

GEOFIZIKA	Vol. 1	1984
-----------	--------	------

Izvorni znanstveni rad

Globalno zračenje u Jugoslaviji za slučaj Rayleigheve atmosfere

Ivan Penzar i Branka Penzar

Geofizički zavod, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb

Primljeno 16. siječnja 1984.

UDK 551.521

Razmatraju se prizemne vrijednosti dozračene energije od Sunca u geografskom pojasu od 41° do 47° N i rasponu nadmorskih visina od 0 do 3000 metara uz pretpostavku Rayleighevog modela atmosfere. Analiza se temelji na dnevnom globalnom zračenju. Usporedba s mjerenim podacima pokazuje da je dnevno zračenje za model Rayleigheve atmosfere u pravilu veće od stvarnog dnevnog zračenja pri tlu, osobito u malim nadmorskim visinama. Premašenje se može dogoditi samo u rijetkim prilikama uz relativno čist i suh zrak, jakim refleksijom na zgodno smještenim oblacima i svježem snijegu. Rayleigheva atmosfera nad Jugoslavijom propušta do tla od 82 do 93% energije. Usprkos velike propusnosti taj model atmosfere ipak utječe na položaj pomičnog dnevnog maksimuma zračenja, koji ljeti na gornjoj granici atmosfere dopre do $43^{\circ} 34'N$, a na morskoj razini uopće ne prelazi paralelu 41° N. Bitna razlika između teritorijalne raspodjele globalnog zračenja nad Jugoslavijom za Rayleighevu atmosferu i poznatih raspodjela izvedenih iz trajanja insolacije i naoblake je u tome da izolinije zračenja u ovom slučaju teku uglavnom zonalno, a za realnu atmosferu izolinije zračenje slijede smjer obale odnosno najviših gorskih masiva. Druga bitna razlika je u tome da je dozračena energija kroz suhu i čistu atmosferu to veća što su planine više, a u realnoj atmosferi zbog orografske naoblake je globalno zračenje manje u planinskom području Jugoslavije nego nad Jadranskim bazenom i panonskom nizinom.

Napomena: Ovo je istraživanje potpomognuto od Republičke zajednice za znanstveni rad (SIZ-a I) SR Hrvatske preko istraživačkog projekta Istraživanje i razvoj korištenja energije Sunca. I ovom prilikom se zahvaljujemo na novčanoj pomoći.

Global radiation in Yugoslavia for a Rayleigh atmosphere model

The paper deals with ground values of incoming Solar energy in the 41° – 47° N zone and in the 0–3000 metre altitude range, on the assumption of Rayleigh atmosphere model. The analysis is based on daily global radiation. A comparison with measured data shows that daily radiation for Rayleigh atmosphere model as a rule exceeds that of real daily radiation near the ground, especially at little altitudes. The radiation for a Rayleigh model can be exceeded only rarely, in the case of relatively clear and dry air and strong reflection on suitably situated clouds or on fresh snow. Rayleigh atmosphere over Yugoslavia transmits 82–93% energy to the ground. In spite of great transmissibility, this model still influences the position of moving radiation maximum in summer, reaching 43° – 34° N at the upper level of the atmosphere, and not above 41° N at the sea level. The essential difference between the territorial distribution of global radiation over Yugoslavia for Rayleigh atmosphere and the known distributions derived from sunshine duration and from cloudiness is in the fact that radiation isolines in the model mostly follow the parallels of latitude, and radiation isolines for a real atmosphere follow the direction of the coastline, i. e. the highest mountain ranges. The other essential difference is in the mountains. The higher the mountains, the greater the energy coming through dry clean atmosphere. Due to orographic cloudiness, global radiation in real atmosphere is less intensive in the mountain areas of Yugoslavia than over the Adriatic basin and the Pannonian plain.

1. Uvod

Raspodjele energije dozračene od Sunca na Zemljinu površinu ovisi o mnogim utjecajima, slično kao i raspodjela drugih meteoroloških parametara, no za razliku od tih drugih, ona je manje poznata, zbog veoma rijetke mreže aktinometara i piranometara. Neki od utjecaja koji modificiraju tu energiju nalaze se u samoj atmosferi, a mijenjaju se nepravilno i jako. Druga grupa utjecaja je ekstraterestričkog porijekla, u vezi s gibanjima Zemlje u Sunčevom sustavu; oni se mijenjaju pravilno i mogu se matematički izraziti. Postoji i kvazistacionaran utjecaj, a to je debljina atmosfere nad pojedinim mjestom na Zemlji, definirana nadmorskom visinom toga mjesta.

Ako utjecaje iz prve grupe, koji reguliraju propusnost atmosfere za zračenje, zadržimo kao konstante i time definiramo izvjestan model atmosfere, onda se raspodjela zračenja na Zemljinoj površini i promjene te raspodjele u vremenu mogu računski odrediti za bilo koje mjesto, tj. geografsku širinu i nadmorsku visinu i za bilo koji položaj Zemlje prema Suncu, tj. datum i čas ili dan.

Rayleigheva atmosfera jest jedan model atmosfere, a pretpostavlja potpuno čist i suh zrak, tj. najpovoljnije uvjete za prolaz elektromagnetskog zračenja. U takvom slučaju atmosfera najslabije upija i najmanje raspršuje Sunčevu energiju tako da je kompletni koeficijent ekstinkcije ili slabljenja zračenja a_R tada najmanji. Stvarna atmosfera može se Rayleighevom modelu u određenim uvjetima približiti, ali ga ne može sasvim postići, jer u zraku uvijek ima bar nešto vodene pare i raspršenih čestica. Zato su vrijednosti Sunčevog zračenja za Rayleighovu atmosferu u pravilu najveće vrijednosti koje bi se mogle izmjeriti pri tlu.

Ova se analiza temelji na dnevnim vrijednostima globalnoga Sunčevog zračenja za Rayleighovu atmosferu koje su izračunate na Geofizičkom zavodu, a bit će objavljene u drugoj ediciji Zavoda. One sadržavaju ove utjecaje:

- udaljenost Zemlje od Sunca,
- duljinu svijetlog dijela dana ovisnu o vremenu Sunčevog izlaza i zalaza, o atmosferskoj refrakciji i trajanju građanskog sumraka,
- upadni kut izravnog zračenja na horizontalnu plohu,
- debljinu atmosfere kroz koju zračenje prolazi, ovisnu o visini Sunca nad horizontom i o nadmorskoj visini mjesta,
- pretpostavljen slobodni horizont,
- pretpostavljena neka svojstva atmosfere.

U prvom dijelu rada razmatra se globalno zračenje uz Rayleighovu atmosferu u pojasu od 41° do 47° geografske širine i u rasponu nadmorskih visina od 0 do 3000 metara općenito.

Drugi dio je primjena rezultata na Jugoslaviju, tako da su uvažene konkretne nadmorske visine terena.

2. Metoda izračunavanja dnevnog globalnog zračenja

Energija koja je elektromagnetskim zračenjem Sunca dovedena na neku plohu jedinične površine u nekom razdoblju u meteorologiji se naziva Sunčevim zračenjem. Sunčevo zračenje je gustoća toka dozračene energije. Izražava se u jedinicama za energiju na površinu u vremenu. Globalno Sunčevo zračenje (izravno iz smjera Sunca i raspršeno iz svih smjerova neba) računali smo isključivo za horizontalnu plohu.

Globalno zračenje $g(\omega, a_R)$ u nekom trenu na zemljopisnoj širini φ nekog dana kod udaljenosti Sunca od Zemlje R , a deklinacije Sunca δ , u Rayleighovom modelu gdje je koeficijent ekstinkcije $a_R(\omega)$, a koeficijent apsorpcije $c_R(\omega)$ pri satnom kutu Sunca ω dobijemo po izrazu:

$$g(\omega, a_R) = \frac{S_0 R_m^2}{2 R^2} \cdot \sin h \{ \exp[-a_R(\omega) \cdot m(\omega)] + \exp[-c_R(\omega) \cdot m(\omega)] \} \quad (1)$$

pri čemu je S_0 solarna konstanta, R_m srednja udaljenost Sunca od Zemlje, h visina Sunca nad horizontom, a $m(\omega)$ optička masa zraka one točke na nebu u kojoj se nalazi Sunce što znači da ta veličina predstavlja duljinu optičkog puta Sunčevog zračenja kroz atmosferu.

Visina Sunca h se dobiva iz relacije:

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2)$$

a optička masa zraka pomoću jednadžbe:

$$m(\omega) = \frac{p}{p_0 \cdot \sin h} \quad (3)$$

Oznake p i p_0 znače tlakove zraka na promatranoj nadmorskoj visini i na razini mora.

Trenutno globalno zračenje može se na opisani način računati za bilo koji satni kut Sunca u intervalu od izlaza do zalaza Sunca. Prema Schindleru (Baur, 1953) satni kut izlaza odnosno zalaza Sunca ω_0 uz uvažavanje atmosferske refrakcije dobiva se po izrazu:

$$\cos \omega_0 = \frac{\cos \xi - \sin \varphi \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} \quad (4)$$

pri čemu je

$$\xi = 90^\circ + a + r_s + \nu \quad (5)$$

Tu je a atmosferska refrakcija, r_s vidni kut Sunčevog polumjera, ν je depresija horizonta. Za solarnu konstantu uzeta je vrijednost $8,12 \text{ J cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, a za deklinaciju Sunca podaci iz astronomskih efemerida za 1966. godinu.

Dnevni hod koeficijenta ekstinkcije $a_R(\omega)$ preuzet je iz rada I. Penzar (1970), a koeficijenta apsorpcije $c_R(\omega)$ dajemo u tablici 1. Ovi koeficijenti uključuju debljinu sloja ozona i njezino godišnje kolebanje kakvo navodi W. Schüepp (1949) za geografsku širinu 45° N .

Promjena tlaka zraka s visinom uzeta je kao u standardnoj ARDC atmosferi.

U duljinu svijetlog dijela dana uključeno je trajanje građanskog sumraka prema Listu (1951, tab. 172), za koje vrijeme do tla dolazi jedan dio raspršenog zračenja.

Geografska širina od 41° do 47° N mijenjana, je u koracima od po pola stupnja, a nadmorska visina od 0 m do 3000 m u koracima od po 500 metara.

Tablica 1. Dnevni hod apsorpcionog koeficijenta $c_R(\omega) 10^{-4}$ za $\varphi = 45^\circ$ na 16. dan u mjesecu za određeni satni kut Sunca.

Table 1. Daily course of absorption coefficient $c_R(\omega) 10^{-4}$ for $\varphi = 45^\circ$ on the 16th day in a month for a definite Solar hour angle.

ω	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
7 ^h 45 ^m						068						
7 15					102	187	133					
6 45					220	258	240	129				
6 15				188	283	318	307	234				
5 45			103	266	338	357	352	288	213			
5 15			200	335	390	396	395	343	266	107		
4 45		178	289	374	430	435	434	380	324	214		
4 15	090	255	341	425	452	455	455	422	367	268	183	
3 45	211	312	381	452	463	464	465	438	399	325	232	171
3 15	254	340	422	461	470	472	474	448	422	362	278	245
2 45	298	376	442	467	480	482	485	464	440	398	307	282
2 15	328	410	460	474	485	486	490	471	450	415	347	317
1 45	339	430	472	481	497	499	503	478	452	431	363	341
1 15	357	452	476	484	500	505	509	482	457	437	383	359
0 45	359	458	480	490	501	511	515	489	462	442	395	366
0 15	360	459	483	494	502	512	516	493	465	444	397	372

Dnevno globalno zračenje dobiva se uobičajenom metodom numeričke integracije izraza (1) kako je to pokazano u radu I. Penzar (1974). U numeričkoj integraciji jednadžbe (6) intervali Δt nizani su od pravog Sunčevog podneva prema jutru i večeri sve dok nisu obuhvatili jutarnji i večernji sumrak, čiji je početak odnosno svršetak označen satnim kutovima $-\omega_0$ i ω_0 . Tako je dobiveno n intervala u svakoj polovici dana. Sredini i -tog intervala odgovara satni kut Sunca ω_i , za koji se računa prema (1) globalno zračenje $g_i(\omega_i, a_R) \cdot \Delta t$.

