the value of solar irradiance with reference to digital elevation models. Two actinometrical models were described: r.sun implemented in the GRASS GIS software and the *Area Solar Radiation* (ARS) provided in the ArcMap program, a part of the ArcGIS package. A digital elevation model of the East Carpathian Mountains in Romania was used as entry data for the above described models and a comparative analysis of the following characteristics was performed: total solar irradiance, direct irradiance, diffused irradiance and direct daylight duration. It was determined that despite the fact that both actinometrical models show different values of solar irradiance for the same area, they reflect similar spatial distributions. While both models are deemed valid tools for calculating solar radiation in mountainous areas, elementary knowledge of the tools is a must in order to use the results in an informed and responsible way.

Keywords: solar radiation, geographical information systems, irradiance, irradiation, computer models

WSTĘP

Dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni czynnej stanowi jeden z istotnych czynników warunkujących zarówno jej bilans radiacyjny, jak i cieplny. Warunki klimatyczne obserwowane w danym miejscu zależą bowiem w głównej mierze od ilości energii promienistej, jaka dociera do powierzchni czynnej oraz od tego, w jaki sposób energia ta jest absorbowana i przekształcana w ramach różnych procesów fizycznych (Paszyński i in. 1999). Przyjmując za powierzchnię czynną powierzchnię Ziemi, można przedstawić równanie jej bilansu radiacyjnego w następujący sposób:

$$R = (I \sin h + i)(1 - A) - E_{\text{ef}},$$

gdzie: R – saldo bilansu radiacyjnego, I – natężenie promieniowania bezpośredniego padającego na powierzchnię płaską, h – kąt padania promieni słonecznych, i – natężenie promieniowania rozproszonego, A – albedo

powierzchni czynnej, E_{ef} – natężenie promieniowania efektywnego (różnica między natężeniem promieniowania Ziemi a natężeniem promieniowania zwrotnego atmosfery).

Dopływ promieniowania słonecznego do powierzchni czynnej jest zatem określany za pomocą sumy dwóch zmiennych: $I_{\text{sin}h}$ oraz i , z których pierwsza dotyczy promieniowania bezpośredniego, a druga – rozproszonego.

W idealnych warunkach poszczególne składniki bilansu radiacyjnego powierzchni Ziemi na obszarze objętym badaniami powinny być określone w wyniku pomiarów *in situ*, wykonywanych przy użyciu radiometrów. W praktyce, z uwagi na niewielką dostępność tych urządzeń, podyktowaną wysoką ceną, jak również z powodu różnic w dopływie promieniowania słonecznego wynikających ze specyfiki obszarów o urozmaiconej rzeźbie (mnogość płaszczyzn o zmiennej ekspozycji, różnice wartości współczynnika zmętnienia atmosfery, inne zasłonięcie horyzontu itp.), pomiary bezpośrednie składników bilansu radiacyjnego zazwyczaj nie są wykonywane. Zamiast nich stosowane są przybliżenia, pozyskiwane na podstawie danych teledetekcyjnych: obrazowań satelitarnych lub lotniczych. Wadą tego typu danych jest niska rozdzielczość przestrzenna, np. mapa albedo czy mapa temperatury jasnościowej powierzchni czynnej opracowana na podstawie danych ze spektrometrów MODIS, zainstalowanych na satelitach Terra i Aqua o rozdzielczości przestrzennej od 250 m do 1 km (por. Barnes i in. 1998; Schaaf 2002).

Alternatywą dla obrazowań satelitarnych w zakresie określania dopływu promieniowania słonecznego jest modelowanie z wykorzystaniem systemów informacji geograficznej (GIS), które pozwalają na precyzyjne określenie rozkładu przestrzennego promieniowania bezpośredniego i rozproszonego. Jest to szczególnie cenne narzędzie w badaniach obszarów o urozmaiconej rzeźbie terenu, np. obszarów górskich, które z powodu utrudnionego dostępu i mnogości płaszczyzn różniących się nachyleniem i ekspozycją stanowiłyby poważne wyzwanie dla badań terenowych lub zastosowania nisko- i średniorozdzielczych obrazowań teledetekcyjnych.

Moduły aktynometryczne zaimplementowane w wybranym oprogramowaniu GIS pozwalają na obliczenie chwilowego natężenia bezpośredniego i rozproszonego promieniowania słonecznego, jak również na określenie sum napromienienia na podstawie cyfrowego modelu rzeźby terenu (DEM, *Digital Elevation Model*). Model taki może być wykonany dla dowolnego obszaru Ziemi, bez względu na jego dostępność geograficzną, na podstawie wiarygodnego DEM-u lub na podstawie danych pozyskanych ze skanowań wysokorozdzielczymi lidarami lub radarą zlokalizowanymi na pokładzie samolotów lub satelitów. Cyfrowe modele rzeźby terenu wykorzystywane są jako dane wejściowe do modeli analizy dopływu promieniowania, które następnie obliczają wartości potencjalnego promieniowania całkowitego, bezpośredniego lub rozproszonego, jak również wartość usłonecznienia potencjalnego dla dowolnego punktu

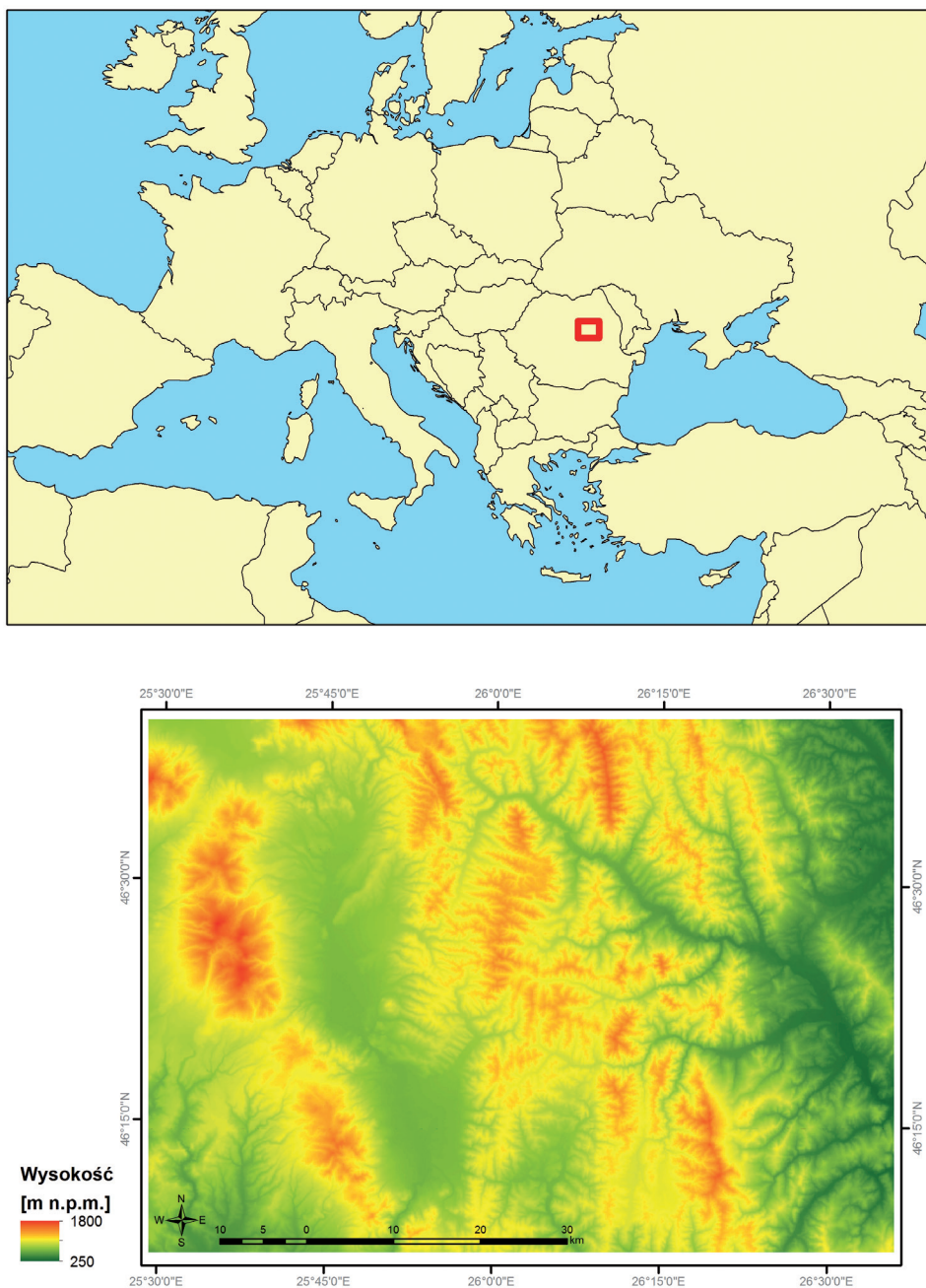
w terenie. Modele analizy dopływu promieniowania pozwalają na obliczenie wartości promieniowania potencjalnego (jak również usłonecznienia potencjalnego), gdyż nie uwzględniają zmniejszenia dopływu promieniowania na skutek występowania zachmurzenia. Pozwalają natomiast określić stopień ekstynkcji atmosferycznej związanej ze zmętnieniem atmosfery, wykorzystując do tego celu współczynnik zmętnienia Linkego (uwzględniający ciśnienie pary wodnej oraz zawartość aerozoli w atmosferze).

