

REPUBLIČKI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD
SOCIJALISTIČKE REPUBLIKE HRVATSKE

339-M8

Broj 10

Rasprave i prikazi

DK 551.509.313
551.509.324.2

NUMERIČKI MODEL ZA PROGNOZU
KOLIČINE OBORINA

DJURO RADINOVIĆ

Zagreb, 1971

REPUBLICAN HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE
of the
SOCIALISTIC REPUBLIC CROATIA

339-M8

No 10

Memoirs

DK 551. 509. 313 : 551. 509. 324. 2

NUMERICAL MODEL FOR
PRECIPITATION FORECASTING

by

DJURO RADINOVIĆ

Zagreb 1971

P R E D G O V O R

Tijekom zadnjih nekoliko godina pojavilo se i u našoj zemlji veliko zanimanje za dobivanje "umjetne kiše", odnosno za stimulaciju oborina za potrebe hidroelektrana, poljoprivrede, itd. Iako se u mnogim zemljama u svijetu takve akcije s manje ili više uspjeha provode već niz godina, u našoj zemlji se tek prije tri godine pristupilo prethodnim istražnim radovima u tom pogledu. Zahvaljujući velikom interesu kojeg je pokazala Zajednica jugoslavenske elektroprivrede za stimulaciju oborina, sektor za meteorološka istraživanja i aerologiju Republičkog hidrometeorološkog zavoda SR Hrvatske u Zagrebu je sredstvima te zajednice izradio opsežan istraživački rad "Stimulacija oborine na području Like i Gorskog kotara" u kojem se po prvi put u našoj zemlji prikazuju rezultati istraživanja klimatološkog potencijala u akcijama stimulacije oborina u takvim područjima.

Područje Like i Gorskog kotara, gdje se nalaze akumulacioni bazeni hidroelektrana Senj i Vinodol, izabrano je kao eksperimentalni poligon iz razloga jer je po svojim klimatološkim i topografskim karakteristikama te neposrednoj blizini Jadranskog mora po našoj ocjeni najpovoljniji za ovakve akcije.

Kompletan projekt izradili su stručnjaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda SR Hrvatske, kod čega su dr. Dražen Poje, rukovodilac sektora za meteorološka istraživanja i aerologiju, mr. Nadežda Šinik, dipl.inž. i Nada Pleško, dipl.inž. bili kreatori osnovne koncepcije istraživanja i realizatori niza rješenja. Stručni konzultant u odnosima između meteorologa - istraživača te potreba i želja elektroprivrednih organizacija bio je dr. Dragomir Djukanović, savjetnik u Jugoslavenskoj elektroprivredi.

Kao dio tog istraživačkog projekta, u kojem su osim klimatologije terena i fizikalno-meteoroloških uvjeta stimulacije oborine tretirane i mogućnosti i metodika stimulacije oborina, je i ovaj "Numerički model za prognozu količine oborina", kojeg je izradio dr. Djuro Radinović, vanjski suradnik Zavoda. Ovaj rad, kojeg predajemo stručnoj javnosti, trebao bi u operativnom dijelu budućih akcija omogućiti objektivnu procjenu prirodnih mogućnosti oborina.

Zagreb, studenoga 1971.

D I R E K T O R
REPUBLIČKOG HIDROMETEOROLOŠKOG ZAVODA
SR HRVATSKE

Mile Šikić, dipl. inž.

Adresa autora:

Dr Djuro Radinović
Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, Birčainova 6

Tisak:

Republički hidrometeorološki zavod SR Hrvatske, Zagreb, Grič 3

S A D R Ź A J

Strana

Abstract	7
Formulacija modela za prognozu količine oborina	9
1. Uvod	9
2. Metoda izračunavanja vertikalnih brzina . . .	11
3. Metoda prognoze vertikalnih brzina	18
4. Odnos vertikalne komponente brzine i statičke stabilnosti atmosfere	19
5. Jednadžba modela za prognozu količine oborina.	22
6. Orografski utjecaji u modelu za prognozu koli- čine oborina	25
7. Odredjivanje specifične vlage zraka u modelu pomoću rosišta	28
8. Odredjivanje specifične vlage zraka pomoću tlaka vodene pare i deficita vlage zraka . . .	31
9. Interpolacija u gustoj mreži točaka	34
10. Rješenja jednadžbi modela analitičkim i nume- ričkim metodama	36
11. Izračunavanje količine oborina po jednadžbama modela pomoću elektronskog računara	43
Primjena modela za prognozu količine oborine u oblasti jugozapadnog dijela Hrvatske	49
12. Fizičko-geografske karakteristike jugozapadnog dijela Hrvatske	49
13. Postavljanje mreže točaka i oblikovanje relje- fa jugozapadnog dijela Hrvatske metodom izglad- njivanja	50
14. Opis programa za rad na elektronskom računaru.	52
15. Opis programa za prognozu količine oborine pomoću elektronskog računara	54
16. Primjena numeričkog modela za izračunavanje količine oborina u karakterističnim vremenskim situacijama na području jugozapadnog dijela Hrvatske i analiza rezultata	58
Literatura	63

Abstract

In the first part of this paper a numerical model for the precipitation forecasting has been formulated. Two basic functions in the equation of this model are the vertical velocity and humidity distribution in the atmosphere. In order to take orographic influence into consideration a general form of the equation with correspondent coefficients has been developed and in the model included. Further, the relation between vertical velocity and static stability of the atmosphere has been considered and, as an important factor in the process of the condensation was put into the equation of the model. At the end of this part the analytical and numerical solutions of the equations of the model have been discussed and programs for electronic computer described.

The second part of this paper contains the application of the numerical model for the precipitation forecasting in the North Adriatic sea region. This region is characterized by the strong vertical gradient of the specific humidity and pronounced orographic influence. Analysis of the results achieved in three different cases shows that this model could be used in the routine forecasting as an objective method for the forecasting of the amount of precipitation.

FORMULACIJA MODELA ZA PROGNOZU
KOLIČINE OBORINA

1. U v o d

Polazeći od međusobne zavisnosti koja postoji između divergencije vektora vjetera, odnosno vertikalne komponente brzine i intenziteta oborina, *Palmen i Holopainen /4/* su na jednom primjeru jakog ciklonalnog razvoja izračunali količinu oborine u centralnim oblastima ciklone. Za ovu svrhu oni su koristili izračunate vrijednosti divergencije na standardnim izobarnim plohama. Pri tome su upotrijebili slijedeću jednadžbu za izračunavanje količine oborine:

$$P = E - \frac{1}{g} \int_0^P \frac{\partial q}{\partial t} dp - \frac{1}{g} \int_0^P \nabla \cdot (q \vec{v}) dp \quad (1.1)$$

gdje P označava količinu oborine na jedinicu površine, E iznos isparavanja s površine, a q specifičnu vlagu zraka. Pri rješavanju ove jednadžbe usvojena je pretpostavka da se sva kondenzirana vodena para odmah izluči na zemlju. Ova pretpostavka nije čak ni približno točna kada se radi o jednom oblaku ili malim kišnim zonama.

Trenutni intenzitet oborine ovdje je zamijenjen srednjim intenzitetom za period vremena od 6 sati. Po mišljenju ovih autora, zadovoljavajuće slaganje između izračunatih i izmjerenih količina oborine može se očekivati samo ako se podaci usporede za srazmjerno veliku oblast i duži vremenski interval, u sredini kojeg se nalazi sinoptički termin za koji su korišćeni podaci u računanju.

Uzimajući u obzir navedene uvjete jednadžba (1.1) daje osrednjenu vrijednost za oblast na koju se odnosi, tako da je možemo pisati na slijedeći način:

$$\bar{P} - \bar{E} = - \frac{1}{g} \int_0^{\bar{P}} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} dp - \frac{1}{g} \int_0^{\bar{P}} \overline{\nabla \cdot (q \vec{v})} dp - \frac{1}{g} \int_0^{\bar{P}} \overline{q \nabla \cdot \vec{v}} dp \quad (1.2)$$

Iz ove jednadžbe slijedi da u slučajevima kada nema oborina i kada je divergencija jednaka nuli, isparavanje s podloge odgovara izrazu:

$$\bar{E} \approx \frac{1}{g} \int_0^P \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} dp + \frac{1}{g} \int_0^P \overline{\vec{v} \cdot \nabla q} dp$$

Kako je isparavanje E u ciklonalnim situacijama sa intenzivnim oborinama u usporedbi sa P malo, *Palmen i Holopainen* zaključuju, da suma od prva dva člana na desnoj strani jednadžbe (1.2) treba, uzevši općenito, u usporedbi sa posljednjim članom iste jednadžbe biti mala. Ovaj zaključak je približno točan u situacijama kada je atmosfera u donjim slojevima bliska zasićenju. Takova stanja se mogu očekivati u centralnim dijelovima kišnih zona.

Uzimajući sve ovo u obzir *Palmen i Holopainen* su zaključili da se u takvim slučajevima količina oborine može približno izračunati po jednostavnoj formuli:

$$\bar{P} \approx - \frac{1}{g} \int_0^P \overline{q \vec{v} \cdot \nabla} dp \quad (1.3)$$

Analizirajući ovu formulu vidimo da ona ne može biti uspješno primjenjivana pošto sadrži slijedeće važnije nedostatke:

1). Oborine su funkcija vertikalne brzine a ne promjene vertikalne brzine, kako proizlazi iz formule, tj.

$$P = f(\omega) ; \quad P \neq f(\vec{v} \cdot \nabla) ; \quad P \neq - f\left(\frac{\partial \omega}{\partial p}\right)$$

Ovo iz razloga što su oborine posljedica adijabatskog hlađenja koje je najintenzivnije pri dizanju zraka uvis i srazmjerno je vertikalnoj brzini.

2) Na visini gdje je maksimalna vertikalna brzina (ω_{\max}) je:

$$\vec{v} \cdot \nabla = - \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

što znači, da na toj visini prema formuli nema kondenzacije. Međutim, prirodno je pretpostaviti da je na toj visini kondenzacija najintenzivnija.

3) Integracijom divergencije od gornje do donje granice atmosfere dobija se mala razlika između velikih procesa divergencije, koja ima različit predznak u različitim dijelovima atmosfere (*Sutcliffe /12/*). Stoga nije moguće količinu oborine izjednačavati sa integralom divergencije od donje do gornje granice atmosfere, kako to rade *Palmen i Holopainen*.

4) Po formuli (1.3) nije moguće uzeti u obzir uticaj orografije, pošto se dobija suprotan rezultat. Naime, kad se po jednadžbi kontinuiteta umjesto divergencije piše $-\frac{\partial \omega}{\partial p}$ i formula integrira pomoću konačnih razlika, dobija se:

$$P = -\frac{q}{g}(\omega_n - \omega_s) \quad (1.4)$$

gdje je ω_n vertikalna brzina na gornjoj, a ω_s na donjoj granici sloja atmosfere u kojem se izračunavaju vertikalne brzine. Na privjetrinskim stranama orografskih prepreka vertikalna brzina ima negativan predznak i tim je veća što je orografska prepreka strmija i viša. To znači, da bi po jednadžbi (1.4) orografske prepreke utjecale na smanjenje količine oborine umjesto na njihovo povećanje kao što se stvarno događa u prirodi.

S obzirom na navedene nedostatke formule za izračunavanje količine oborine, koju su dali *Palmen i Holopainen*, i namjeru da se u numeričkom modelu za prognozu količine oborine uzme u obzir utjecaj orografije, ovdje ćemo predstaviti novu formulu koja će odnose između količine oborine i vertikalne brzine izražavati drugačije. Prethodno ćemo izložiti pogodnu metodu za izračunavanje vertikalnih brzina sa uzimanjem u obzir utjecaja orografije.

2. Metoda izračunavanja vertikalnih brzina

Za izračunavanje vertikalnih brzina, zbog kojih uglavnom dolazi do oborina, poći ćemo od jednadžbe kontinuiteta:

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} = -\nabla \cdot \vec{v} \quad (2.1)$$

gdje $\omega = \frac{dp}{dt}$ i označava vertikalnu komponentu brzine u sistemu p , a \vec{v} vektor brzine. Integracijom jednadžbe (2.1) moguće je

izračunati vertikalnu brzinu na izobarnoj plohi p_n ako se zna vertikalna brzina na nižem nivou i horizontalna divergencija vektora vjetra između tih nivoa, tj.

$$\omega_{p_n} = \omega_{p_{n-1}} + \int_{p_n}^{p_{n-1}} \nabla \cdot \vec{v} dp \quad (2.2)$$

gdje n predstavlja normalu usmjerenu od zemljine površine u polje.

Ako podjemo od zemljine površine naviše, onda u prvoj aproksimaciji vertikalna brzina na zemljinoj površini je:

$$\omega_s = -g\rho_s w \quad (2.3)$$

gdje je g ubrzanje zemljine teže, ρ_s gustoća zraka na površini zemlje, a w vertikalna komponenta vjetra u sistemu z . Iz geometrijskog odnosa vektora vjetra i topografije proizlazi da je vertikalna komponenta:

$$w = \vec{v} \cdot \nabla h$$

gdje h označava visinu terena. Pri tlu je vertikalna komponenta w funkcija horizontalnog polja vjetra i nagiba terena:

$$w = u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y}$$

Uvodjenjem konačnih razlika i zamjenom w u jednadžbi (2.3) dobijemo vertikalnu brzinu u sistemu p u slijedećem obliku:

$$\omega_s = -g\rho_s \left(u \frac{\Delta h}{2\Delta x} + v \frac{\Delta h}{2\Delta y} \right) \quad (2.4)$$

Vertikalnu brzinu na zemljinoj površini po ovoj formuli izračunavat ćemo na slijedeći način:

- 1) Odredi se nadmorska visina u točkama mreže u kojima se izračunava,
- 2) Na osnovu visina terena u točkama mreže izračunavaju se razlike u visini između točaka u pravcu x i y ,
- 3) Odrede se komponente vjetra u i v iz prizemne karte raspodjele tlaka zraka. Time su dobijeni svi potrebni podaci za rješavanje jednadžbe (2.4).

Komponente vjetra u prizemnom sloju se nalaze u određenom odnosu s raspodjelom tlaka zraka. Taj odnos je dan jednadžbama:

$$u = -\frac{1}{(f^2 + k_s^2)\rho_s} \left(f \frac{\partial p}{\partial y} + k_s \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2.5)$$

$$v = \frac{1}{(f^2 + k_s^2)\rho_s} \left(f \frac{\partial p}{\partial x} - k_s \frac{\partial p}{\partial y} \right)$$

gdje k_s označava koeficijent vanjskog trenja, a f Coriolisov parametar.

