

OSONČENOST POVRŠJA SLOVENIJE

SOLAR ILLUMINATION RADIATION OF SLOVENIA

Klemen Zakšek, Krištof Oštir, Tomaž Podobnikar

POVZETEK

Prispevek opisuje model izračuna energije kvaziglobalnega obsevanja, s katerim je bila določena osončenost površja Slovenije. Energija Sonca je odvisna predvsem od vpadnega kota Sonca na površje, ki ga določajo astronomski parametri in morfologija površja, in od meteoroloških razmer, predvsem od trajanja Sončevega obsevanja. Podatki o površju so bili pridobljeni iz digitalnega modela višin InSAR DMV 25. Z enačbami iz astronomskega almanaha je bilo simulirano navidezno gibanje Sonca. V model je vključen algoritem iskanja lastnih in vrženih senc, saj območja v senci prejmejo mnogo manj energije kot osončena območja. Upoštevati je bilo treba tudi ustrezne meteorološke parametre. Izračun je bil izvršen po urah in dekadah (desetdnevno obdobje), vsota energij vseh dekad pa predstavlja letno energijo kvaziglobalnega obsevanja.

KLJUČNE BESEDE

osončenost, energija kvaziglobalnega obsevanja, digitalni model višin, navidezno gibanje Sonca, vpadni kot, sence

ABSTRACT

The article presents the elaboration of the quasi-global radiation model. This model was used to determine the solar illumination radiation of Slovenia. The solar energy depends mostly on the incidence angle defined by astronomical and surface parameters, and on meteorological conditions, especially duration of solar radiation. The surface parameters were calculated from the InSAR DMV 25 interferometric radar digital elevation model. The virtual Sun motion was simulated with equations derived from the astronomical almanac. Shade determination was considered as an important part of the model. If a part of the surface is in the shadow, it receives far less energy than sunny surfaces. Corresponding meteorological parameters were also integrated in the model. All calculations were done for hours and decades (ten-day periods). The annual quasi-global radiation energy was calculated as the sum of all energies over all decades.

KEY WORDS

solar illumination radiation, energy of quasi-global radiation, digital elevation model, virtual Sun motion, shadow

1. UVOD

Z osončenostjo se je v preteklosti ukvarjalo že veliko strokovnjakov. Hočevar (1980) je v svoji študiji preučeval razporeditev potenciala sončeve energije v Sloveniji, Gabrovec in Kastelec (1998) sta izdelala karto osončenosti za Geografski atlas Slovenije, na ZRC SAZU pa je bila izdelana diplomska naloga na to temo (Zakšek, 2002). Zadnja študija se je naslonila na metodologijo predhodnih del, a jih nadgrajuje v algoritmu iskanja senc in boljših podatkih o površju.

Tudi v svetu je bilo opravljenih več raziskav s podobno tematiko. Izdelanih je bilo tudi že nekaj zelo zapletenih modelov, ki omogočajo izračun osončenosti (RReDC, 2001; Schaab, 2000). Sicer postajajo nekateri preprostejši modeli že standardni del geodetskih programov (Conrad, 2002). V današnjem času se opravljajo meritve Sončeve energije tudi s pomočjo satelitov – japonski meteorološki satelit GSM-5 meri urne vrednosti prejete Sončeve energije na zemeljskem površju (Bom, 2002).

Osončenost lahko na kratko definiramo kot izpostavljenost Soncu. Podamo jo lahko z energijo globalnega in kvaziglobalnega obsevanja ali s trajanjem Sončevega obsevanja. Sonce je glavni vir energije na Zemlji, saj med drugim omogoča fotosintezo. V zadnjem času se Sončeva energija omenja predvsem kot alternativni vir energije, kajti naše gospodarstvo v večini sloni na fosilnih gorivih, ki niso obnovljiva. Trajanje in energija sončevega obsevanja sta tako vse pomembnejša podatka v kmetijstvu, vinogradništvu, energetiki in načrtovanju naselij.

Pri določevanju Sončeve energije, ki je vsota energije neposrednega in difuznega Sončevega obsevanja, moramo upoštevati več dejavnikov:

- vpadni kot Sončevih žarkov,
- morfologijo površja in
- podnebje.