Zbog simetrije prije- i poslijepodnevnih vrijednosti dnevno globalno zračenje dobiveno je kao:

$$G(a_R) = 2 \sum_{i=1}^n g_i(\omega_i, a_R) \cdot \Delta t \quad (6)$$

Za Δt odabran je razmak 30 minuta, jer se prije pokazalo (I. Penzar, 1970, 1973) da se dnevni tokovi zračenja na gornjoj granici atmosfere dobivani numeričkom integracijom s takvim koracima u vremenu razlikuju od pravih dnevnih tokova samo za $\pm 0,4\%$.

3. Globalno zračenje pri povoljnim uvjetima u pojasu između 41° i 47° N

3.1. Usporedba s mjerenim vrijednostima

Zbog kontrole usporedili smo dobivene prizemne dnevne vrijednosti globalnog zračenja uz Rayleighovu atmosferu s mjerenim vrijednostima u Jugoslaviji i Austriji.

Iz Jugoslavije su za usporedbu uzete najveće izmjerene dnevne vrijednosti za svaki mjesec u razdoblju od 9 godina na 6 postaja raspoređenih na raznim geografskim širinama i po mogućnosti različitih nadmorskih visina (tab. 2).

Tablica 2. Mjesta odabrana za usporedbu računskih podataka o globalnom zračenju.

Table 2. Chosen control points for comparison of computed values global radiation

Mjesto	Geografska širina		Nadmorska visina	Promatrano razdoblje
Bar	42°	6' N	6 m	1964-1969
Beograd	44	47	243	1960-1969
Bitola	41	3	586	1960-1969
Ljubljana	46	4	299	1960-1969
Sjenica	43	16	1015	1964-1969
Zagreb	45	49	157	1960-1969

U tablici 3 prikazana su odstupanja računskih vrijednosti od najveće izmjerene vrijednosti za svaki mjesec. Vidi se da su izmjerene vrijednosti bile manje od izračunatih za isti datum i na odgovarajućoj geografskoj širini i nadmorskoj visini, osim u tri slučaja (Beograd 22. XII 1961., Bitola 28. I 1969. i 27.XII 1966.). U Beogradu tog dana je bilo potpuno vedro, a tlo pokriveno snijegom. U Bitoli je oba navedena dana bilo nešto

Tablica 3. Odstupanja računskih podataka dnevnog globalnog zračenja od maksimalnih izmjerenih vrijednosti ($J\ cm^{-2}$).

Table 3. Deviation of daily global radiation computed values from maximum registered data ($J\ cm^{-2}$).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Bar											
113	67	326	544	636	661	690	649	561	272	230	0
Beograd											
67	134	356	456	523	598	632	569	285	310	197	-25
Bitola											
-33	176	372	385	583	661	527	573	444	314	213	-38
Ljubljana											
360	255	155	565	795	787	870	393	841	494	121	197
Sjenica											
167	151	385	477	686	578	557	640	632	381	163	100
Zagreb											
197	243	419	628	628	628	664	695	573	590	460	264

oblaka, a 27. XII 1966. ležao je također snijeg na tlu. Iz toga se može zaključiti da je u sva tri slučaja bilo pojačano difuzno zračenje zbog refleksije na snijegu odnosno na oblacima.

Iz klimatografije Austrije (Steinhauser et al. 1958.) odabrane su za usporedbu prosječne dnevne vrijednosti globalnog zračenja za vedro nebo na geografskoj širini 47° u raznim visinama. One su izvedene iz mjerenja izravnog i raspršenog zračenja. Tablica 4 pokazuje da su odstupanja naših računskih vrijednosti od odgovarajućih mjerenih za Austriju uvijek pozitivna.

Tablica 4. Odstupanje računskih podataka srednjeg dnevnog globalnog zračenja ($J\text{ cm}^{-2}$) za geografsku širinu 47° od izmjerenih vrijednosti na vedre danu u Austriji za odabrane visine.

Table 4. Deviations of computed mean daily global radiation ($J\text{ cm}^{-2}$) for the 47° latitude from measured values on clear days in Austria.

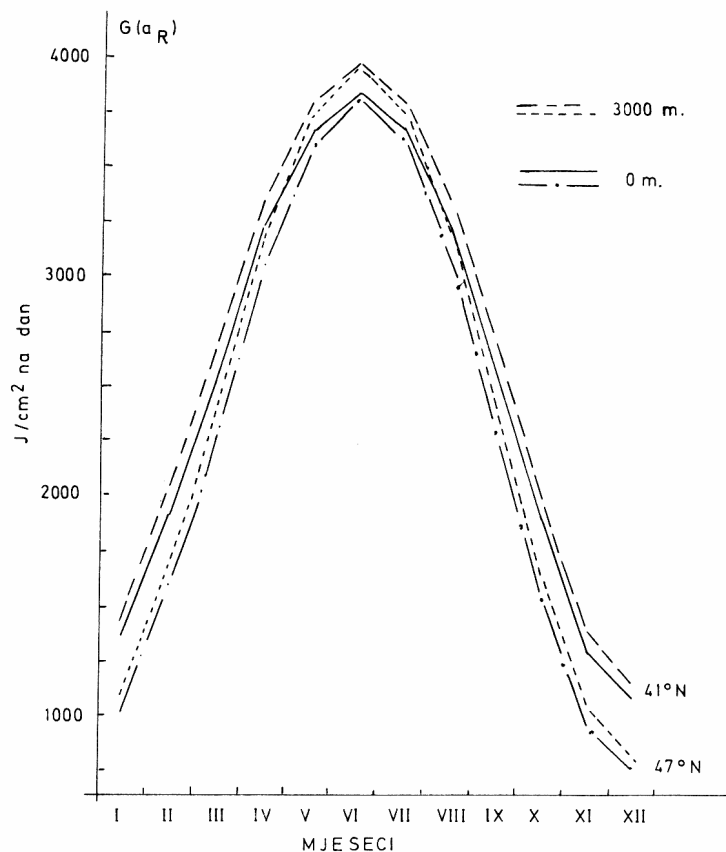
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
500 m											
301	360	477	649	757	778	787	678	506	410	276	230
1000 m											
243	272	377	511	640	678	691	578	414	318	213	180
1500 m											
197	226	293	393	527	569	582	477	352	243	176	151
2000 m											
184	184	251	314	431	511	490	402	293	197	146	130
3000 m											
188	172	213	318	385	414	368	306	205	176	130	126

Usporedba pokazuje da se vrijednosti za model Rayleigheve atmosfere u pravilu mogu smatrati najvećima što ih prizemno zračenje može postići, a ono ih premašuje samo u izuzetnim slučajevima povećane refleksije na tlu ili oblacima. Stvarno prizemno zračenje uz vedro vrijeme sve je bliže onom za Rayleighev model kako se povećava nadmorska visina, jer je u visinama stvarna atmosfera sve sličnija suhoj i čistoj, kakvu pretpostavlja model.

3. 2. Godišnji hod dnevnog globalnog zračenja

Godišnji hod dnevno dozračene energije može se okarakterizirati godišnjim srednjakom, rasponom ili amplitudom i položajem ekstrema. Godišnji hod srednjaka dan je u tabeli u prilogu.

U promatranom području ostaje ekstraterestrički utjecaj dominantan i unutar atmosfere s obzirom na položaj ekstrema i na promjene raspona i srednjaka s geograf-

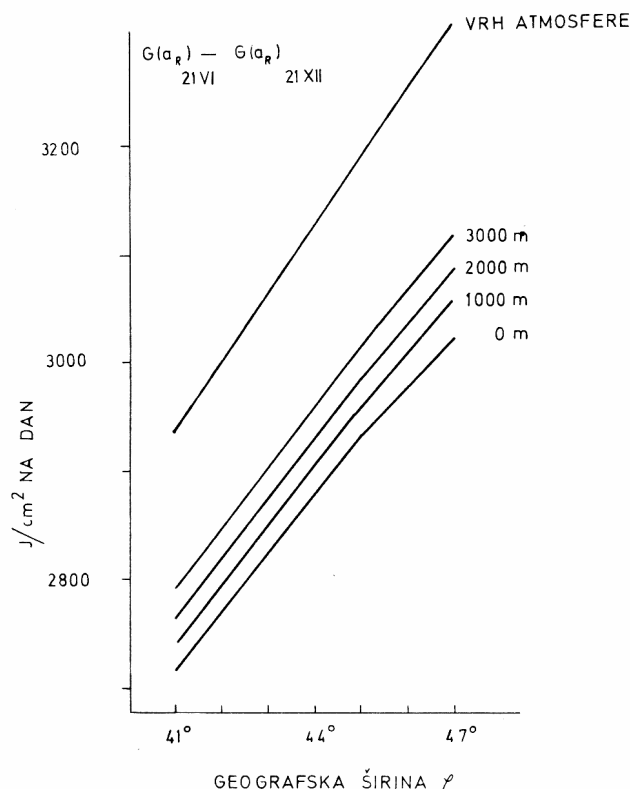


Slika 1. Godišnji hod dnevnog globalnog zračenja ($J\ cm^{-2}$) u Rayleighovoj atmosferi na 21. dan u mjesecu u pojasu od 41° do 47° zemljopisne širine na visini 0 i 3000 metara

Figure 1. Annual course of global radiation ($J\ cm^{-2}$) in Rayleigh atmosphere on 21st day in a month in the $41^\circ - 47^\circ N$ latitude zone at the altitudes of 0 metres and 3000 metres.

skom širinom. Na bilo kojoj geografskoj širini i nadmorskoj visini krivulja godišnjeg hoda ima oblik jednostavnog vala s ekstremima na dane solsticija: 21. XII i 21. VI (sl. 1). Godišnji raspon je u svim visinama najmanji na jugu promatranog pojasa (sl. 2). Godišnji srednjak se smanjuje od 41° do 47° geografske širine na razini mora za $218\ J/cm^2$ na 6° . Taj meridijanski gradijent nešto se povećava s visinom i na 3000 m iznosi $226\ J/cm^2$ na 6° kao i na gornjoj granici atmosfere.