Kad izraze (2.5) uvrstimo u jednadžbu (2.4) u obliku konačnih razlika imamo:

$$\omega_s = \frac{g}{f^2 + k_s^2} \left[\left(f \frac{\Delta p}{2\Delta y} + k_s \frac{\Delta p}{2\Delta x} \right) \frac{\Delta h}{2\Delta x} - \left(f \frac{\Delta p}{2\Delta x} - k_s \frac{\Delta p}{2\Delta y} \right) \frac{\Delta h}{2\Delta y} \right]$$

odnosno:

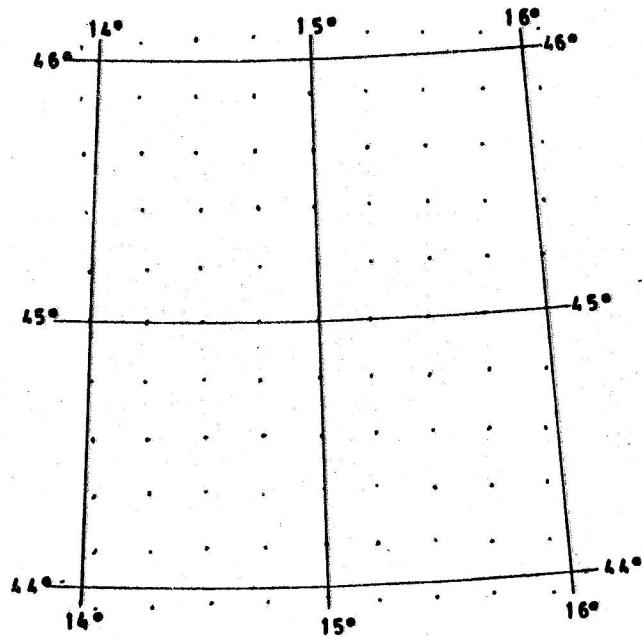
$$\omega_s = \frac{g}{f^2 + k_s^2} \left[\left(k_s \frac{\Delta h}{2\Delta x} - f \frac{\Delta h}{2\Delta y} \right) \frac{\Delta p}{2\Delta x} + \left(f \frac{\Delta h}{2\Delta x} + k_s \frac{\Delta h}{2\Delta y} \right) \frac{\Delta p}{2\Delta y} \right]$$

Ako se oblast u kojoj izračunavamo nalazi na 45° geografske širine, onda posljednju jednadžbu možemo, najzad, pisati:

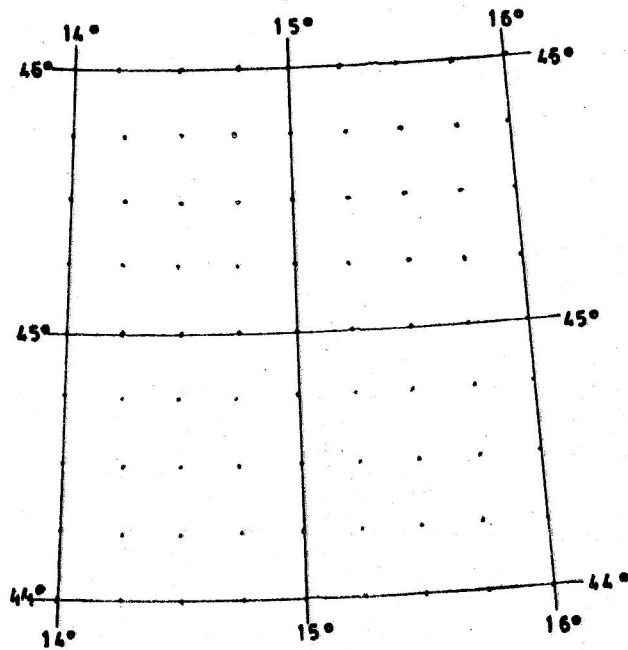
$$\omega_s = \frac{g}{4(f^2 + k_s^2)(\Delta y)^2} \left[(k_s \Delta_x h \cos^2 45^\circ - f \Delta_y h \cos 45^\circ) \Delta_{x,p} + (f \Delta_x h \cos 45^\circ + k_s \Delta_y h) \Delta_{y,p} \right] \quad (2.6)$$

U oblastima razudjenog reljefa vertikalna komponenta brzine prouzrokovana oblicima terena, kao i raspodjela količine oborina, biće veoma promjenljiva. Da bi se dobila približna slika raspodjele vrijednosti vertikalne komponente potrebno je izvoditi proračune u relativno gustom mreži točaka.

Za rješavanje jednadžbi numeričkim metodama obično se u meteorologiji koriste dva tipa mreža točaka. Kod prvog su točke u mreži ekvidistantno rasporedjene, dok kod drugog tipa točke leže na presjecima meridijana i paralela. Po jedan primjer ovih mreža prikazan je na slikama 1. i 2.



Sl. 1. Mreža ekvidistantno raspoređenih točaka



Sl. 2. Mreža točaka koja se poklapa s mrežom paralela i meridijana. Razmak između točaka je $0,25^\circ$ geografske dužine, odnosno širine

Kad se koristi mreža točaka koja se poklapa sa geografskom mrežom meridijana i paralela, razlike između rastojanja točaka na različitim paralelama mogu se zanemariti ukoliko mreža pokriva srazmjerno malu površinu. To isto vrijedi i za promjenu Coriolisovog parametra.

S obzirom na malu promjenu ubrzanja zemljine teže s visinom i činjenicu da visina terena u točkama mreže rijetko gdje prelazi 1000 m, pogotovo ako se orografija izglađuje, onda se i promjena ubrzanja zemljine teže može opravdano zanemariti.

Imajući u vidu naprijed opisane aproksimacije, kao i nemogućnost preciznog uzimanja u obzir oblika terena i nedovoljno točno očitavanje razlika tlaka zraka sa karata, navedene veličine se u računu mogu smatrati konstantama. U našem daljnjem razmatranju uzećemo za njih slijedeće vrijednosti:

$$g = 9,806 \text{ m sec}^{-2}; \quad k_s = 0,87 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}; \quad f = 10^{-4} \text{ sec}^{-1};$$

$$\Delta x = 0,25^{\circ} \text{ g.d.} = 19.622 \text{ m}; \quad \Delta y = 0,25^{\circ} \text{ g.š.} = 27.750 \text{ m};$$

$$\Delta x = 0,1^{\circ} \text{ g.d.} = 7.848 \text{ m}; \quad \Delta y = 0,1^{\circ} \text{ g.š.} = 11.100 \text{ m}.$$

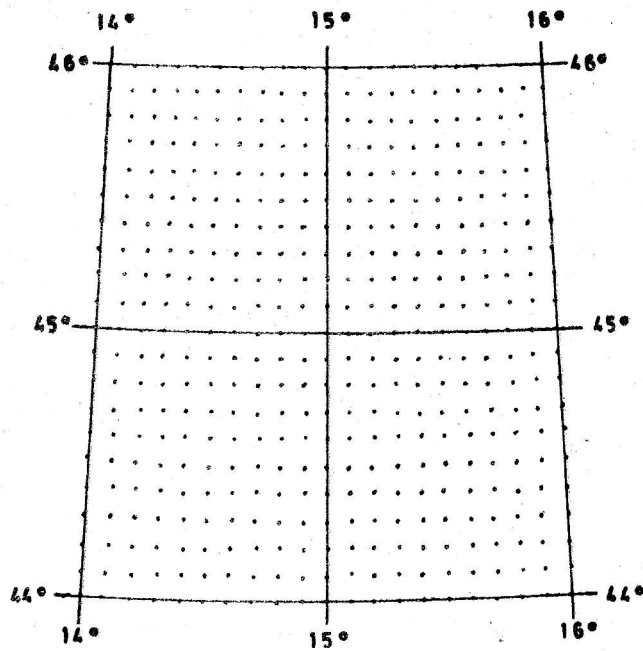
Uvrštenjem ovih vrijednosti u jednadžbu (2.6) dobijamo praktičan oblik jednadžbe za izračunavanje vertikalnih brzina sa koeficijentima koji se odnose na mrežu točaka prikazanu na sl. 1.

$$\omega_s = 10^{-3} \left[(3,15\Delta_x h - 2,55\Delta_y h)\Delta_{xp} + (2,55\Delta_x h + 1,57\Delta_y h)\Delta_{yp} \right] \quad (2.7)$$

Ako uzmemo još gušću mrežu točaka, sa međusobnim razmakom od $0,1^{\circ}$ geografske dužine, odnosno širine, prikazane na sl. 3, jednadžba za izračunavanje vertikalne brzine imaće slijedeće koeficijente:

$$\omega_s = 10^{-2} \left[(1,97\Delta_x h - 1,59\Delta_y h)\Delta_{xp} + (1,59\Delta_x h + 0,98\Delta_y h)\Delta_{yp} \right] \quad (2.8)$$

Ovdje su promjene visina h izražene u m, a promjene tlaka zraka p u mb. Veličina k_s predstavlja vanjsko trenje i uzeta je srednja vrijednost za kopno na 45° geografske širine (Hann-Süring, Lehrbuch der Meteorologie, 5 izd., str. 605).



Sl. 3. Mreža točkaka s razmakom $0,1^{\circ}$ geografske dužine, odnosno širine

Izrazi u zagradama u jednađbama (2.7) i (2.8) predstavljaju konstante za svaku točku T_{ij} mreže posebno. Stoga ove jednađbe možemo pisati u obliku:

$$\omega_s = 10^{-3} (a\Delta_{x,p} + b\Delta_{y,p})_{ij}$$

$$\omega_s = 10^{-2} (a\Delta_{x,p} + b\Delta_{y,p})_{ij}$$

ili:

$$\omega_s = 10^{-3} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \quad (2.9)$$

$$\omega_s = 10^{-2} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \quad (2.10)$$

Prva jednađba od posljednje dvije odnosi se na mrežu točkaka s razmakom $0,25^{\circ}$, a druga na mrežu točkaka s razmakom $0,1^{\circ}$ geografske dužine, odnosno širine.

Prema posljednjim jednadžbama mogu se izračunati vertikalne komponente brzine na zemljinoj površini kao funkcije horizontalne brzine vjetra i nagiba terena. Na isti način, tj. pomoću razlika tlaka zraka svedenog na morski nivo i nagiba terena, može se dobiti prognoza vertikalnih brzina u prizemnom sloju korišćenjem prizemne prognostičke karte.

Kad je poznata vertikalna brzina na zemljinoj površini možemo po jednadžbi (2.2) dobiti vertikalnu brzinu na višem nivou. Za ovo je potrebno da se zna i integrirana vrijednost divergencije vektora vjetra između izobarnih ploha. U tu svrhu obično se pretpostavlja da se unutar jednog sloja divergencija vjetra mijenja linearno s tlakom zraka. Na osnovu ove pretpostavke može se za podintegralnu vrijednost divergencije vjetra uzeti srednja vrijednost u sloju, koja se dobija po obrascu:

$$(\overline{\nabla \cdot \vec{v}})_{n/n-1} = \frac{\nabla \cdot \vec{v}_n + \nabla \cdot \vec{v}_{n-1}}{2}$$

Tako ćemo za prvi izobarni nivo iznad zemljine površine dobiti:

$$\omega_1 = \omega_s + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_1 + \nabla \cdot \vec{v}_s}{2} (p_s - p_1)$$

a za neki nivo p_n biće:

$$\omega_{p_n} = \omega_s + \omega_{p_1} + \omega_{p_2} + \dots + \omega_{p_{n-1}} + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_{n-1} + \nabla \cdot \vec{v}_n}{2} (p_{n-1} - p_n)$$

Odnosno, izraženo pomoću divergencije biće:

$$\omega_{p_n} = \omega_s + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_s + \nabla \cdot \vec{v}_1}{2} (p_s - p_1) + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_1 + \nabla \cdot \vec{v}_2}{2} (p_1 - p_2) + \dots + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_{n-1} + \nabla \cdot \vec{v}_n}{2} (p_{n-1} - p_n)$$

gdje n označava broj nivoa i povećava se od zemljine površine u polje.

U slučaju da koristimo izobarne nivoe, koji su ekvidistantno raspoređeni prema tlaku zraka, posljednja jednadžba imaće oblik:

$$\omega_{p_n} = \omega_s + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_s + \nabla \cdot \vec{v}_1}{2} (p_s - p_1) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} (\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}) (p_k - p_{k+1}) \quad (2.11)$$

Po ovoj jednadžbi možemo izračunati vertikalnu brzinu na bilo kom nivou ako znamo vertikalnu brzinu u prizemnom sloju i vrijednost divergencije između standardnih izobarnih ploha.

3. Metoda prognoze vertikalnih brzina

Ako se vertikalne brzine koriste u modelu za prognozu oborina onda je potrebno raspolagati prognoziranim vertikalnim brzinama. Prognozu vertikalnih brzina, međutim, nije moguće dobiti iz divergencije vjetera. Ovo iz razloga što se po postojećim metodama prognoze izradjuju prognostičke karte raspodjele tlaka zraka i geopotencijala, a ne i vjetera. Iz prognostičkih karata raspodjele tlaka zraka, odnosno geopotencijala, moguće je dobiti samo geostrofski vjetar, koji se temelji na pretpostavci da je divergencija jednaka nuli.

Vertikalne brzine za potrebe prognoze izračunavaju se po jednadžbi vrtložnosti primijenjenoj na prognozirano polje geopotencijala. Međutim, ova izračunavanja su dosta glomazna pa se izvode samo u većim prognostičkim centrima koji raspolažu elektronskim računarima. Manji centri pomoću faksimila primaju od većih centara gotove karte prognoziranih vertikalnih brzina.

Pošto manji prognostički centri ne mogu primiti prognostičke karte vertikalnih brzina za sve nivoe za koje su zainteresirani, oni moraju koristiti metodu interpolacije za izračunavanje na drugim nivoima. U tu svrhu koriste se pretpostavke da je vertikalna brzina na gornjoj i donjoj granici atmosfere jednaka nuli, a na nedivergentnom nivou ima svoj maksimum. Na osnovu ovih pretpostavki *Estoque* /1/ je formulirao model vertikalne brzine u atmosferi kao polufaznu sinus funkciju slijedećeg oblika:

$$\omega(x,y,p,t) = \sqrt{2}\omega_m(x,y,t)\sin\left(\frac{\pi}{2}\frac{p_0 - p}{p_0 - p_L}\right) \quad (3.1)$$

U ovoj jednadžbi p_0 označava tlak zraka na morskoj razini, p_L tlak zraka na nedivergentnoj visini, a indeks m se odnosi na srednju visinu gdje je:

$$p_m = \frac{1}{2}(p_0 + p_L)$$

Uobičajeno je da se 500 mb nivo smatra nedivergentnom visinom. To znači da će na toj visini vertikalna brzina imati svoj maksimum. Prema tome, ako raspolažemo sa vrijednostima vertikalnih brzina na 500 mb, koje ćemo označiti sa ω_L , jednadžbu (3.1) možemo pisati:

$$\omega(x, y, p, t) = \omega_L(x, y, t) \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p}{p_0 - p_L} \right) \quad (3.2)$$

Po ovoj jednadžbi možemo na osnovu samo jednog podatka o vertikalnoj brzini izračunati vrijednost vertikalne brzine na bilo kom nivou od donje do gornje granice atmosfere. U slučaju da se ne raspolaže s podatkom o vertikalnoj brzini na nedivergentnom nivou, već na nekom drugom nivou, problem je lako rješiv. Naime, po istoj jednadžbi može se pomoću vertikalne brzine na nekoj visini p dobiti maksimalna brzina na nedivergentnoj visini.

Najzad, ako raspolažemo prizemnom prognostičkom kartom koja daje raspodjelu tlaka zraka na morskoj razini i prognostičkom kartom vertikalnih brzina na 500 mb, možemo izračunati ukupnu vertikalnu brzinu na nekom nivou p_n . To se postiže zbrojem opće komponente vertikalne brzine ω_a i dodatne komponente uslovljene oblicima orografije i polja vjetra u prizemlju, tj.

$$\omega_{p_n} = \omega_s + \omega_a$$

Zamjenom ω_s iz jednadžbe (2.10) i ω_a iz jednadžbe (3.2) dobijamo:

$$\omega_{p_n} = 10^{-2} \left[a_{ij} (p_{i+1, j} - p_{i-1, j}) + b_{ij} (p_{i, j+1} - p_{i, j-1}) \right] + \left[\omega_L \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{p_0 - p}{p_0 - p_L} \right) \right]_{ij} \quad (3.3)$$

gdje indeksi i, j označavaju točke mreže u kojima se izračunava.

4. Odnos vertikalne komponente brzine i statičke stabilnosti atmosfere

Vertikalna komponenta brzine u slobodnoj atmosferi uglavnom je u suglasnosti sa statičkom stabilnošću atmosfere. Tako, npr. u oblastima gdje je atmosfera statički stabilna postoji spuštanje a u oblastima gdje je atmosfera statički nestabilna dizanje zraka. Brzina ovog općeg spuštanja, odnosno dizanja zraka, srazmjerna je stupnju statičke stabilnosti, odnosno nestabilnosti atmosfere.

S vertikalnom komponentom brzine prouzrokovanom orografskim preprekama stvar stoji drukčije. Pri istoj brzini i smjeru

horizontalnog strujanja na jednu orografsku prepreku vertikalna komponenta brzine će se pri različitim stanjima atmosfere veoma mnogo razlikovati. Kada je atmosfera izrazito stabilna potreban je velik iznos energije da bi se zrak dizao. Zbog toga se u takvim situacijama zrak ne diže uz orografsku prepreku već obilazi oko nje. U drugom pak slučaju, kada je atmosfera statički labilna ili indiferentna, zrak se diže i prebacuje preko orografske prepreke bez utroška energije (*Radinović /7/ i /10/*).