Vpadni kot je kot med normalo na površje in smerjo proti Soncu. Odvisen je od položaja Zemlje glede na Sonce, geografske lege, naklona ter ekspozicije površja. Najlažje ga izračunamo iz normalnega vektorja na površje in vektorja proti Soncu.

Na osončenost močno vpliva tudi morfologija površja. Območja obrnjena proti jugu so na severni polobli bolj izpostavljena Soncu kot severna pobočja že zaradi razlike v vpadnih kotih Sonca. Poleg tega lahko višje ležeči deli površja mečejo sence na nižja območja. Za vsak trenutek moramo vedeti, če je površje osončeno ali če je v senci, kajti površje v senci ne prejme energije neposredne svetlobe, ampak le energijo difuzne svetlobe.

Ko govorimo o vplivu podnebja, nas zanima predvsem število dni v letu z oblačnostjo ali meglo. Ta vremenska pojava povečujeta sipanje svetlobe in predstavljata filter za neposredno osončenost. Podnebne vplive opazujemo na meteoroloških postajah. Za izračun osončenosti je najpomembnejši podatek trajanje Sončevega obsevanja. V izračunu potrebujemo še transmisijska koeficienta glede na absorpcijo in razpršitev.

2. IZRAČUN

2.1 Podatki

Osnovni podatki o površju so bili pridobljeni iz digitalnega modela višin InSAR DMV 25 (Oštir et al., 2000), ki je bil izdelan z radarsko interferometrijo leta 2000 na ZRC SAZU. Osnovna enota mreže DMV je kvadratura celica velikosti 25 krat 25 m. V izračunu osončenosti je bila Zemlja predstavljena kot rotacijski elipsoid, zato so bile državne koordinate pretvorjene v geografske, z upoštevanjem geoidnih višin pa so bile iz ortometričnih pridobljene elipsoidne višine.

Poleg tega je bil uporabljen meteorološki model Hočevarja in Rakovca (Hočevar, 1980), kjer so bili upoštevani podatki o trajanju Sončevega obsevanja ter transmisijski koeficienti za absorpcijo in za razpršitev.

Za vsak izbran trenutek je bila izračunana deklinacija Sonca v nebesnem ekvatorialnem koordinatnem sistemu in oddaljenost Zemlje od Sonca.

2.2 Normalni vektorji na površje in vektorji proti Soncu

Vpadni kot Sonca določimo, če poznamo normalni vektor na površje in vektor proti Soncu. Oba vektorja sta bila definirana v enotnem geocentričnem globalnem kartezičnem koordinatnem sistemu.

Vhodni podatki omogočajo pridobitev geografskih koordinat, elipsoidnih višin, naklonov in ekspozicij. Iz njih so bili določeni normalni vektorji na površje.

$$n_p = f(\varphi, \lambda, v, \alpha)$$

n_p - normalni vektor na površje v - naklon

φ , - geografska (elipsoidna) širina α - ekspozicija

λ - geografska (elipsoidna) dolžina

Enačba 1: Normalni vektor na površje.

Za določitev vektorja proti Soncu je bilo potrebno simulirati navidezno gibanje Sonca okoli Zemlje. Položaj Sonca se glede na opazovalca na Zemlji neprestano spreminja, zato je vektor proti Soncu funkcija časa in deklinacije Sonca.

$$s = f(\delta, \beta)$$

σ - vektor proti Soncu β - časovni kot: $\beta = \frac{\pi \cdot (t - 7^h)}{12^h}$

δ - deklinacija t - čas (SEČ) v urah

Enačba 2: Vektor proti Soncu.

2.3. Izračun vpadnega kota in iskanje senc

Kot med dvema vektorjema je najlažje določiti s skalarnim produktom. Če znašata dolžini obeh vektorjev natanko eno enoto, velja, da je skalarni produkt enak kosinusu kota med vektorjema. Na ta način je bil izračunan vpadni kot za vsak trenutek posebej.

Vpadni kot določa, ali je površje sploh lahko obsijano, pri čemer v grobem ločimo tri primere. V prvem primeru je površje potencialno obsijano, kadar je vpadni kot manjši od 90 stopinj. Drugi primer nastopi, če so Sončevi žarki približno vzporedni površju oz. vpadni kot le malo odstopa od 90 stopinj - površje je delno obsijano. V tretjem primeru je vpadni kot večji od 90 stopinj in površje je zagotovo neosvetljeno, saj je v lastni senci.

