

MODELOVANIE PRIESTOROVEJ DISTRIBÚCIE SLNEČNÉHO ŽIARENIA NA GEORELIÉFE POMOCOU MODELU R.SUN A GEOGRAFICKÉHO INFORMAČNÉHO SYSTÉMU

Jaroslav HOFIERKA¹

Abstract: Hofierka, J.: Modeling spatial distribution of solar radiation on georelief using r.sun model and geographic information system

The paper presents r.sun – a spatially distributed solar radiation model for GRASS GIS and its application in environmental studies. The model simulates a spatial distribution of all three components of solar radiation (beam, diffuse and reflected radiation). The shadowing effects of surrounding terrain are optionally also included. They have a big impact especially in mountainous areas and low solar altitude. The model can be used in local and also regional studies. Most of its parameters can be defined as spatially distributed using raster maps and/or can be taken directly from GIS database. The possibilities of the model is documented using data with 250-m spatial resolution covering the whole territory of Slovakia. Using digital elevation model and land cover data we simulated spatial distribution of clear-sky solar radiation on georelief. Annual amount global radiation is highly differentiated (0,5-2,9MWh/m²/year) with the lowest values in shadowed valleys and the highest values in southern parts of mountains.

Keywords: solar radiation, modeling, GIS

ÚVOD

Slnečné žiarenie má pre krajinnú sféru obrovský význam. Ovplyvňuje mnohé fyzikálne, chemické a biologické procesy. Kvantifikácia množstva tohto žiarenia v ľubovoľnom bode krajinnej sféry je preto veľmi potrebná najmä pri modelovaní týchto procesov alebo plánovaní konkrétnych ľudských aktivít. Príkladom môže byť napríklad plánovanie a hodnotenie možností pestovania na slnko náročnej poľnohospodárskej plodiny (napr. vinič).

Žiarenie, ktoré je k dispozícii na povrchu Zeme je výsledkom zložitej interakcie medzi atmosférou a povrchom Zeme. Množstvo slnečného žiarenia, ktoré je na lokálnej až regionálnej úrovni k dispozícii závisí od mnohých faktorov. Okrem zemepisnej šírky je hlavným priestorovým distribútorom georeliéfu prostredníctvom sklonu, orientácie voči svetovým stranám a tieňov útvarmi georeliéfu. Pomer jednotlivých zložiek žiarenia ovplyvňuje aj oblačnosť a charakter zemského povrchu (krajinná pokrývka).

Modelovanie slnečného žiarenia dopadajúceho na georeliéf je pomerne zložitý proces. Slnečné žiarenie má tri zložky - priame, difúzne a odrazené žiarenie, ktoré spolu tvoria globálne žiarenie. Každá zložka je opísaná vlastným systémom rovníc. Difúzna časť aj rovnicami, ktoré sú odvodené z meraní a teda ich presnosť má len regionálnu platnosť.

Matematický popis jednotlivých zložiek slnečného žiarenia je v literatúre podrobne popísaný. U nás sa tomuto problému komplexne venovali najmä Kittler a Mikler (1986). Krcho (1990) a Jenčo (1992) sa zamerali najmä na modelovanie priameho slnečného žiarenia pomo-

¹ Doc. Mgr. Jaroslav Hofierka, PhD., Katedra geografie a regionálneho rozvoja, Fakulta humanitných a prírodných vied Prešovskej univerzity, Ul. 17. novembra 1, 081 16 Prešov, e-mail: hofierka@fhpv.unipo.sk

cou digitálneho modelu georeliéfu. Hofierka a Šúri (2002) podávajú vyčerpávajúci matematický popis jednotlivých zložiek žiarenia pre model *r.sun* implementovaný v GIS-e GRASS. Modely slnečného žiarenia sú teda výpočtovo náročné, do úvahy sa berie viacero faktorov a častá je aj potreba analyzovať rozsiahle územie. Z toho dôvodu je pri modelovaní distribúcie slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch výhodné použitie geografického informačného systému (GIS).