Da bismo dobili stvarnu vertikalnu brzinu uvjetovanu orografskom preprekom potrebno je pored horizontalne brzine i kuta pod kojim vjetar puše na orografsku prepreku nagiba i same prepreke uzeti u obzir i statičku stabilnost atmosfere. U tom slučaju poći ćemo od izraza za statičku stabilnost atmosfere (*Gates/3/*).

$$\sigma = -\frac{\alpha}{g\theta} \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

gdje je α specifični volumen, a θ potencijalna temperatura zraka. S obzirom na diferencijaciju potencijalne temperature gornji izraz možemo pisati:

$$\sigma = -\frac{\alpha}{g} \left(\frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial p} - \frac{R}{c_p} \frac{1}{p} \right)$$

Zamjenom α iz jednadžbe stanja ovaj izraz postaje:

$$\sigma = -\frac{RT}{gp} \left(\frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial p} - \frac{R}{c_p} \frac{1}{p} \right) \quad (4.1)$$

Za izračunavanje vertikalne brzine uvjetovane orografskom preprekom potrebno je uzeti u račun statičku stabilnost atmosfere u sloju od podnožja do vrha planinskog masiva koji se nalazi unutar razmatrane oblasti. Ako u oblasti za koju izračunavamo vertikalne brzine postoje meteorološke stanice u podnožju i na vrhu planine, tada možemo meteorološke elemente sa stanice u podnožju obilježiti indeksom D, a sa stanice na vrhu indeksom G. U tom slučaju možemo pisati

$$T = \frac{T_D + T_G}{2} ; \quad p = \frac{p_D + p_G}{2} ; \quad \frac{\partial T}{\partial p} \approx \frac{\Delta T}{\Delta p} = \frac{T_D - T_G}{p_D - p_G}$$

pa jednadžba (4.1) dobija oblik:

$$\sigma = -\frac{R(T_D + T_G)}{g(p_D + p_G)} \cdot \left(\frac{2}{T_D + T_G} \cdot \frac{T_D - T_G}{p_D - p_G} - \frac{R}{c_p} \cdot \frac{2}{p_D + p_G} \right)$$

odnosno:

$$\sigma = -\frac{2R}{g(p_D + p_G)} \cdot \left(\frac{T_D - T_G}{p_D - p_G} - \frac{R}{c_p} \frac{T_D + T_G}{p_D + p_G} \right) \quad (4.2)$$

S obzirom da je zbroj temperatura, odnosno tlak zraka stanice u podnožju i stanice na vrhu planina znatno manje promjenljiv od razlike istih elemenata, možemo pisati:

$$\bar{T} \approx \frac{\bar{T}_D + \bar{T}_G}{2} \quad i \quad \bar{p} \approx \frac{\bar{p}_D + \bar{p}_G}{2}$$

gdje su \bar{T} i \bar{p} srednje vrijednosti u odgovarajućem periodu godine. Tako sada jednadžbu (4.2) možemo pisati u obliku:

$$\sigma = - \frac{R}{g} \left(\frac{T_D - T_G}{p_D - p_G} - \frac{R}{c_p} \cdot \frac{\bar{T}}{\bar{p}} \right) \quad (4.3)$$

U određenoj orografskoj oblasti i u određeno doba godine možemo smatrati da je:

$$\frac{R}{g} \approx \text{const} \quad i \quad \frac{\bar{T}}{\bar{p}} \approx \text{const},$$

a kako je:

$$\frac{R}{c_p} = 0,29 \quad i \quad \gamma = \frac{T_D - T_G}{p_D - p_G},$$

to jednadžbu (4.3) možemo pisati:

$$\sigma = k(10\gamma - 1)m^{-3}sec^{-4},$$

gdje je $k = -0,1 \frac{R}{g\bar{p}}$.

Najzad, ako označimo:

$$S = \frac{g}{k} + 1 = 10\gamma,$$

tada vezu između statičke stabilnosti atmosfere i vertikalne brzine ω_s , uvjetovane orografskom preprekom, možemo izraziti sa:

$$\omega_s = \omega_g S \quad (4.4)$$

gdje ω_g označava vertikalnu brzinu koja se dobija jednostavno geometrijski iz vektora vjetra i nagiba terena, a ω_s stvarnu vertikalnu brzinu koja se dobija korekcijom geometrijske vertikalne brzine u funkciji statičke stabilnosti atmosfere.

Analizom veličine S vidimo, da će u slučaju kad je atmosfera u indiferentnom stanju biti $S = 1$, u stanju statičke stabilnosti $S < 1$, a kod statičke labilnosti $S > 1$. To znači, da će u indiferentnoj atmosferi vertikalna komponenta biti jednaka geometrijskoj vertikalnoj brzini. U stabilnoj atmosferi ona će biti smanjena a u labilnoj povećana proporcionalno stupnju statičke stabilnosti, odnosno labilnosti atmosfere.

Kod izračunavanje statičke stabilnosti u oblasti većih planinskih masiva treba imati u vidu činjenicu, da se vrlo često stratifikacija atmosfere na jednoj strani planine znatno razlikuje od stratifikacije na drugoj strani planinskog masiva. Stoga statičku stabilnost u takvoj oblasti treba odrediti na svakoj strani posebno.

5. Jednadžba modela za prognozu količine oborina

Pretpostavimo li da je individualna promjena specifične vlage zraka q jednaka razlici između isparavanja E i kondenzacije vođene pare P u jedinici mase, tj:

$$\dot{q} = \dot{E} - \dot{P}$$

ili u sistemu p :

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + \omega \frac{\partial q}{\partial p} = \dot{E} - \dot{P} \quad (5.1)$$

tada integracijom ove jednadžbe u granicama od p_s do p_n u određenom intervalu vremena dt , dobija se:

$$P = E - \frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} \frac{\partial q}{\partial t} dp - \frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} u \frac{\partial q}{\partial x} dp - \frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} v \frac{\partial q}{\partial y} dp - \frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} \omega \frac{\partial q}{\partial p} dp \quad (5.2)$$

U slučaju kada je ω u sloju od p_s do p_n pozitivno (spuštanje zraka), tada nema kondenzacije ili je zanemarljivo mala ($P \approx 0$), pa imamo da je:

$$E = \frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} \frac{\partial q}{\partial t} dp + \frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} u \frac{\partial q}{\partial x} dp + \frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} v \frac{\partial q}{\partial y} dp \quad (5.3)$$

Kada postoji oborinska zona iznad veće oblasti, zrak je zasićen vodenom parom u sloju od zemljine površine do gornje granice oblačnog sloja, odnosno do visine p_n . U takvim slučajevima isparavanje je veoma malo u usporedbi sa kondenzacijom. To znači, da je i zbroj članova na desnoj strani jednadžbe (5.3) također zanemarljivo mali. Prema tome iz jednadžbe (5.2) slijedi da je:

$$P = - \frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} \omega \frac{\partial q}{\partial p} dp \quad (5.4)$$

Iz ove jednadžbe vidimo, da ako znamo raspodjelu vertikalne brzine i specifične vlage zraka u sloju od zemljine površine do visine p_n možemo izračunati srednju vrijednost vertikalne brzine i vertikalnog gradijenta specifične vlage zraka i na taj način izračunati količinu oborina P .

Izračunavši vertikalnu brzinu na zemljinoj površini i divergenciju u slojevima između standardnih izobarnih nivoa, možemo po jednadžbi (2.11) izračunati vertikalne brzine na svim standardnim nivoima. Praktično rješavanje ove jednadžbe može se vidjeti u radu *Radinović-Mesinger /11/*. Isto tako, ako se raspoložive prognostičke kartama raspodjele tlaka zraka na morskoj razini i vertikalne brzine na 500 mb, možemo po jednadžbi (3.3) dobiti prognoziranu vrijednost vertikalne brzine na svim standardnim izobarnim plohama.

Radi jednostavnijeg razmatranja zamislimo oblast gdje nema orografskih efekata ($p_s = p_0$) i izaberimo izobarne nivoe tako, da je razlika u tlaku zraka (Δp) između bilo koja dva susjedna nivoa jednaka. Tada jednadžbu (5.4) možemo pisati:

$$P = - \frac{p_0 - p_n}{2gn\Delta p} \left[(\omega_0 + \omega_1) (q_0 - q_1) + (\omega_1 + \omega_2) (q_1 - q_2) + \dots \right. \\ \left. \dots + (\omega_{n-1} + \omega_n) (q_{n-1} - q_n) \right]$$

a kako je:

$$\frac{p_0 - p_n}{\Delta p} = n$$

imamo:

$$P = - \frac{1}{2g} \left[(\omega_0 + \omega_1) (q_0 - q_1) + (\omega_1 + \omega_2) (q_1 - q_2) + \dots \right. \\ \left. \dots + (\omega_{n-1} + \omega_n) (q_{n-1} - q_n) \right] \quad (5.5)$$

odnosno:

$$P = -\frac{1}{2g} \left[\omega_0 (q_0 - q_1) + \sum_{k=1}^{n-1} \omega_k (q_{k-1} - q_{k+1}) + \omega_n (q_{n-1} - q_n) \right]$$

za $k = 1, 2, \dots, n-1$.

Kako je na morskome nivou i u oblastima na zemljinoj površini gdje nema utjecaja orografije $\omega_0 = 0$, to za takav slučaj konačno imamo:

$$P = -\frac{1}{2g} \left[\sum_{k=1}^{n-1} \omega_k (q_{k-1} - q_{k+1}) + \omega_n (q_{n-1} - q_n) \right] \quad (5.6)$$

Koristeći podatke o divergenciji na izobarnim nivoima možemo jednadžbu (5.5) po formuli (2.2) izraziti u obliku:

$$P = -\frac{1}{2g} \left[2\omega_0 (q_0 - q_n) + \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} (q_k + q_{k+1}) \Delta p - \sum_{k=0}^n (\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}) q_n \Delta p \right] \quad (5.7)$$

Kada se to odnosi na morsku razinu ili na oblasti gdje nema utjecaja orografije, ova jednadžba postaje:

$$P = -\frac{1}{2g} \left[\sum_{k=0}^{n-1} \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} (q_k + q_{k+1}) - \sum_{k=0}^n (\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}) q_n \right] \Delta p \quad (5.8)$$

U slučaju kad je p_n dovoljno malo, gdje je $q_n \approx 0$, posljednji član jednadžbe iščezava, pa sa dovoljnom točnošću možemo pisati:

$$P = -\frac{1}{4g} \sum_{k=0}^{n-1} (\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}) (q_k + q_{k+1}) \Delta p$$

Ovo je osnovna jednadžba našeg modela za izračunavanje količina oborina i, kao što se već na prvi pogled može zaključiti, ona ima dosta pogodan oblik za praktično korišćenje.

6. Orografski utjecaji u modelu za prognozu količine oborina

U oblastima gdje se pri horizontalnom strujanju zraka javlja vertikalna komponenta kao posljedica neravnina na zemljinoj površini, jednadžba (5.6) će imati oblik:

$$P = - \frac{1}{g} \int_{P_n}^{P_s} (\omega_a + \omega_s) \frac{\partial q}{\partial p} dp$$

ili:

$$P = \frac{1}{g} \int_{P_n}^{P_s} \omega_a \frac{\partial q}{\partial p} dp - \frac{1}{g} \int_{P_n}^{P_s} \omega_s \frac{\partial q}{\partial p} dp \quad (6.1)$$

gdje ω_s predstavlja dodatnu komponentu vertikalne brzine, a ω_a vertikalnu komponentu brzine koja odgovara općem dizanju zraka u atmosferi, odnosno vertikalnim kretanjima velikih razmjera.

Zamjenom ω_s iz jednadžbe (2.10) drugi član na desnoj strani jednadžbe (6.1) postaje:

$$\frac{1}{g} \int_{P_n}^{P_s} \omega_s \frac{\partial q}{\partial p} dp = - \frac{10^{-2}}{g} \int_{P_n}^{P_s} a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + p_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \frac{\partial q}{\partial p} dp$$

Izraz pod integralom u zagradi predstavlja vertikalnu brzinu na zemljinoj površini, uvjetovanu prizemnim strujanjem i oblicima orografije. Ova brzina, prema Pichleru i Deuneru /6/ opada s visinom u funkciji:

$$\gamma(p) = \left(\frac{p_n}{p_s} \right)^{\alpha}$$

gdje je $\alpha \approx 4$. Ako za srednju vertikalnu brzinu u sloju p_s do p_n pišemo:

$$\bar{\omega} = B\omega_s \quad \text{gdje je} \quad B = \frac{p_s^4 + p_n^4}{2p_s^4}$$

posljednju jednadžbu možemo integrirati, pa dobijamo:

$$-\frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} \omega_s \frac{\partial q}{\partial p} dp = -\frac{10^{-5}}{g} \left[a_{ij}(p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + \right. \\ \left. + b_{ij}(p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] B(q_s - q_n)$$

Ovdje je q u g/kg, a p u mb.

Sažimanjem konstanta g i B u jednu, drugi član na desnoj strani jednadžbe (4.1) dobija konačno oblik:

$$-\frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} \omega_s \frac{\partial q}{\partial p} dp = -10^{-5} D \left[a_{ij}(p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + \right. \\ \left. + b_{ij}(p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] (q_s - q_n)$$

gdje je $D = \frac{B}{g}$; za $p_n = 100$ mb, a $B \approx 0,5$, biće $D \approx 0,05$. Tako će drugi član na desnoj strani jednadžbe (6.1) imati oblik:

$$-\frac{1}{g} \int_{p_n}^{p_s} \omega_s \frac{\partial q}{\partial p} dp = -10^{-7} \cdot 5 \left[a_{ij}(p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + \right. \\ \left. + b_{ij}(p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] (q_s - q_n)$$

Kad se, s obzirom na jednadžbu (6.1), utjecaj orografije uvrsti u jednadžbe (5.6) i (5.8) one dobijaju oblik:

$$\begin{aligned}
 P = & -5 \cdot 10^{-5} \left\{ \left[\sum_{k=1}^{n-1} \omega_k (q_{k-1} - q_{k+1}) + \omega_n (q_{n-1} - q_n) \right] + \right. \\
 & + 10^{-2} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - \right. \\
 & \left. \left. - p_{i,j-1}) \right] (q_s - q_n) \right\} \quad (6.2)
 \end{aligned}$$

odnosno:

$$\begin{aligned}
 P = & -5 \cdot 10^{-3} \left\{ \left[\sum_{k=0}^{n-1} \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} (q_k + q_{k+1}) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \sum_{k=0}^n (\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}) q_n \right] \Delta p + 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] (q_s - q_n) \right\} \quad (6.3)
 \end{aligned}$$

ili s pretpostavkom da je $q_n \approx 0$, imamo:

$$\begin{aligned}
 P = & -5 \cdot 10^{-3} \left\{ \left[\sum_{k=0}^{n-1} \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} (q_k + q_{k+1}) \right] \Delta p + \right. \\
 & \left. + 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] q_s \right\} \quad (6.4)
 \end{aligned}$$

Posljednja jednadžba predstavlja opći oblik jednadžbe modela za prognozu oborina pod naprijed navedenim uvjetima.

Vertikalna brzina koja figurira u jednadžbi modela javlja se kao funkcija raspodjele tlaka zraka na morskom nivou i oblika standardnih izobarnih ploha. Zbog toga dinamički efekti vezani za frontalne površine ne mogu doći do izražaja ukoliko nisu ispoljeni kroz oblik izobarnih ploha. Isto tako, iz jednadžbe

(6.4) slijedi, da u slučaju kada se u prizemlju javi bezgradijentno polje, posljednji član iščezava, pa je orografski efekt jednak nuli. Ovo je razumljivo, pošto u takvoj situaciji nema strujanja, pa ne može biti ni vertikalne komponente uslovljene orografijom.

7. Odredjivanje specifične vlage zraka u modelu pomoću rosišta

Specifična vlaga zraka je veličina koja se ne mjeri direktno već se dobija izračunavanjem iz drugih lakše mjerljivih veličina. Sadržaj vlage u zraku na standardnim izobarnim nivoima, koji se daje u TEMP i MESRAN izvještajima, davan je do 1. siječnja 1968. godine pomoću temperature rosišta (T_d). Od 1. siječnja 1968. godine vlaga zraka se izražava razlikom između temperature i rosišta (DD). Stoga ćemo u prednje jednadžbe specifičnu vlagu zraka zamijeniti rosištem. Ovu zamjenu ćemo izvesti na slijedeći način:

Specifična vlaga zraka po definiciji je:

$$q = 0,622 \frac{e}{p} \quad (7.1)$$

gdje je e tlak vodene pare, a p tlak zraka.