Pri iskanju vrženih senc moramo poznati vrh ovire. Predpostavimo, da je vrh tista točka, kjer prvič zasledimo lastne sence (vpadni kot večji od 90 stopinj).

Poleg potencialne ovire potrebujemo še azimut Sončevih žarkov in zenitno razdaljo Sonca. Po DMV-ju se pomikamo v smeri, ki je najbližja azimutu Sončevih žarkov. Površje je v senci toliko časa, dokler je zenitna razdalja vrha ovire manjša od zenitne razdalje Sonca. Ker v izračunu ni bil upoštevan vpliv vegetacije, mikromorfologije in ukrivljenosti Zemlje, bi lahko tudi pri vrženih sencah govorili o treh primerih osvetljenosti, vendar je vmesna kategorija (delna osvetljenost) vsaj za regionalne analize popolnoma brezpredmetna.

2.4 Fizikalni model kvaziglobalnega obsevanja

Sončeva energija na površju je odvisna tudi od meteoroloških parametrov. Vhodni podatki za ta del izračuna so trajanje Sončevega obsevanja ter transmisijska koeficienta glede na absorpcijo in razpršitev. Navedeni podatki so bili pridobljeni na 24 meteoroloških postajah razporejenih po vsej Sloveniji kot povprečja opazovanj v obdobju tridesetih let. Vsaki meteorološki postaji je bilo prirejeno podnebno območje, za katero so v izračunu veljali ustrezni meteorološki parametri.

Osončenost lahko podamo na več načinov, vendar jo najbolje opišemo z energijo kvaziglobalnega obsevanja. To je Sončeva energija, ki jo v določenem času prejme poljubno nagnjena ploskev. V izračunu je bil, kot že rečeno, uporabljen fizikalni model Hočevarja in Rakovca (Hočevar, 1980). Ta model upošteva energijo neposredne in difuzne svetlobo. Popolnoma teoretično bi dobili dnevno energijo kvaziglobalnega obsevanja z integracijo ploskovne gostote moči po času od vzhoda do zahoda Sonca. Model je bil numerično poenostavljen, saj je bila energija kvaziglobalnega obsevanja računana po urah in dekadah. To pomeni, da je bila določena za vsak deseti dan za vsako uro. Za pridobitev Sončeve energije izbrane deкаде je bila celodnevna energija pomnožena z deset. Celoletno energijo kvaziglobalnega obsevanja dobimo z vsoto energij vseh dekad.

$$E_{ko} = \sum_{ura=vzhod}^{zahod} j_{ko}(ura) \cdot \Delta t$$

E_{ko} - dnevna energija kvaziglobalnega obsevanja Δt - časovni interval (1 h)

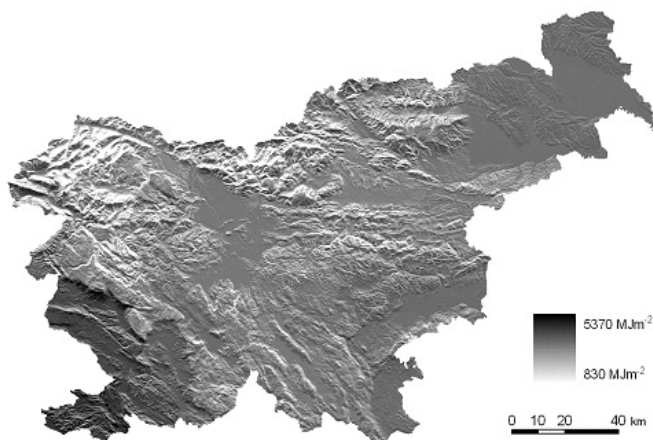
j_{ko} - (ploskovna) moč kvaziglobalnega obsevanja

Enačba 3: Dnevna energija kvaziglobalnega obsevanja.

3. REZULTATI

Izračun je bil izvršen v Matlabu. Matlab je programsko orodje, ki je zelo primerno za matrične izračune. Podatki so zaradi upoštevanja vpliva senc segali preko meja naše države, rezultati pa so bili na koncu obrezani po meji. Prostorsko razporeditev energije kvaziglobalnega obsevanja prikazuje karta na sliki 1. Vidimo lahko, da je najbolj osončena Primorska, najmanj pa je obsijano območje Julijskih Alp.