Niniejsze opracowanie ma na celu przedstawienie modeli analizy dopływu promieniowania słonecznego występujących w dwóch popularnych systemach informacji geograficznej: komercyjnym programie ArcMap (wchodzącym w skład pakietu ArcGIS) oraz darmowym programie GRASS GIS, jak również określenie podobieństw i różnic między tymi programami w zakresie modelowania rozkładu przestrzennego dopływu promieniowania na obszarach o urozmaiconej rzeźbie terenu. Do stworzenia map promieniowania słonecznego wykorzystano metody analizy przestrzennej, same mapy zaś zostały poddane analizie porównawczej. Materiałem źródłowym był cyfrowy model rzeźby terenu z pogranicza Zewnętrznych Karpat Wschodnich i Równin Południoworumuńskich o rozdzielczości trzech sekund kątowych (ryc. 1). Model ten został utworzony na podstawie wyników sondowania interferometrycznym radarem z syntetyczną aperturą (Burgmann i in. 2000) i pozyskany z misji SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

MODELOWANIE DOPŁYWU PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W PROGRAMIE GRASS GIS

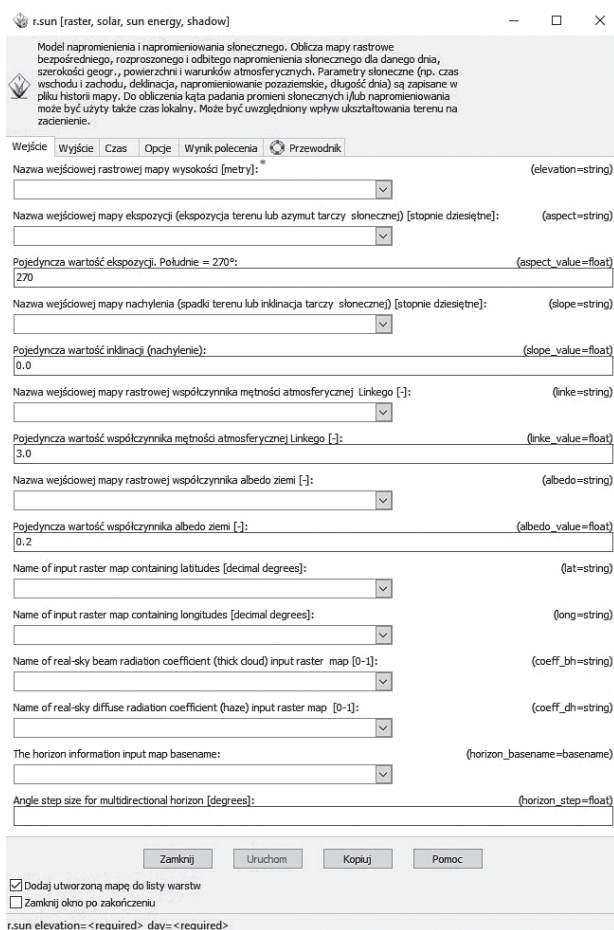
GRASS GIS jest systemem informacji geograficznej umożliwiającym wykonywanie analiz przestrzennych na danych rastrowych i wektorowych oraz modelowanie fizycznogeograficzne z wykorzystaniem preinstalowanych lub dodatkowych modułów. Model analizy dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni czynnej znajduje się¹ w menu *Raster*, w sekcji *Promieniowanie słoneczne i cienie*. Sam model funkcjonuje pod nazwą *r.sun*. Główne okno modelu *r.sun* przedstawione jest na rycinie 2. Interfejs graficzny modelu podzielony jest na zakładki, w których definiuje się kolejno: parametry i warstwy wejściowe, warstwy wyjściowe, czas, dla którego ma być wykonywana analiza oraz opcje dodatkowe. Model *r.sun* może funkcjonować w dwóch trybach. W trybie pierwszym oblicza kąt padania promieni słonecznych, a także napromieniowanie słoneczne, tj. wielkość strumienia energii słonecznej padającej na

¹ Wszystkie ilustracje oraz opisy lokalizacji elementów interfejsu programu GRASS GIS odnoszą się do wersji graficznej 7.0.4 dla systemu Windows. Wcześniejsze oraz późniejsze wersje oprogramowania mogą różnić się nazewnictwem oraz umiejscowieniem poszczególnych opcji.



Ryc. 1. Położenie obszaru badań (u góry) oraz jego cyfrowy model rzeźby terenu (u dołu), pokazany w barwach hipsometrycznych

Fig. 1. Location of the research site (upper part) and its Digital Elevation Model (lower part), shown in the hypsometric tint



Ryc. 2. Okno dialogowe modelu *r.sun* w programie GRASS GIS
Fig. 2. Dialog window of the *r.sun* model in GRASS GIS software

jednostkę powierzchni w podziale na napromieniowanie całkowite, napromieniowanie bezpośrednie, napromieniowanie rozproszone oraz napromieniowanie odbite od powierzchni Ziemi. W trybie drugim oblicza on wartość usłonecznienia potencjalnego, jak również napromienienie słoneczne, tj. sumaryczną ilość energii słonecznej dostarczonej do jednostki powierzchni w jednostce czasu, w podziale na napromienienie całkowite, bezpośrednie, rozproszone oraz odbite od powierzchni Ziemi. Obliczenia w obydwu trybach prowadzone są dla określonych dni i/lub godzin, uwzględniając rzeźbę terenu (nachylenie, ekspozycja) oraz warunki atmosferyczne (m.in. długość dnia, deklinację Słońca, pory świtu i zmierzchu astronomicznego oraz cywilnego).

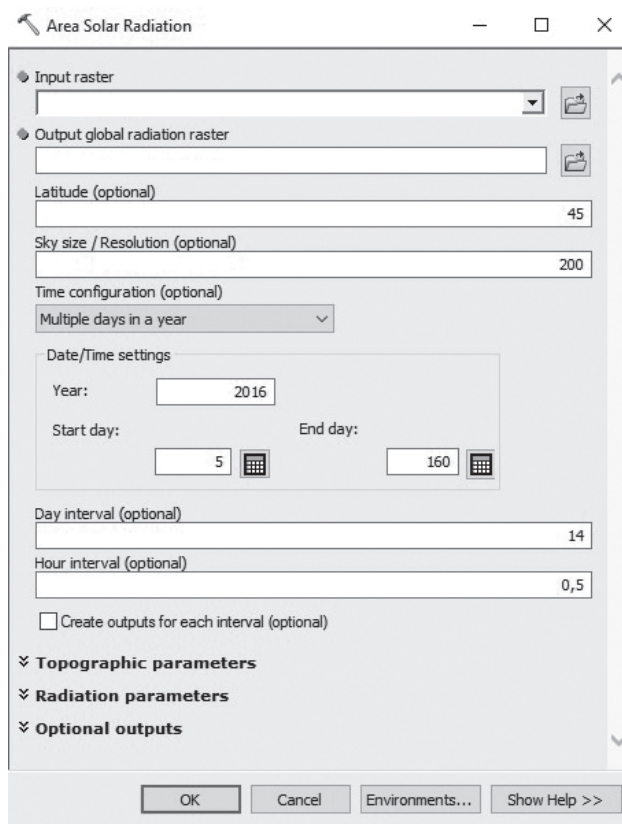
Model *r.sun* wykorzystuje zestaw reguł opisujących położenie i przemieszczanie się Słońca (Krcho 1990; Jenco 1992), a następnie sparametryzowanych

w formie równań (Kitlera, Miklera 1996). Wykorzystując równania opisujące wzajemne położenie Słońca i Ziemi, jak również zależności opisujące interakcje promieniowania słonecznego z ziemską atmosferą (odbicie, ekstynkcja, rozpraszanie), model oblicza trzy podstawowe komponenty promieniowania całkowitego – promieniowanie bezpośrednie, rozproszone oraz odbite, pod postacią napromieniowania i napromienienia. Obliczenia wykonywane są na podstawie założeń teoretycznych wprowadzonych w *European Solar Radiation Atlas* (Scharmer, Greif 2000; Page i in. 2001; Rigolier 2001). Model oblicza promieniowanie potencjalne, wynikające z położenia Słońca na niebie oraz właściwości atmosfery (masa optyczna, współczynnik rozpraszania), zakładając homogeniczność atmosfery pod względem wartości tych współczynników. Model uwzględnia również topografię terenu, automatycznie określając strefy zacienione i oświetlone w zdefiniowanym przedziale czasowym, nie uwzględnia natomiast wpływu zachmurzenia na dopływ promieniowania słonecznego.