Utjecaj atmosfere očituje se u iznosu srednjaka i raspona i u njihovim vertikalnim gradijentima. U promatranom području povećanje visine za 1000 m povećava dnevno zračenje približno toliko kao pomak prema jugu za jedan stupanj geografske širine (sl. 3). Na povećanje raspona jednako utječe povećanje nadmorske visine za 1000 m i pomak prema sjeveru za pola stupnja geografske širine (sl. 4). To su prosječne vrijednosti u vi-



Slika 2. Godišnji raspon dnevnog globalnog zračenja ($G(a_R)$) 21. VI – $G(a_R)$ 21. XII) na raznim visinama za Rayleighovu atmosferu

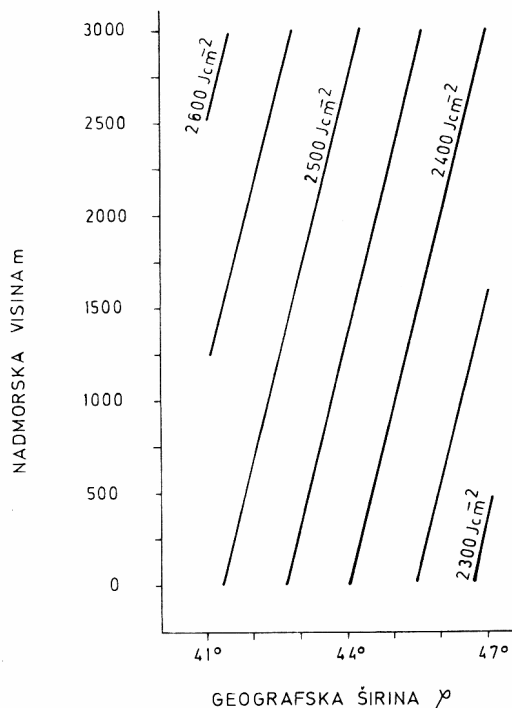
Figure 2. Annual range of daily global radiation ($G(a_R)$) June 21 – $G(a_R)$ December 21) at different altitudes, for Rayleigh atmosphere.

sinama od 3000 m, a stvarno se vertikalni gradijenti mijenjaju malo s geografskom širinom kako pokazuje tablica 5.

Tablica 6 prikazuje godišnji hod dnevnog globalnog zračenja za odabranu geografsku širinu i nekoliko nadmorskih visina pomoću podataka za 21. dan u mjesecu, kako bi se obuhvatila oba ekstrema.

3. 3. Horizontalna raspodjela dnevnog globalnog zračenja

Poznato je da se na gornjoj granici atmosfere u umjerenim geografskim širinama tokovi energije dozračene od Sunca povećavaju u smjeru od ekvatora prema polu u većem dijelu godine. Samo u izvjesnom razdoblju oko ljetnog solsticija u to područje ulazi iz manjih širina jedan maksimum dnevnog zračenja koji se pomiče prema sjeveru i na sam dan solsticija se nalazi na $43^\circ 33' 34''$ N da bi se nakon toga opet povlačio prema ekvatoru. Od 25. svibnja do 19. srpnja taj pomični maksimum je manji od onoga na sjevernom polu.



Slika 3. Promjene globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi za prosječan dan u godini s geografskom širinom i nadmorskom visinom

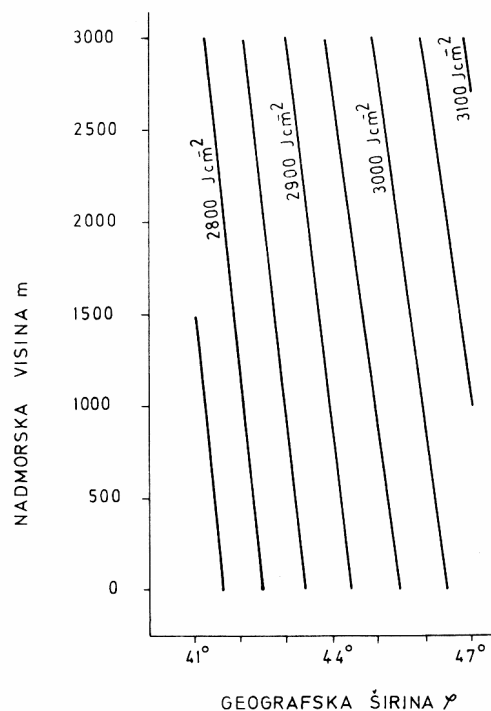
Figure 3. Global radiation changes with latitude and altitude in Rayleigh atmosphere for an average day.

U pojas koji mi ovdje promatramo putujući maksimum dnevnog zračenja na gornjoj granici atmosfere ulazi 6. lipnja, a iz njega izlazi 8. srpnja, kako pokazuje gornja krivulja na sl. 5.

Iz iste slike vidimo da atmosfera ima veliki utjecaj na položaj toga pomičnog maksimuma zračenja. U Rayleighovoj atmosferi već na visini 3000 m maksimum se sjevernije od 41° N ne zadržava 33 dana, kao na gornjoj granici atmosfere, nego samo 20 dana, a u solsticiju ne dopire sjevernije od 41° 45'. Na visini 0 m on u samom solsticiju upravo dopire do paralele 41° N. Prema tome u pravilu se dnevno zračenje povećava u horizontalnoj ravnini u smjeru meridijana, a samo u izvjesnom razdoblju oko ljetnog solsticija može meridionalna promjena imati suprotan predznak. Iznosi horizontalnih gradijenata dnevnog globalnog zračenja mijenjaju se tokom godine. Ilustraciju toga daje tablica 7.

4. Propusnost Rayleighove atmosfere za zračenje

Propusnost za zračenje Rayleighove atmosfere iznad neke nadmorske visine možemo izraziti relativnim zračenjem tj. omjerom između dnevnog globalnog zračenja na toj visini i dnevnog Sunčevog zračenja na gornjoj granici atmosfere. Relativno zračenje



Slika 4. Promjene godišnjeg raspona globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi (dnevna vrijednost 21. VI – dnevna vrijednost 21. XII) s geografskom širinom i nadmorskom visinom

Figure 4. Changes of annual range of global radiation in Rayleigh atmosphere with latitude and altitude (June 21 value minus December 21 value).

Tablica 5. Povećanje godišnjeg srednjaka i raspona pri porastu visine od 0 do 3000 m na tri geografske širine.

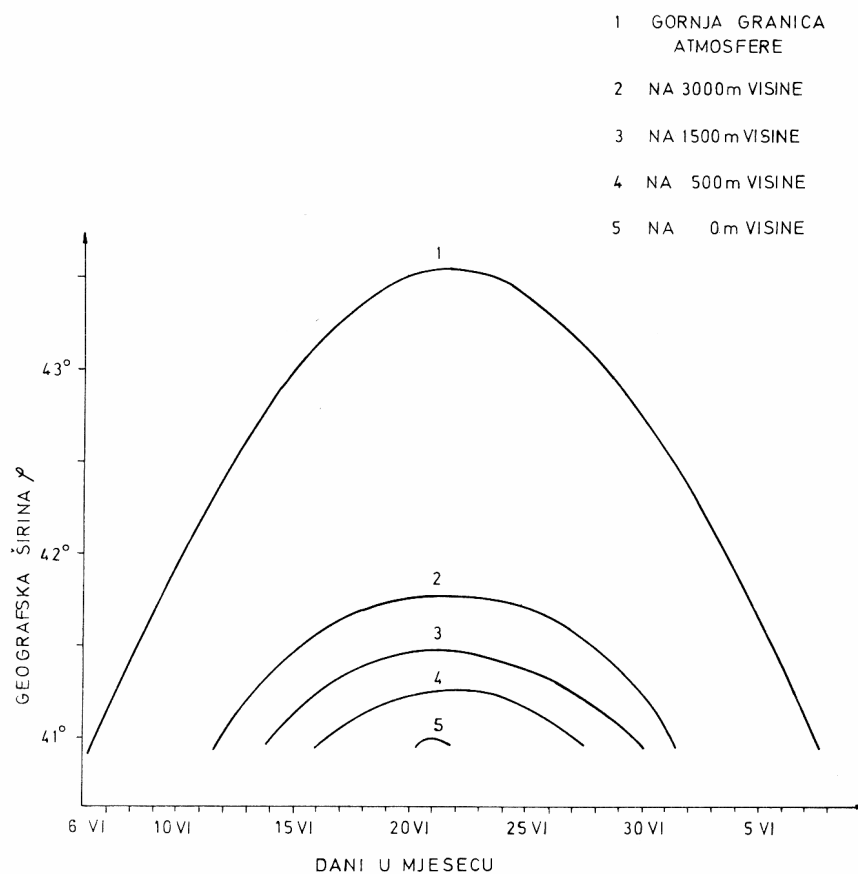
Table 5. Increase of yearly mean value and range with increasing altitude from 0 to 3000 metres, on three latitudes.

$^{\circ}\text{N}$	41	44	47
srednjak	109	109	100 J/cm^2 po danu na 3 km
raspon	75	80	88 J/cm^2 po danu na 3 km

Tablica 6. Globalno zračenje na geografskoj širini $44^{\circ}N$ za razne visine na 21. dan u mjesecu ($J\text{ cm}^{-2}$ na dan).

Table 6. Global radiation on $44^{\circ}N$ latitude for different altitudes on 21st day in a month ($J\text{ cm}^{-2}$ per day).

Visina (m)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	1163	1733	2402	3126	3599	3800	3612	3126	2423	1720	1130	921
1000	1189	1762	2436	3168	3641	3846	3658	3168	2457	1749	1155	942
2000	1214	1795	2469	3210	3683	3892	3700	3210	2490	1779	1184	964
3000	1239	1825	2507	3252	3729	3942	3741	3252	2532	1812	1209	983



Slika 5. Položaj putujućeg maksimuma dnevnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u doba ljetnog solsticija

Figure 5. Position of travelling maximum of daily global radiation in Rayleigh atmosphere at summer solstice.

Tablica 7. Horizontalni gradijenti dnevnog globalnog zračenja između 41 i 47°N (povećanje s porastom geografske širine) na visini 0 m i 3000 m ($J\ cm^{-2}$ na 1° geografske širine).

Table 7. Horizontal gradients of daily global radiation between 41 and 47°N (increase with increased latitude) at the altitudes of 0 metre and 3000 metres ($J\ cm^{-2}$ per 1° of latitude).

Visina	21.I	21.II	21.III	21.IV	21.V	21.VI	21.VII	21.VIII	21.IX	21.X	21.XI	21.XII
0 m	55	54	44	28	10	3	8	25	43	53	55	61
3000 m	56	56	46	29	8	(*)	7	24	43	56	56	56
			(*)	između 42 i 47° N	:	3						
				između 41 i 41,5° N	:	0						
				between 42 and 47° N	:	3						
				between 41 and 41,5° N	:	0						

Tablica 8. Godišnji hod relativnog zračenja na pojedinim geografskim širinama za nadmorske visine 0, 1500 i 3000 metara.

Table 8. Annual course of relative radiation on different latitudes for altitudes of 0, 1500 and 3000 metres.