Za boljšo predstavo je bila narejena statistična analiza rezultatov (tabela 1). Dobri dve tretjini Slovenije prejmeta letno med 3700 MJm² in 4700 MJm² Sončeve energije. Glede na naš model



Slika 1: Energija kvaziglobalnega obsevanja v Sloveniji.

je najbolj osončeno površje blizu mejnega prehoda Sočerga, najmanj pa pod severno triglavsko steno.

Statistični parametri	Energija [MJm ⁻²]
Minimum	840
Maksimum	5360
Srednja vrednost	4020
Standardni odklon	520

Preglednica 1: Statistična analiza energije kvaziglobalnega obsevanja v Sloveniji.

Na osnovi razporeditve energije kvaziglobalnega obsevanja (slika 1) lahko sklepamo, da morfologija površja bistveno vpliva na vrednost prejete Sončeve energije. Zato je bilo opravljeno še nekaj analiz, ki kažejo vpliv površja na rezultate. Iz tabele 2 lahko vidimo, da severne lege prejmejo v povprečju mnogo manj energije kot južne. Sončeva energija je na južnih ekspozicijah tudi mnogo bolj enakomerno porazdeljena. Območja, z ekspozicijami proti vzhodu in zahodu, so blizu slovenskemu povprečju in se med sabo bistveno ne razlikujejo.

Ekspozicija	Srednja vrednost [MJm ⁻²]	Standardni odklon [MJm ⁻²]
sever	3600	620
vzhod	3960	400
jug	4400	260
zahod	4050	430

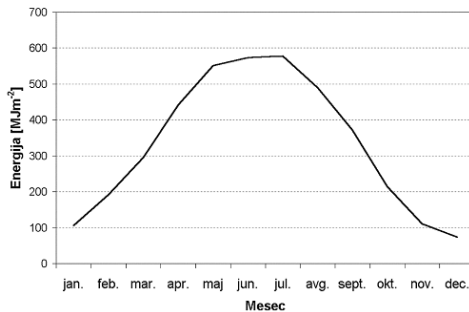
Preglednica 2: Energija kvaziglobalnega obsevanja glede na ekspozicije površja v Sloveniji.

Slovenijo lahko geografsko delimo na pokrajine (Perko, 2001). Taka delitev poleg oblike površja upošteva tudi podnebne pogoje. Najmanj energije prejme alpsko visokogorje, največ Sončeve energije v Sloveniji pa je na sredozemskih planotah.

	Srednja vrednost [MJm^{-2}]	Standardni odklon [MJm^{-2}]
Alpska visokogorja	3696	770
Alpska hribovja	3922	536
Dinarske planote	3996	444
Alpske ravnine	4055	214
Panonska gričevja	4115	323
Dinarska podolja in ravniki	4137	283
Panonske ravnine	4181	92
Sredozemska brda	4390	467
Sredozemske planote	4490	337

Preglednica 3: Energija kvaziglobalnega obsevanja po pokrajinah Slovenij

Graf 1 prikazuje spreminjanje povprečne energije kvaziglobalnega obsevanja v Sloveniji po mesecih.



Graf 1: Energija kvaziglobalnega obsevanja v Sloveniji po mesecih.

Slovenija prejme največ Sončeve energije julija (povprečna energija kvaziglobalnega obsevanja znaša 580 MJm^{-2}) in najmanj decembra (povprečje 70 MJm^{-2}). Najhitreje se energija kvaziglobalnega obsevanja spreminja v času obeh enakonočij, najbolj konstantna pa je v času obeh solsticijev.

4. OVREDNOTENJE KAKOVOSTI REZULTATOV

V geodeziji za ocenjevanje natančnosti uporabljamo zakon o prenosu varianc in kovarianc. Ker je v izračunu nastopalo veliko spremenljivk in zvez med njimi, si z njimi ne da pomagati. Grobo oceno natančnosti lahko pridobimo, če v podatkih simuliramo napako in nato preučujemo vpliv napake na rezultate, podobno kot deluje tudi metoda Monte Carlo.