Existuje niekoľko modelov slnečného žiarenia implementovaných v GIS-e. Jedným z prvých bol model *SolarFlux* vyvinutý pre ARC/INFO GIS (Hetric et al., 1993, Dubayah a Rich, 1995). Model využíva jednoduchšie, resp. empirické matematické formulácie žiarenia a nie je vhodný pre veľké územia. Fu a Rich (2000) vyvinuli model *Solar Analyst* pre ArcView GIS. Model je pomerne rýchly, ale je málo flexibilný pri definícii vlastností atmosféry a modelovaní väčšieho územia. *r.sun* je model slnečného žiarenia implementovaný v GIS-e GRASS. Pri matematickej definícii modelu sme vychádzali z prác Krcha (1990), Jenča (1992), Hofierku (1997), Scharmera a Greifa (2000). Detailný popis sa nachádza v práci (Hofierka a Šúri, 2002). Tento model nemá obmedzenie modelov spomenutých vyššie a je dostatočne flexibilný pre rôzne aplikácie. Umožňuje modelovať jednak slnečné žiarenie pre čistú oblohu, ako aj reálne žiarenie (s vplyvom oblačnosti) na základe meteorologických údajov.

Cieľom príspevku je ukázať na možnosti modelovania priestorovej distribúcie slnečného žiarenia na georeliéfe v jeho troch zložkách pomocou modelu *r.sun* a geografického informačného systému na príklade územia Slovenskej republiky.

MODEL *r.sun*

Model pracuje ako štandardný príkaz GIS-u GRASS. GRASS je voľne šíriteľný geografický informačný systém. To znamená, že je voľne dostupný na internete (<http://grass.itc.it>) a použitie je obmedzené len podmienkami GNU GPL licencie. Používateľ má k dispozícii aj zdrojový kód a dokumentáciu, takže môže ľubovoľne meniť kód, prípadne vytvárať nový, vlastný. Jedná sa o rovnaký princíp s akým je vytváraný a šírený operačný systém Linux. GRASS pracuje nielen na Linuxe, ale aj na ďalších operačných systémoch na báze operačného systému UNIX (Neteler a Mitasova, 2002).

Prvá verzia modelu *r.sun* bola určená len na modelovanie priameho slnečného žiarenia (Hofierka, 1997). Aktuálna verzia modeluje všetky tri zložky žiarenia a navyše umožňuje modelovať aj skutočné žiarenie pod vplyvom oblačnosti. Došlo aj k podstatnému zrýchleniu algoritmu pre výpočet zatienenia okolitým georeliéfom. *r.sun* pracuje v 2 módoch: jeden mód je určený pre výpočet žiarenia pre jednotlivý deň v roku, v ďalšom móde sa počítajú výstupné hodnoty pre zadaný čas v danom dni.

Model vyžaduje len niekoľko vstupných parametrov, zvyšné parametre sú voliteľné a pokiaľ nie sú zadané, použije sa interný výpočet, ale sa použijú prednastavené hodnoty. V tab. č. 1 je uvedený zoznam vstupných parametrov. V niektorých prípadoch je možné daný parameter zadať buď ako jednotlivú hodnotu alebo ako vstupný raster s priestorovo premenlivými hodnotami.

Tab.č. 1: Vstupné parametre modelu r.sun

Názov parametra modelu	Forma parametra (jednotlivá hodnota/raster)	Charakteristika
<i>elevin</i>	raster	nadmorská výška [m]
<i>aspin</i>	raster	orientácia voči svetovým stranám [stupne]
<i>slopein</i>	raster	sklon [stupne]
<i>linkein</i>	raster	Linkeho koeficient zákalu atmosféry [-]
<i>lin</i>	jednotlivá hodnota	Linkeho koeficient zákalu atmosféry [-]
<i>albedo</i>	raster	albedo povrchu [-]
<i>alb</i>	jednotlivá hodnota	albedo povrchu [-]
<i>latin</i>	raster	zemepisná šírka [-]
<i>lat</i>	jednotlivá hodnota	zemepisná šírka [-]
<i>coefbh</i>	raster	koeficient skutočného priameho slnečného žiarenia [-]
<i>coefdh</i>	raster	koeficient skutočného difúzneho slnečného žiarenia [-]
<i>day</i>	jednotlivá hodnota	číslo dňa [1-365]
<i>declin</i>	jednotlivá hodnota	deklinácia
<i>time</i>	jednotlivá hodnota	lokálny (slnečný) čas
<i>step</i>	jednotlivá hodnota	časový krok [hod.]
<i>dist</i>	jednotlivá hodnota	koeficient vzdialenosti testovania [-]