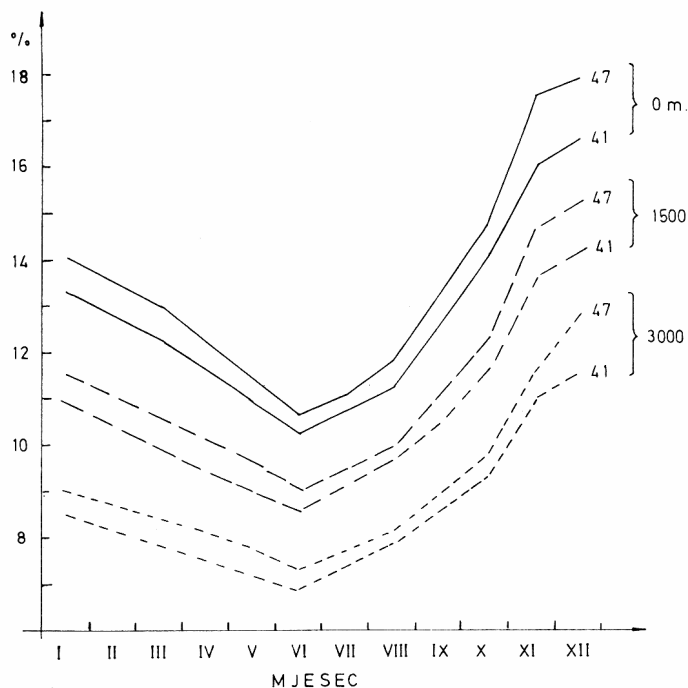
γ°	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	GOD.
	0 metara												
41	86,4	87,2	87,7	88,8	89,1	89,6	89,5	89,0	87,8	87,0	84,8	83,6	88,1
42	86,3	87,0	87,5	88,6	89,0	89,6	89,4	88,9	87,8	86,8	84,6	83,3	88,0
43	86,1	86,9	87,3	88,6	88,9	89,5	89,3	88,8	87,6	86,7	84,3	83,1	87,9
44	86,0	86,7	87,2	88,5	88,9	89,5	89,2	88,7	87,5	86,5	84,1	82,6	87,9
45	85,7	86,5	87,0	88,3	88,8	89,4	89,2	88,6	87,3	86,3	83,8	82,2	87,7
46	85,6	86,3	86,8	88,2	88,7	89,2	89,1	88,5	87,1	86,1	83,6	82,1	87,6
47	85,5	86,2	86,7	88,1	88,6	89,2	89,0	88,4	87,0	85,9	83,3	82,0	87,5
	1500 metara												
41	88,9	89,4	89,6	90,5	90,6	91,3	91,1	90,6	89,7	89,2	87,4	86,3	90,0
42	88,8	89,3	89,4	90,4	90,6	91,3	91,0	90,6	89,5	89,0	87,0	86,2	89,9
43	88,8	89,0	89,3	90,3	90,6	91,3	90,9	90,5	89,4	88,9	86,8	85,9	89,9
44	88,9	89,0	89,2	90,3	90,5	91,2	90,9	90,4	89,3	88,7	86,7	85,4	89,8
45	88,5	88,9	89,0	90,2	90,4	91,1	90,9	90,4	89,2	88,6	86,5	85,0	89,7
46	88,3	88,7	88,9	90,1	90,3	90,9	90,7	90,2	89,1	88,2	86,3	84,9	89,6
47	88,1	88,6	88,8	89,9	90,3	90,9	90,7	90,2	88,9	88,1	85,9	84,6	89,5
	3000 metara												
41	91,5	91,6	91,6	92,4	92,3	93,0	92,7	92,3	91,6	91,4	89,6	89,0	91,9
42	91,5	91,6	91,4	92,3	92,2	93,0	92,6	92,3	91,4	91,3	89,5	89,0	91,9
43	91,5	91,4	91,3	92,2	92,2	93,0	92,6	92,2	91,3	91,2	89,4	89,0	91,8
44	91,5	91,3	91,2	92,1	92,2	92,9	92,6	92,2	91,3	90,9	89,3	88,7	91,8
45	91,5	91,2	91,0	92,0	92,1	92,8	92,5	92,1	91,2	90,8	89,2	88,1	91,6
46	91,2	91,0	90,9	91,9	92,0	92,7	92,4	92,0	91,1	90,5	89,1	87,6	91,5
47	91,0	91,0	90,8	91,8	92,0	92,6	92,4	91,9	90,9	90,5	88,9	87,4	91,5

u postocima računali smo za srednje dnevne vrijednosti po mjesecima, a one se podudaraju s pravim dnevnim vrijednostima za 15. ili 16. dan u svim mjesecima osim onih u koje padaju solsticiji; tamo se podudaraju s vrijednostima za 10. ili 11. dan u mjesecu.

Budući da se prolazom kroz atmosferu dio zračenja gubi, relativno je zračenje veće na većim visinama te u doba i na mjestima veće podnevne visine Sunca, što znači ljeti i u manjoj geografskoj širini. U području koje mi promatramo promjene propusnosti atmosfere s geografskom širinom su najmanje. Promjene od zime na ljeto na jednoj visini i od 0 do 3000 m u jednom mjesecu su veće i podjednake. Rayleigheva atmosfera propušta najmanje, i to 82% zračenja u prosincu do visine 0 m, na geografskoj širini 47° , a najviše, i to 93% zračenja u lipnju, do visine 3000 m, na geografskim širinama 41° do 43° .

Tablica 8 prikazuje relativno zračenje odnosno propusnost Rayleigheve atmosfere za tri visine kao ilustracija opisanih konstatacija.

Slabljenje zračenja prolazom kroz čitavu ili dio Rayleigheve atmosfere može se izraziti kao razlika dnevnih vrijednosti na gornjoj granici atmosfere G_0 i na nekoj visini u atmosferi $G(a_R)$ i to u postocima ekstraterestričke vrijednosti. Za 21. dan u mjesecu na odabranim visinama i geografskim širinama tako izraženo slabljenje zračenja ilustrira sl. 6.



Slika 6. Godišnji hod procentualnog slabljenja zračenja za 21. dan u mjesecu na dvije geogr. širine i tri visine

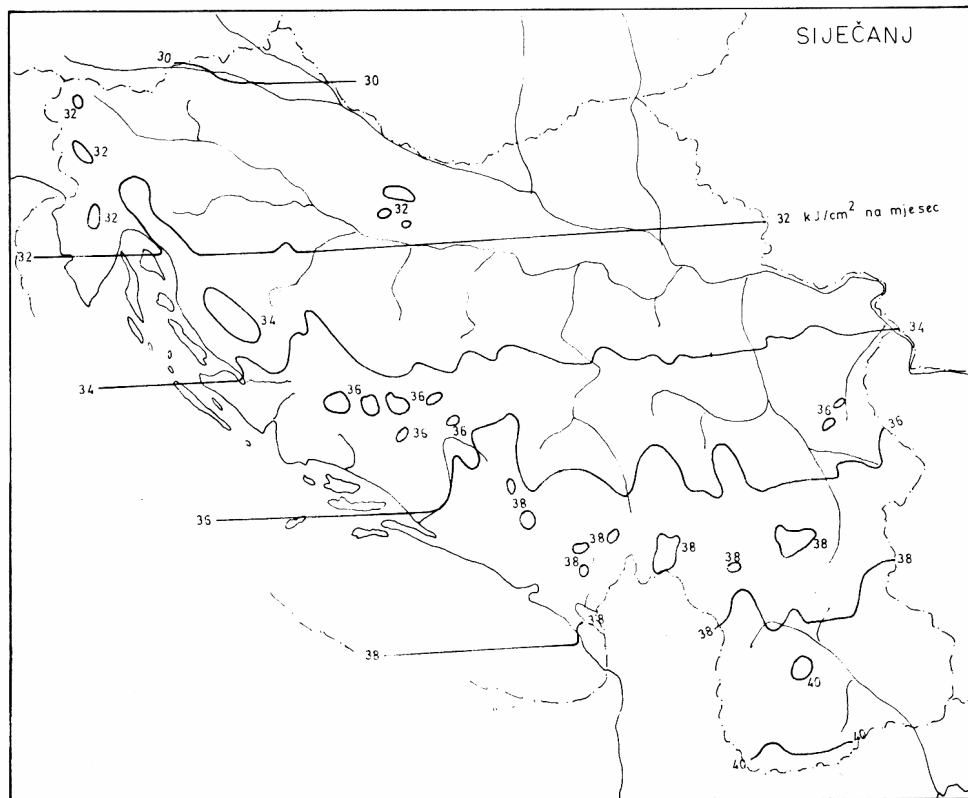
Figure 6. Annual course of radiation depletion (%) for 21st day in a month on two latitudes and three altitudes.

5. Raspodjela globalnog zračenja u Jugoslaviji

Slike 7 do 18 prikazuju raspodjelu energije dozračene do tla u Jugoslaviji kroz Rayleighovu atmosferu za svaki mjesec u godini. Djelomičan prikaz takve raspodjele dao je prije I. Penzar (1979).

Budući da se zračenje s visinom i prema jugu povećava, izolinije globalnog zračenja su nad planinama izbočene prema sjeveru tim jače što su planine više. Zimi, kad je meridionalni gradijent zračenja na gornjoj granici atmosfere velik, i pri tlu je utjecaj geografske širine toliki da izolinije nad planinskim područjem nisu jako izobličene (sl. 7, 17, 18). Ljeti su meridionalne promjene zračenja na gornjoj granici atmosfere i u atmosferi manje, pa je pri tlu tada jako uočljiv utjecaj planina (sl. 12, 13).

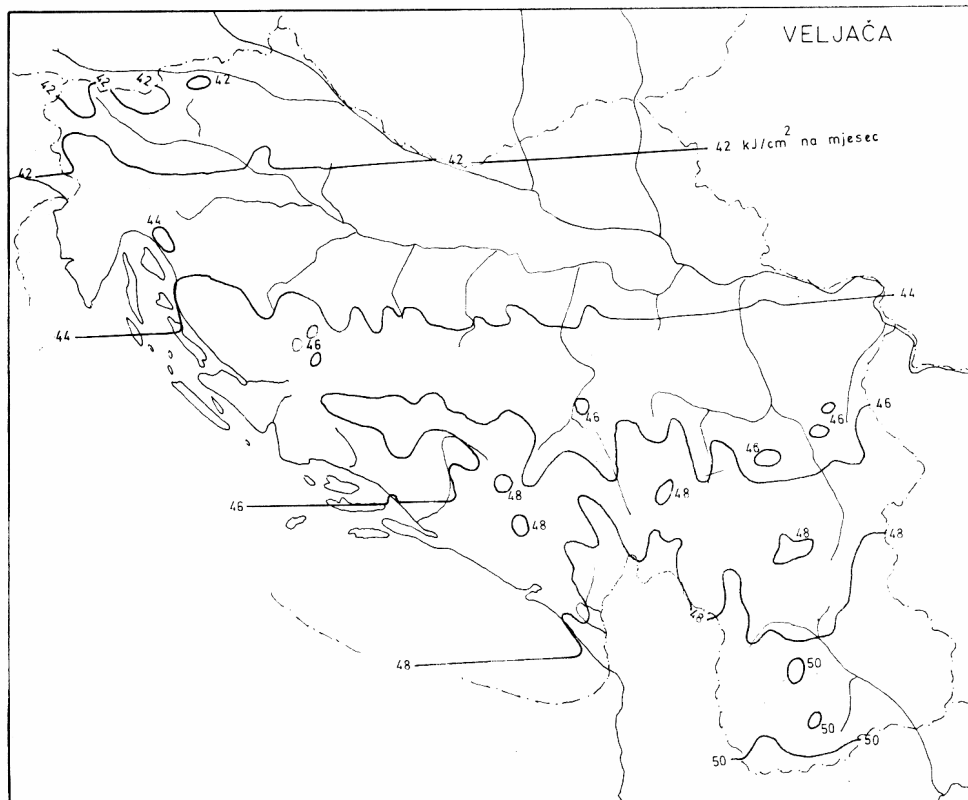
Raspodjela godišnjeg globalnog zračenja (sl. 19) pokazuje nad morem i u ravnici izrazit utjecaj geografske širine, a nad planinama utjecaj nadmorske visine. U razdoblju od godine dana kroz Rayleighovu atmosferu bi najviše energije ($920\,700\text{ J cm}^{-2}$) primile visoke gore, a najmanje ($837\,000\text{ J cm}^{-2}$) najsjeverniji dijelovi nizine u Jugoslaviji.