Rosište je funkcija samo tlaka vodene pare, pa za rosište, za koje je stvarni tlak vodene pare maksimalan, postoji slijedeći odnos:

$$e = 6,1 \cdot 10^{8,61 \frac{t_d}{273 + t_d}}$$

U suglasnosti s *Clausius-Clapeyronovom* jednadžbom ako se tlak vodene pare promijeni za de pri promjeni tlaka za dp rosište će se promijeniti za:

$$\frac{dT_d}{dp} = \frac{T_d}{eA_d} \frac{de}{dp} \quad (7.2)$$

gdje je A_d količnik između ukupne i vanjske toplote isparavanja. Vrijednost A_d zavisi samo od temperature i srazmjerno se malo mijenja s promjenom temperature. U praktičnim računanjima uzima se s dovoljnom tačnošću da je $A_d = 20$.

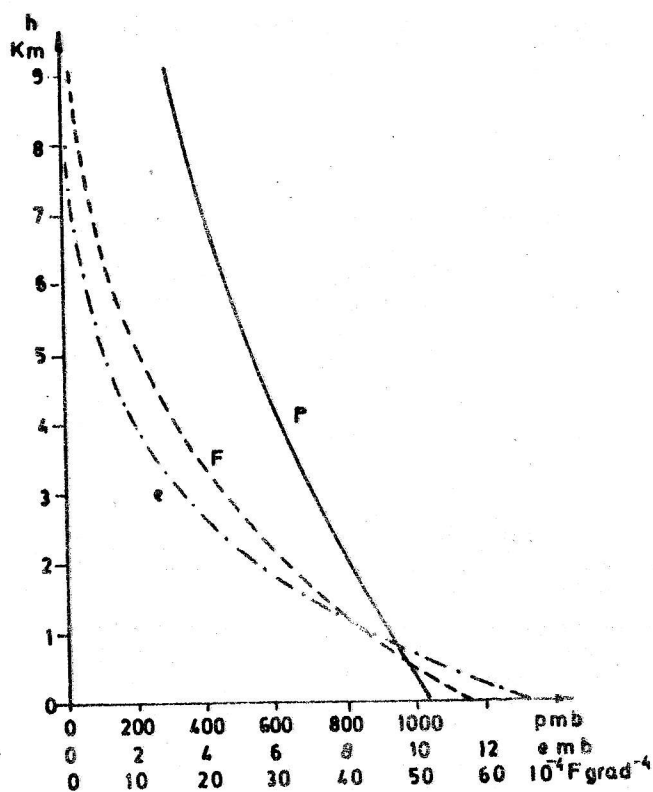
Diferenciranjem jednadžbe (7.1) po p imamo:

$$\frac{dq}{dp} = q \left(\frac{1}{e} \frac{de}{dp} - \frac{1}{p} \right)$$

Poslije zamjene izraza za vodenu paru s rosištem iz jednadžbe (7.2) biće:

$$\frac{dq}{dp} = 0,622 \frac{eA_d}{pT_d} \frac{dT_d}{dp} - \frac{0,622e}{p^2} \quad (7.3)$$

Izraz $\frac{eA_d}{pT_d}$ se mijenja s visinom ali je njegova promjena znatno manja od promjene rosišta, što se jasno vidi iz slike 4. Zbog toga ovaj izraz možemo u prvoj aproksimaciji smatrati konstantom



Sl. 4. Zavisnost veličina F o raspodjeli tlaka zraka i vodene pare s visinom

i pisati:

$$F_k = 0,622 \frac{e_k A_k}{p_k T_{dk}} = \text{const} \quad (7.4)$$

odnosno:

$$\frac{dq_k}{dp} = F_k \frac{dT_{dk}}{dp} - \frac{0,622e}{p^2}$$

gdje k označava određeni izobarni nivo.

Drugi član na desnoj strani posljednje jednačbe je za oko dva reda veličine manji od prvog pa se može zanemariti. Tako jednačba (7.3) dobija oblik:

$$\frac{dq_k}{dp} = F_k \frac{dT_{dk}}{dp}$$

i zamjenom u jednačbi (6.3) najzad imamo:

$$P = -5 \cdot \left\{ \left[\sum_{k=0}^{n-1} F_k \frac{V \cdot \vec{v}_k + V \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} (T_{dk} + T_{dk+1}) - \sum_{k=0}^n F_k (V \cdot \vec{v}_k + V \cdot \vec{v}_{k+1}) T_{dn} \right] \Delta p + 10^{-4} F_s [a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1})] (T_{ds} - T_{dn}) \right\} \quad (7.5)$$

Ovdje je T_d računato u Kelvinovim stupnjevima a p u mb. Zamjenom u jednačbi (6.4), koja predstavlja skraćeni oblik posljednje jednačbe biće:

$$P = -5 \cdot \left\{ \left[\sum_{k=0}^{n-1} F_k \frac{V \cdot \vec{v}_k + V \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} (T_{dk} + T_{dk+1}) \right] \Delta p + 10^{-4} F_s [a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1})] T_{ds} \right\} \quad (7.6)$$

U praktičnim računanjima mogu se za F_k uzeti slijedeće približne vrijednosti:

$$F_0 = 5,6 \cdot 10^{-4}, \quad F_1 = 3,6 \cdot 10^{-4}, \quad F_2 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ grad}^{-1}$$

$$F_3 = 0,8 \cdot 10^{-4}, \quad F_4 = 0,4 \cdot 10^{-4}, \quad F_5 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ grad}^{-1}$$

8. Određivanje specifične vlage zraka pomoću tlaka vodene pare i deficita vlage zraka

U mjesečnim i godišnjim izvještajima, kao i u drugoj meteorološkoj dokumentaciji, sadržaj vodene pare izražava se naponom, odnosno tlakom vodene pare i deficitom vlage zraka. Zbog toga ćemo u jednadžbama modela za prognozu količine oborina izraziti specifičnu vlagu zraka pomoću tlaka vodene pare i deficita vlage zraka, kako bismo omogućili korišćenje tog vida podataka u našem modelu.

Deficit vlage zraka je definiran razlikom između maksimalnog tlaka vodene pare (e_w), kojeg bi zrak mogao imati pri datoj temperaturi i tlaku zraka i stvarnog tlaka vodene pare (e) koju zrak sadrži u datom trenutku vremena, tj.:

$$D = e_w - e \quad (8.1)$$

Pošto nas za naš model interesira specifična vlaga q to iz definicije specifične vlage imamo, da je:

$$e = \frac{qp}{0,622}$$

a zamjenom u izrazu (8.1) i rješenjem po q dobijamo:

$$e = \frac{0,622}{p}(e_w - D) \quad (8.2)$$

Iz Clausius-Clapeyronove jednadžbe, koja nam daje promjenu tlaka zasićene vodene pare s temperaturom, imamo:

$$e_w = 6,1 \cdot 10^{\frac{ML}{273} \cdot \frac{t}{R_v(273+t)}}$$

gdje je M modul Briggsovih logaritama, L latentna toplina isparavanja, R_v plinska konstanta vodene pare i t temperatura zraka u Celsiusovim stupnjevima. Prve tri veličine mogu se smatrati konstantama, pa kad se zamijene odgovarajućim brojnim vrijednostima dobijamo:

$$e_w = 6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t}{273 + t}}$$

Poslije zamjene u (8.2) imamo:

$$q = \frac{0,622}{p} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t}{273 + t}} - D \right) \quad (8.3)$$

Otuda vidimo, da možemo specifičnu vlagu izraziti pomoću temperature i deficita vlage za svaki određeni izobarni nivo.

Ako u jednadžbu za prognozu oborina (6.3) umjesto specifične vlage q uvrstimo izraz na desnoj strani jednadžbe (8.3) dobićemo:

$$\begin{aligned} P = & - 3,11 \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} \left[\frac{1}{p_k} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t}{273 + t}} - D_k \right) + \right. \right. \\ & + \left. \frac{1}{p_{k+1}} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_{k+1}}{273 + t_{k+1}}} - D_{k+1} \right) \right] \Delta p - \sum_{k=0}^n (\nabla \cdot \vec{v}_k + \\ & + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}) \frac{1}{p_n} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_n}{273 + t_n}} - D_n \right) \Delta p + 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - \right. \\ & - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \left. \right] \cdot \\ & \cdot \left. \left[\frac{1}{p_s} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_s}{273 + t_s}} - D_s \right) - \frac{1}{p_n} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_n}{273 + t_n}} - D_n \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (8.4)$$

Ovdje je t u Celsiusovim stupnjevima a p i D u mb. S pretpostavkom da je $q_n \approx 0$ biće:

$$\begin{aligned}
 P = & - 3,11 \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} \left[\frac{1}{p_k} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_k}{273 + t_k}} - D_k \right) + \right. \right. \\
 & + \frac{1}{p_{k+1}} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_{k+1}}{273 + t_{k+1}}} - D_{k+1} \right) \Delta p + 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - \right. \\
 & - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \left. \right] \cdot \\
 & \left. \left. \cdot \left[\frac{1}{p_s} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_s}{273 + t_s}} - D_s \right) \right] \right\} \quad (8.5)
 \end{aligned}$$

Prognoistička jednadžba za prognozu količine oborina, u kojoj umjesto divergencije koristimo prognoziranu vertikalnu brzinu po jednadžbi (3.1), poslije zamjene q u jednadžbi (6.2) dobiće oblik:

$$\begin{aligned}
 P = & - 3,11 \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p}{p_0 - p_L} \right) \left[\frac{1}{p_{k-1}} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_{k-1}}{273 + t_{k-1}}} - D_{k-1} \right) - \right. \right. \\
 & - \frac{1}{p_{k+1}} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_{k+1}}{273 + t_{k+1}}} - D_{k+1} \right) \left. \right] \omega_L + \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \right. \\
 & \left. \cdot \frac{p_0 - p_n}{p_0 - p_L} \right) \left[\frac{1}{p_{n-1}} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_{n-1}}{273 + t_{n-1}}} - D_{n-1} \right) - \right. \\
 & - \frac{1}{p_n} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_n}{273 + t_n}} - D_n \right) \left. \right] \omega_L + 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \Big] \cdot \\
 & \cdot \left[\frac{1}{p_s} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_s}{273 + t_s}} - D_s \right) - \frac{1}{p_n} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_n}{273 + t_n}} - D_n \right) \right] \Big\}
 \end{aligned}
 \tag{8.6}$$

Da bismo riješili ovu jednadžbu potrebno je da raspolažemo s prognoziranim vrijednostima temperature i deficita vlage na svim standardnim nivoima koje koristimo u našem modelu. Prognoziranje vrijednosti ovih veličina moguće je dobiti advekcijom izoterma i izolinija deficita vlage na standardnim izobarnim nivoima. Na taj način posljednja jednadžba se može praktično koristiti za prognozu količine oborina.

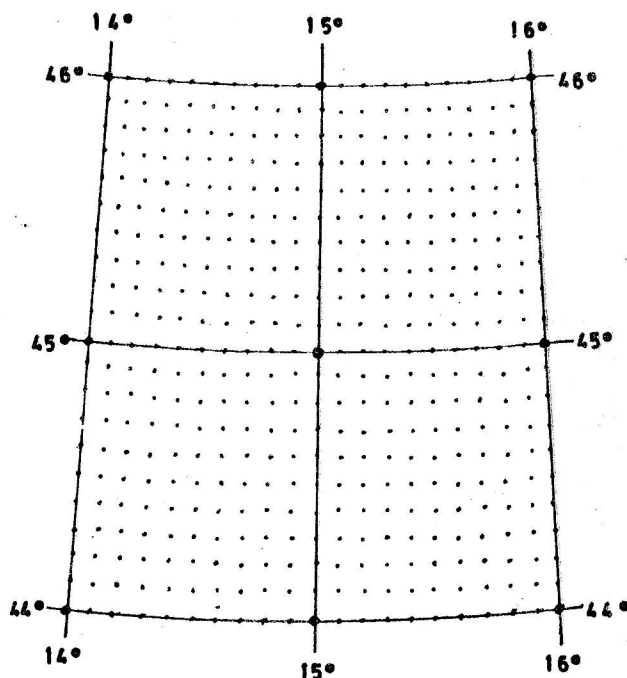
9. Interpolacija u gustoј mreži točaka

Da bi se izračunavale količine oborina u funkciji vertikalne komponente brzine, koja predstavlja opće dizanje zraka u atmosferi i oblika reljefa, potrebno je koristiti gustu mrežu točaka. Što je mreža točaka u kojima se izračunava količina oborina gušća, to će uticaj orografije biti preciznije uzet u obzir.

Medjutim, gustoća aeroloških stanica, na kojima se izvode mjerenja u slobodnoj atmosferi, je znatno manja od gustoće točaka prikazanih na slikama 1, 2 i 3. Zbog toga nema smisla da se vrijednosti veličina, koje se izračunavaju iz aeroloških podataka, računaju u gustoј mreži točaka. U ovom slučaju problem se rješava tako što se vrijednosti meteoroloških elemenata u slobodnoj atmosferi, dobijenih radiosondažnim mjerenjima, izračunavaju u rijetkoј mreži točaka, a zatim interpolacijom prenose u gustu mrežu točaka. Na sl. 5 prikazan je odnos između rijetke i guste mreže točaka.

S obzirom da se točke u gustoј mreži točaka nalaze na rastojanju od svega $0,1^\circ$ geografske širine i $0,1^\circ$ geografske dužine, to je konvergencija meridijana na tako malom rastojanju zanemarljivo mala. Stoga ćemo četverokut kojeg čine četiri susjedne točke mreže smatrati pravokutnikom. To isto ćemo učiniti i sa rijetkom mrežom točaka, računajući s nešto većom greškom, pošto se u njoj točke nalaze na većem rastojanju.

Prednja aproksimacija omogućuje da na osnovu vrijednosti u rijetkoј mreži točaka primjenom metoda interpolacije izračunamo vrijednosti u gustoј mreži točaka. Poznavajući vrijednosti nekog elementa u četiri susjedne točke rijetke mreže, koje



Sl. 5. Odnos izmedju rijetke i guste mreže točaka

tvore pravokutnik, mogu se dobiti vrijednosti u bilo kojoj točki unutar tog pravokutnika linearnom interpolacijom u dva međusobno normalna pravca. To se izvodi po jednadžbi drugog stupnja:

$$H = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy \quad (9.1)$$

U geometrijskom smislu ova jednadžba opisuje površinu drugog stupnja (hiperboloïd), lineariziranu u pravcima paralelnim površinama (x, H) i (y, H) .

Radi jednostavnosti smatraćemo da razmaci izmedju točaka rijetke mreže predstavljaju jedinične odsječke na osima x (paralela) i y (meridijan). Ako sada početak koordinatnog sistema postavimo u donji lijevi ugao razmatranog pravokutnika, koeficijenti u jednadžbi (9.1), koji su povezani s vrijednostima H u tjemenu pravokutnika, određeni su slijedećim odnosima:

$$a_{00} = H_{00}$$

$$a_{10} = H_{10} - H_{00}$$

$$a_{01} = H_{01} - H_{00}$$

$$a_{11} = H_{11} + H_{00} - H_{10} - H_{01}$$

Indeksi uz H označavaju tjemena pravokutnika. Zamjenom ovih koeficijenata u jednadžbi (9.1) dobijamo jednadžbu bilinearne interpolacije u obliku:

$$H = H_{00}(1-x)(1-y) + H_{10}x(1-y) + H_{01}y(1-x) + H_{11}xy \quad (9.2)$$

U ovoj jednadžbi x i y predstavljaju koordinate koje se zamjenjuju vrijednostima t/m , odnosno t/n . Ovdje m označava broj intervala na koji je podijeljen razmak između dvije točke rijetke mreže pri prelasku na gustu mrežu točaka i to na osi x , a n znači isto to samo na osi y . Sa t je označen redni broj intervala za koji se provodi interpolacija u razmaku od 0 do m , odnosno n .

U našem slučaju brojevi m i n imaju vrijednost 10, tj. razmaci između rijetke mreže točaka duž osi x i y podijeljeni su na deset jednakih intervala. Ovdje treba imati u vidu da su intervali na osima x i y brojno jednaki kad se izražavaju u metrima ili nekim drugim dužinskim jedinicama.