Zadaním deklinácie sa nepoužije deklinácia počítaná programom, podobne ako aj v prípade Linkeho koeficientu zákalu atmosféry, albeda a zemepisnej šírky. Zemepisná šírka môže byť definovaná ako jednotlivá hodnota (vhodné len pre menšie územie), ako raster alebo ju program odčíta pre každú bunku rastra priamo z databázy GRASS-u. Parameter *step* definuje časový krok, s ktorým sa počíta celodenná radiácia od východu až po západ Slnka. Prednastavená hodnota je 1/2 hodiny, čo pre väčšinu aplikácií postačuje. Model môže simulovať priestorovú distribúciu slnečného žiarenia s vplyvom okolitým georeliéfom alebo bez tohto vplyvu. Parameter *dist* definuje hustotu testovania existencie tieňa na záujmovom území. Prednastavená hodnota je 1.0, hodnoty nad 1.0 zvyšujú rýchlosť výpočtu, ale znižujú presnosť, pri hodnotách pod 1.0 sa výpočet spomaľuje, ale maximalizuje sa presnosť.

Ako sme už spomenuli vyššie, model pracuje v dvoch módoch. V móde 1 je výstupom modelu rastrová mapa uhla dopadu slnečných lúčov na georeliéf (*incidunt*) [stupne] alebo okamžikové hodnoty slnečného žiarenia v jeho troch zložkách (*beam_rad*, *diff_rad*, *refl_rad*) [W.m^{-2}]. V móde 2 sú počítané denné sumy slnečného žiarenia v jeho troch zložkách (*beam_rad*, *diff_rad*, *refl_rad*) [$\text{Wh.m}^{-2}.\text{deň}^{-1}$]. Doba priameho žiarenia v každej bunke rastra je zaznamenávaná v súbore (*insol_time*) [min.]

Hodnoty žiarenia uvedené vyššie sú platné pre tzv. čistú oblohu, bez oblačnosti. Model r.sun umožňuje počítať aj reálne žiarenie na základe meteorologických pozorovaní žia-

renia alebo len oblačnosti. Koeficienty *coefbh* a *coefdh* definujú podiel, ktorým sa redukuje žiarenie čistej oblohy atmosférickými faktormi, najmä oblačnosťou.

Vplyv zatienenia tvarmi okolitého georeliéfu býva najmä pri členitom georeliéfe a nízkych výškach Slnka výrazný. Napríklad na území Slovenskej republiky sú miesta, kde v určitých obdobiach roka nie je priame slnečné žiarenie. Tieto plochy sú programom *r.sun* označené kódom určeným pre tieň.

Iné dôležité hodnoty modelovania sú po skončení výpočtu uložené do textového súboru s názvom *r.sun_out.txt*. Jeho obsah sa dynamicky mení podľa módu výpočtu (obsahuje napr. údaje o použitej solárnej konštante, deklinácii, čase východu a západu slnka).

Celoročné hodnoty žiarenia, alebo pre vybrané časti roka definované celými dňami, prípadne určité časti dňa môžu byť modelované modelom *r.sun* pomocou tzv. shell skriptovania, ktoré tvorí pre GRASS náhradu makrojazyka softéru. Príklady skriptov pre GRASS sú uvedené napríklad v práci Netelera a Mitasovej (2002).

MODELOVANIE PRIESTOROVEJ DISTRIBÚCIE SLNEČNÉHO ŽIARENIA PRE ÚZEMIE SLOVENSKA

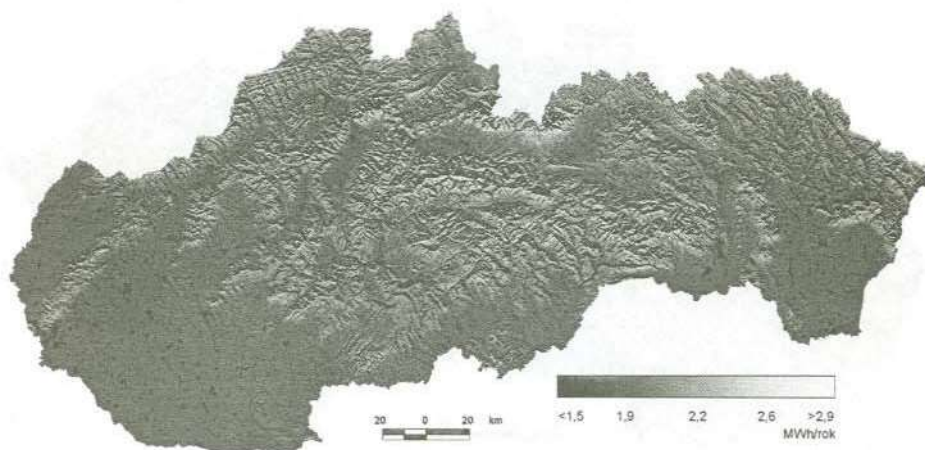
Pre dokumentovanie možností solárneho modelu *r.sun* sme vybrali príklad ročného úhrnu slnečného žiarenia dopadajúceho na georeliéf pre celé územie Slovenska. Podkladmi pre výpočet boli nasledovné údaje: digitálny model reliéfu územia Slovenska s rozlíšením 250 m (vrstva nadmorskej výšky, sklonu a orientácie voči svetovým stranám) a rastrové mapy Linkeho koeficientu zákalu atmosféry a albeda povrchu s rozlíšením 250 m. V tomto prípade boli použité ich priemerné celoročné hodnoty pre rôzne typy využitia krajiny uvedené v práci (Kittler a Mikler, 1986).