Slika 7. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u siječnju na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

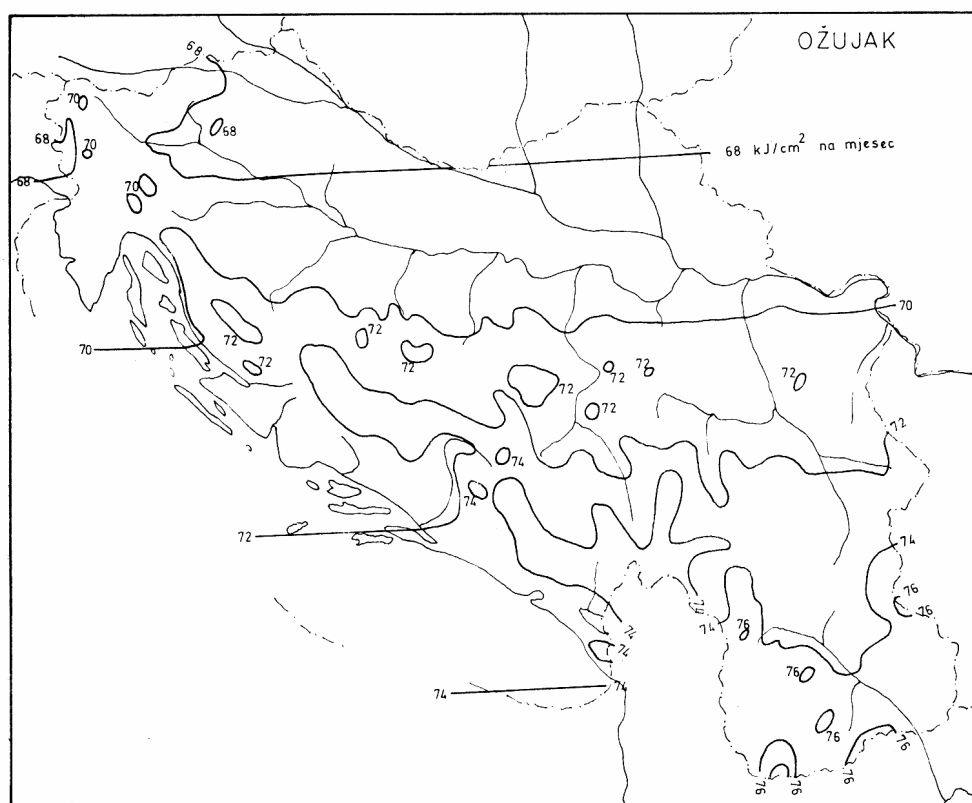
Figure 7. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for January in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).

Iz slika 20, 21 i 22 može se ocijeniti propusnost zračenja u Rayleighevoj atmosferi nad pojedinim dijelom Jugoslavije u najpovoljnijim mjestima (lipanj), najnepovoljnijim mjestima (prosinac) i u godišnjem prosjeku. U skladu s onim što je bilo rečeno u poglavlju 4, izolinije jednake propusnosti prate izohipse terena.



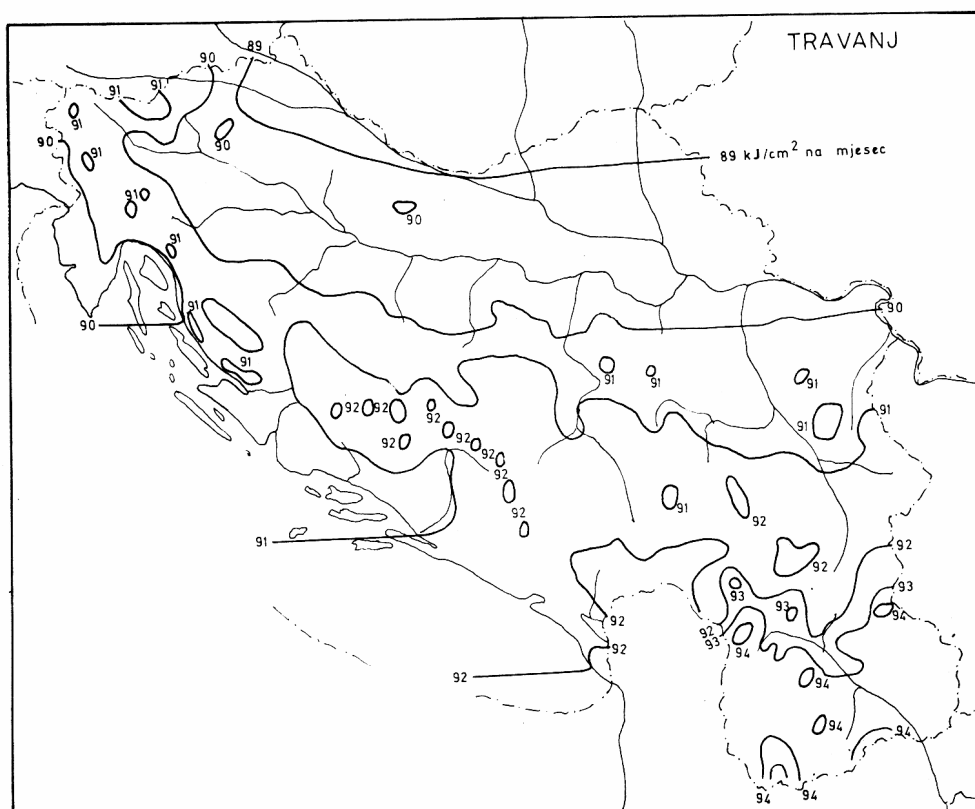
Slika 8. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighevoj atmosferi u veljači na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 8. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for February in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



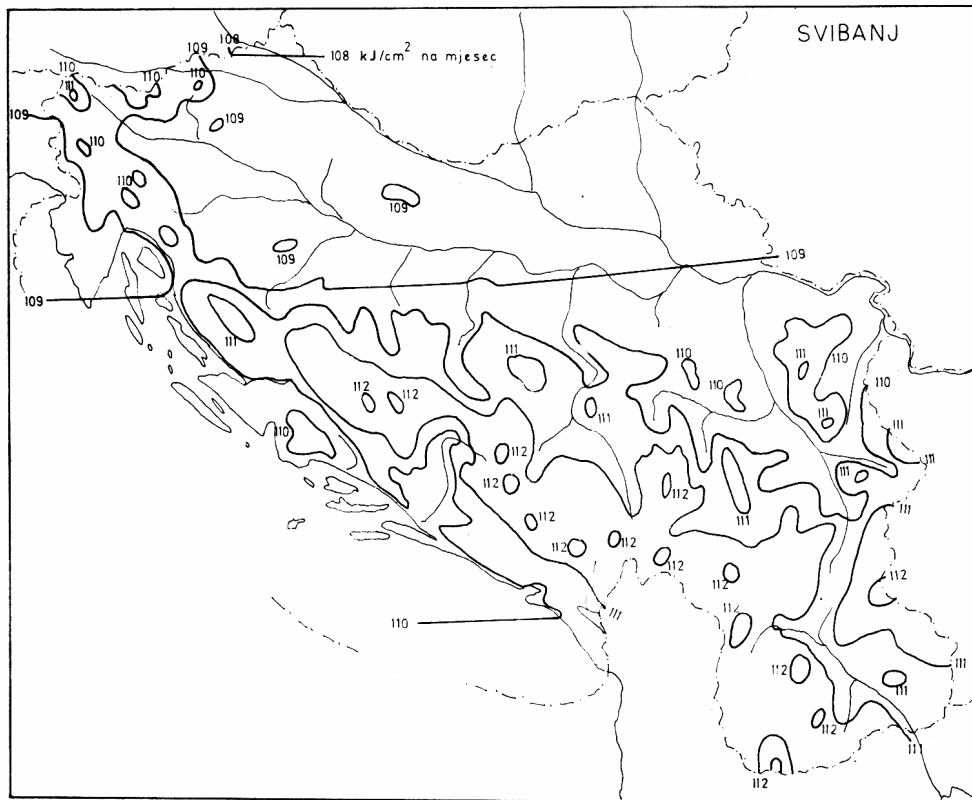
Slika 9. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u ožujku na području ŠFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 9. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for March in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



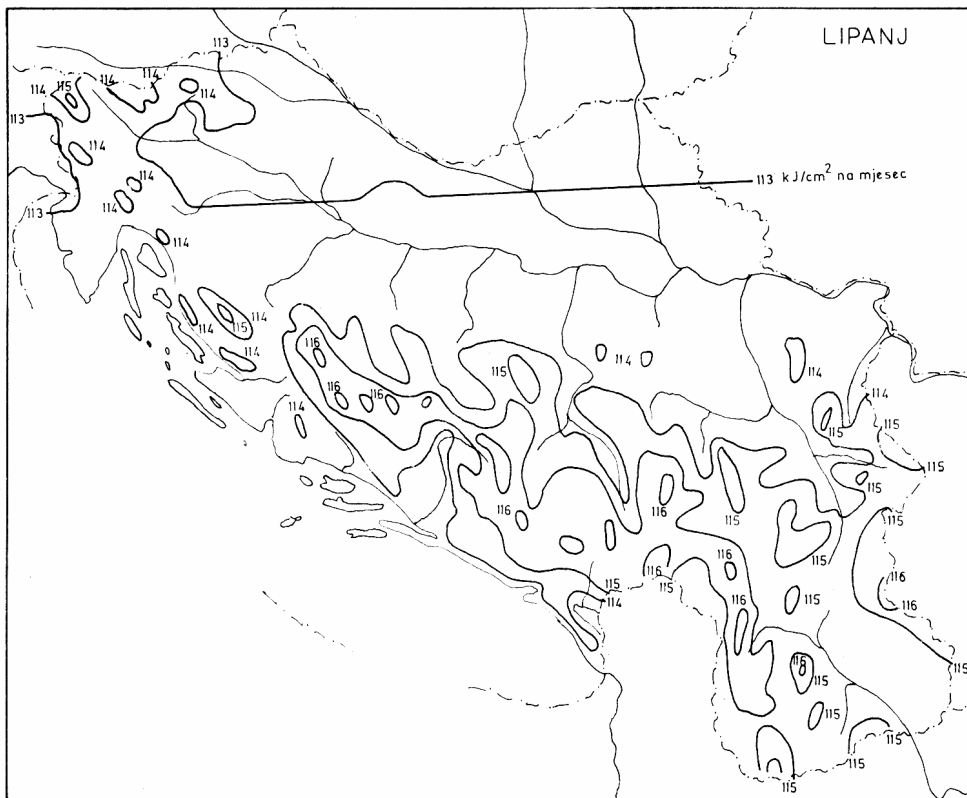
Slika 10. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u travnju na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 10. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for April in Yugoslavia (kJ/cm^2 month).