MODELOWANIE DOPŁYWU PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO W PROGRAMIE ARCMAP

Program ArcMap stanowi część rozbudowanego systemu informacji geograficznej znanego pod nazwą ArcGIS. Jest to komercyjne oprogramowanie GIS rozwijane przez *Environmental Systems Research Institute* (w skrócie ESRI), służące do pracy na danych wektorowych oraz rastrowych. W programie ArcMap moduł aktywnometryczny zaimplementowany jest w zestawie narzędzi ArcToolbox, w dziale *Spatial Analyst Tools*, w sekcji *Solar Radiation*, pod nazwą *Area Solar Radiation* – w skrócie ARS (ryc. 3). Model promieniowania słonecznego zainstalowany w programie ArcMap oblicza wartość napromienienia słonecznego na podstawie algorytmu widoczności hemisferycznej Richa (Rich i in. 1994), rozwiniętego przez Fu i Richa (2000, 2002). Pozwala na określenie wielkości napromienienia całkowitego, napromienienia bezpośredniego oraz napromienienia rozproszonego, jak również na określenie usłonecznienia potencjalnego. Działa zatem identycznie jak drugi tryb modelu *r.sun* programu GRASS GIS. Jednostkami napromienienia są $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ dla zadanego przedziału czasu (możliwe jest przedstawienie wartości dla pojedynczych dni lub dla zdefiniowanego przedziału czasu), a usłonecznienie potencjalne wyrażane jest w godzinach. Napromienienie całkowite określone jest na podstawie sumy napromienienia bezpośredniego i rozproszonego.

Model pozwala na określenie parametrów związanych z transmisyjnością oraz masą optyczną atmosfery ziemskiej. Zakładana jest homogeniczność atmosfery, przy czym w zależności od długości toru optycznego promieni słonecznych w atmosferze wprowadzane są modyfikacje w równaniach określających

Ryc. 3. Okno dialogowe modelu *ARS* w programie ArcMapFig. 3. Dialog window of the *ARS* model in ArcMap software

jących dopływ promieniowania, aby lepiej oddać wzrost ekstynkcji i dyfrakcji przy niskiej wysokości Słońca nad horyzontem. W przeciwieństwie do modelu *r.sun*, model *ARS* pozwala na wybór jednego z dwóch założeń, odnoszącego się do rozpraszania promieniowania: rozpraszanie może następować jednorodnie na całym niebie (promieniowanie rozproszone ma wtedy charakter izotropowy) lub rozpraszanie może być uzależnione od kąta zenitalnego Słońca (promieniowanie rozproszone ma wtedy charakter anizotropowy). Model w programie ArcMap ma jedno ograniczenie nieobecne w programie GRASS GIS: potrafi obliczyć wartości promieniowania słonecznego tylko dla określonego równoleżnika. Zatem chcąc obliczyć wartości promieniowania dla obszaru o dużej rozciągłości południkowej niezbędne jest podzielenie go na strefy obliczeniowe, każda o rozciągłości południkowej nieprzekraczającej jednego stopnia. Model zaimplementowany w programie GRASS GIS pozwala na obliczenie dopływu promieniowania słonecznego niezależnie od rozciągłości południkowej obszaru.

WYNIKI MODELOWANIA W PROGRAMACH GRASS GIS I ARCMAP

W celu porównania działania modeli analizy dopływu promieniowania słonecznego w programach GRASS GIS oraz ArcMap przy ich użyciu obliczono wartości napromienienia całkowitego, bezpośredniego i rozproszonego na podstawie przygotowanego cyfrowego modelu rzeźby terenu. Aby możliwie dobrze uwidocznąć potencjalne różnice w funkcjonowaniu modeli, przeprowadzono obliczenia dla dnia przesilenia letniego, w którym występuje największa wartość promieniowania słonecznego w ciągu całego roku. Dla obydwu modeli przyjęto identyczne parametry wejściowe (tab. 1) dopasowane do celów testowo-analitycznych. W celu ułatwienia wizualnego porównania różnic w wartościach poszczególnych zmiennych opracowano spójną legendę barwną dla każdej pary map wynikowych przedstawiających tę samą zmienną obliczoną za pomocą różnych modeli, jak również zaprezentowano histogramy opracowane według jednolitego zakresu skali poziomej.

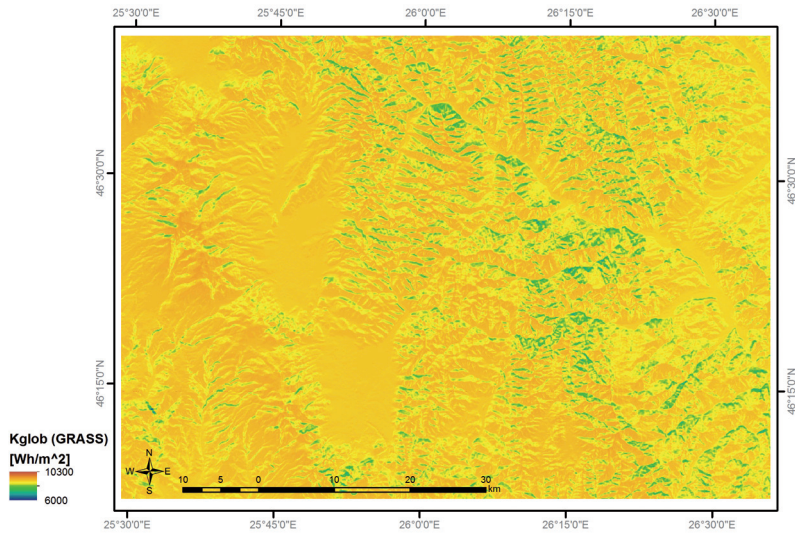
Tabela 1. Parametry wejściowe modeli *r.sun* oraz *ARS*

Table 1. Entry parameters of *r.sun* and *ARS* models

Parametr	Wartość
Typ pogody	insolacyjna
Emisyjność promieniowania rozproszonego	izotropowa
Efektywność rozpraszania atmosferycznego	0,3
Współczynnik przezroczystości atmosfery	0,7
Albedo powierzchni czynnej	0,3
Zachmurzenie	0 oktantów
Stała słoneczna	1367 W · m ⁻²