Na základe modelu *r.sun* a skriptu uvedeného nižšie (Obr. č. 1) boli vypočítané hodnoty zložiek žiarenia pre každý jednotlivý deň v roku a hodnota globálneho žiarenia bola pripočítaná do celoročnej sumy. Žiarenie bolo počítané s vplyvom zatienenia okolitým georeliéfom.

Obr.č. 1: UNIX shell skript, pomocou ktorého bol vypočítaný ročný úhrn globálneho slnečného žiarenia

```
r.mapcalc global.annual=0
i=1
while [ $i -le 365 ]
do
DAY='echo $i'
echo "Computing day $DAY..."
r.sun -s elevin=ele250 aspin=asp250 slopein=slop250 linkein=linke albedo=albedo
day="$i" beam_rad=b.$DAY diff_rad=d.$DAY refl_rad=r.$DAY
r.mapcalc global.annual="global.annual + b.$DAY + d.$DAY + r.$DAY"
i='expr $i + 1'
done
echo "Finished."
```

Obr. č. 2: Ročný úhrn globálneho slnečného žiarenia dopadajúceho na georeliéf Slovenska



Na Obr. č. 2 je uvedený výsledok modelovania v mapovej forme. Hodnoty žiarenia predstavujú hodnoty „celoročne čistej oblohy“ a teda sú vyššie ako skutočné hodnoty redukované oblačnosťou a inými atmosférickými faktormi. Obrázok dokumentuje priestorovú diferenciáciu slnečného žiarenia na základe georeliéfu Slovenska. Ročné hodnoty globálneho žiarenia sa pohybujú od 0,2 MWh na severných stranách pohorí a v údoliach, kde vznikajú tieňe najmä v zimnom období do 2,9 MWh na južných úbočiach pohorí. Plošné zastúpenie vybraných intervalov ročných hodnôt globálneho žiarenia je uvedené v Tab. č. 2. Ukážka situácie v priestorovom rozložení slnečného žiarenia v jeho jednotlivých zložkách počas dňa zimného slnovratu je uvedený na Obr. č. 3 až 5.

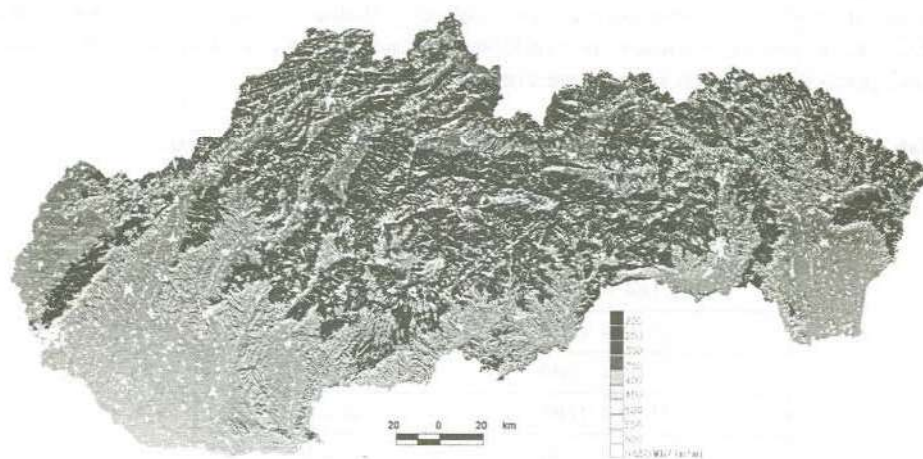
Tab. č. 2: Plošné zastúpenie vybraných intervalov globálneho slnečného žiarenia