10. Rješenja jednadžbi modela analitičkim i numeričkim metodama

Analizirajmo jednadžbu (5.4) za izračunavanje količine oborina:

$$P = -\frac{1}{g} \int_{P_n}^P \omega \frac{\partial q}{\partial p} dp = -\frac{1}{g} \int_{P_n}^P (\omega_a + \omega_s) \frac{\partial q}{\partial p} dp$$

ili u razvijenom obliku prikazanom u jednadžbi (8.4):

$$P = -3,11 \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} \left[\frac{1}{P_k} \left(6,11 \cdot 10 \frac{8,61t_k}{273 + t_k} - D_k \right) - \frac{1}{P_{k+1}} \left(6,1 \cdot 10 \frac{8,61t_{k+1}}{273 + t_{k+1}} - D_{k+1} \right) \right] \Delta p - \sum_{k=0}^n (\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}) \frac{1}{P_n} \left(6,1 \cdot 10 \frac{8,61t_n}{273 + t_n} - D_n \right) \Delta p + \right.$$

$$+ 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \cdot \\ \cdot \left[\frac{1}{p_s} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_s}{273 + t_s}} - D_s \right) - \frac{1}{p_n} \left(6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_n}{273 + t_n}} - D_n \right) \right] \cdot S \}$$

Radi preglednosti stavićemo da je:

$$E_k = 6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_k}{273 + t_k}}$$

pa će gornja jednačba izgledati:

$$P = -3,11 \left\{ \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} \left[\frac{1}{p_k} (E_k - D_k) + \frac{1}{p_{k+1}} (E_{k+1} - D_{k+1}) \right] \Delta p - \right. \\ \left. - \sum_{k=0}^n (\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}) \frac{1}{p_n} (E_n - D_n) \Delta p + 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - \right. \right. \\ \left. \left. - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \cdot \left[\frac{1}{p_s} (E_s - D_s) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{p_n} (E_n - D_n) \right] S \right\} \quad (10.1)$$

Zamislimo jedno idealizirano stanje atmosfere. Neka vertikalna brzina u atmosferi monotono raste od zemljine površine do nivoa 500 mb, tako da je:

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} = -10^{-4} \text{ sec}^{-1}$$

što odgovara promjeni vertikalne brzine od 10 cm sec⁻¹ na 100 mb. Tada je divergencija u cijelom sloju od zemljine površine do nivoa 500 mb konstantna. Pretpostavimo li dalje, da maksimalni tlak vodene pare na nivou 1000 mb iznosi 10 mb i da se s visinom smanjuje dvostruko brže od smanjenja tlaka zraka u istom smjeru. Najzad možemo još pretpostaviti, da je atmosfera

zasićena vodenom parom od zemljine površine do visine 500 mb, tj. da je u tom dijelu atmosfere deficit vlage zraka $D = 0$. U ovako opisanoj atmosferi prvi dio desne strane jednadžbe (10.1), koji se nalazi unutar velikih zagrada, imao bi slijedeći oblik:

$$P_I = -3,11 \left(\frac{E_0}{P_0} + 2 \frac{E_1}{P_1} + 2 \frac{E_2}{P_2} + 2 \frac{E_3}{P_3} + 2 \frac{E_4}{P_4} + \frac{E_5}{P_5} - 10 \frac{E_5}{P_5} \right) \nabla \cdot \vec{v} \cdot \Delta p \quad (10.2)$$

Kako je:

$$\frac{E_0}{P_0} = 2 \frac{E_1}{P_1} = 4 \frac{E_2}{P_2} = 8 \frac{E_3}{P_3} = 16 \frac{E_4}{P_4} = 32 \frac{E_5}{P_5} = 10^{-2};$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 10^{-4} \text{sec}^{-1}; \quad \Delta p = -10^2 \text{mb}$$

to će biti:

$$P_I = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{kg m}^{-2} \text{sec}^{-1}$$

odnosno

$$P_I = 3 \text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$$

To znači, da bi se pri zamišljenom stanju atmosfere zbog općeg dizanja i pri tom adijabatskog hladjenja zraka kondenziralo i izlučilo 3 kg ili 3 mm oborine na m^2 za 1 sat.

Jednadžbu (10.2) možemo pod navedenim pretpostavkama pisati u obliku:

$$P = -3,11 \nabla \left(\frac{E}{p} \right) \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} \cdot \Delta p$$

gdje n označava broj slojeva na koji je atmosfera podijeljena. Iz ove jednadžbe vidimo, da ako se srednji gradijent specifične vlage zraka ili srednja divergencija u razmatranom sloju udvostruči, udvostručiće se i količina oborina. Drugim riječima, odnos između količine oborina s jedne strane i srednjeg gradijenta specifične vlage zraka, odnosno srednje divergencije je linearan.

Razmotrimo sad drugi dio desne strane jednadžbe (10.1):

$$P_{II} = -3,11 \cdot 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \cdot \left[\frac{1}{p_s} (E_s - D_s) - \frac{1}{p_n} (E_n - D_n) \right] \cdot S \quad (10.3)$$

Uzmimo jednu točku mreže koja se nalazi na padini orografske prepreke s nagibom od 1000 m na razmacima $2\Delta x$ i $2\Delta y$, tj. $\Delta_x h$ i $\Delta_y h$ je 1000 m. Neka je gradijent tlaka zraka na morskom nivou 1 mb na 1° geografske dužine, odnosno širine, što znači:

$$P_{i+1,j} - P_{i-1,j} = 0,2 \text{ i } P_{i,j+1} - P_{i,j-1} = 0,2 \text{ mb.}$$

Pretpostavimo dalje, da je posljednji član u ovom dijelu jednadžbe znatno manji od prethodnog zbog bržeg opadanja tlaka vodene pare od tlaka zraka, pa ćemo ga zanemariti. Ako najzad pretpostavimo, da je u prizemnom sloju zrak zasićen ($D_s = 0$), a odnos

$$\frac{E}{P_s} = 10^{-2} \text{ i atmosfera u indiferentnom stanju (S = 1), onda će}$$

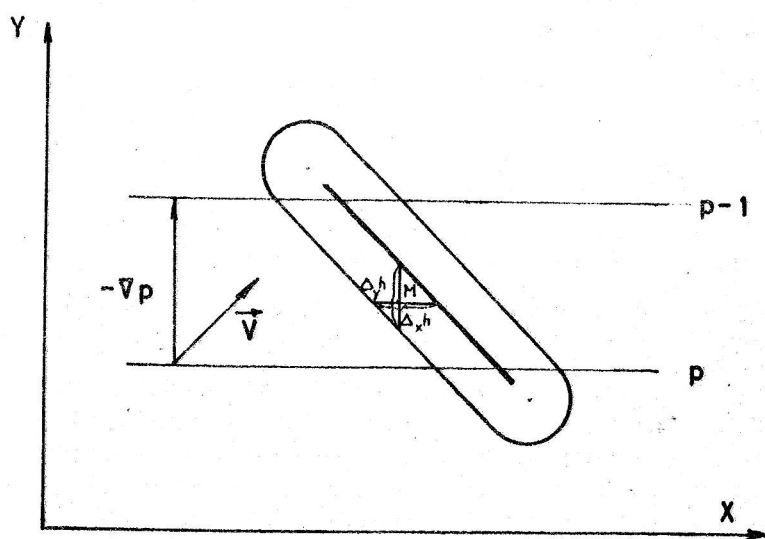
jednadžba (10.3) biti:

$$P_{II} = 18,2 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

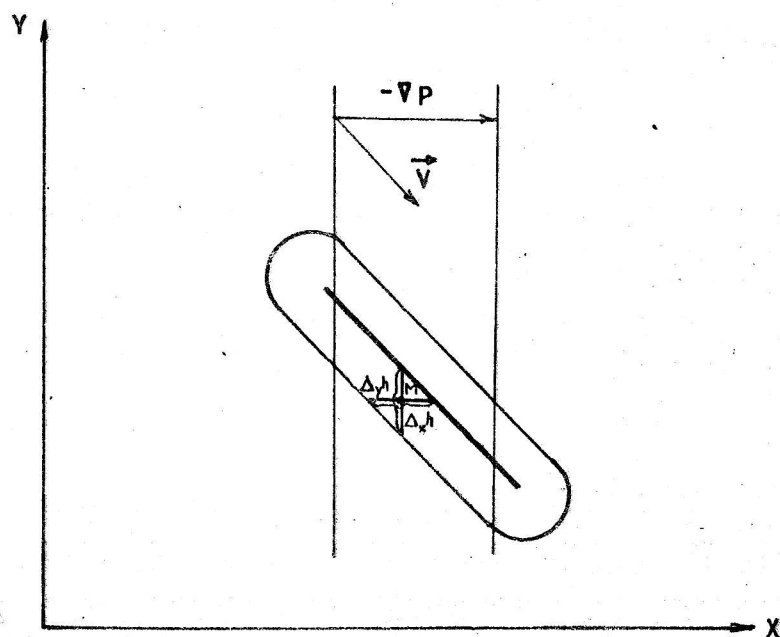
To znači, da bi pod opisanim uvjetima zbog utjecaja orografije palo $18,2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$, odnosno mm oborine na m^2 u sekundi. Ako bi se ovi uvjeti duže održavali palo bi za jedan sat 6,5 mm na m^2 . Odavde vidimo, da bi pod opisanim uvjetima orografska prepreka mogla uzrokovati više oborina nego opće dizanje zraka u atmosferi.

Jasnija predodžba o orografskom utjecaju može se dobiti posebnom analizom koeficijenata a_{ij} i b_{ij} i polja tlaka na nekoliko jednostavnih slučajeva. U tu svrhu postavimo koordinatni sistem u prosječnu točku meridijana i paralele tako da je os x usmjerena prema istoku, a os y prema sjeveru. Zamislimo da se orografska prepreka pruža pod uglom od 135° u odnosu na os x . Neka u prvom slučaju izobare leže paralelno osi x , a gradijent tlaka neka bude usmjeren prema sjeveru, kao što je prikazano na sl. 6. U ovom slučaju je $P_{i+1,j} - P_{i-1,j} = 0$ pa je cijeli prvi član u srednjoj zagradi na desnoj strani jednadžbe (10.3) jednak nuli. Sastav koeficijenta b_{ij} pokazuje, da isti nagib orografske prepreke ima veći efekt u pravcu osi x nego u pravcu osi y . Količina oborina je proporcionalna nagibu prepreke i gradijentu tlaka u pravcu sjevera.

U drugom slučaju, prikazanom na sl. 7, orografska prepreka ima istu orijentaciju kao i u prvom, samo izobare leže paralelno osi y , a gradijent je usmjeren prema istoku. Drugim riječima, polje tlaka, a s njime i polje strujanja, okrenuto je za 90° u pravcu kazaljke na satu. Ovdje je $P_{i,j+1} - P_{i,j-1} = 0$ pa je cijeli drugi član u zagradi na desnoj strani jednadžbe (10.3) jednak nuli. Iz analize koeficijenta a_{ij} vidimo, da je njegov prvi dio koji sadrži nagib u pravcu osi x pozitivan, dok



Sl. 6. Odnos polja tlaka i orografske prepreke (prvi slučaj)



Sl. 7. Odnos polja tlaka i orografske prepreke (drugi slučaj)

je njegov drugi dio koji sadrži nagib u pravcu osi y negativan. Pri istom nagibu orografske prepreke nagib u pravcu osi x više utiče na proces kondenzacije nego nagib u pravcu osi y .

Pošto koeficijent uz nagib u pravcu osi y ima manju apsolutnu vrijednost to će pri istom nagibu u pravcu osi x i y a_{ij} biti pozitivan. U ovom slučaju kad se rezultanta vjetra rastavi na komponente u pravcima x i y , biće u pravcu x pozitivan a u pravcu y negativan. Pri ovakvom odnosu orografske prepreke i polja tlaka, odnosno polja strujanja, cijeli koeficijent a_{ij} će biti negativan i uticaće nasuprot kondenzacije samo ako je nagib u pravcu osi y za oko 20% veći od nagiba u pravcu osi x .

U trećem slučaju pretpostavićemo da orografska prepreka ima istu orijentaciju kao i u prethodna dva slučaja i da se izobare pružaju paralelno orografskoj prepreci. Gradijent tlaka neka je usmjeren na orografsku prepreku, odnosno pod kutem od 45° u odnosu na os x . Ovo je prikazano na sl. 8.

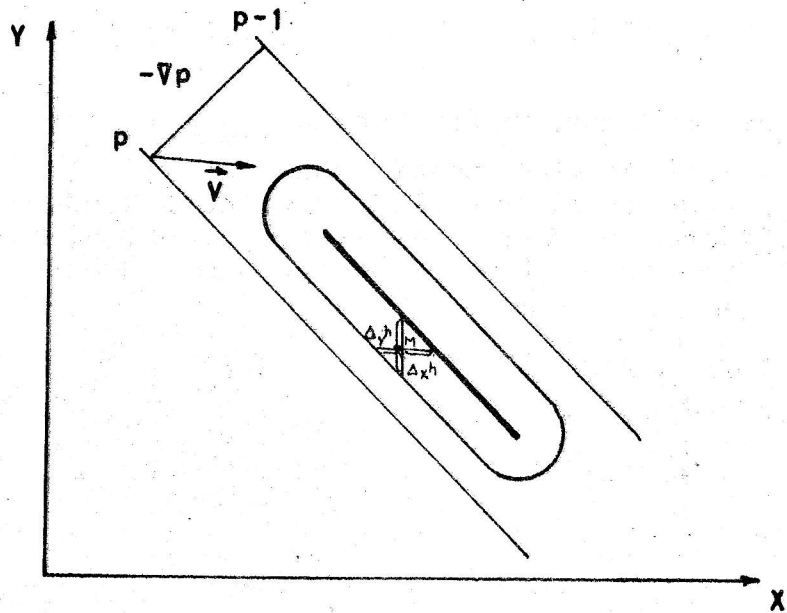
Pri ovakvoj orijentaciji izobara u odnosu na orografsku prepreku oba člana u prvoj srednjoj zagradi na desnoj strani jednadžbe (10.3) doprinosiće kondenzaciji sve dok nagib u pravcu osi y ne premaši nagib u pravcu osi x za oko 20%. Pod pretpostavkom da je nagib u pravcu osi x jednak nagibu u pravcu osi y koeficijent b_{ij} je 6,85 puta veći od koeficijenta a_{ij} i količina oborine je uglavnom srazmjerna koeficijentu b_{ij} i gradijentu tlaka u pravcu osi y .

Četvrti slučaj, koji ćemo ovdje razmotriti, prikazan je na sl. 9. Tu vidimo, da se pri istom položaju orografske prepreke izobare pružaju normalno na nju a gradijent tlaka je usmjeren prema jugoistoku. Za točku na jugozapadnoj strani orografske prepreke, u kojoj se izračunavaju količine oborina, veličine $\Delta_x h$ i $\Delta_y h$ su veće od nule pa su i koeficijenti a_{ij} i b_{ij} pozitivni. S obzirom na orijentaciju gradijenta tlaka je:

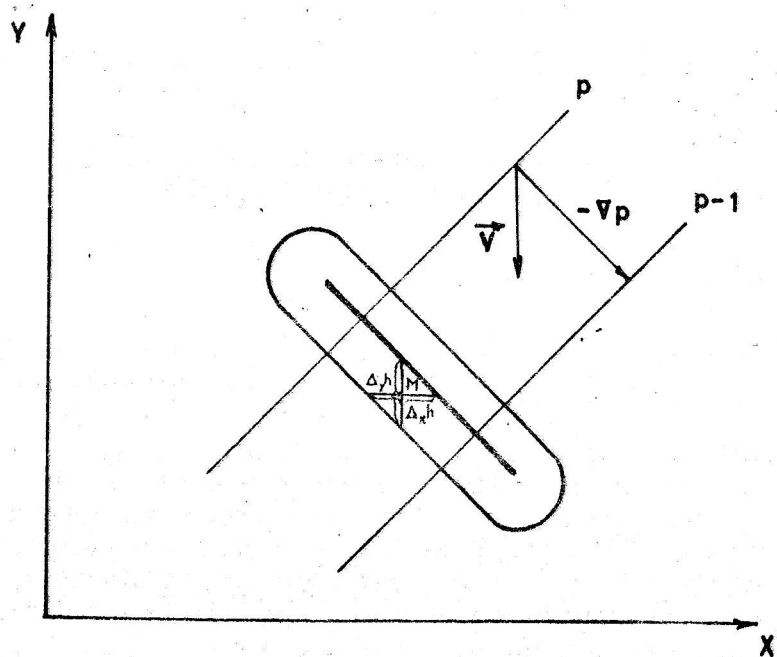
$$p_{i+1,j} - p_{i-1,j} < 0 \quad \text{i} \quad p_{i,j+1} - p_{i,j-1} > 0$$

Zbog toga će član s koeficijentom a_{ij} na desnoj strani jednadžbe (10.3) imati negativnu, a član s koeficijentom b_{ij} pozitivnu vrijednost. To znači, da će pri ovom položaju baričkog polja prvi od njih djelovati u smjeru a drugi nasuprot procesu kondenzacije. Iz sl. 9. vidimo, da se pri strujanju duž osi y točka M nalazi na zavjetrenoj strani orografske prepreke gdje mora proizvoditi fensko djelovanje.