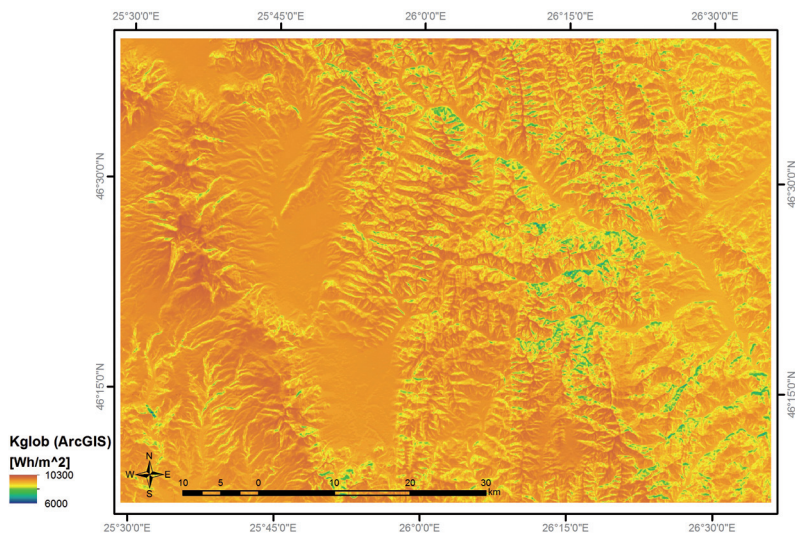
Całkowite napromienienie słoneczne

Mapy napromienienia całkowitego stworzone na podstawie modeli *r.sun* (ryc. 4) oraz *ARS* (ryc. 5) cechują się zbliżonym rozkładem przestrzennym zmiennej z zastosowaniem jednolitych warunków początkowych. Najwyższe wartości napromienienia całkowitego występują na stokach górskich o ekspozycji południowej, południowo-wschodniej oraz południowo-zachodniej, najniższe zaś na stokach o ekspozycji północnej. Różnice przejawiają się jednak w uzyskiwanych wartościach napromienienia (tab. 2 oraz ryc. 6). Napromienienie całkowite (*Kglob*) według modelu *ARS* przyjmuje średnio wyższe wartości niż według modelu *r.sun* (odpowiednio: 9334,4 i 8876,2 Wh · m⁻²), w tym modelu wyższe są również wartości maksymalne. Na mapie wykonanej w programie



Ryc. 4. Mapa całkowitego napromienienia słonecznego stworzona za pomocą modelu *r.sun*

Fig. 4. Map of total solar irradiance created with the *r.sun* model

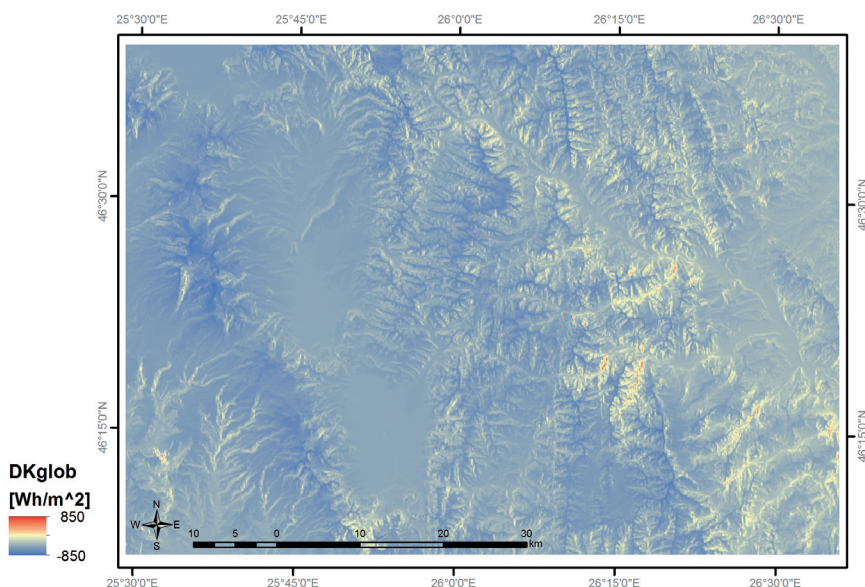


Ryc. 5. Mapa całkowitego napromienienia słonecznego stworzona za pomocą modelu *ARS*

Fig. 5. Map of total solar irradiance created with the *ARS* model

Tabela 2. Podstawowe statystyki wynikowych map rastrowych
Table 2. Basic statistics of final raster maps

Zmienna	Model	Jednostka	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Napromienienie całkowite	<i>r.sun</i>	$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$	6 079,8	9 414,8	8 876,2	293,9
	ARS		6 178,2	10 246,0	9 334,4	373,9
Napromienienie bezpośrednie	<i>r.sun</i>	$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$	5 671,0	8 062,8	7 569,1	287,2
	ARS		4 259,5	7 854,5	7 132,9	334,0
Napromienienie rozproszone	<i>r.sun</i>	$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$	1 108,9	1 370,0	1 283,0	20,8
	ARS		1 655,3	2 414,9	2 201,5	69,3
Usłonecznienie potencjalne	<i>r.sun</i>	h	10,5	16,0	14,5	0,9
	ARS		8,2	15,5	14,1	1,0

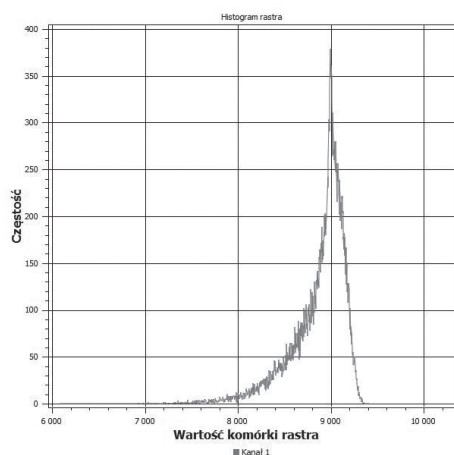


Ryc. 6. Mapa różnicy całkowitego napromienienia słonecznego obliczonego za pomocą modelu *r.sun* (odjemna) i modelu ARS (odjemnik)

Fig. 6. Map of the difference of total solar irradiance calculated with *r.sun* model (minuend) and ARS model (subtrahend)

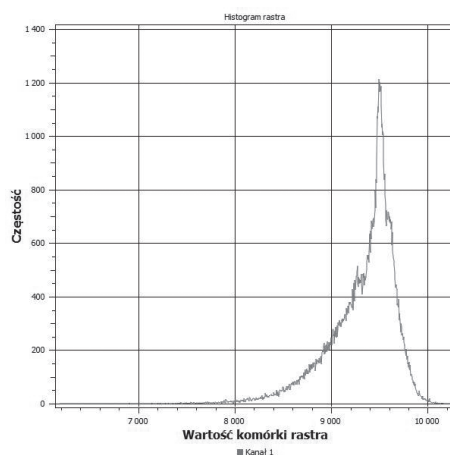
ArcMap występuje większy kontrast między stokami góorskimi o ekspozycji południowej i zboczami dolin o ekspozycji północnej. Zmienność wartości obliczonych w programie GRASS GIS jest wyraźnie mniejsza niż wartości obliczonych w programie ArcMap (odchylenie standardowe odpowiednio: 293,9 i 373,9). Mapa z programu GRASS GIS odznacza się mniejszym kontrastem, ale wartości napromienienia stoków górskich i zboczy dolin o ekspozycji północnej

są na niej wyraźnie niższe, jednocześnie zwiększona jest powierzchnia obszaru obniżonego napromienienia w ich obrębie. Rozkład częstości występowania poszczególnych wartości jest podobny w modelu *r.sun* (ryc. 7) i modelu *ARS* (ryc. 8), przy czym pierwszym najwyższa częstość występuje dla wartości około $9000 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$, a w drugim dla wartości około $9500 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$. Należy zauważyć, że choć wyniki modelu *r.sun* cechują się mniejszą zmiennością, to jednak model *ARS* daje bardziej jednorodne rezultaty, gdyż poszczególne wartości odznaczają się w nim większą częstością występowania (skale rzędnych na ryc. 7 i 8 różnią się ponad trzykrotnie).



Ryc. 7. Histogram mapy całkowitego napromienienia słonecznego stworzonej za pomocą modelu *r.sun*

Fig. 7. Histogram of the map of total solar irradiance created with the *r.sun* model

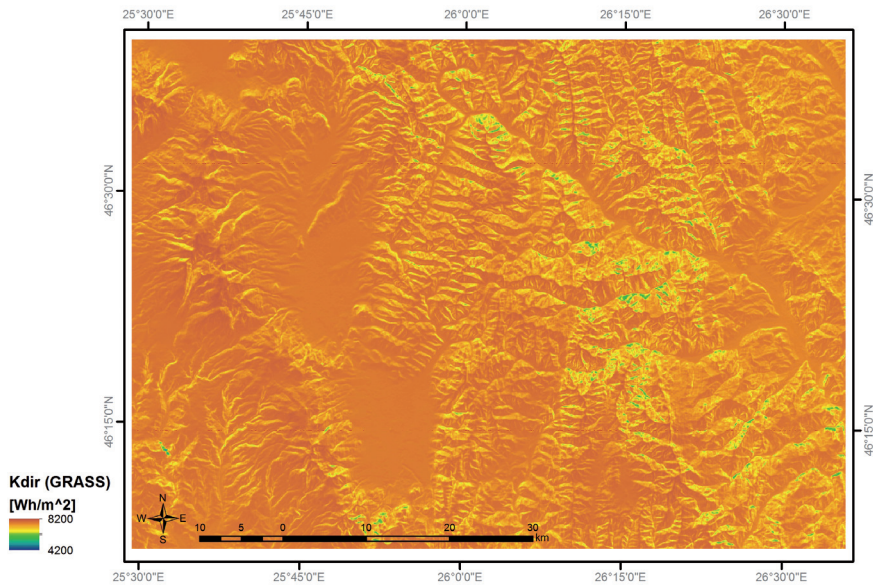


Ryc. 8. Histogram mapy całkowitego napromienienia słonecznego stworzonej za pomocą modelu *ARS*

