

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 19 (1991/1992)

Številka 3

Strani 144-152

Zdravko Petkovšek in Tomaž Vrhovc:

IZRAČUN IZJEMNO VELIKIH PADAVIN

Ključne besede: fizika, meteorologija, padavine.

Elektronska verzija:

<http://www.presek.si/19/1091-Petkovsek-Vrhovec.pdf>

© 1991 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

IZRAČUN IZJEMNO VELIKIH PADAVIN

UVOD

Izjemno velike količine padavin, ki v kratkem času padejo na zemeljsko površje, lahko povzročijo najrazličnejše nevšečnosti. Če so tla že povsem namočena, tako da ne morejo več vezati tekoče vode, vsa padavinska voda odteče, se zlije v vodotoke in zaradi velikega dotoka in omejene možnosti odtoka se potoki in reke razlijejo iz korit. Natančen izračun količine padavin, ki pade iz oblakov, je v splošnem zelo zahteven, v nadaljevanju si bomo ogledali, na kakšen način je mogoče iz polj meteoroloških spremenljivk oceniti predvideno količino padavin.

VODA V OZRAČJU

V ozračju se voda pojavlja v treh agregatnih stanjih: kot vodna para, kot kapljice in kot ledeni kristali. Vodna para prihaja v ozračje predvsem z izhlapevanjem z vodnih, vlažnih in poraščenih površin. Če se zrak ohladi pod temperaturo rosišča, se iz vlažnega zraka kondenzira vlaga v obliki kaplic ali kristalov. Nastane oblak ali megla.

Ponavadi so oblaki sestavljeni iz drobnih kapljic. V oblaku so lahko tudi ledeni kristali. Do nastanka kristalov pride, če so temperature zraka v oblaku pod lediščem in so v oblaku prisotna sublimacijska jedra - trdni zametki kristalov, drugače pride do nastanka podhlajenih kapljic. Če so v oblaku sočasno kapljice in ledeni kristali, začno ledeni kristali rasti na škodo kapljic. Kapljice izhlapevajo in para se izloča na kristalih. Večje kapljice in kristali padajo hitreje od drobnejših in pri svojem padanju skozi oblak večji padavinski elementi zbirajo drobnejše. Ledeni kristali in kapljice postajajo vse večji, padajo vse nižje, kjer je zrak vse toplejši, kristali se talijo in iz oblaka se vsuje dež.

V zraku pri dani temperaturi ne more biti poljubno mnogo vodne pare. Gostota vodne pare, ki ji rečemo tudi absolutna vlažnost, ima pri vsaki temperaturi in pritisku določeno zgornjo mejo. Če se temperatura zniža, se zniža tudi zgornja meja absolutne vlage. Če je v zraku več pare, kot je ta znižana zgornja meja, se presežna vodna para izloči v tekočem ali trdnem stanju. Največja absolutna vlaga se s temperaturo in pritiskom eksponentno spreminja. Tako npr. pri 20 stopinjah Celzija lahko zrak vsebuje 17,3 g vodne pare v kubičnem metru, pri ledišču pa le še 4,8 g. Če se torej zrak, ki je pri 20 stopinjah nasičen, ohladi do ledišča, se mora iz vsakega

kubičnega metra zraka kondenzirati 12.5 g vode. Pri temperaturah nad lediščem (pa tudi pri negativnih temperaturah) se ta voda izloči kot vodne kapljice. Ledeni kristalčki nastanejo pri nizkih temperaturah, če so v oblaku prisotna sublimacijska jedra, na katere se vodna para izloči v trdnem stanju. Pri zelo nizkih temperaturah (pod -20 stopinj Celzija) začno posamezne kapljice zmrzovati.

Najpogosteje se zrak v ozračju ohladi zaradi dviganja. Pri dviganju zrak pridobiva potencialno energijo, se razpenja (opravlja delo proti okolici) in tako se mu notranja energija zmanjšuje na račun opravljenega dela. Zaradi zmanjševanja notranje energije se zmanjšuje temperatura zraka.

Dviganje zraka nastopa v atmosferi v ciklonih, ob frontah, včasih ob pobočjih, pogosto zaradi pregretja posameznih zračnih balonov pri tleh (konvekcija). Pri vsakem dviganju zraka, ko se zrak ohladi pod rosišče, se pojavijo oblaki, pogosto pa tudi padavine.