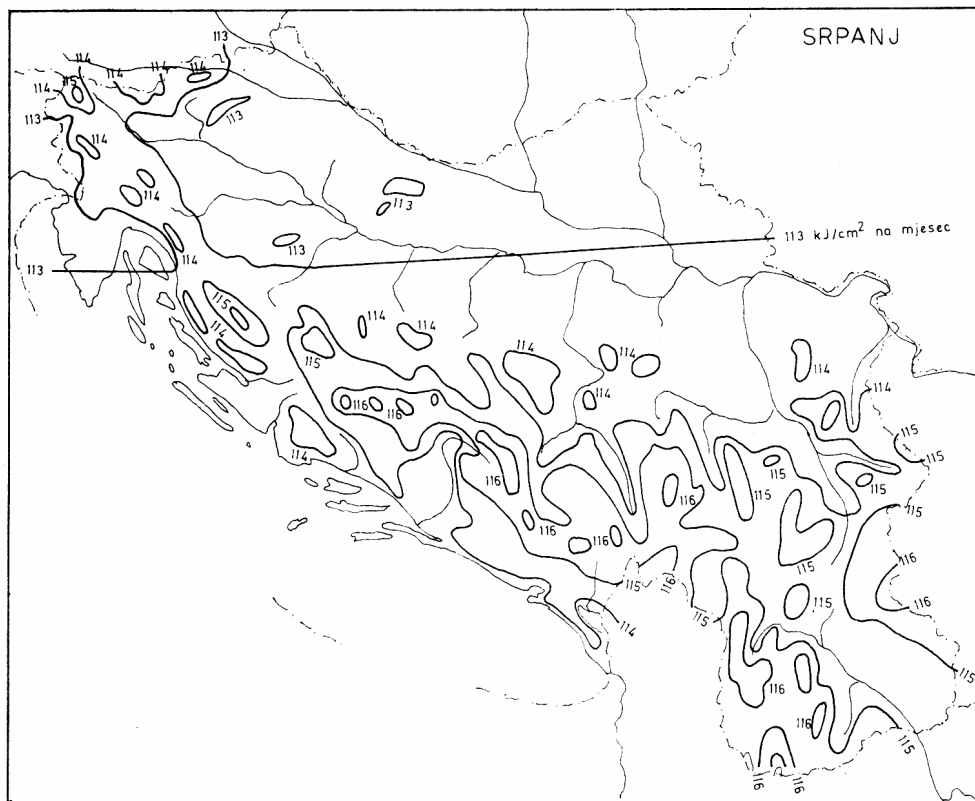
Slika 11. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u svibnju na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 11. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for May in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



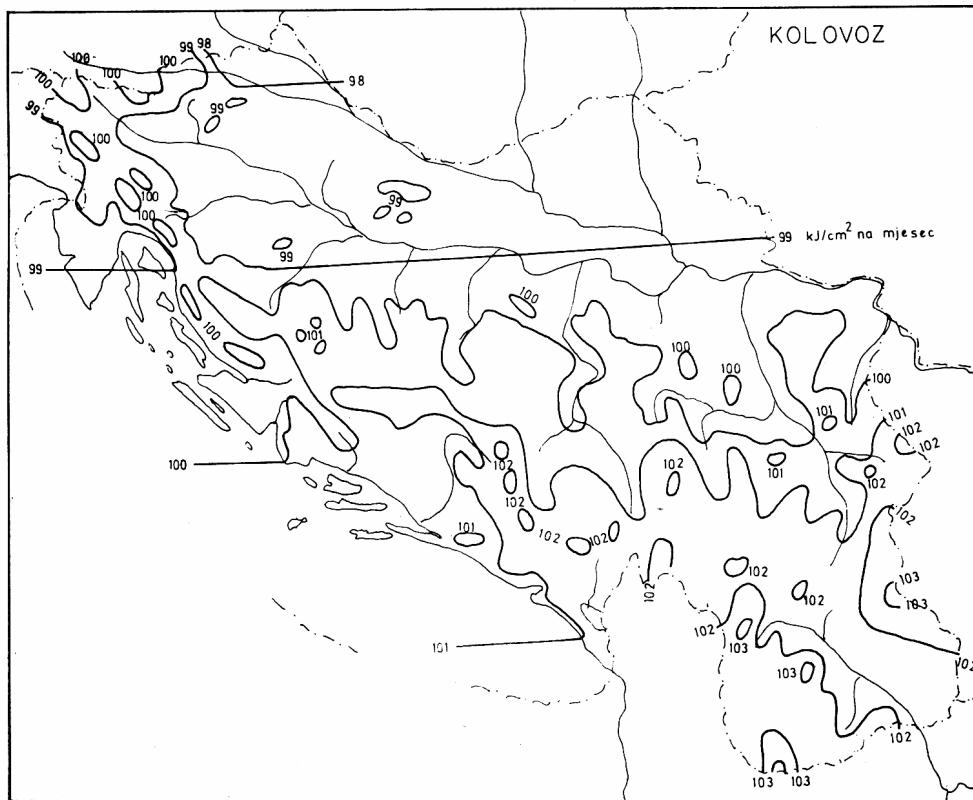
Slika 12. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u lipnju na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 12. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for June in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



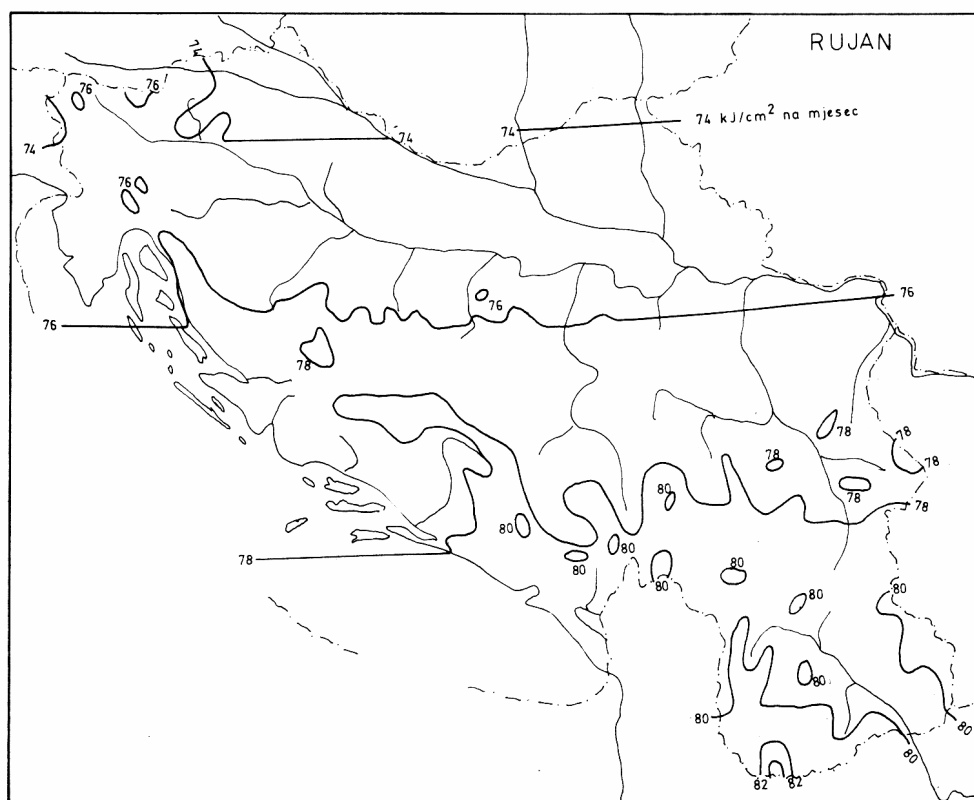
Slika 13. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u srpnju na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 13. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for July in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



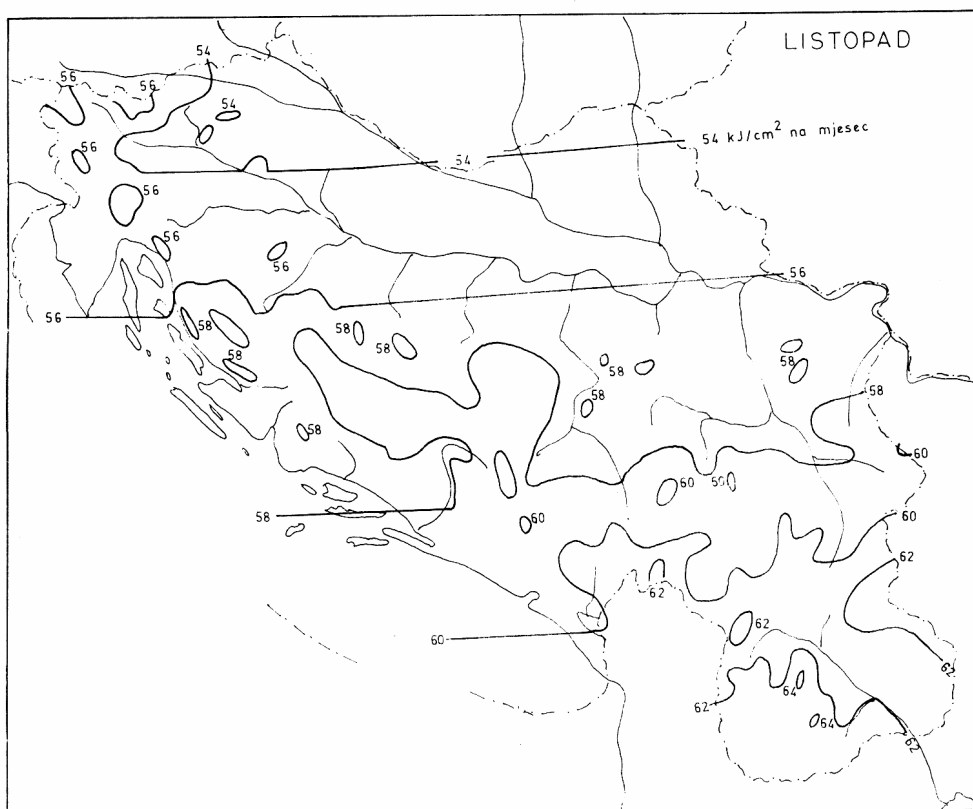
Slika 14. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u koložovu na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 14. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for August in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



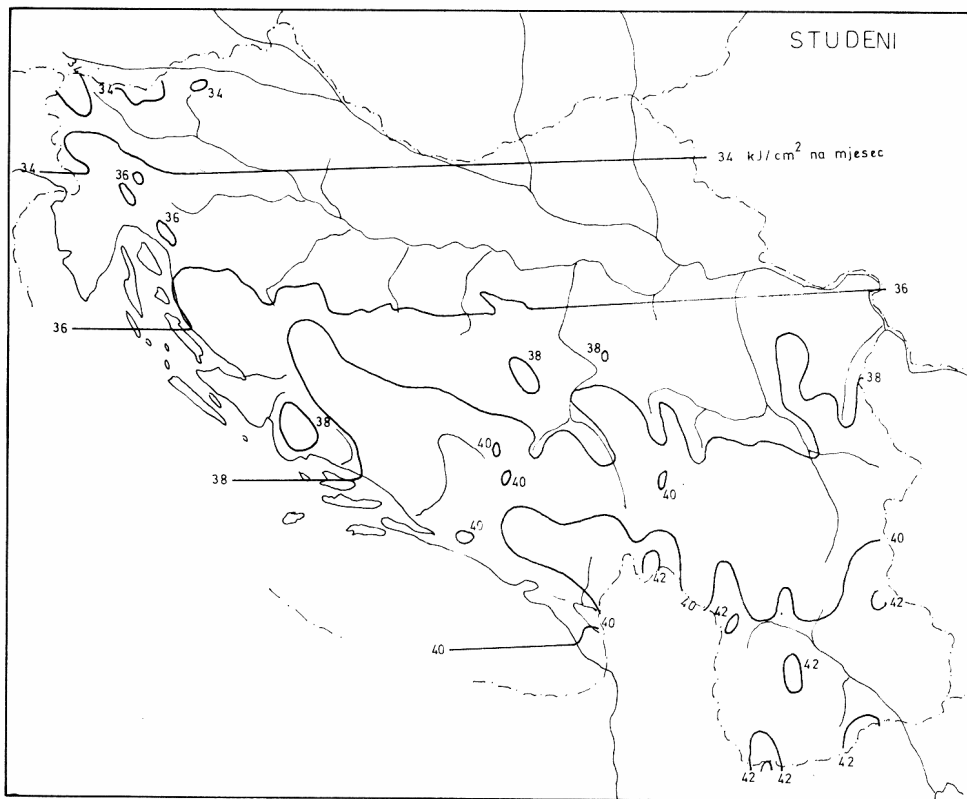
Slika 15. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u rujnu na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 15. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for September in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