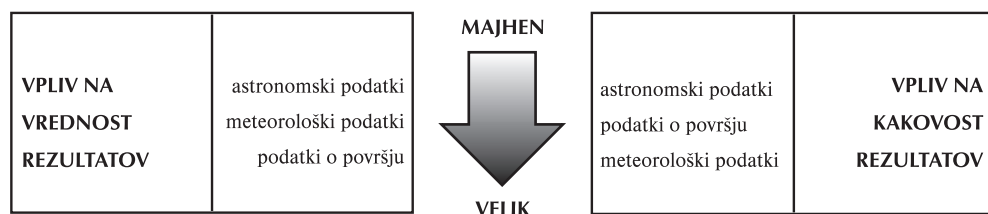
Najprej je bila napaka simulirana v DMV-ju. Na manjšem reprezentativnem območju je bila izdelana ploskev, ki ima srednjo vrednost normalno porazdeljenih višin blizu nič. Standardni odklon te ploskve je bil približno enak natančnosti vhodnega DMV-ja (standardni odklon 3,2 m; srednja vrednost 0,6 m). Izdelano ploskev smo prišteli DMV-ju in primerjali srednjo vrednost Sončeve energije pred simulirano napako in po njej. Srednji vrednosti se po pričakovanju praktično ne razlikujeta (razlika 0,05 %), kar pa ne pomeni, da ne pride do večjih razlik v okviru posameznih

celic. Na manjših in razgibanih območjih ima napaka predstavitve površja namreč odločilen vpliv na rezultate v posamezni celici. Zato lahko že manjše geomorfološke spremembe površja vodijo v večje spremembe v prejeti Sončevi energiji, ki v globalnem smislu ne pridejo do izraza.

Napaka je bila na podoben način simulirana tudi pri meteoroloških podatkih. Na žalost nismo imeli podatkov o natančnosti meteoroloških podatkov, zato smo jim "pokvarili" zadnje decimalno mesto. S primerjavo srednjih vrednosti pred simulirano napako in po njej ugotovimo, da se razlikujeta za dober odstotek. Žal ne moremo zagotoviti, da bodo v prihodnosti meteorološke razmere podobne podatkom, ki so bili uporabljeni v izračunu. Vsako večje odstopanje od povprečnih vrednosti meteoroloških parametrov lahko precej vpliva na končne rezultate v globalnem smislu. Upoštevati moramo še, da se lahko vreme spreminja tudi na zelo majhnem območju, vendar je izračun predvideval podobnost vremenskih pogojev na precej večjih območjih. Za natančnejši račun bi morali torej opazovati meteorološke parametre z večjo natančnostjo in na več meteoroloških postajah.

Pri oceni kakovosti rezultatov moramo upoštevati tudi vpliv astronomskih parametrov. Natančnost izračuna deklinacije znaša stotino kotne stopinje, vendar ima le majhen vpliv na končne rezultate. Tudi če deklinacijo spremenimo za njen standardni odklon, se srednja vrednost energije kvaziglobalnega obsevanja skoraj ne spremeni (razlika 0,01 %). To pomeni, da imajo astronomski parametri najmanjši vpliv na izračun Sončeve energije.

Z upoštevanjem vseh vplivov lahko grobo ocenimo natančnost energije kvaziglobalnega obsevanja, ki gledano relativno znaša približno 1 %. Zahtevana natančnost rezultatov je odvisna od aplikacije, za katero jih želimo uporabiti. Če nas zanimajo rezultati za neko veliko območje (v našem primeru za Slovenijo), DMV nima velikega vpliva na natančnost rezultatov. Kadar nas zanimajo rezultati za neko lokalno območje velikosti nekaj pikselov, pa je uporabljeni DMV preslab. Podobno je z meteorološkimi podatki. Podatki uporabljeni v izračunu dajo dobre rezultate za dolgotrajna obdobja (več let) na območjih v velikosti nekaj 100 km², medtem ko se zaradi nestanovitnosti vremena slabo obnesejo pri obdobjih dolgih le nekaj dni. Meteorološki model je že dokaj star, vendar novejši model zaradi slabše kakovosti meteoroloških podatkov ne bi prinesel bistvenih izboljšav.



Slika 2: Vpliv podatkov na rezultate.

Rezultati izračuna so neuporabni za območja velika nekaj arov na poljubno izbran dan. V našem primeru je bila obravnavana energija kvaziglobalnega obsevanja za celo Slovenijo v nekajletnem obdobju. Rezultati so v tem primeru zadovoljivi, njihove vrednosti so najbolj odvisne od

morfologije površja, manjši vpliv imajo meteorološki in astronomski podatki. Kakovost rezultatov najbolj obremenjujejo meteorološki podatki, podatki o površju in astronomski podatki pa imajo mnogo manjši vpliv. Medsebojen vpliv podatkov na vrednost in kakovost rezultatov prikazuje slika 2.