OSNOVNI IZRAČUN KOLIČINE PADAVIN

Kako izračunati količino padavin, ki se izloči iz dvigajočega zraka?

Prvi zakon termodinamike govori o tem, da se masi zraka dovedena toplota ΔQ porabi za spremembe temperature, pritiska in količine vode.

$$\Delta Q = mc_p \Delta T - V \Delta p + L \Delta m_v \quad (1)$$

Za zrak, ki je nasičen z vlago, velja, da se v primerih, ko ne dovajamo toplote, spremembe temperature odražajo v spremembah pritiska in v spremembah mase tekoče vode. Spremembe temperature ΔT so pri tem odvisne od specifične toplote zraka c_p , spremembe pritiska Δp od prostornine zraka V , spremembe mase teloče vode Δm_v pa od izparilne toplote L .

Z nekaj računanja (z upoštevanjem plinske enačbe, hidrostaticne enačbe in nekaterih drugih) sledi enačba za največjo možno jakost padavin (največjo možno gostoto masnega toka izločanja tekoče vode) J .

$$J = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_a}\right) \frac{w}{L} \Delta p \quad (2)$$

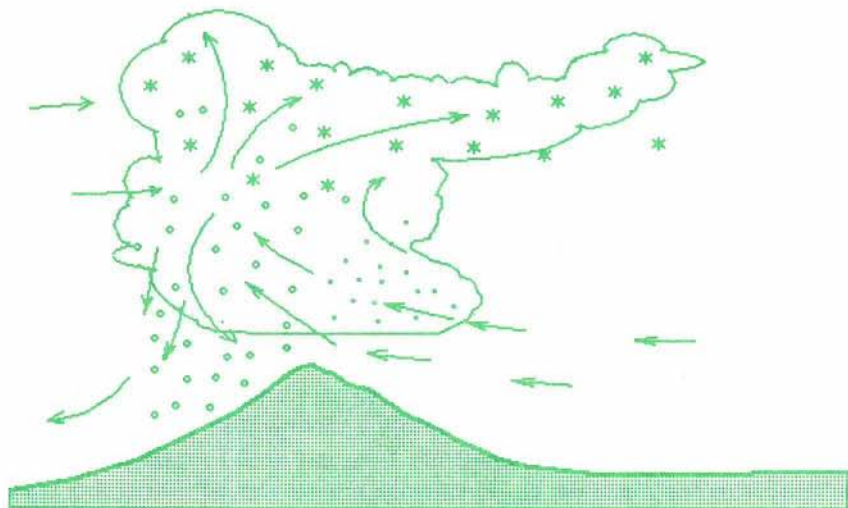
kjer γ_w in γ_a merita, za koliko se ohladi ob dviganju nasičen oziroma nenasičen zrak, w je vertikalna hitrost zraka in $\Delta p = -\rho g \Delta z$ je z razliko pritiska izražena debelina zračne plasti, iz katere padajo padavine.

Za tipičen primer vzemimo naslednje vrednosti $\gamma_w = 5 \text{ K/km}$, $\gamma_a = 10 \text{ K/km}$, $w = 0.3 \text{ m/s}$, $\Delta p = 300 \text{ mb}$ (cca 4 km), $L = 2.5 \text{ MJ/kg}$. Po gornji enačbi dobimo jakost padavin $7 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$. Ta bi dala v 48 urah 336 mm

(ali litrov oziroma kilogramov na m^2) padavin. Seveda se prav vsa voda ne izloči v obliki padavin, nekaj je ostane v oblakih, ki jih odnese veter. Ocenimo, da v oblakih ostane tri desetine izločene vode, zato zmanjšamo zgornjo količino padavin za faktor 0.7 in dobimo za 48 ur količino 235 mm padavin.

Vrednosti γ_a in L sta le malo odvisni od temperature, različne pa so lahko vlažnost zraka (zajeta v γ_w), vertikalna komponenta hitrosti vetra (w) in debelina plasti izločanja vlage (Δp).

V nadaljevanju si bomo ogledali vpliv posameznih členov enačbe 2 na količino izločenih padavin.