Ako bi gradijent tlaka pri istom položaju izobara kao u prethodnom slučaju bio usmjeren u suprotnom smjeru, tj. u smjeru sjeverozapada, kao što je prikazano u posljednjem slučaju na sl. 10, imali bi:



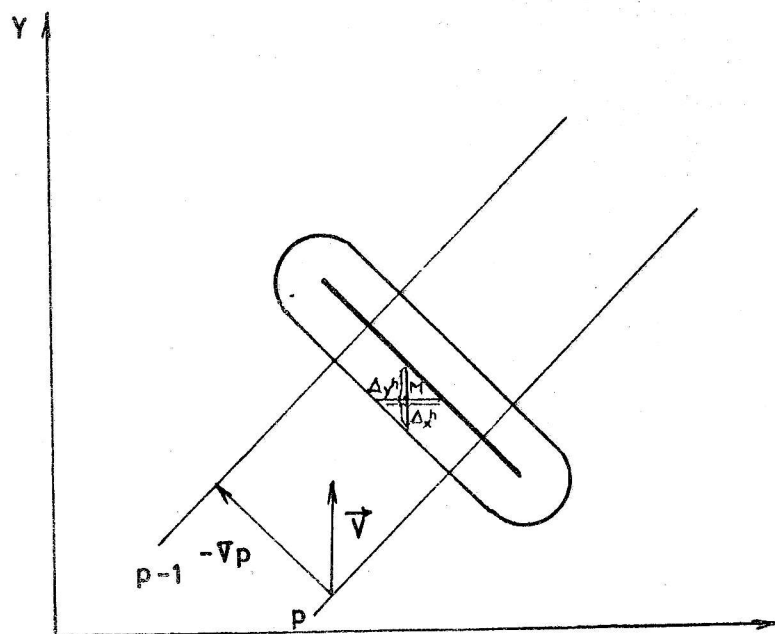
Sl. 8. Odnos polja tlaka i orografske prepreke (treći slučaj)



Sl. 9. Odnos polja tlaka i orografske prepreke (četvrti slučaj)

$$p_{i+1,j} - p_{i-1,j} > 0 \quad \text{i} \quad p_{i,j+1} - p_{i,j-1} < 0$$

S obzirom na predznak koeficijenata a_{ij} i b_{ij} prvi član u srednjoj zagradi na desnoj strani jednadžbe (10.3) bio bi pozitivan a drugi negativan. U pogledu doprinosa kondenzaciji i povećanju količine oborine u razmatranoj točki M, ovi članovi imaju suprotnu ulogu od one u prethodnom slučaju.



Sl. 10. Odnos polja tlaka i orografske prepreke (peti slučaj)

11. Izračunavanje količine oborine po jednadžbama modela pomoću elektronskog računara

Za praktičan način izračunavanja količine oborine možemo jednadžbe modela pisati u obliku pogodnom za rješavanje pomoću elektronskog računara. U tom cilju pretpostavićemo da postoji dizanje zraka u sloju atmosfere od zemljine površine do nivoa 300 mb i razviti jednadžbe modela u oblik pogodan za rad na elektronskom računaru.

Radi kraćeg pisanja uvešćemo slijedeće oznake:

1000 mb = 0	
850 " = 1	$\Delta p_1 = 1000 - 850 \text{ mb} = 150 \text{ mb}$
700 " = 2	$\Delta p_2 = 850 - 700 \text{ " } = 150 \text{ "}$
500 " = 3	$\Delta p_3 = 700 - 500 \text{ " } = 200 \text{ "}$
400 " = 4	$\Delta p_4 = 500 - 400 \text{ " } = 100 \text{ "}$
300 " = 5	$\Delta p_5 = 400 - 300 \text{ " } = 100 \text{ "}$

Ovakvim obilježavanjem jednadžbe (6.2), koja predstavlja naprijed opisani model atmosfere, biće:

$$\begin{aligned}
 P = & -5 \cdot 10^{-5} \left\{ \left[\omega_1 (q_0 - q_2) + \omega_2 (q_1 - q_3) + \omega_3 (q_2 - q_4) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \omega_4 (q_3 - q_5) + \omega_5 (q_4 - q_5) \right] + 10^{-2} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] (q_s - q_n) \right\} \quad (11.1)
 \end{aligned}$$

Ako umjesto vertikalne brzine ω u ovu jednadžbu uvedemo divergenciju, kao što je prikazano u jednadžbi (6.3), imaćemo:

$$\begin{aligned}
 P = & 5 \cdot 10^{-3} \left\{ \left[\frac{\nabla \cdot \vec{v}_0 + \nabla \cdot \vec{v}_1}{2} (q_0 + q_1) \right] 150 + \left[\frac{\nabla \cdot \vec{v}_1 + \nabla \cdot \vec{v}_2}{2} (q_1 + q_2) \right] 150 + \right. \\
 & \left. + \left[\frac{\nabla \cdot \vec{v}_2 + \nabla \cdot \vec{v}_3}{2} (q_2 + q_3) \right] \cdot 200 + \left[\frac{\nabla \cdot \vec{v}_3 + \nabla \cdot \vec{v}_4}{2} (q_3 + q_4) \right] 100 + \right. \\
 & \left. + \left[\frac{\nabla \cdot \vec{v}_4 + \nabla \cdot \vec{v}_5}{2} (q_4 + q_5) \right] 100 - \left[(\nabla \cdot \vec{v}_0 + \nabla \cdot \vec{v}_1) 150 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + (\nabla \cdot \vec{v}_1 + \nabla \cdot \vec{v}_2) 150 + (\nabla \cdot \vec{v}_2 + \nabla \cdot \vec{v}_3) 200 + (\nabla \cdot \vec{v}_3 + \nabla \cdot \vec{v}_4) 100 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + (\nabla \cdot \vec{v}_4 + \nabla \cdot \vec{v}_5) 100 \right] q_5 - 10^{-4} \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \cdot (q_s - q_5) \right\} \quad (11.2)
 \end{aligned}$$

Ovdje je član jednadžbe $(\nabla \cdot \vec{v}_5 + \nabla \cdot \vec{v}_6)_{q_5} \cdot 100$ zanemaren, pošto on zahtijeva uzimanje u obzir jednog nivoa više nego što obuhvaća naš model kako je naprijed definiran.

U slučaju da radimo sa rosištem umjesto sa specifičnom vlagom zraka, koristićemo jednadžbu (7.5), koju možemo pisati u obliku:

$$\begin{aligned}
 P = & 5 \left\{ \left[F_0 \frac{\nabla \cdot \vec{v}_0 + \nabla \cdot \vec{v}_1}{2} (Td_0 + Td_1) \right] 150 + \left[F_1 \frac{\nabla \cdot \vec{v}_1 + \nabla \cdot \vec{v}_2}{2} (Td_1 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + Td_2) \right] 150 + \left[F_2 \frac{\nabla \cdot \vec{v}_2 + \nabla \cdot \vec{v}_3}{2} (Td_2 + Td_3) \right] 200 + \\
 & \left[F_3 \frac{\nabla \cdot \vec{v}_3 + \nabla \cdot \vec{v}_4}{2} (Td_3 + Td_4) \right] 100 + \left[F_4 \frac{\nabla \cdot \vec{v}_4 + \nabla \cdot \vec{v}_5}{2} (Td_4 + \right. \\
 & \left. + Td_5) \right] 100 - \left[F_0 (\nabla \cdot \vec{v}_0 + \nabla \cdot \vec{v}_1) 150 + F_1 (\nabla \cdot \vec{v}_1 + \nabla \cdot \vec{v}_2) 150 + \right. \\
 & \left. + F_2 (\nabla \cdot \vec{v}_2 + \nabla \cdot \vec{v}_3) 200 + F_3 (\nabla \cdot \vec{v}_3 + \nabla \cdot \vec{v}_4) 100 + \right. \\
 & \left. + F_4 (\nabla \cdot \vec{v}_4 + \nabla \cdot \vec{v}_5) 100 \right] Td_5 - 10^{-4} F_s \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + \right. \\
 & \left. + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] (Td_s - Td_5) \left. \right\} \quad (11.3)
 \end{aligned}$$

Najzad, ako koristimo jednadžbu modela u kojoj je vlaga zraka izražena razlikom maksimalnog napona vodene pare i deficita vlage, kao što je prikazano u jednadžbi (10.1), imaćemo:

$$\begin{aligned}
 P = & -3,11 \left\{ \frac{\nabla \cdot \vec{v}_0 + \nabla \cdot \vec{v}_1}{2} \left[\frac{1}{p_0} (E_0 - D_0) + \frac{1}{p_1} (E_1 - D_1) \right] \Delta p_1 + \right. \\
 & + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_1 + \nabla \cdot \vec{v}_2}{2} \left[\frac{1}{p_1} (E_1 - D_1) + \frac{1}{p_2} (E_2 - D_2) \right] \Delta p_2 + \\
 & \left. + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_2 + \nabla \cdot \vec{v}_3}{2} \left[\frac{1}{p_2} (E_2 - D_2) + \frac{1}{p_3} (E_3 - D_3) \right] \Delta p_3 + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_3 + \nabla \cdot \vec{v}_4}{2} \left[\frac{1}{p_3} (E_3 - D_3) + \frac{1}{p_4} (E_4 - D_4) \right] \Delta p_4 + \\
& + \frac{\nabla \cdot \vec{v}_4 + \nabla \cdot \vec{v}_5}{2} \left[\frac{1}{p_4} (E_4 - D_4) + \frac{1}{p_5} (E_5 - D_5) \right] \Delta p_5 - \\
& - \left[(\nabla \cdot \vec{v}_0 + \nabla \cdot \vec{v}_1) \Delta p_1 + (\nabla \cdot \vec{v}_1 + \nabla \cdot \vec{v}_2) \Delta p_2 + (\nabla \cdot \vec{v}_2 + \nabla \cdot \vec{v}_3) \Delta p_3 + \right. \\
& + (\nabla \cdot \vec{v}_3 + \nabla \cdot \vec{v}_4) \Delta p_4 + (\nabla \cdot \vec{v}_4 + \nabla \cdot \vec{v}_5) \Delta p_5 \left. \right] \frac{1}{p_5} (E_5 - D_5) + \\
& + 10^{-4} S \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \cdot \\
& \cdot \left[\frac{1}{p_s} (E_s - D_s) - \frac{1}{p_5} (E_5 - D_5) \right] \} \tag{11.4}
\end{aligned}$$

Ako radi preglednosti stavimo da je:

$$A_k = \frac{\nabla \cdot \vec{v}_k + \nabla \cdot \vec{v}_{k+1}}{2} \Delta p_{k+1}$$

$$Q_k = \frac{1}{p_k} (E_k - D_k)$$

$$C_{ij} = a_{ij} (b_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1})$$

jednadžba (11.4) dobija oblik:

$$\begin{aligned}
P = & -3,11 \left[A_0 (Q_0 + Q_1) + A_1 (Q_1 + Q_2) + A_2 (Q_2 + Q_3) + A_3 (Q_3 + Q_4) + \right. \\
& \left. + A_4 (Q_4 + Q_5) - 2 (A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4) Q_5 + 10^{-4} S C_{ij} (Q_s - Q_5) \right]
\end{aligned}$$

ili u općem obliku:

$$P = -3,11 \left[\sum_{k=0}^{n-1} A_k (Q_k + Q_{k+1}) - 2 \sum_{k=0}^n A_k Q_n + 10^{-4} S C_{ij} (Q_s - Q_n) \right] \quad (11.5)$$

Ova jednadžba je, kao što će se kasnije vidjeti, pogodna za programiranje i rješavanje elektronskim računarom.

Na sličan način možemo i jednadžbu za prognozu količine oborine dovesti u pogodan oblik za računanje na elektronskom računar. U tom cilju poći ćemo od jednadžbe (5.6), koju ćemo napisati u obliku:

$$P = -3,11 \left\{ \sum_{k=1}^{n-1} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p_k}{p_0 - p_L}\right) \left[\frac{1}{p_{k-1}} (E_{k-1} - D_{k-1}) - \frac{1}{p_{k+1}} (E_{k+1} - D_{k+1}) \right] \omega_L + \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p_n}{p_0 - p_L}\right) \left[\frac{1}{p_{n-1}} (E_{n-1} - D_{n-1}) - \frac{1}{p_n} (E_n - D_n) \right] \omega_L + 10^{-4} S \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \cdot \left[\frac{1}{p_s} (E_s - D_s) - \frac{1}{p_n} (E_n - D_n) \right] \right\} \quad (11.6)$$

Ako se razmatra dio atmosfere od zemljine površine do nivoa 300 mb i označe standardni nivoi indeksima kao i u prethodnim slučajevima, uz pretpostavku da je $\omega_L = \omega_{500}$, jednadžba (11.6) imaće oblik:

$$P = -3,11 \left\{ \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p_1}{p_0 - p_3}\right) \left[\frac{1}{p_0} (E_0 - D_0) - \frac{1}{p_2} (E_2 - D_2) \right] \omega_3 + \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p_2}{p_0 - p_3}\right) \left[\frac{1}{p_1} (E_1 - D_1) - \frac{1}{p_3} (E_3 - D_3) \right] \omega_3 + \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p_3}{p_0 - p_3}\right) \left[\frac{1}{p_2} (E_2 - D_2) - \frac{1}{p_4} (E_4 - D_4) \right] \omega_3 + \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p_4}{p_0 - p_3}\right) \left[\frac{1}{p_3} (E_3 - D_3) - \frac{1}{p_5} (E_5 - D_5) \right] \omega_3 + \right\}$$

$$\begin{aligned}
& + \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p_5}{p_0 - p_3}\right) \left[\frac{1}{p_4} (E_4 - D_4) - \frac{1}{p_5} (E_5 - D_5) \right] \omega_3 + \\
& + 10^{-4} S \left[a_{ij} (p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) + b_{ij} (p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) \right] \cdot \\
& \cdot \left[\frac{1}{p_s} (E_s - D_s) - \frac{1}{p_n} (E_n - D_n) \right] \} \quad (11.7)
\end{aligned}$$

Uzevši da je:

$$G_k = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{p_0 - p_k}{p_0 - p_L}\right)$$

i imajući u vidu prethodno uvedene oznake Q_k i C_{ij} gornja jednažba postaje:

$$\begin{aligned}
P = -3,11 \left\{ \left[G_1 (Q_0 - Q_2) + G_2 (Q_1 - Q_3) + G_3 (Q_2 - Q_4) + \right. \right. \\
\left. \left. + G_4 (Q_3 - Q_5) + G_5 (Q_4 - Q_5) \right] \omega_3 + 10^{-4} S C_{ij} (Q_s - Q_5) \right\} \quad (11.8)
\end{aligned}$$

ili sažeto pisano:

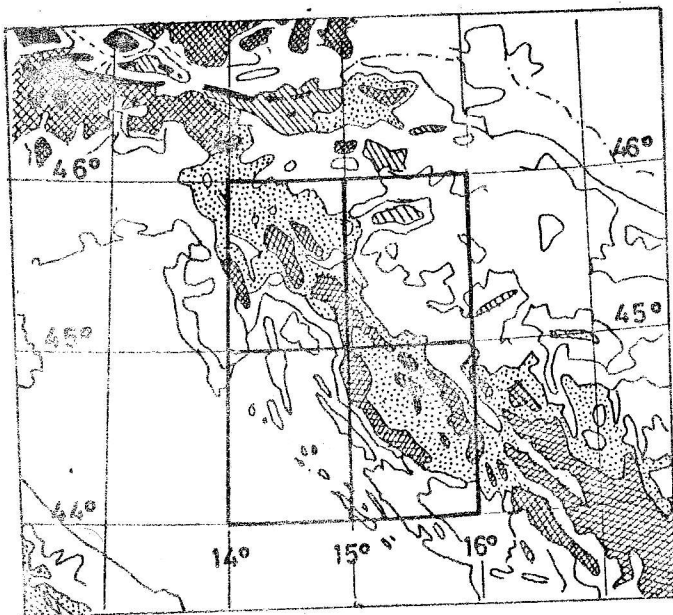
$$\begin{aligned}
P = -3,11 \left\{ \left[\sum_{k=1}^{n-1} G_k (Q_{k-1} - Q_{k+1}) + G_n (Q_{n-1} - Q_n) \right] \omega_L + \right. \\
\left. + 10^{-4} S C_{ij} (Q_s - Q_n) \right\} \quad (11.9)
\end{aligned}$$

Ovaj oblik čini jednažbu vrlo preglednom i pogodnom za programiranje u cilju rješavanja elektronskim računarom.