Fig. 8. Histogram of the map of total solar irradiance created with the *ARS* model

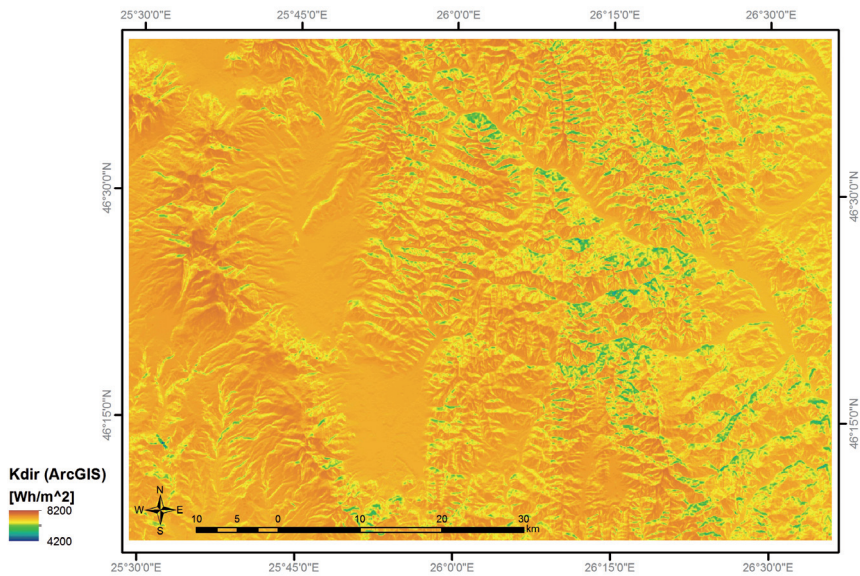
Bezpośrednie napromienienie słoneczne

Zależności związane z rozkładem przestrzennym napromienienia bezpośredniego (K_{dir}) są odwrotne niż w wypadku napromienienia całkowitego. Model *r.sun* z programu GRASS GIS oblicza wyższe wartości napromienienia (wartość średnią oraz wartości ekstremalne) niż model *ARS* z programu ArcMap, przy czym różnica między wartościami maksymalnymi obliczanymi przez te dwa modele jest znacznie mniejsza niż różnica między wartościami minimalnymi – przekraczająca $1400 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ (por. tab. 2). Mapa wykonana na podstawie modelu *r.sun* (ryc. 9) przedstawia wyższe wartości niż mapa sporządzona na podstawie modelu *ARS* (ryc. 10) zarówno na obszarach płaskich, jak i na terenach o ekspozycji południowej i północnej. Cechą charakterystyczną



Ryc. 9. Mapa bezpośredniego napromienienia słonecznego stworzona za pomocą modelu *r.sun*

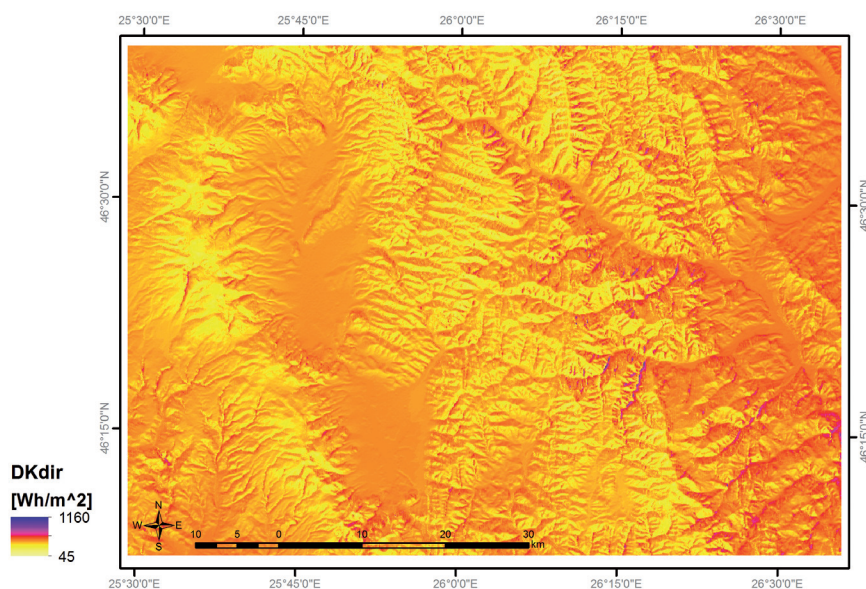
Fig. 9. Map of direct solar irradiance created with the *r.sun* model



Ryc. 10. Mapa bezpośredniego napromienienia słonecznego stworzona za pomocą modelu *ARS*

Fig. 10. Map of direct solar irradiance created with the *ARS* model

modelu z programu ArcMap jest obliczanie wyraźnie niższych wartości napromienienia bezpośredniego dla stoków i zboczy o umiarkowanym lub dużym nachyleniu i ekspozycji północnej (ryc. 11). Model z programu GRASS GIS dokonuje istotnej redukcji napromienienia bezpośredniego tylko dla stoków o największym nachyleniu i ekspozycji północnej. Rozkład częstości występowania poszczególnych wartości ma zbliżony przebieg w obydwu modelach, choć najwyższe częstości w modelu z programu GRASS GIS występują dla wartości około $7750 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 12), a w modelu z programu ArcMap dla wartości około $7250 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 13). W przypadku napromienienia bezpośredniego różnica skali częstości występowania jest jeszcze większa niż dla napromienienia całkowitego.

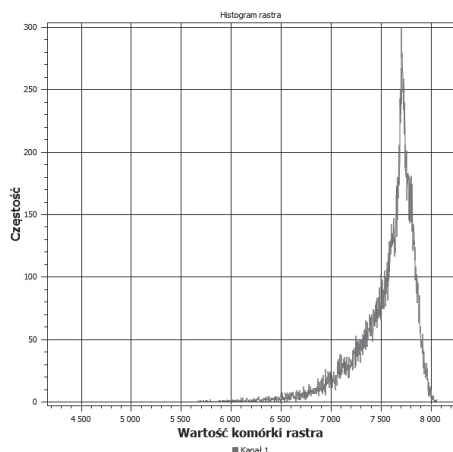


Ryc. 11. Mapa różnicy bezpośredniego napromienienia słonecznego obliczonego za pomocą modelu *r.sun* (odjemna) i modelu *ARS* (odjemnik)

Fig. 11. Map of the difference of direct solar irradiance calculated with *r.sun* model (minuend) and *ARS* model (subtrahend)

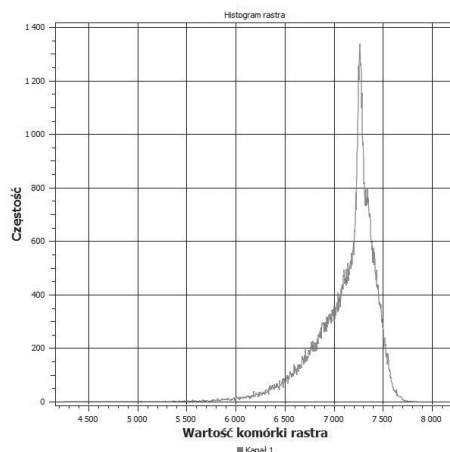
Rozproszone napromienienie słoneczne

Większe wartości napromienienia bezpośredniego w modelu *r.sun* są kompensowane przez znacznie niższe wartości napromienienia rozproszonego (*Kdiff*) w porównaniu z modelem *ARS*. Różnica napromienienia rozproszonego wynosi około 40% i przejawia się zarówno w wartościach ekstremalnych (np. wartość maksymalna odpowiednio: $1370,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ i $2414,9 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$), jak