Slika 1 Kumulonimbusni oblak nad hribom z idealiziranimi smermi in hitrostmi vetrov

Vertikalne hitrosti

V drugem razdelku smo omenili, da so gibanja zraka v navpični (vertikalni) smeri najpomembnejši razlog za ohlajanje zraka. Razlogov za vertikalno gibanje zraka je več, hitrost dviganja je posledica intenzivnosti meteoroloških procesov.

Do dviganja zraka prihaja zaradi obsežnih (sinoptičnih) vremenskih procesov (na tipičnih razdaljah 1000 km). V ciklonih se zrak pri tleh steka proti središču ciklona in se počasi dviga. V ciklonih so tudi tople in hladne fronte,

v velikosti nekaj 100 km. Ob frontah se topli zrak dviguje nad hladnega, frontalni pas dvigajočega se zraka pa se počasi tudi horizontalno premika.

Do dviganja zraka pride tudi zaradi lokalnih dejavnikov. Če piha veter proti goram, se mora tok zraka, ko pride do gora, prilagoditi oblikam reliefa. Zrak gore deloma obteče, deloma pa se ob njih dviga. Velikost hitrosti dviganja zraka je odvisna od strmine, oblike in razsežnosti gora oziroma grebenov. Razsežnost teh pojavov je sorazmerna razprostranjenosti reliefnih oblik.

Do dviganja zraka pride tudi zaradi lokalnega pregrevanja. Če se nad delom tal, ki so toplejša od okolice, zrak segreje, se zaradi vzgona začne dvigati in s tem ohlajati in kaj kmalu se iz njega začne izločati oblak. Velikost teh pojavov je nekaj deset kilometrov.

Pri vsakršnem vertikalnem gibanju zraka pa pride zaradi razpenjanja še do dodatne labilizacije zračnih plasti. Dvigajoča se plast zraka se na zgornji meji dvigne višje kot na spodnji meji in zato se zrak na zgornji meji plasti ohladi močneje kakor pa na spodnji. Spodnje plasti stebra postanejo glede na zgornje pregrete, t.j. labilne, in v dvigajoči se plasti pride do dodatnega vertikalnega mešanja zraka.

Ko se iz zraka začno izločati vodne kapljice, te pri svoji kondenzaciji oddajajo toploto in dvigajoči se nasičeni zrak se z dviganjem ohlaja manj, kot če bi bil nenasičen. Ti pojavi imajo razsežnost okoli deset kilometrov in več.

PROCES	vert. hitrost	int. padavin
sinoptično: cikloni	5 cm/s	1 mm/h
sinoptično: fronte	10 cm/s	4 mm/h
mezo: orografsko	30 cm/s	1 mm/h
lokalno: konvekcija	100 cm/s	10 mm/h
lokalno: nevihte	300 cm/s	30 mm/h

Zgornja delitev pojavov je le načelna. Ob prehodu hladne fronte prek razgibanega gorskega reliefa se dviganja seštevajo: ob hladni fronti se topli zrak dviga, zaradi dviganja pride do labilizacije in s tem do nastanka neviht, gorske pregrade pa dviganje povečajo tako v hladnem kot v toplem zraku. V privetrju gorskih pregrad so padavine zato izrazitejše. V zavetrju gorskih pregrad pride do spuščanja zraka, s tem se zrak ogreva in v zavetrju gora je padavin manj.

Če želimo zanesljivo izračunati, kakšna je razporeditev količine padavin

pri tleh, moramo upoštevati, da kapljice, ki nastanejo v oblakih, veter nosi s seboj. Kapljice tako ne padejo na tla tik pod mestom nastanka, pač pa jih veter razseje vzdolž svoje poti. Kapljice pri padanju skozi nenasičen zrak pod oblakom tudi delno izhlapevajo in tako se količina padavin še nekoliko zmanjša.

Debelina dvigajočih se plasti

V enačbi 2 kot pomemben dejavnik nastopa debelina plasti, v kateri se nasičeni zrak dviga. Največje debeline te plasti se pojavijo ob nevihtah, saj takrat šteber dvigajočega zraka sega skoraj od tal (okoli 1000 mb) do tropopavze (okoli 200 mb). Ob frontalnih nevihtah se dvigovanje zraka ne začne že pri tleh, pač pa nekoliko višje v ozračju (okoli 900 mb), višina vrha frontalno nevihtnih oblakov je odvisna predvsem od vertikalne razporeditve temperature.