5. ZAKLJUČEK

V članku je opisan model izračuna osončenosti in njegova implementacija za območje Slovenije. Simulirano je bilo navidezno gibanje Sonca preko površja z upoštevanjem digitalnega modela višin. V model je vgrajen algoritem iskanja senc in meteorološki model. Rezultat aplikacije je karta energije kvaziglobalnega obsevanja za vso državo. V tako razgibani deželi, kot je Slovenija, ima površje največji vpliv na energijo kvaziglobalnega obsevanja. To kažejo tudi rezultati analiz, ki kažejo vpliv površja na rezultate. Povprečna vrednost energije kvaziglobalnega obsevanja v Sloveniji znaša 4020 MJm^{-2} , standardni odklon pa je 520 MJm^{-2} .

Rezultate lahko neposredno primerjamo s Karto sončnega obsevanja (Gabrovec in Kastelec, 1998). Gabrovčev model izračuna se od opisanega razlikuje v algoritmu iskanja lastnih in vrženih senc, meteorološki model pa je enak. Večja razlika med študijama nastopi v uporabljenih podatkih o površju. InSAR DMV 25 zagotavlja nedvomno boljše podatke o površju kot DMR 100, ki ga je kot vhodni podatek uporabil Gabrovec.

Podatki o osončenosti bodo v prihodnosti pomembni predvsem zaradi vse večje rabe alternativnih virov energije, prav gotovo pa bodo znali te podatke uporabiti tudi agronomi, gozdarji, vinogradniki ... Podatke o energiji kvaziglobalnega obsevanja bi bilo smiselno uporabiti tudi pri strateškem načrtovanju razvoja določene pokrajine.

LITERATURA

Conrad, O., *DiGeM 2.0 Help*. Göttingen, 2002

Bom (Commonwealth of Australia 2002, Bureau of Meteorology), *Daily Solar Radiation Model Description*. 2002 - URL: <http://www.bom.gov.au/sat/solradinfo.shtml>

Gabrovec, M., *Sončno obsevanje v reliefno razgibani Sloveniji*. Geografski zbornik, Ljubljana, 1996, št. XXXVI, str. 47-68

Gabrovec, M., Kastelec, D., *Karta sončnega obsevanja*. Nacionalni atlas Slovenije (uredniki: Jerneja Fridl, Drago Kladnik, Milan Orožen Adamič, Drago Perko), Ljubljana, str. 105, DZS, 1998

Hočevar, A., *Razporeditev potenciala Sončeve energije v Sloveniji*. Ljubljana, VDO Biotehniška fakulteta, VTOZD za agronomijo, 1980

RReDC, *National Solar Radiation Data Base User's Manual (1961-1990)*. 2001 - URL: <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/NSRDB/sources.html>

Perko, D., *Tipi pokrajin*. Nacionalni atlas Slovenije (uredniki: Jerneja Fridl, Drago Kladnik, Milan Orožen Adamič, Drago Perko, Jernej Zupančič), Ljubljana, Založba Rokus, 2001

Oštir, K., Podobnikar, T., Stancič, Z., Mlinar, J., *Digitalni model višin Slovenije InSAR 25*. Geodetski vestnik, Ljubljana, 2000, letnik 44, št. 4, str. 374-383

Schaab, G., *Modellierung und Visualisierung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Einstrahlungsstärke mittels eines Geo - Informationssystems*. Kartographische Bausteine, Dresden, 2000

Zakšek, K., *Osončenost površja Slovenije*. Diplomaska naloga, Ljubljana, FGG, 2002

Klemen Zakšek, univ. dipl. inž. geod.

Znanstvenoraziskovalni center SAZU,
Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
klemen.zaksek@zrc-sazu.si

dr. Kristof Oštir, univ. dipl. fiz.

Znanstvenoraziskovalni center SAZU,
Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
kristof@zrc-sazu.si

dr. Tomaž Podobnikar, univ. dipl. inž. geod.

Znanstvenoraziskovalni center SAZU,
Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
tomaz@zrc-sazu.si

Recenzija: mag. Dalibor Radovan, Matej Gabrovec

Prispelo v objavo: 12. december 2002