Ryc. 12. Histogram mapy bezpośredniego napromienienia słonecznego stworzonej za pomocą modelu *r.sun*

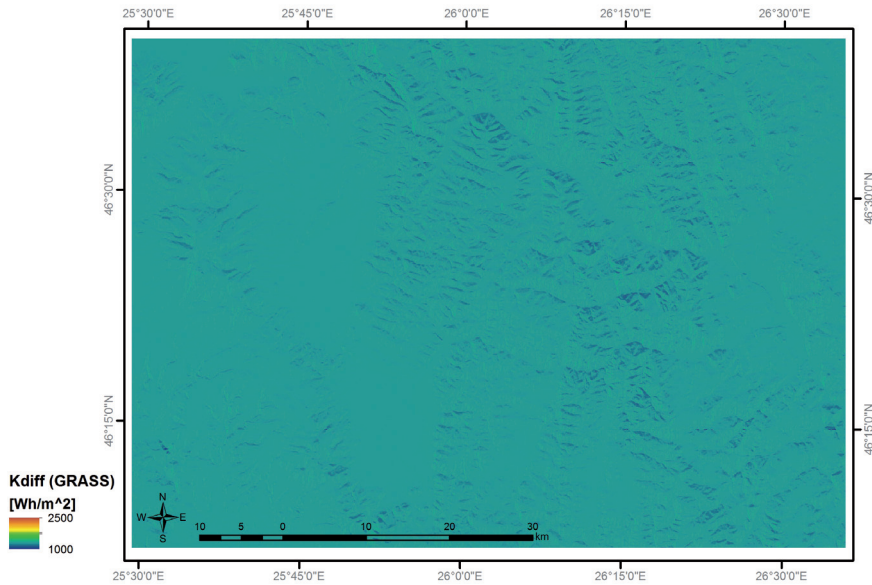
Fig. 12. Histogram of the map of direct solar irradiance created with the *r.sun* model



Ryc. 13. Histogram mapy bezpośredniego napromienienia słonecznego stworzonej za pomocą modelu *ARS*

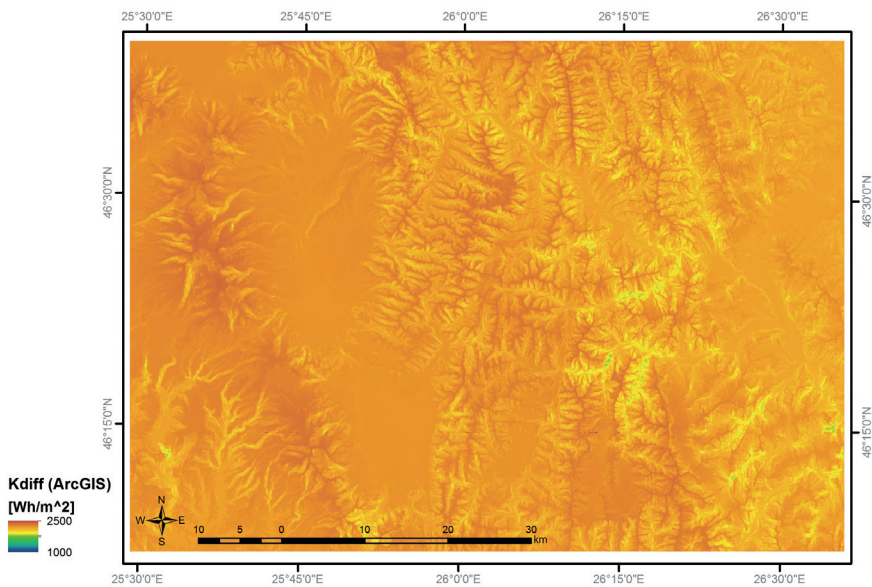
Fig. 13. Histogram of the map of direct solar irradiance created with the *ARS* model

i średnich (odpowiednio: $1283,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ i $2201,5 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$). Wartości napromienienia rozproszonego z modelu *r.sun* odznaczają się wyraźnie mniejszą zmiennością w porównaniu z wartościami z modelu *ARS* (tab. 2). Rozkład przestrzenny napromienienia rozproszonego w pierwszym modelu jest znacznie bardziej jednorodny niż w drugim. Zmienność przestrzenna zaznacza się dopiero na obszarach o dużym nachyleniu, a doliny rzeczne nie wpływają na wzrost lub spadek wartości napromienienia rozproszonego na mapie wykonanej w programie GRASS GIS (ryc. 14). Mapa wykonana w programie ArcMap przedstawia znacznie wyższy poziom heterogeniczności i bardziej szczegółowo odwzorowuje przejścia między formami morfologicznymi terenu (ryc. 15). Największe wartości napromienienia rozproszonego przypadają na grzbiety górskie. Dodatkowo zaznacza się dwoisty rozkład napromienienia rozproszonego w obrębie dolin rzecznych: w ich górnej części wartość napromienienia rozproszonego jest wyraźnie mniejsza niż w dolnej części, niezależnie od kierunku, w którym otwarta jest dolina. Podobne zależności nie są widoczne na mapie z modelu *r.sun*. Różnice między wartościami obliczonymi przez obydwa modele (ryc. 16) widoczne są również na histogramach. Napromienienie rozproszone obliczone w programie GRASS GIS ma jedno maksimum częstości dla wartości około $1280 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 17), podczas gdy napromienienie rozproszone obliczone w programie ArcMap oznacza się występowaniem dwóch maksimów częstości dla wartości około $2250 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ oraz $2150 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ (ryc. 18), przy czym to drugie maksimum jest słabo zaznaczone z uwagi na dużą częstość występowania wartości między pierwszym a drugim maksimum.



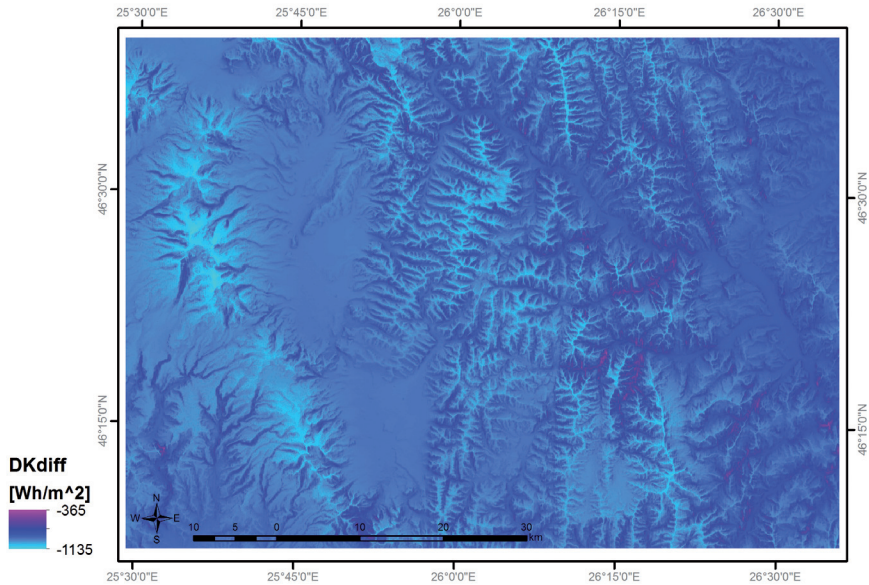
Ryc. 14. Mapa rozproszonego napromienienia słonecznego stworzona za pomocą modelu *r.sun*

Fig. 14. Map of diffused solar irradiance created with the *r.sun* model



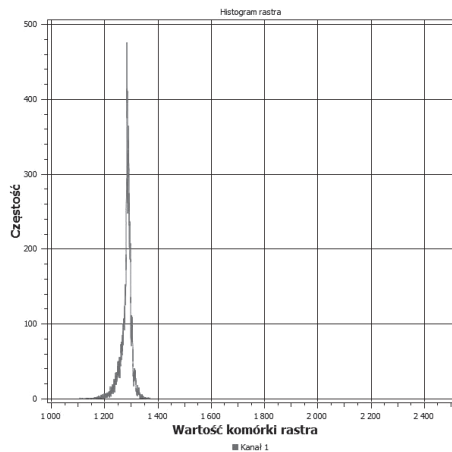
Ryc. 15. Mapa rozproszonego napromienienia słonecznego stworzona za pomocą modelu *ARS*