Količina vlage v zraku

Količina vlage v zraku je v enačbi 2 predstavljena prek temperaturnega gradienta γ_w . Če je zrak pred začetkom dviganja topel, je v njem lahko bistveno več vlage, kot pa če je hladen. Intenzivne padavine se zato lahko pojavijo le, če je vreme razmeroma toplo in vlažno, ob hudem mrazu ni intenzivnih padavin. V hladnem zraku namreč ni vlage, ki bi se iz zraka lahko izločila, če bi se ta zrak še naprej ohlajal.

OROGRAFSKO DVIGANJE ZRAKA

Ob razsežnih gorovjih se mora pritekajoči se zrak ob njih dvigniti. Posamezno, četudi visoko goro, bo veter večinoma obtekel in le malo zraka se bo dvignilo prek vrha gore, enako velja, če veter piha vzdolž grebena. Če je greben pravokoten na smer vetra, se bo prek njega dvigovalo največ zraka. Velikost vertikalne hitrosti je tako odvisna od nagiba reliefa v smeri pritekajočega zraka oziroma od nagiba tokovnic. Če torej zaradi splošnega gibanja zraka v pretežno stabilni atmosferi (stabilna atmosfera je takšna, ki se nerada vertikalno meša) vetrovi naletijo na gorske grebene, se pretakajo čeznje; pri tleh bolj zamotano, v višinah pa bolj zglajeno. Slika 2 prikazuje nekaj zglajenih tokovnic nad razgibanim gorskim reliefom.

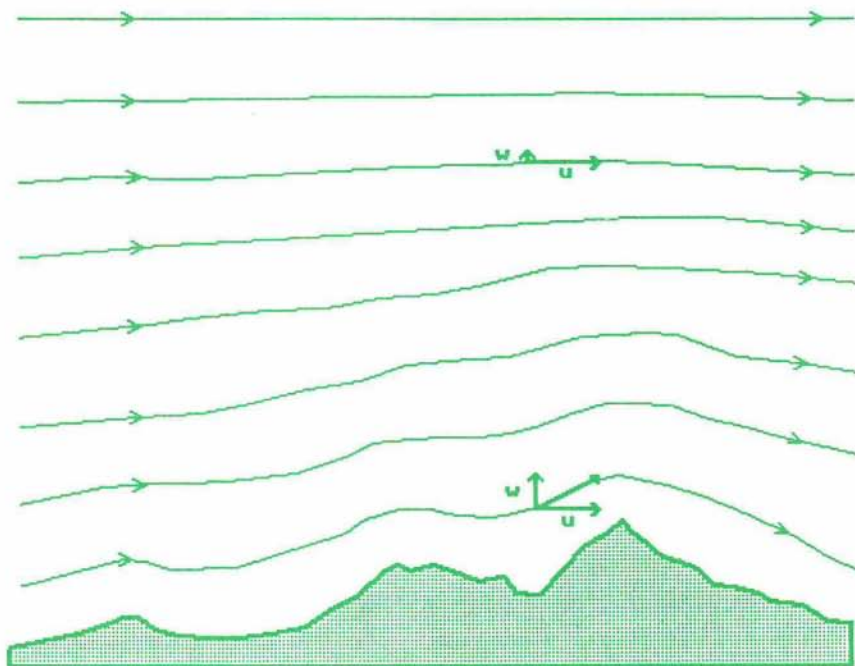
Dejanski relief je v resnici tridimenzionalen in je sestavljen iz množice raznolikih oblik, ki so glede na veter najrazličneje orientirane. Vetrovi se tako

ponekod dvigujejo prek grebenov, drugod pa oblike obtekaajo.