Intervaly ročných hodnôt globálneho žiarenia [kWh/m ²]	Plošné zastúpenie [%]
164 – 1500	2,67
1501 – 1700	6,63
1701 – 1900	26,70
1901 – 2100	46,61
2101 – 2300	11,67
2301 – 2500	4,57
2501 – 2909	1,15

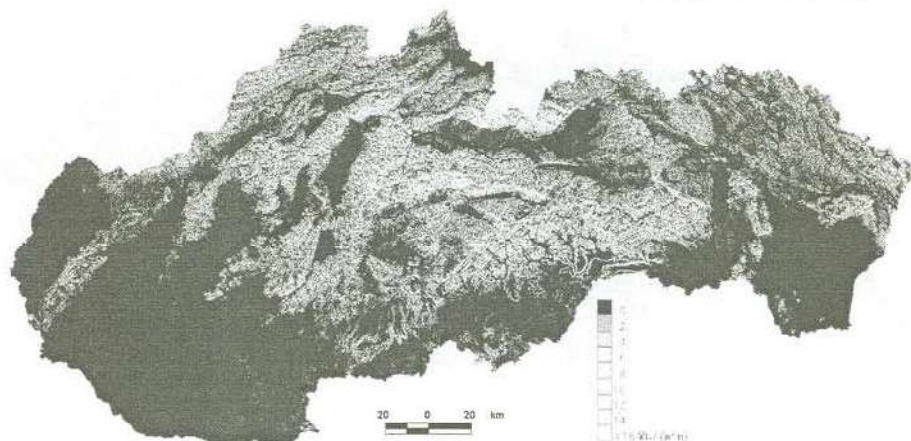
Obr. č. 3: *Priame slnečné žiarenie pre deň zimného slnovratu*