Fig. 15. Map of diffused solar irradiance created with the *ARS* model



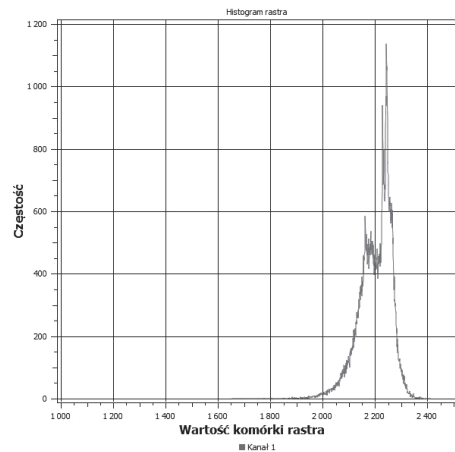
Ryc. 16. Mapa różnicy rozproszonego napromienienia słonecznego obliczonego za pomocą modelu *r.sun* (odjemna) i modelu ARS (odjemnik)

Fig. 16. Map of the difference of diffused solar irradiance calculated with *r.sun* model (minuend) and ARS model (subtrahend)



Ryc. 17. Histogram mapy rozproszonego napromienienia słonecznego stworzonej za pomocą modelu *r.sun*

Fig. 17. Histogram of the map of diffused solar irradiance created with the *r.sun* model

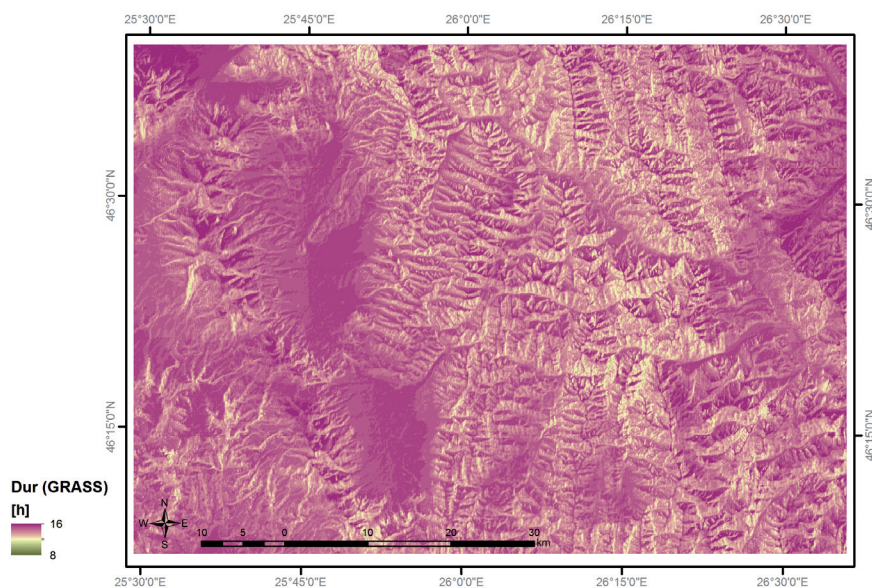


Ryc. 18. Histogram mapy rozproszonego napromienienia słonecznego stworzonej za pomocą modelu ARS

Fig. 18. Histogram of the map of diffused solar irradiance created with the ARS model

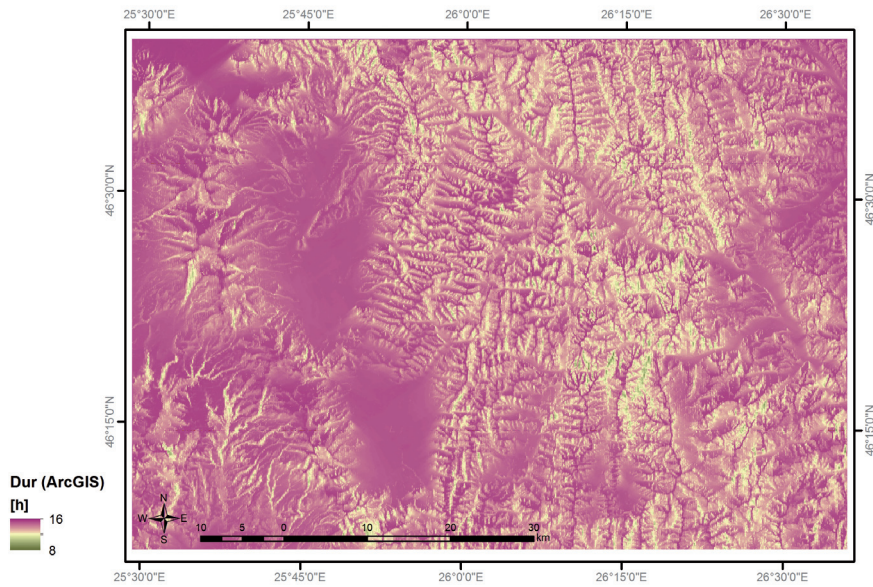
Usłonecznienie potencjalne

Usłonecznienie potencjalne (*Dur*) obliczone za pomocą obydwu modeli cechuje się zbliżonym rozkładem przestrzennym i szczegółowością, przy czym mapa wykonana z wykorzystaniem modelu *r.sun* (ryc. 19) przedstawia wyższe wartości niż mapa sporządzona za pomocą modelu *ARS* (ryc. 20). Różnice (ryc. 21) są szczególnie widoczne w obrębie wyniesionych szczytów, wierzchowin oraz na równinach leżących pomiędzy poszczególnymi łańcuchami górskimi. Wyniki obydwu modeli cechują się podobną zmiennością. Średnie oraz maksymalne wartości usłonecznienia potencjalnego w obydwu modelach również są zbliżone (tab. 2), występuje jednak duża różnica w wartościach minimalnych (8,2 h w programie ArcMap, 10,5 h w programie GRASS GIS). Można przypuszczać, że różnica ta związana jest z odmiennym sposobem określania wartości usłonecznienia, co odzwierciedlają odmienne przebiegi poszczególnych klas na histogramach. W modelu *r.sun* usłonecznienie potencjalne wyświetlane jest domyślnie z krokiem 0,5 h (ryc. 22), podczas gdy w modelu *ARS* krok domyślny wynosi 1 min (ryc. 23). W pierwszym modelu najwyższa częstość przypada na wartość usłonecznienia 15 h, w drugim zaś na wartość maksymalną, tj. 15,5 h.



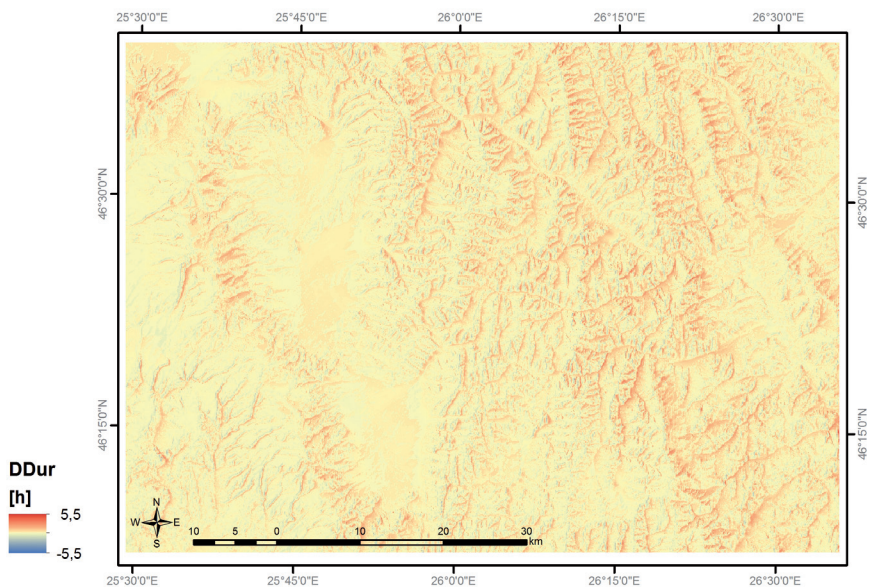
Ryc. 19. Mapa usłonecznienia potencjalnego stworzona za pomocą modelu *r.sun*

Fig. 19. Map of direct daylight duration created with the *r.sun* model



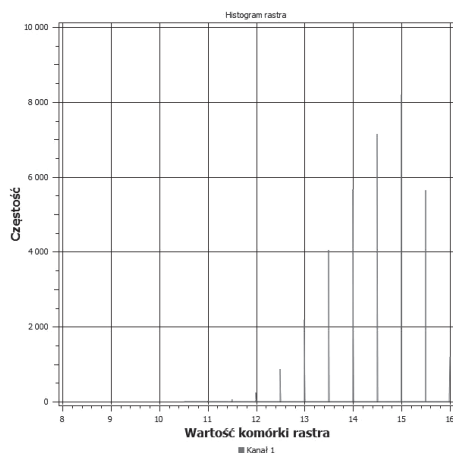
Ryc. 20. Mapa usłonecznienia potencjalnego stworzona za pomocą modelu *ARS*