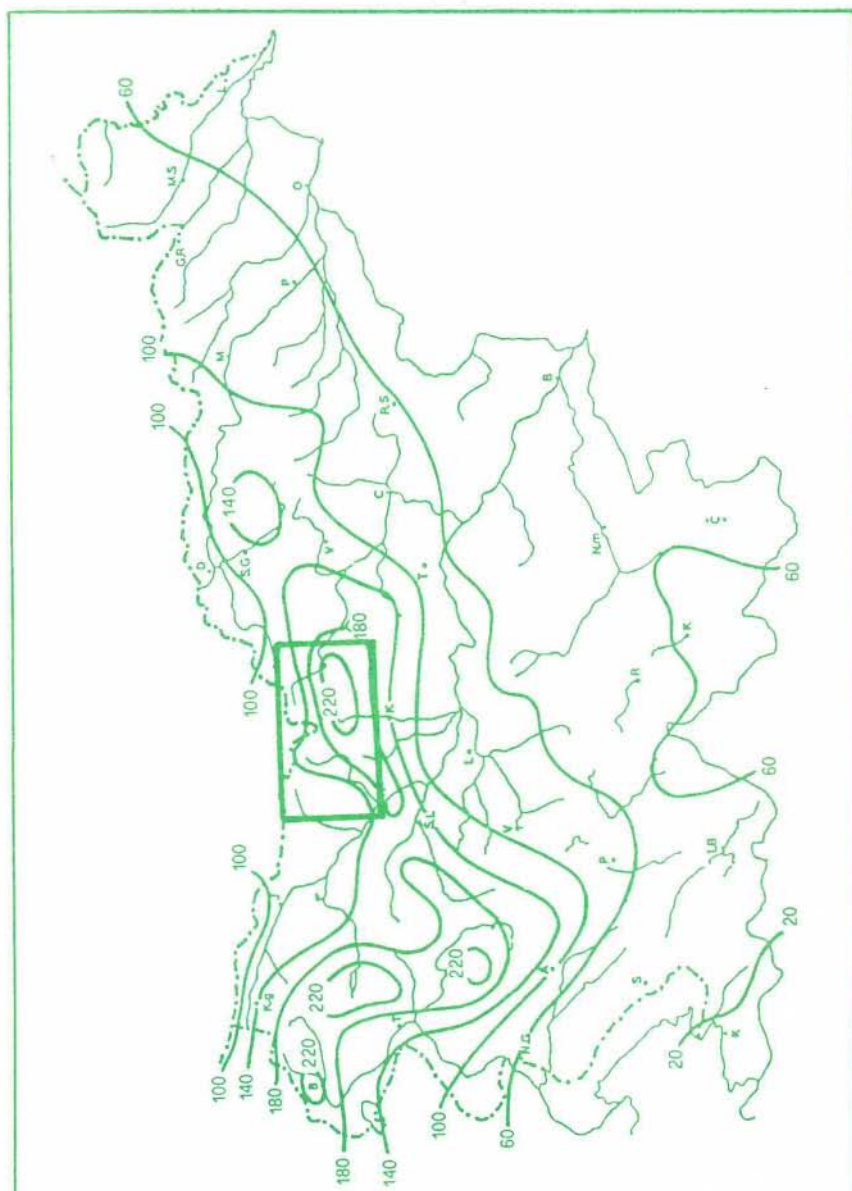
Natančno določanje poti pretakanja zraka prek gorske pregrade, ob kateri pride do frontalnih in konvektivnih padavin, je zelo zamotano. V našem primeru bomo prikazali le tisti del vertikalne hitrosti vetra, ki nastane kot posledica dviganja ob reliefu.

Za primer si oglejmo velike padavine v severni Sloveniji, ki so povzročile poplave v Savinjski dolini 1. in 2. novembra 1990. Na sliki 3 si lahko ogledamo 48-urne količine padavin. Opazimo lahko, da sta nad Slovenijo bili takrat dve maksimalni področji padavin, prvo v Julijskih Alpah (Bohinj 280 mm, Kanin 220 mm, Vojsko 220 mm), drugo pa ob jugovzhodnem delu Kamniških in Savinjskih Alp (med dolino Kamniške Bistrice in Logarsko dolino 230 mm).