PRIMJENA MODELA ZA PROGNOZU KOLIČINA OBORINA
U OBLASTI JUGOZAPADNOG DIJELA HRVATSKE

12. Fizičko-geografske karakteristike jugozapadnog
dijela Hrvatske

Oblast u kojoj ćemo ispitivati numerički model za prognozu količine oborine ograničena je 44° i 46° sjeverne geografske širine i 14° i 16° istočne geografske dužine. Ovako ograničena oblast obuhvata sjeverni Jadran, Liku, Kordun, Gorski kotar i u Sloveniji Notrenjsko i Dolenjsko. Ova oblast je prikazana na sl. 11.



Sl. 11. Oblast u kojoj se ispituje
numerički model za prognozu
oborina

Kontinentalni dio ograničene oblasti karakteriziraju orografski masivi izrazitih oblika, koji predstavljaju dio Dinarskog gorja. Dinarsko gorje u Sloveniji pruža se južno od Cerkljansko-škofjaloškog i Posavskog pobrdja te Ljubljanskog barja, s najvišim vrhom Snježnikom, visokim 1796 metara. U Gorskom kotaru najviši vrhovi Dinarskog gorja su: Risnjak (1528 m) i Bijela Lasica (1533 m).

Od Risnjaka se Dinarsko gorje pruža prema jugoistoku u dva lanca. Zapadnom lancu pripadaju Senjsko bilo i Velebit s Vaganskim vrhom visokim 1758 m, a istočnom Velika i Mala Kapela i Plješivica s najvišim vrhom od 1657 m. Između ovih lanaca nalaze se kraška polja: Gacko, Ličko i Krbavsko sa istoimenim rijekama ponornicama.

Jugozapadni dio razmatrane oblasti, prikazane na sl. 11. ograničene 1^o geografske dužine i 1^o geografske širine obuhvata sjeverni dio Jadranskog mora. Tu se od većih otoka nalaze: Krk, Rab i Pag, koji se pružaju paralelno s masivom Velebita, a zapadnije od njih u istom pravcu pružaju se otoci Cres i Lošinj.

Planinski masiv Velebita se pruža neposredno uz obalu sjevernog Jadrana i na taj način oštro dijeli maritimni od kontinentalnog utjecaja u toj oblasti. Dvije najizrazitije pojave veza- ne za masiv Velebita su bura i maksimum oborina u hladnoj polo- vini godine. Bura se javlja pri prebacivanju hladnog zraka pre- ko Velebita na Jadran, koji je prethodno prodro u kontinentalni dio Hrvatske. Ona je dosta česta i veoma izrazita, naročito u oblasti Senja gdje ponekad dostiže orkansku brzinu.

S druge strane sjeverni Jadran i Djenovski zaljev su veoma pogodne oblasti za često stvaranje i održavanje ciklone (*Radi- nović, /8/ i /9/*). U tim situacijama u oblasti sjevernog Jadra- na izobare se najčešće pružaju pravcem jugozapad-sjeveroistok. Pri takvom pravcu pružanja izobara s gradijentom tlaka zraka usmjerenim prema sjeverozapadu vjetar u nižim slojevima puše iz južnog kvadranta. Tako je zračna struja usmjerena pod dosta ve- likim kutem na planinski masiv koji se pruža duž obale. S obzi- rom na veliku strminu zapadnih padina planinskih masiva duž obale sjevernog Jadrana i velik sadržaj vodene pare u zraku ko- ji dolazi s mora, orografski utjecaj u ovom području je veoma izražen. Stoga možemo smatrati da je oblast sjevernog Jadrana izuzetno pogodna za ispitivanje valjanosti numeričkih i drugih modela za prognozu količine oborine, kod kojih se uzima u obzir utjecaj orografije.

13. Postavljanje mreže točaka i oblikovanje reljefa jugozapadnog dijela Hrvatske metodom izgladnjivanja

Za numeričko rješavanje jednadžbi koje se odnose na atmosfer- ske procese velikih razmjera koriste se mreže točaka s razma- kom od 5 do 10^o geografske širine (*Fjörtöft /2/, Petterssen /5/*). Za razmatranje procesa srednjih razmjera koriste se mreže točaka s rastojanjem od 1 do 5^o geografske širine (*Palmen i Holopainen /4/, Radinović i Mesinger /11/*). Procesi kao što su ciklone u zapadnom Sredozemlju, Jadranskom moru ili Panonskom bazenu, zatim oborinske zone na graničnim površinama i orograf- ski utjecaji većih planinskih masiva spadaju po svojim dimenzi- jama u procese srednjih razmjera. Utjecaji pojedinih oblika

topografije na stvaranje lokalne cirkulacije i prisilnog dizanja zraka, što se ogleda u neravnomjernoj raspodjeli oborina, spadaju u proces malih razmjera.

Pri numeričkom rješavanju jednadžbi treba imati u vidu da je izbor odgovarajuće mreže točaka tim delikatniji što su atmosferski sistemi i pojave manjih razmjera. Ovaj problem se javlja stoga što u procesima manjih razmjera postoji niz detalja koji su od značaja a čije se dimenzije kreću u širokom opsegu. Takav problem se pojavio i pri odredjivanju mreže točaka u oblasti jugozapadnog dijela Hrvatske.

Na početku smo se odlučili da koristimo mrežu točaka koja se poklapa s mrežom paralela i meridijana. Glavni razlog koji nas je na ovakvo rješenje naveo je mogućnost točnog definiranja geografskih koordinata i preciznog odredjivanja svake točke mreže na geografskim kartama.

U prvom slučaju postavljena je mreža točaka s međusobnim razmakom od $0,25^{\circ}$ geografske širine i $0,25^{\circ}$ geografske dužine, koja je prikazana na sl. 2. Pri odredjivanju nadmorske visine terena u točkama mreže, najveća visina, koja je sa sekcijskih karata dobijena u jednoj točki mreže, iznosi 1284 m. Najveća razlika između dvije točke u razmaku od $0,5^{\circ}$ geografske širine iznosi 1199 m, a od $0,5^{\circ}$ geografske dužine 1224 m.

Nadmorska visina u pojedinim točkama mreže ne može reprezentirati širu oblast oko te točke. Ovo iz razloga što je visina terena u točki sasvim slučajna vrijednost koja zavisi od rasporeda i gustoće točaka mreže. Stoga je potrebno da se provede određeno prostorno izgladivanje topografije kako bi visine; koje se nalaze u točkama mreže, odražavale glavne oblike i karakteristike planinskog masiva.

U našem slučaju izgladivanje je provedeno izračunavanjem srednje vrijednosti visine iz svih vrijednosti visina u točkama koje okružuju točku u kojoj se izgladjuje. To je ustvari pokretni srednjak iz 9' vrijednosti. Poslije takvog izgladivanja najveća nadmorska visina dobijena u jednoj točki mreže iznosi 929 m. Najveća promjena visine na udaljenosti od $0,5^{\circ}$ geografske dužine je 462 m, a na udaljenosti od $0,5^{\circ}$ geografske širine 526 m. S obzirom da je razmak između točaka mreže duž meridijana 27.750 m, a duž paralele 19.619 m, to se navedena promjena visine odnosi na dvostruko veći horizontalni razmak.

Kad se razlika između visina u točkama mreže podijeli sa dvostrukim razmakom između točaka dobija se nagib terena, koji u ekstremnom slučaju dostiže vrijednost 1:1000. Imajući u vidu masiv Velebita, koji se pruža duž obale i strmo diže uvis, možemo zaključiti, da je nagib terena koji se dobija u mreži točaka s rastojanjem od $0,25^{\circ}$ geografske širine i $0,25^{\circ}$ geografske dužine za veći dio razmatrane oblasti premalen. Zbog toga smo se odlučili na postavljanje mreže točaka s razmakom od $0,1^{\circ}$ geografske širine i $0,1^{\circ}$ geografske dužine, prikazane na sl. 3.

Mreža točaka s razmakom od $0,1^{\circ}$ geografske širine i $0,1^{\circ}$ geografske dužine je 5 puta gušća od mreže točaka s razmakom od $0,25^{\circ}$ geografske širine i $0,25^{\circ}$ geografske dužine. Razmak između točaka mreže rasporedjenih na $0,1^{\circ}$ geografske širine i $0,1^{\circ}$ geografske dužine iznosi duž meridijana 11.100 m, a duž paralela 7.848 m. Najveća nadmorska visina koja je dobijena u ovoj mreži točaka iznosi 1.460 m, a najveća visina poslije izgladivanja iznosi 1.005 m. Najveća promjena visine između dvije točke u razmaku od $0,2^{\circ}$ geografske širine iznosi 757 m, a u razmaku između $0,2^{\circ}$ geografske dužine 775 m.

Iz ovih podataka vidimo da su u gušćoj mreži točaka nadmorske visine, kao i promjene nadmorskih visina povećane. To je posljedica manjeg izgladivanja, jer se gušćom mrežom točaka prostorno izgladivanje smanjuje. Pošto je promjena visina u pravcu paralela i meridijana povećana a razmak između točaka mreže smanjen, to je nagib terena koji se dobija odnosom ovih dviju veličina u ovoj gušćoj mreži višestruko povećan. Time smo se znatno približili stvarnim oblicima orografije u oblasti jugozapadnog dijela Hrvatske pa se može očekivati da je ovakvom mrežom točaka topografija sjevernog Jadrana dobro predstavljena u našem numeričkom modelu za prognozu količine oborina.

14. Opis programa za rad na elektronskom računaru

Za izračunavanje količine oborina po jednadžbama modela potrebno je poznavati vrijednosti divergencije ili vertikalne komponente brzine u točkama mreže. Divergencija i vertikalna komponenta brzine u slobodnoj atmosferi dobijaju se iz radiosondažnih podataka. Veličina oblasti u kojoj se u našem slučaju izračunava količina oborine je relativno mala u usporedbi s razmacima između radiosondažnih stanica. S obzirom na prostorni odnos između površine na kojoj se izračunava divergencija i veličine oblasti za koju se izračunava količina oborine, kao i nemogućnost točnog izračunavanja divergencije, divergencija se najprije izračunava u tjemnim točkama a zatim se interpolacijom dobija u ostalim točkama mreže. Postupci za praktično rješavanje jednadžbi modela mogu se jasno vidjeti iz opisa programa za elektronski računar.

Radi preglednosti praktičnih postupaka sadržanih u programu koje treba izvesti da bi se jednadžbe modela riješile pomoću elektronskog računara, program je podijeljen na 3 dijelova. Prvi dio programa sadrži instrukcije za ulaz podataka u elektronski računar, dešifriranje podataka i izračunavanje komponenta vjetera. Ovim dijelom programa ostvarena je zamisao da se u elektronski računar uvođe podaci radiosondažnih mjerenja u obliku MESRAŃ depeša. Na osnovu broja stanice računar za svaku depešu odredi odgovarajuće geografske koordinate, zatim iz podataka o temperaturi (TTT_a) i deficitu (DD) izračuna se

rosište ($T_d T_d$), iz grupe za vjetar (ddff), u kojoj su smjerovi vjetra dati u deseticama stupnjeva a brzina u čvorovima, dobija se brzina u $m \text{ sec}^{-1}$ za određeni smjer. Najzad, iz ovih podataka izračunavaju se komponente vjetra u i v u smjeru paralela i meridijana. Sve ove postupke računar izradi za onaj broj nivoa koji se označi na početku programa.

U drugom dijelu programa izračunavaju se divergencije na radiosondažnim stanicama za sve nivoe. Ovo izračunavanje se izvodi po jednadžbi površine gdje komponente brzine u i v kao skalarne veličine predstavljaju površine u prostoru.

Za rješavanje jednadžbe površine radi dobijanja vrijednosti neke skalarne veličine u jednoj točki u kojoj imamo podatak potrebno je da se zna 5 koeficijenata. To se postiže uzimanjem u račun podataka s još 5 radiosondažnih stanica. Međutim, ako se uzme isti broj podataka koliko u jednadžbi ima nepoznatih koeficijenata i kroz njih provuče tražena površina postoji mogućnost da se, zbog manjih ili većih grešaka koje osmotreni podaci sadrže, dobiju besmisleni rezultati. Da bi se to izbjeglo, uzet je dvostruko veći broj podataka nego što ima koeficijenata u jednadžbi površine. Pošto ima veći broj podataka nego nepoznata u jednadžbi pri rješavanju jednadžbe primijenjena je metoda najmanjih kvadrata.

U trećem dijelu programa izračunavaju se divergencije u tjemnim točkama mreže. Ovo se postiže interpolacijom i to tako što se kroz vrijednosti divergencije u tri najbliže stanice provuče ploha i izračunaju tri koeficijenta. Na ovaj način interpoliraju se samo vrijednosti divergencije u četiri točke koje predstavljaju tjemena pravokutne mreže točaka koja prekriva razmatranu oblast.

U ovaj dio programa unjet je i kriterijum kojim se postiže da dobijena vrijednost interpolacije po jednadžbi plohe ne može biti veća od najveće niti manja od najmanje vrijednosti divergencije na stanicama. Ako interpolirana vrijednost ne zadovoljava ovaj kriterij tada se uzima srednja vrijednost divergencije od najbliže tri stanice čije su divergencije korišćene u jednadžbi plohe.

Četvrtim dijelom programa rješava se problem dobijanja divergencije za ostale točke mreže. Vrijednosti divergencije u ostalim točkama mreže dobijaju se interpolacijom na osnovu vrijednosti u četiri tjemene točke mreže. Interpolacija u ovom slučaju provodi se prema jednadžbi (9.1), odnosno (9.2).

U petom dijelu programa izračunava se rosište u tjemnim točkama mreže. Ovaj dio je analogan trećem dijelu, tj. na osnovu vrijednosti rosišta na tri stanice, koje su najbliže našoj oblasti, dobijaju se interpolacijom po jednadžbi plohe vrijednosti u tjemnim točkama mreže. Ovdje je takodjer postavljen kriterijum da interpolirana vrijednost ne može biti veća od najveće niti manja od najmanje vrijednosti na stanicama.

Šesti dio je analogan četvrtom dijelu programa. U njemu se rješava problem interpolacije vrijednosti rosišta u svim točkama mreže na osnovu vrijednosti u tjemnim točkama mreže. I u ovom slučaju interpolacija se provodi prema jednadžbi (9.1), odnosno (9.2).

U sedmom dijelu programa izračunava se količina oborina uvjetovanih općim dizanjem zraka u atmosferi. Ovo se postiže na osnovu prethodno dobijenih vrijednosti divergencije i rosišta, i to u svim točkama mreže i za sve nivoe.

U posljednjem osmom dijelu programa izračunava se količina oborina uvjetovanih orografijom. U ovom dijelu programa sabiraju se količine oborina uvjetovanih općim dizanjem zraka i utjecajem orografije. U stvari, posljednja dva dijela programa predstavljaju programiranu jednadžbu (11.3) sa štampanjem dobijenih rezultata.