Obr. č. 4: *Difúzne slnečné žiarenie pre deň zimného slnovratu*



Obr. č. 5: Odrazené slnečné žiarenie pre deň zimného slnovratu



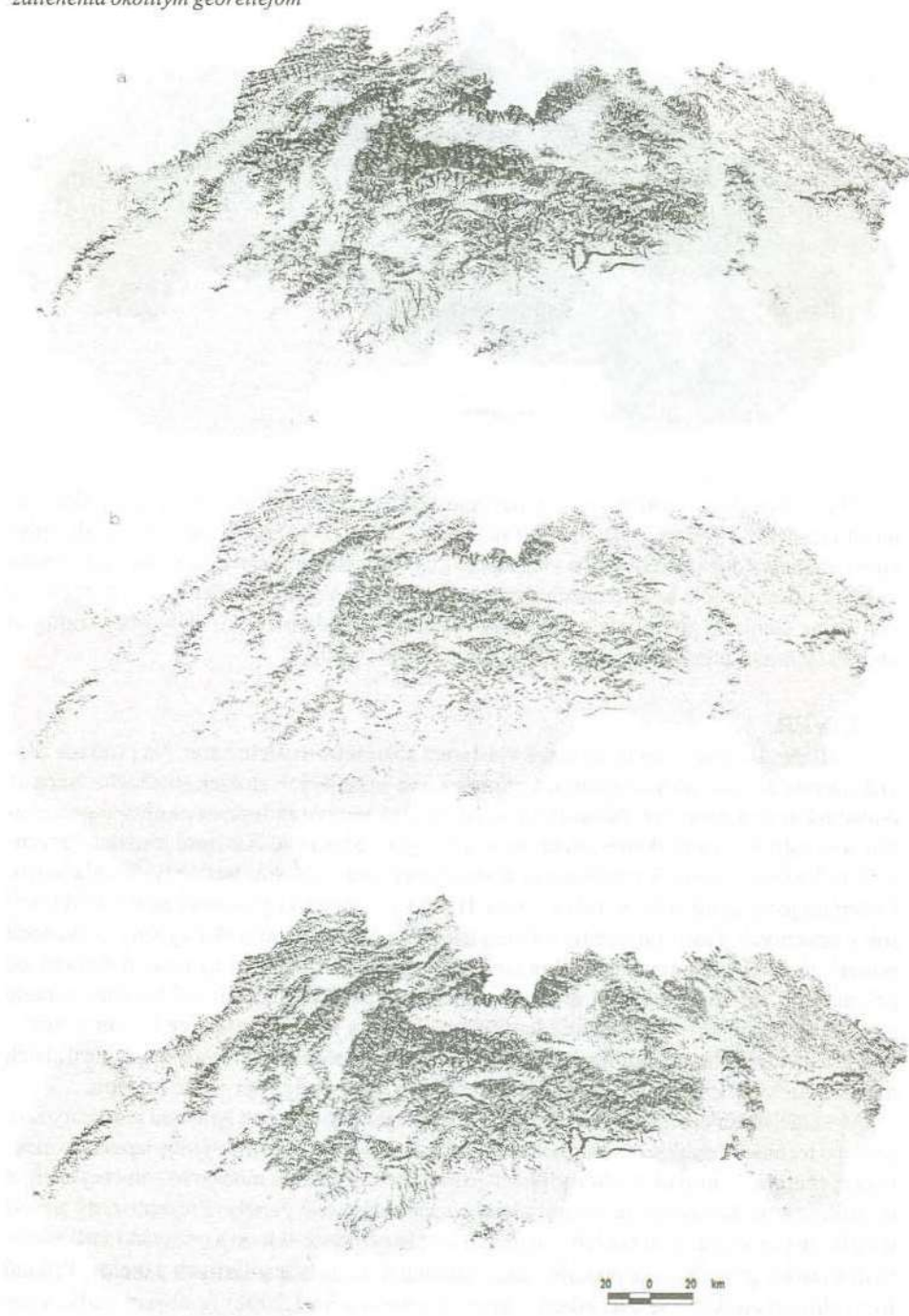
Obr. č. 6a-c dokumentuje vplyv zatienenia okolitým georeliéfom na množstvo dopadajúceho slnečného žiarenia. Na obrázku sú čiernou farbou zvýraznené tie plochy, kde vplyvom zatienenia došlo k redukcii o viac ako 5% z celkového množstva žiarenia v porovnaní s algoritmom výpočtu bez tieniaceho vplyvu georeliéfu. Vplyv zatienenia je výraznejší vo vertikálne členitom georeliéfe a pri nízkej výške slnka nad obzorom, t.j. najmä v zimnom období (v tomto prípade sa jedná o deň zimného slnovratu).

ZÁVER

V príspevku sme uviedli základné vlastnosti solárneho modelu r.sun. Na príklade Slovenska sme dokumentovali možnosti modelovania jednotlivých zložiek slnečného žiarenia dopadajúcich na georeliéf. Poukázali sme na význam vplyvu zatienenia okolitým georeliéfom a to najmä v zimných mesiacoch roka, keď výška Slnka nad obzorom je nízka. Prezentované hodnoty žiarenia predstavujú hodnoty pre čistú oblohu, bez vplyvu oblačnosti. Georeliéf je výrazný diferenciatívny faktor. Hodnoty žiarenia sa pohybujú od 0,2 MWh/m²/rok v severných, často zatienených polohách až po 2,9 MWh/m²/rok na južných svahoch pohorí. V ďalších štúdiách je možné sledovať závislosti vlastností kajinnej pokrývky od príjmu slnečnej energie (napr. druhové zloženie vegetácie, chorobnosť lesného porastu a pod.). Otvárajú sa tiež možnosti identifikácie území a ich vhodnosti pre konkrétny účel – napríklad ktoré spĺňajú podmienky dostatočného príjmu slnečnej energie, prípadne ďalších agrotechnických kritérií. GIS je ideálnym nástrojom pre analýzy práve tohto typu.

Využitie slnečnej energie je mnohoraké. Okrem prírodovedných aplikácií je značný záujem aj o technické aplikácie súvisiace s využitím slnečnej energie pri výrobe tepelnej a elektrickej energie. V prípade týchto aplikácií je predmetom záujmu množstvo slnečnej energie dopadajúce na horizontálnu rovinu alebo rôzne naklonené panely. Prezentovaný model umožňuje modelovanie aj takýchto aplikácií tak, že namiesto sklonu a orientácii voči svetovým stranám georeliéfu sa použijú rastre náklonu a orientácie solárnych panelov. Príklad fotovoltickej aplikácie je uvedený v práci (Hofierka a Šúri, 2002). V oblasti diaľkového

Obr. č. 6: Redukcia jednotlivých zložiek žiarenia - a) priame, b) difúzne a c) odrazené - pod vplyvom zatienenenia okolitým georeliéfom



prieskumu Zeme má model veľký potenciál využitia najmä pri rádiometrických korekciách obrazu na základe vplyvu reliéfu. Identifikáciou zatienených oblastí a ich analýzou je možné minimalizovať ich vplyv na kvalitu satelitného snímku aj pomocou jednotlivých zložiek žiarenia (zatienené oblasti nie sú ožiarené priamym žiarením, ale zvyčajne sú ožiarené difúznym a a odrazeným žiarením).