Razen omenjenih maksimumov se je pojavil še dodatni maksimum na Pohorju, vendar je tam padlo kar za 100 mm manj dežja kot pa na področjih največjih padavin. Zanimivo je, da je na privetrni strani Kamniško Savinjskih



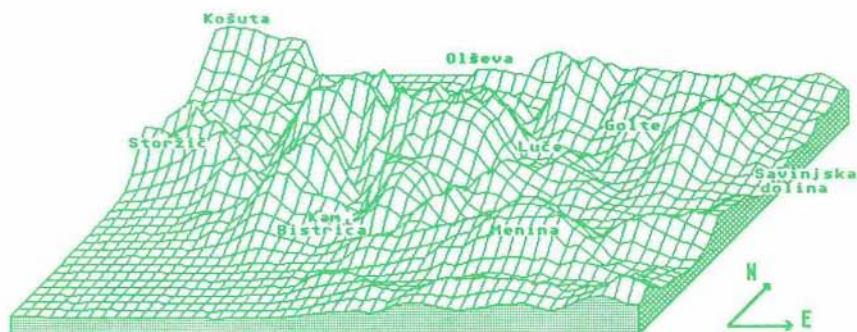
Slika 2. Nekaj idealiziranih tokovnic nad presekom razgibanega terena.



Alp (npr. postaja Kamniška Bistrica) padlo skoraj dvakrat toliko padavin kot pa v zavetrju (v Logarski dolini, postaja Solčava).

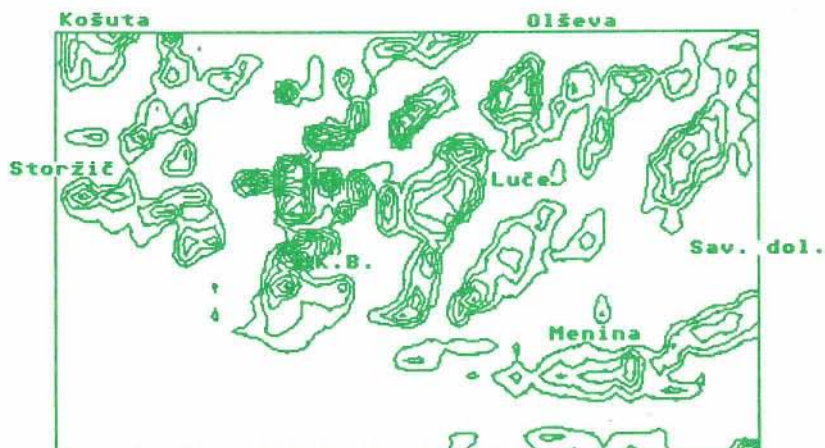
Z meteorološkimi meritvami so takrat ugotovili, da so nad severovzhodno Slovenijo pihali jugovzhodni vetrovi. Na sliki 5 je za območje Kamniško Savinjskih Alp prikazano, koliko padavin bi dobili, če bi bile padavine povzročene le z dviganjem zraka zaradi gorske pregrade. Pri tem smo privzeli, da je debelina dvigajoče se plasti povsod enaka ($\Delta p = 500 \text{ mb}$) in da je tudi vlažnost zraka povsod enaka.

Na sliki 5 prikazana razporeditev padavin pokaže, da lahko s sorazmerno preprostim računom orografskega dviga in z njim povzročene količine padavin, dobimo mnogo natančnejšo sliko razporeditve padavin, kot pa jo dobimo z redkimi terenskimi meritvami (slika 3). Tako izračunane količine padavin pojasnijo v precejšnji meri prostorsko razporeditev izjemnih padavin in poplav, ki so v začetku novembra 1990 povzročile naravno katastrofo v Kamniških in Savinjskih Alpah ter v Savinjski dolini. Velike količine padavin nad pobočji doline Kamniške Bistrice (oznaka K. B. na sliki 5) in zahodno od Luč (Veža, Podvolovjek) so padle na že poprej namočena tla in so zato takoj odtekle v vodotoke, ki so nato poplavalili doline. Padavine so nastale zaradi zelo počasi se premikajoče frontalne cone, ob kateri so se prožile tudi nevihte, ki so se zaradi prisilnega dviga ob gorski pregradi še okrepile.



Slika 4. Relief Kamniško Savinjskih Alp, aksonometrična projekcija, pogled z juga. Mrežna razdalja je 1 km.

Slika 3. 48-urne višine padavin; vsota za 1. in 2. november 1990, območje Kamniško Savinjskih Alp je uokvirjeno. (Povzeto po reviji UJMA 5 (1991) str.12) (levo)



Slika 5. Količina padavin v 48 urah nad delom severne Slovenije izračunana le z orografskim dvigom, vsaka izolinija predstavlja $20 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Spodnja slika je zemljevid obravnavanega področja