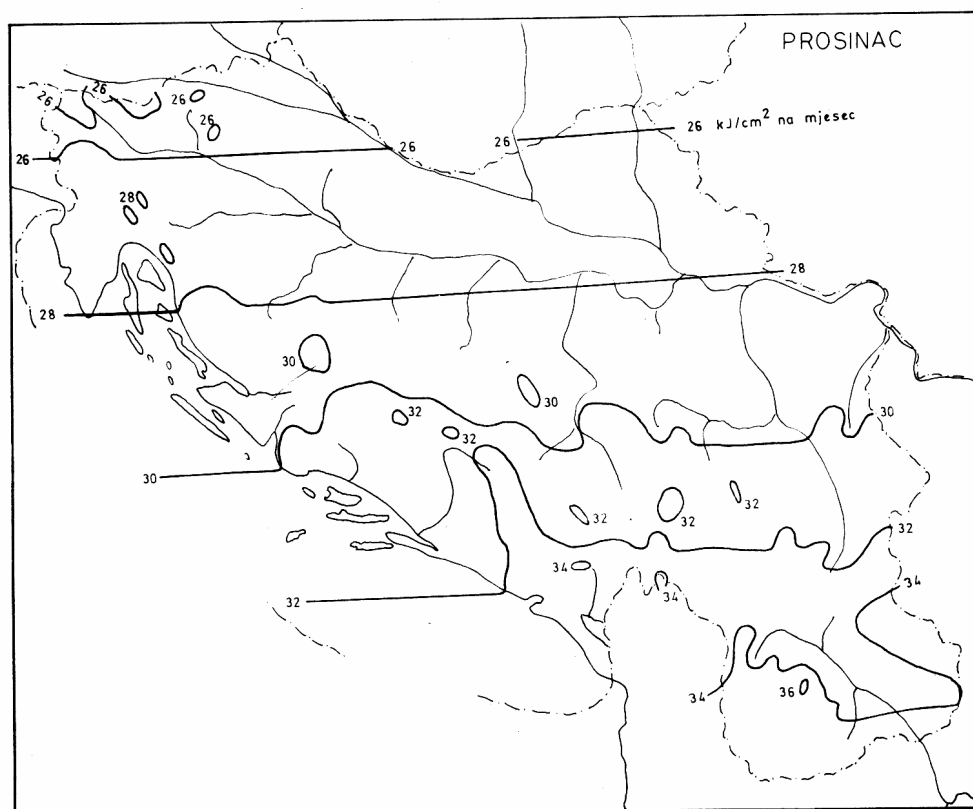
Slika 16. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u listopadu na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 16. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for October in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



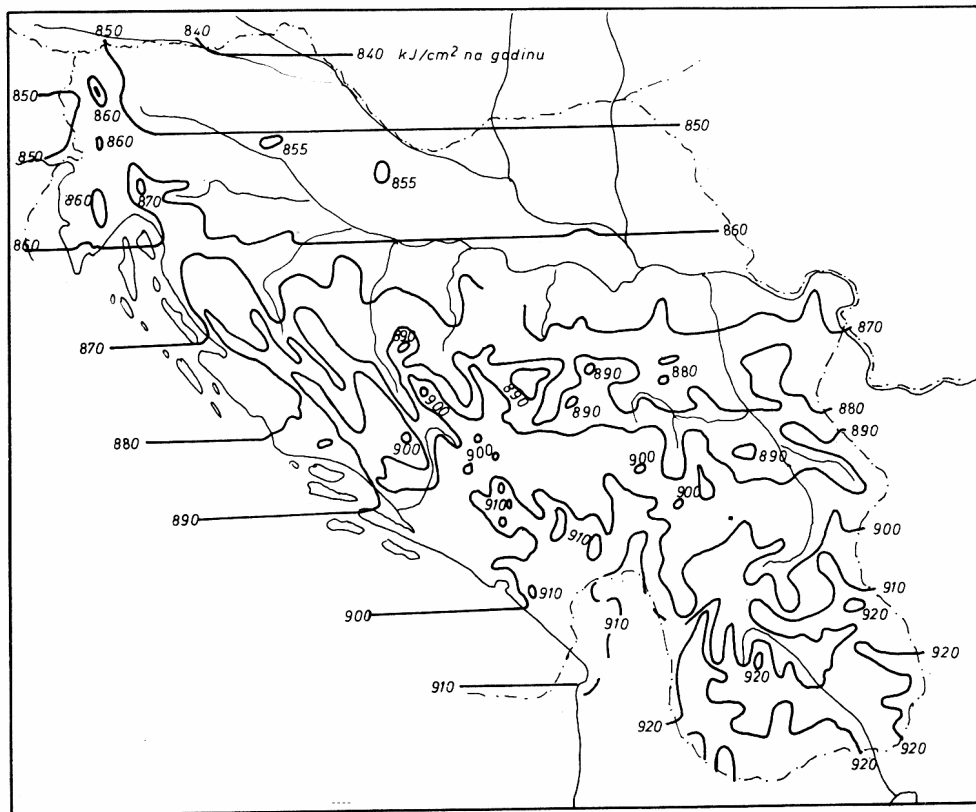
Slika 17. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u studenom na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 17. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for November in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



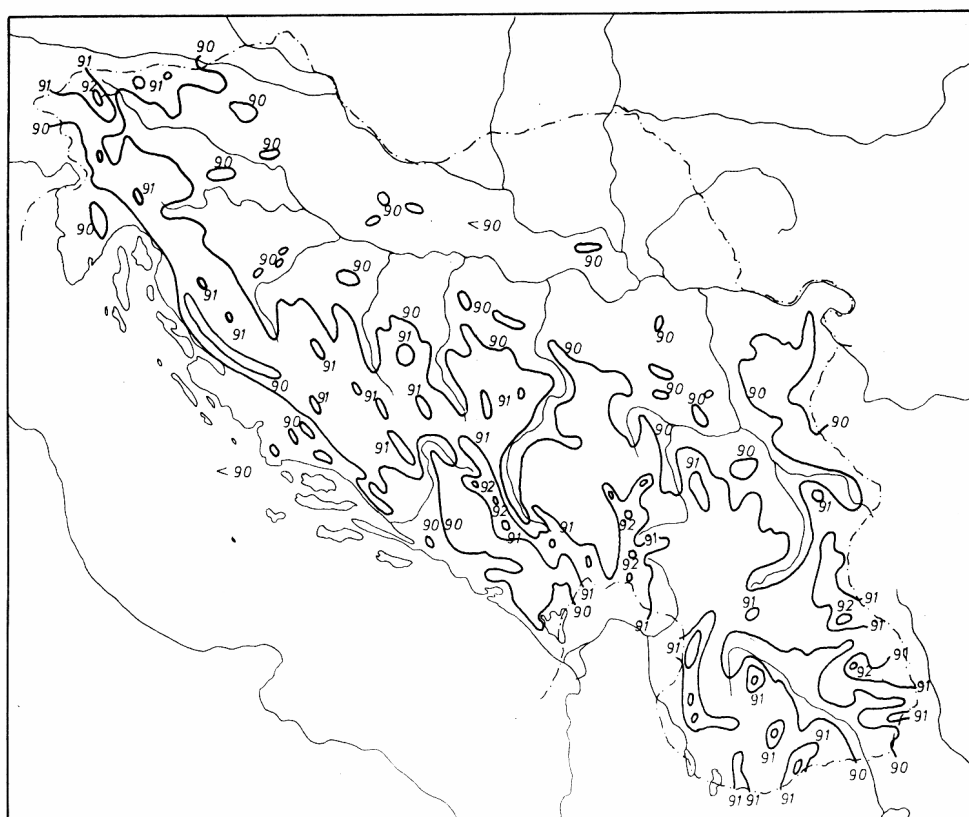
Slika 18. Raspodjela mjesečnog globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi u prosincu na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na mjesec)

Figure 18. Distribution of global radiation in Rayleigh atmosphere for December in Yugoslavia (kJ/cm^2 per month).



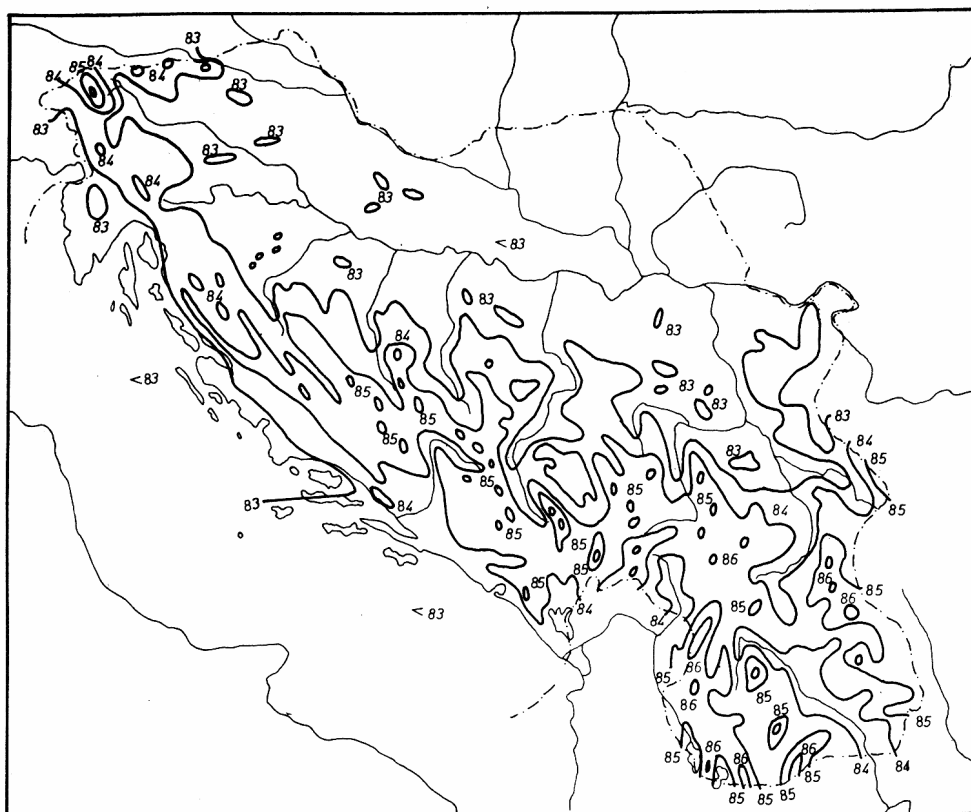
Slika 19. Raspodjela godišnjeg globalnog zračenja u Rayleighovoj atmosferi na području SFR Jugoslavije (kJ/cm^2 na godinu)

Figure 19. Distribution of annual global radiation in Rayleigh atmosphere in Yugoslavia (kJ/cm^2 per year).