Fig. 20. Map of direct daylight duration created with the *ARS* model



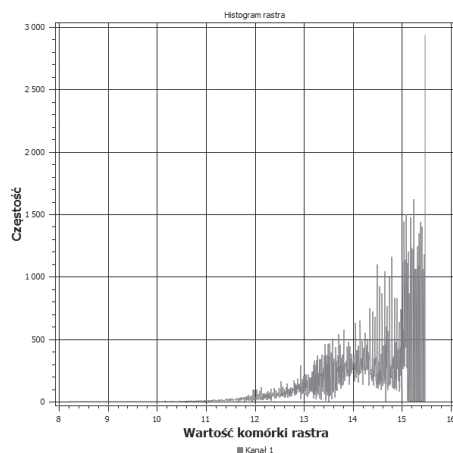
Ryc. 21. Mapa różnicy usłonecznienia potencjalnego obliczonego za pomocą modelu *r.sun* (odjemna) i modelu *ARS* (odjemnik)

Fig. 21. Map of the difference of direct daylight duration calculated with *r.sun* model (minuend) and *ARS* model (subtrahend)



Ryc. 22. Histogram mapy usłonecznienia potencjalnego stworzonej za pomocą modelu *r.sun*

Fig. 22. Histogram of the map of direct daylight duration created with the *r.sun* model



Ryc. 23. Histogram mapy usłonecznienia potencjalnego stworzonej za pomocą modelu *ARS*

Fig. 23. Histogram of the map of direct daylight duration created with the *ARS* model

PODSUMOWANIE

Modele analizy dopływu promieniowania słonecznego zawarte w systemach informacji geograficznej pozwalają na obliczenie wartości napromienienia potencjalnego na podstawie cyfrowego modelu rzeźby terenu. W programie GRASS GIS zaimplementowany jest model *r.sun*, a w programie ArcMap, wchodzącym w skład oprogramowania ArcGIS, zaimplementowany jest model *ARS*. Obydwa modele funkcjonują w podobny sposób, obliczając wielkość strumienia energii słonecznej dochodzącej do powierzchni Ziemi na podstawie równań określających wzajemne położenie Słońca i Ziemi, kąta padania promieni słonecznych oraz wielkości ekstynkcji atmosferycznej wynikającej z właściwości optycznych atmosfery, jak również z ukształtowania terenu (jego nachylenia oraz ekspozycji). Model *r.sun* pozwala na obliczenie większej liczby zmiennych niż model *ARS*, w tym na obliczenie napromienienia oraz napromieniowania całkowitego, bezpośredniego, rozproszonego i odbitego, jak również na obliczenie kąta padania promieni słonecznych. Model *ARS* umożliwia tylko obliczenie napromienienia całkowitego, bezpośredniego i rozproszonego, bez napromienienia odbitego oraz napromieniowania. Dodatkowo ograniczeniem technicznym modelu zaimplementowanego w programie ArcMap jest brak możliwości prowadzenia obliczeń dla obszaru o dużej rozciągłości południkowej, z uwagi na konieczność zdefiniowania pojedynczego równoleżnika, dla którego obliczane są charakterystyki.

Dla obszaru o urozmaiconej rzeźbie terenu obydwa modele przedstawiają podobny rozkład przestrzenny napromienienia całkowitego, bezpośredniego oraz usłonecznienia potencjalnego. Występują jednak różnice zarówno w wartościach średnich i ekstremalnych, jak i w częstości poszczególnych wartości. W wypadku wyżej wymienionych charakterystyk szczegółowość obydwu modeli jest zbliżona, choć należy zauważyć występowanie różnic w wartościach obliczanych dla stoków i zboczy o dużym nachyleniu i skrajnych ekspozycjach – południowej i północnej. Największe różnice między modelem *r.sun* i *ARS* występują w wypadku obliczania wartości napromienienia rozproszonego i sięgają 40%. Należy przypuszczać, że tak duża różnica związana jest z odmiennym sposobem uwzględniania rozpraszania atmosferycznego w obydwu modelach: model *r.sun* wykorzystuje m.in. współczynnik mętności atmosferycznej Linkego oraz opcjonalny współczynnik rozpraszania atmosferycznego, którego wartość może być ustalana niezależnie dla każdego piksela; z kolei model *ARS* korzysta z pojedynczej wartości współczynnika rozpraszania atmosferycznego oraz ze współczynnika transmisyjności atmosfery.

Choć autor nie miał możliwości porównania wyników modeli *r.sun* i *ARS* z pomiarami empirycznymi, to prace innych badaczy zawierające takie analizy wskazują na wysoką dokładność wyżej wymienionych modeli i ich zgodność z wynikami pomiarów *in situ* (Kryza i in. 2010; Álvarez i in. 2011; Usta i in. 2015). Obydwa modele aktynometryczne uwzględniają w swoich wyliczeniach zmienne ukształtowanie terenu, ich szczegółowość zaś jest ograniczona rozdzielczością przestrzenną cyfrowego modelu rzeźby terenu, z którego korzystają. Z tego powodu zarówno model *r.sun*, jak i *ARS* mogą być wykorzystywane do określania dopływu promieniowania na obszarach o urozmaiconej rzeźbie terenu i stanowią cenne narzędzie wspomagające analizy bilansu radiacyjnego powierzchni czynnej. Zdaniem autora różnice w wartościach podawanych przez obydwa modele nie umniejszają ich znaczenia jako narzędzia badawczego, należy jednak mieć świadomość różnic między modelami. Każdy badacz korzystający z tego typu lub z podobnych modeli powinien wykazać przynajmniej podstawową znajomość zasady ich działania, aby móc zweryfikować miarodajność ich wyników.

LITERATURA

- Álvarez J., Mitasova H., Allen H.L., 2011, *Estimating Monthly Solar Radiation in South-Central Chile*, Chilean Journal of Agricultural Research, 71(4), 601–609.
- Barnes W.K., Pagano T.S., Salomonson V.V., 1998: *Prelaunch Characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1*, IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 36, 1088–1100.
- Burgmann R., Rosen P.A., Fielding E.J., 2000: *Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation*, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28, 169–209.

- Fu P., Rich P.M., 2000: *The Solar Analyst 1.0 Manual*, Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA.
- Fu P., Rich P.M., 2002: *A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry*, Computers and Electronics in Agriculture, 37, 25–35.
- Jenco M., 1992: *Distribution of direct solar radiation on georelief and its modelling by means of complex digital model of terrain*, Geografický časopis, 44, 342–355.
- Kittler R., Mikler J., 1996: *Basis of the utilization of solar radiation*, VEDA, Bratislava, 150.
- Krcho J., 1990: *Morphometric analysis and digital models of georelief*, VEDA, Bratislava.
- 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 Research, 31(1), Polska Akademia Nauk, Warszawa, 17–32.
- Page J., Albuissou M., Wald L., 2001: *The European solar radiation atlas: a valuable digital tool*, Solar Energy, 71, 81–83.
- Paszyński J., Miara K., Skoczek J., 1999: *Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego*, Dokumentacja Geograficzna, IGiPZ PAN, Warszawa, 14.
- Rich P.M., Dubayah R., Hetrick W.A., Saving S.C., 1994: *Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, 524–529.
- Rigollier Ch., Bauer O., Wald L., 2000: *On the clear sky model of the ESRA – European Solar radiation Atlas – with respect to the Heliosat method*, Solar Energy, 68, 33–48.
- Schaaf C., 2002: *Global albedo map based upon data processed by the MODIS Land Science Team*, <<http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=60636>> [dostęp: 10.05.2016].
- Scharmer K., Greif J., 2000: *The European solar radiation atlas, Vol. 2: Database and exploitation software*, Les Presses de l'École des Mines, Paris.
- Usta Z., Cömert Ç., Yilmaz V., 2015: *Solar Energy Potential of Cities in Turkey; A GIS Based Analysis*, 18th International Symposium on Environmental Pollution and its Impact on Life in the Mediterranean Region, 26–30 września 2015, Grecja.