Prezentovaný model predstavuje významnú pomôcku pri rôznych environmentálnych štúdiách, ale aj pri technických aplikáciách. Umožňuje analyzovať rozsiahle územia a využívať pri tom existujúce databázy a analytické funkcie GIS-u. Model je voľne k dispozícii ako súčasť GIS-u GRASS.

Literatúra

- DUBAYAH, R., RICH, P. M., 1995, Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems* 9: 405-419.
- FU, P., RICH, P. M., 2000, *The Solar Analyst 1.0 User Manual*. Helios Environmental Modeling Institute, <http://www.hemisoft.com>.
- HETRICK, W. A., RICH, P. M., BARNES, F. J., WEISS, S. B., 1993, GIS-based solar radiation flux models. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical papers*. GIS, Photogrammetry and Modeling 3: 132-143.
- HOFIERKA, J., 1997, Direct solar radiation modelling within an open GIS environment. *Proceedings of the Joint European GI Conference 1997*, Vienna: 575-584.
- HOFIERKA, J., ŠÚRI, M., 2002, The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. *Proceedings of the "Open Source Free Software GIS - GRASS users conference 2002"*, Editors: Ciolli M., Zatelli P., Trento, Italy, 11-13 September 2002. CD-ROM.
- JENČO, M., 1992, Distribúcia priameho slnečného žiarenia na reoreliéfe a jej modelovanie pomocou komplexného digitálneho modelu reliéfu. *Geografický časopis* 44: 342-355.
- KITTLER, R., MIKLER, J., 1986, *Základy využívania slnečného žiarenia*. Bratislava, Veda.
- KRCHO, J., 1990, *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Bratislava, Veda.
- NETELER, M., MITASOVA, H., 2002, *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- SCHARMER, K., GREIF, J., (eds) 2000, *The European Solar Radiation Atlas*. Vol. 2: Database and Exploitation Software. Paris, (es Presses de l'École des Mines).

MODELING SPATIAL DISTRIBUTION OF SOLAR RADIATION ON GEORELIEF USING R.SUN MODEL AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

Summary

The paper presents r.sun – a spatially distributed solar radiation model for GRASS GIS and its application in environmental studies. The model simulates a spatial distribution of all three components of solar radiation (beam, diffuse and reflected radiation) using standard input data (e.g. elevation, slope, aspect, Linke's turbidity factor and surface albedo). The model is sufficiently flexible in modeling of small as well as large areas. Most of its parameters can be defined as spatially distributed using raster maps and/or can be taken directly from GIS database (e.g. latitude). The results are saved in GIS database in raster maps of beam, diffuse and reflected radiation or time of insolation. The radiation is in Wh/m² for mode 1 (instant radiation/irradiation for a given local time) or in Wh/m²/day for mode 2 when radiation for a given day is computed. Using shellscripting in GRASS GIS we can

compute radiation for selected time periods (e.g. part of the day or year). The example of annual radiation script is presented. The model simulates clear-sky as well as real-sky radiation using coefficients available from meteorological measurements.

The shadowing effects of surrounding terrain are modelled using a flexible and fast algorithm. The shadows have a big impact especially in mountainous areas and low solar altitude. The possibilities of model application are documented using data with 250-m spatial resolution covering the whole territory of Slovakia. Using digital elevation model and land cover data we have simulated spatial distribution of clear-sky solar radiation on georelief. Annual amount of global radiation is highly differentiated (0.2 - 2.9 MWh/m²/year) due to georelief with lowest values in shadowed valleys and highest values in southern parts of mountains. The shadowing effects are documented for winter solstice day. The precise modelling of solar radiation is important for many applications. We briefly discuss possible environmental and technical applications. The presented model is a valuable tool in these application areas. The model is already freely available in open source GRASS GIS.

Recenzovali: prof. RNDr. Ján Harčár, CSc.

doc. Ing. Jozef Vilček, PhD.