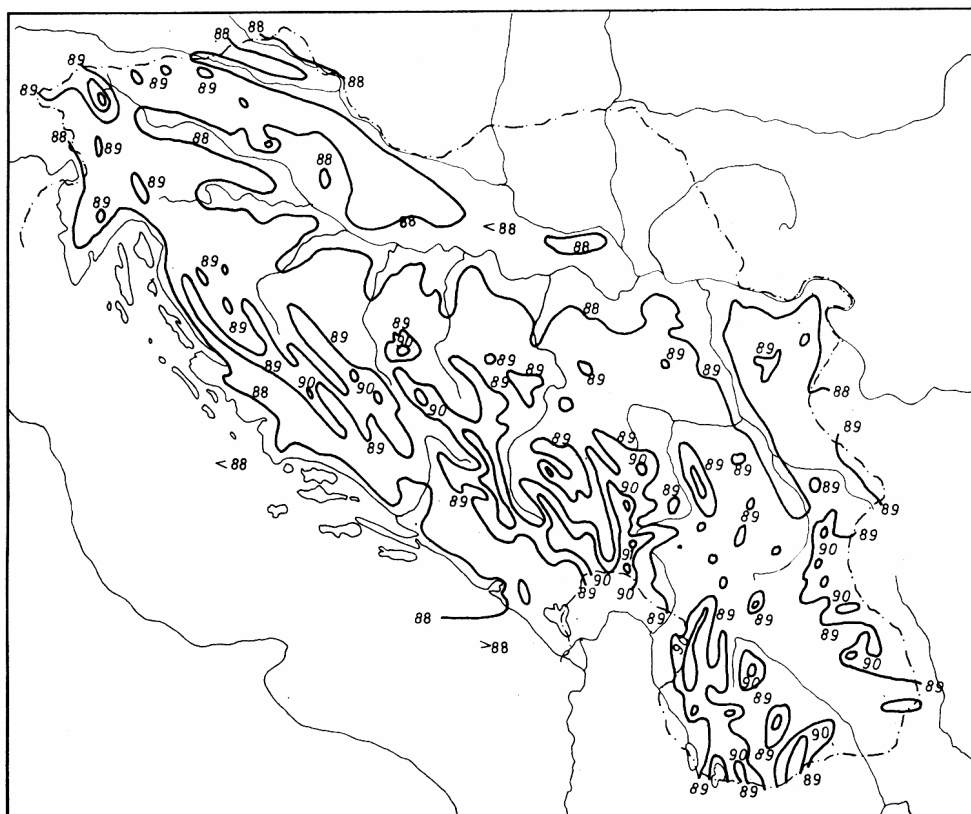
Slika 20. Raspdjela relativnog zračenja (%) u lipnju nad područjem SFR Jugoslavije

Figure 20. Distribution of relative radiation (%) in June in Yugoslavia.



Slika 21. Raspodjela relativnog zračenja (%) u prosincu nad područjem SFR Jugoslavije

Figure 21. Distribution of relative radiation (%) in December in Yugoslavia.



Slika 22. Raspodjela relativnog zračenja (%) za godinu nad područjem SFR Jugoslavije

Figure 22. Distribution of annual values of relative radiation (%) in Yugoslavia.

6. Zaključak

Rayleigheva atmosfera nad Jugoslavijom propustila bi do tla u najpovoljnijem slučaju 93%, a u najnepovoljnijem 82% energije koja je od Sunca došla na gornju granicu atmosfere.

Usprkos velike propusnosti taj model atmosfere ipak utječe na položaj pomičnog dnevnog maksimuma zračenja koji ljeti na gornjoj granici atmosfere leži najsjevernije na širini $43^{\circ}34'$ dne 21. lipnja. Pod Rayleighevom atmosferom na visini 0 m taj maksimum uopće ne prelazi paralelu 41° N, dok se na većim visinama zadržava sjeverno od nje kraće vrijeme nego na gornjoj granici atmosfere i ne dopire toliko na sjever. S obzirom na položaj Jugoslavije i njenu orografiju može se taj sporedni ljetni maksimum zračenja zanemariti, tim više što se u mjesečnim vrijednostima zračenja on slabo vidi na paraleli 42° samo na visinama od 500 do 3000 metara.

Dnevno zračenje za model Rayleigheve atmosfere u pravilu je veće od stvarnog dnevnog zračenja pri tlu, osobito u malim nadmorskim visinama. Rijetko kada može izmjerena vrijednost dostići ili premašiti onu za Rayleighevu atmosferu. Da bi se to dogodilo potrebna je, uz relativno čist i suh zrak, jaka refleksija na zgodno smještenim oblacima ili svježem snijegu.

Raspodjela stvarnog globalnog zračenja u Jugoslaviji nije poznata zbog premalog broja aktinometrijskih i piranometrijskih postaja. Postoji međutim prikaz reaspodjele izračunate iz podataka o naoblaci, koji vrijedi za visine do 1000 m (B. Penzar, I. Penzar, 1960), kao i one izračunate iz trajanja insolacije (M. Popović, i ostali, 1978). Bitna razlika između tih rezultata i onih iz poglavlja 5 je u tome što uz pretpostavku suhe i čiste atmosfere izolinije zračenja teku uglavnom zonalno, dok uz pretpostavku prosječne naoblake, odnosno sunčanosti, one u grubom slijede liniju obale odnosno liniju najviših gorskih masiva. Druga bitna razlika je u tome da je dozračena energija kroz Rayleighevu atmosferu to veća što su planine više, a u realnoj atmosferi zbog orografske naoblake je globalno zračenje manje u planinskom području Jugoslavije nego nad Jadranom i Panonijom.

7. Literatura

1. F. Baur (1953): *Linkes meteorologisches Taschenbuch, Neue Ausgabe II*, Akad. Verlagsg., Leipzig, 724
2. B. J. List (1951): *Smithsonian Meteorological Tables*, Smithsonian Institution, Washington, 527
3. B. Penzar, I. Penzar (1960): Raspodjela globalne radijacije nad Jugoslavijom i Jadranskim morem, *Hidrografski godišnjak za 1959*, 151–171
4. I. Penzar (1970): Prilog poznavanju atmosferske mutnoće i njenog djelovanja na Sunčevu radijaciju, *Disertacija na Prir. mat. fakultetu Sveučilišta u Zagrebu*, 1–221
5. I. Penzar (1973): Ekstraterestričke vrijednosti Sunčeve radijacije na geografskoj širini $45^{\circ}49'$ N, *Zbornik meteoroloških i hidroloških radova* 4, 3–17
6. I. Penzar (1974): Changes of Potential Values of Global Radiation on the Ground with Altitude and Latitude in the 41° N to 47° N Zone, *Zbornik meteor. i hidrol. radova* 5, 311–315
7. I. Penzar (1979): Maksimalna snaga Sunčevog zračenja na području Jugoslavije, *Sunčeva energija* 1, 6–9

8. I. Penzar (1982): Proračun Sunčevog zračenja na granici atmosfere u pojasu Jugoslavije, Zbornik radova Život i delo M. Milankovića, SANU, Knj. 12, 107–118
9. M. Popović i ostali (1978): Raspodjela globalnog zračenja nad Jugoslavijom, Klimatizacija-grejanje-hlađenje 7, 31–41
10. N. Robinson (1966): Solar Radiation, Elsevier Publ. Comp. Amsterdam-London-New York, 347
11. Savezni hidrometeorološki zavod (1960–1969): Godišnjak Meteorološkog ops. Beograd–Zeleno Brdo
12. R. Schulze (1963): Zum Strahlungsklima der Erde, Archiv Met, Geoph. Biokl. B, 12, 185–195
13. F. Steinhauser et al. (1958): Klimatographie von Österreich, Das Strahlungsklima, von F. Sauberer und I. Dirmhirn, Österreichische Akademie – Denkschriften der Gesamtakademie, B, 3, Wien, 136.

Tablica I. *Prosječno dnevno globalno zračenje ($J\text{ cm}^{-2}$) za Rayleighovu atmosferu.*Table I. *Mean daily global radiation ($J\text{ cm}^{-2}$) for Rayleigh atmosphere.*

Visina	0	500	1000	1500	2000	2500	3000
G. širina							
	siječanj						
41	1285	1297	1310	1322	1335	1348	1360
42	1226	1239	1251	1264	1276	1289	1302
43	1172	1184	1197	1209	1222	1235	1247
44	1117	1126	1138	1151	1163	1196	1189
45	1059	1071	1084	1096	1109	1122	1134
46	1004	1017	1025	1038	1046	1059	1071
	veljača						
41	1762	1774	1791	1808	1820	1833	1850
42	1707	1724	1737	1754	1770	1783	1800
43	1653	1666	1682	1695	1707	1720	1737
44	1599	1615	1628	1641	1657	1670	1682
45	1544	1561	1574	1586	1603	1615	1632
46	1490	1507	1519	1532	1544	1557	1574
	ožujak						
41	2415	2436	2452	2469	2486	2507	2524
42	2369	2390	2406	2423	2440	2457	2478
43	2327	2344	2360	2377	2394	2411	2431
44	2281	2298	2314	2331	2348	2365	2385
45	2231	2247	2264	2281	2298	2314	2331
46	2285	2201	2218	2235	2252	2268	2285
	travanj						
41	3093	3114	3135	3155	3176	3197	3218
42	3063	3084	3105	3126	3147	3168	3189
43	3034	3055	3076	3097	3118	3139	3160
44	3005	3026	3047	3063	3089	3105	3126
45	2971	2992	3013	3034	3055	3076	3097
46	2942	2963	2984	3001	3022	3042	3063
	svibanj						
41	3561	3582	3603	3624	3649	3670	3691
42	3553	3574	3595	3616	3637	3658	3679
43	3541	3561	3582	3607	3628	3649	3670
44	3528	3549	3570	3595	3616	3637	3658
45	3511	3536	3557	3578	3599	3620	3645
46	3499	3524	3541	3566	3587	3607	3633
	lipanj						
41	3783	3804	3829	3854	3875	3900	3926
42	3779	3804	3829	3854	3875	3900	3926
43	3779	3804	3825	3850	3875	3900	3926
44	3775	3804	3821	3846	3871	3896	3921
45	3771	3792	3817	3842	3867	3892	3913
46	3762	3787	3808	3833	3859	3884	3909

Tablica I. Nastavak.

Table 1. Continued.

Visina	0	500	1000	1500	2000	2500	3000
G. širina							
	srpanj						
41	3674	3700	3720	3741	3762	3783	3808
42	3670	3691	3712	3737	3758	3779	3800
43	3662	3683	3708	3729	3754	3775	3797
44	3654	3679	3700	3720	3746	3767	3792
45	3649	3670	3691	3716	3737	3758	3783
46	3637	3662	3683	3704	3729	3750	3775
	kolovoz						
41	3281	3298	3319	3340	3361	3381	3407
42	3260	3281	3302	3323	3344	3365	3386
43	3239	3256	3281	3302	3319	3340	3365
44	3214	3235	3256	3277	3298	3319	3340
45	3193	3214	3235	3256	3277	3298	3319
46	3168	3189	3210	3231	3252	3273	3294
	rujan						
41	2670	2687	2704	2724	2745	2762	2783
42	2632	2649	2666	2687	2704	2724	2741
43	2595	2611	2628	2649	2666	2683	2704
44	2553	2574	2591	2607	2628	2645	2666
45	2515	2532	2549	2565	2586	2603	2620
46	2473	2490	2511	2528	2444	2565	2582
	listopad						
41	1992	2009	2026	2042	2059	2076	2093
42	1942	1954	1971	1988	2005	2026	2042
43	1892	1908	1921	1938	1954	1971	1988
44	1841	1854	1871	1887	1900	1917	1933
45	1787	1804	1820	1833	1854	1867	1879
46	1737	1749	1762	1779	1791	1808	1825
	studeni						
41	1398	1410	1423	1440	1448	1461	1473
42	1339	1352	1364	1377	1394	1402	1415
43	1285	1297	1310	1322	1335	1348	1360
44	1230	1242	1256	1268	1281	1293	1306
45	1176	1189	1201	1214	1226	1239	1256
46	1122	1130	1143	1155	1168	1180	1193
	prosinac						
41	1117	1126	1138	1151	1163	1176	1189
42	1059	1071	1084	1096	1109	1122	1134
43	1004	1017	1025	1038	1050	1063	1076
44	946	958	971	979	992	1004	1017
45	891	904	912	921	933	942	954
46	841	850	858	870	879	887	896