15. Opis programa za prognozu količine oborina pomoću elektronskog računara

Primijena naprijed izloženog numeričkog modela za prognozu količine oborine u razmatranoj oblasti riješena je posebnim programom za elektronski računar (program br. 2.). Ovim programom je programirana jednadžba (11.7), koja se odnosi na dio atmosfere od zemljine površine do visine 300 mb. S obzirom na neznatnu količinu vodene pare na visinama iznad 300 mb, kao i činjenicu da vertikalna brzina na tim visinama u najvećem broju slučajeva ima suprotan predznak od predznaka vertikalne brzine u nižim slojevima, zanemarivanje procesa kondenzacije u dijelu atmosfere iznad 300 mb može se smatrati opravdanim.

Polazeći od jednadžbe (11.7) (koja predstavlja prognostičku jednadžbu našeg modela) vidimo, da se ona može riješiti ako su nam poznate veličine E , D , w i p . Prva veličina predstavlja maksimalni napon vodene pare a druga deficit vlage zraka. Iz jednadžbe vidimo da je neophodno poznavanje vrijednosti ovih veličina na svim standardnim izobaričkim nivoima. Treća veličina predstavlja vertikalnu brzinu na nivou AT 500 mb, a četvrta tlak zraka na razini mora. U prognostičkoj službi danas se redovno izrađuju ili primaju gotove 24-satne prognostičke karte raspodjele tlaka zraka na morskoj razini, kao i karte vertikalnih brzina na AT 500 mb. Ove karte nam omogućuju da koristimo prognostičke vrijednosti za p i w za našu prognostičku jednadžbu. Ostaje nam još problem prognoze maksimalnog napona vodene pare i deficita vlage zraka na svim standardnim izobaričkim nivoima.

Maksimalni tlak vodene pare je funkcija samo temperature zraka pa se može lako izračunati ako se raspolaže prognoziranim vrijednostima temperature. S obzirom da se pri analizi karata AT pored izohipsa izvlače i izoterme to je metodom

advekcije (premiještanje izoterma duž izohipsa) moguće dobiti prognoziranu vrijednost temperature iznad određene oblasti.

Prognozičku vrijednost deficita vlage zraka možemo dobiti iz razlike temperature (t) i rosišta (t_d) koja se daje u TEMP i MESRAN izvještajima. Ova razlika se u meteorološkim izvještajima šifrira sa DD a mi ćemo je u formulama označavati sa δ . Polazeći od definicije deficita vlage zraka, izražene jednadžbom (8.1) i Clausius-Clapeyronovom jednadžbom, možemo pisati:

$$D = 6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t}{273+t}} - 6,1 \cdot 10^{\frac{8,61t_d}{273+t_d}} \quad (15.1)$$

Razlika između temperature i rosišta u nazivnicima eksponenata gornje jednadžbe neće mnogo utjecati na apsolutnu vrijednost eksponenata i izraza u cjelini. Stoga možemo staviti da je:

$$\frac{8,61}{273+t} \approx \frac{8,61}{273+t_d} = A$$

pa će jednadžba (15.1) biti:

$$D = 6,1 \cdot (10^{At} - 10^{At_d})$$

Zamjenom rosišta u posljednjoj jednadžbi iz relacije:

$$t_d = t - \delta$$

Konačno dobijamo izraz za deficit vlage zraka:

$$D = 6,1 \cdot 10^{A(t-\delta)} \cdot (10^{At} - 1) \quad (15.2)$$

odnosno:

$$D = 6,1 \frac{10^{At}}{10^{A\delta}} (10^{At} - 1)$$

S obzirom da se prognoziranu vrijednost temperature mogu dobiti na naprijed opisan način to nam za izračunavanje deficita vlage zraka nedostaje prognozička vrijednost razlike između temperature i rosišta (δ). Za dobijanje prognozičkih vrijednosti ove veličine poslužit ćemo se analogijom prognozirana temperatura na standardnim izobaričkim nivoima.

To znači, da je na kartama apsolutne topografije potrebno izvući izolinije jednakih vrijednosti δ , a zatim ih advektirati kao i izoterme. Vrijednosti i veličine, koje se na taj način dobijaju iznad naše oblasti, predstavljaju tražene

prognostičke vrijednosti. S prognoziranim vrijednostima temperature (t) i razlike između temperature i rosišta (δ) možemo po jednadžbi (15.2) dobiti prognostičku vrijednost deficita vlage zraka. Dobijanje deficita vlage zraka po navedenoj jednadžbi u praksi je moguće na dva načina: pomoću elektronskog računara ili po prethodno izračunatim tablicama. Koji od ova dva načina će se primijeniti predstavlja praktično pitanje vezano za organizaciju i uvjete primjene numeričkog modela za prognozu količine oborina u datom slučaju.

Kad se raspolaže prognostičkim vrijednostima za 4 naprijed navedene veličine, može se pristupiti izračunavanju prognoziranih količina oborina pomoću elektronskog računara. Programom izradjenim u tu svrhu predviđeno je da se najprije unesu u računar konstante a_{ij} i b_{ij} za sve točke mreže. Ove konstante karakteriziraju nagib terena u pravcu paralela i meridijana. Zatim se unesu vrijednosti veličine G koje predstavljaju funkciju i koje su konstante za svaki standardni izobarni nivo posebno.

Poslije unošenja konstanti slijedi unošenje podataka u računar. S obzirom na srazmjerno malu oblast u kojoj izračunavamo količine oborina, u računar se unose prognostičke vrijednosti temperature, razlike između temperature i rosišta, vertikalne brzine i tlaka zraka samo u tjemnim točkama mreže koja pokriva našu oblast. Pri tome se vrijednosti temperature i deficita vlage zraka uzimaju za sve standardne izobarne nivoe do 300 mb, vrijednosti vertikalne brzine na izobarnoj plohi 500 mb, a tlak zraka na morskoj razini.

Nakon unošenja podataka u računar, pomoću temperature po *Clausius-Clapeyronovoj* jednadžbi izračunava se maksimalni napon vodene pare. Zatim se pomoću temperature i razlike između temperature i rosišta izračuna deficit vlage zraka u tjemnim točkama mreže na svim standardnim izobarnim nivoima. Ovo izračunavanje se izvodi po jednadžbi (15.2). Poznavanje vrijednosti maksimalnog napona vodene pare i deficita vlage zraka omogućuje nam izračunavanje veličine Q u jednadžbi (11.8), koja predstavlja razliku ovih dviju veličina podijeljenu sa tlakom zraka odgovarajuće standardne izobarne plohe.

Slijedeći problem koji rješava računar po programu je interpolacija veličine Q i tlaka zraka p u svim točkama mreže. Ova interpolacija se izvodi po jednadžbi (9.1) odnosno (9.2), i to za Q na svim standardnim izobarnim ploham a za p samo na morskoj razini. Time je omogućeno neposredno rješavanje jednadžbe (11.8) i dobijanje prognoziranih vrijednosti količine oborina u svim točkama mreže koja prekriva razmatranu oblast. Na kraju programa nalaze se instrukcije za štampanje dobijenih rezultata.

Nešto jednostavniji način za prognozu količine oborina je ako se umjesto maksimalnog napona vodene pare i deficita vlage zraka upotrebljava rosište. Prognostička jednadžba za praktičnu primjenu ovog načina može se napisati u obliku:

$$P_{ij} = - \left\{ \left[G_1 (T_{d_0} - T_{d_2}) + G_2 (T_{d_1} - T_{d_3}) + G_3 (T_{d_2} - T_{d_4}) + G_4 (T_{d_3} - T_{d_5}) + G_5 (T_{d_4} - T_{d_5}) \right] \omega + G_0 \left[a (P_{i+1, j} - P_{i-1, j}) + b (P_{i, j+1} - P_{i, j-1}) \right] (T_{d_0} - T_{d_5}) \right\} ij$$

U ovoj jednadžbi ω se uzima u mb/24 h, a p u mb. G_k predstavlja konstante sa vrijednostima za standardne izobarne nivoe:

$G_0 / 1000 \text{ mb/}$	$=$	$1 \cdot 10^{-5}$	grad $m^{-1} h$
$G_1 / 850 \text{ mb/}$	$=$	$42,4 \cdot 10^{-5}$	"
$G_2 / 700 \text{ mb/}$	$=$	$50,3 \cdot 10^{-5}$	"
$G_3 / 500 \text{ mb/}$	$=$	$21,0 \cdot 10^{-5}$	"
$G_4 / 400 \text{ mb/}$	$=$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	"
$G_5 / 300 \text{ mb/}$	$=$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	"

Za rješavanje gornje jednadžbe potrebno je poznavati T_d na šest standardnih izobarnih nivoa, p na morskoj razini i na AT 700 mb, i to za sve tri veličine vrijednosti samo u tjemnim točkama mreže. Prognostičke vrijednosti za T_d i p mogu se dobiti na naprijed opisan način, a vrijednosti za ω očitavaju se sa prognostičke karte vertikalnih brzina za 700 mb plohu koja se prima od svjetskih ili regionalnih meteoroloških centara faksimilom.

Praktičan računski postupak je slijedeći: Prognozirane vrijednosti temperature T , razlike između temperature i rosišta DD , tlaka zraka p i vertikalnih brzina ω prenesu se na kartice. Za prve dvije veličine vrijednosti se uzimaju za svih šest nivoa u tjemnim točkama mreže. Nakon ulaska ovih vrijednosti u elektronski računar računa se po programu br. 3. Najprije se iz podataka temperature i razlika temperature i rosišta izračunaju vrijednosti rosišta u tjemnim točkama mreže za sve nivoe do 300 mb. Zatim se izračunaju prognozirane vrijednosti rosišta, vertikalnih brzina i tlaka zraka na morskoj razini u svim točkama mreže putem interpolacije. Najzad računar po jednadžbi (15.3) izračunava prognoziranu količinu oborina usljed općeg dizanja zraka i posebno prognoziranu količinu oborina zbog utjecaja orografije, kao i ukupni iznos prognozirane količine oborine u svim točkama mreže.

16. *Primjena numeričkog modela za izračunavanje količine oborine u karakterističnim vremenskim situacijama na području jugozapadnog dijela Hrvatske i analiza rezultata*

Za ispitivanje ponašanja numeričkog modela za izračunavanje količine oborine u području jugozapadnog dijela Hrvatske odabrano je 7 različitih sinoptičkih situacija. To su sinoptičke situacije od:

- 4. i 5.IV 1962. u 01 sat
- 21. V 1962. u 01 sat
- 16. i 17.IX 1962. u 01 sat
- 2. i 7.VI 1969. u 01 sat

Sinoptička situacija od 4.IV 1962. godine u 01 sat u području jugozapadnog dijela Hrvatske ima slijedeće važnije karakteristike: U prizemlju (sl. 12) približava se hladna fronta sa zapada u dubokoj baričkoj dolini uz pad tlaka zraka za 12-15 mb za posljednjih 24 sata. Centar pada tlaka u prizemlju (sl. 13) nalazi se u neposrednoj blizini posmatrane oblasti u smjeru sjeverozapada. Vrijeme na sjevernom Jadranu je pretežno oblačno bez oborina i puše jugo.

Na visini iznad promatrane oblasti nalazi se prednja strana difluentne doline (sl. 14), koja ima sličan oblik na svim standardnim nivoima. Od termičkih karakteristika ističe se termički greben (sl. 15) s neznatnom promjenom RT 500/1000 mb za posljednja 24 sata.

Prema polju strujanja na standardnim izobarnim nivoima dobija se spuštanje zraka iznad cijele posmatrane oblasti. To u modelu za izračunavanje količine oborine daje negativne vrijednosti, tj. nepovoljne uvjete za kondenziranje vodene pare i izlučivanje oborina. Raspodjela tlaka zraka na morskoj razini je takva da je zonalna komponenta gradijenta tlaka zraka usmjerena na zapad a meridionalna na jug. Ovakva orijentacija gradijenta tlaka zraka ima za posljednicu takvo polje strujanja u prizemlju da bi zbog utjecaja orografije, pri drugim povoljnim uvjetima, došlo do oborina čiji bi raspored i količina u jednom satu trebala odgovarati količini prikazanoj na sl. 16. Međutim, spuštanje zraka u posmatranoj oblasti je bilo tako intenzivno da nije moglo doći do stvaranja oborina, tj. efekt orografije i prizemnog polja strujanja je neutraliziran. Zbog toga je zbroj količina oborina koje su posljedica opće vertikalne komponente u atmosferi i orografskog utjecaja jednak nuli. Ovi rezultati se potpuno slažu sa osmotrenim stanjem vremena 4.IV 1962. godine u 01 sat.

Slijedećeg dana, tj. 5.IV 1962. godine u 01 sat, sinoptička situacija i vrijeme u posmatranoj oblasti su se bitno izmijenili. Jedan prodor hladnog zraka je prošao a sa zapada se približavao drugi frontalni talas (sl. 17). Tlak zraka je produžio padati i za posljednja 24 sata iznad promatrane oblasti je pao za preko 15 mb (sl. 18). Kad se uzme u obzir promjena tlaka zraka u prethodnom danu onda se vidi da je za posljednjih 48 sati tlak zraka u promatranoj oblasti pao na oko 30 mb. Dok je prethodnog dana promatrana oblast bila u termičkom grebenu sada se nalazi u termičkoj dolini (sl. 19). Visinska dolina se nešto izoštrila i umjesto difluentnog dobila iznad promatrane oblasti konfluentni oblik (sl. 20).

Zonalna komponenta tlaka zraka je usmjerena prema istoku, a meridionalna prema sjeveru. Ovakva raspodjela tlaka zraka u prizemlju zbog orografije uvjetovala je po modelu raspodjelu oborina prikazanu na sl. 21. Opća vertikalna komponenta u atmosferi je bila usmjerena naniže, tako da je utjecala na ublažavanje orografskog efekta. Kao posljedica toga ukupna količina oborine, koja predstavlja zbroj količine oborine prouzrokovane općom vertikalnom komponentom i orografskim uticajem, nešto je smanjena (sl. 22).

Raspodjela stvarnih količina oborina za 24 sata, koje su izmjerene 5.IV 1962. godine u 07 sati, prikazana je na sl. 23. Usporedbom raspodjele količina oborina dobijenih po modelu i izmjerenih u promatranoj oblasti vidi se da je u oba slučaja raspodjela vezana za masiv Velebita i druge planine u toj oblasti. Također se poklapaju i centri najvećih količina oborina i to jedan u Gorskom kotaru a drugi na južnom dijelu Velebita.

Glavne karakteristike sinoptičke situacije na dan 21.V 1962. godine u 01 sat iznad promatrane oblasti bile su izrazit greben visokog tlaka zraka (sl.24) u prizemlju i kaplja hladnog zraka na karti RT 500/1000 mb (sl. 25). Na kartama apsolutne topografije os visinske doline na svim standardnim nivoima nalazi se iznad promatrane oblasti i pruža se pravcem sjever-jug (sl. 26). Advekcija hladnog zraka uvjetovala je smanjenje debljine sloja RT 500/1000 mb čiji centar 24-satne promjene se nalazi iznad sjevernog Jadrana i iznosi preko 16 dkb (sl. 27). Tlak zraka u prizemlju u ovoj oblasti je za 24 sata porastao za oko 10 mb (sl. 28).

Opisana sinoptička situacija bi po modelu za izračunavanje količine oborina trebala zbog općeg dizanja zraka u atmosferi dovesti do oborina u cijeloj oblasti sa intenzitetom od 4 do 6 mm/h. Raspodjela po modelu dobijenih količina oborine zbog općeg dizanja zraka u atmosferi prikazana je na sl. 29. Pošto je opća komponenta vertikalne brzine u atmosferi posljedica sistema cirkulacije velikih razmjera, količina oborina uvjetovanih ovom komponentom je veoma ujednačena u cijeloj oblasti.

Zonalna komponenta gradijenta tlaka zraka u prizemlju je u cijeloj oblasti usmjerena na istok. Meridionalna komponenta

gradijenta tlaka zraka je u zapadnom dijelu oblasti usmjerena na jug a u istočnom dijelu oblasti na sjever. Ovakva raspodjela tlaka zraka uvjetuje strujno polje, koje bi po modelu dovelo do oborina čija bi količina i raspodjela trebala odgovarati raspodjeli prikazanoj na sl. 30.

Ukupna količina oborine koja je uvjetovana općim dizanjem zraka u atmosferi i orografijom koja se dobija po modelu za sinoptičku situaciju od 21.V 1962. godine u 01 sat prikazana je na sl. 31. Ako se ova slika usporedi sa sl. 32, na kojoj su prikazane izmjerene količine oborina u 07 sati istoga dana vidi se, da je oborina bilo u cijeloj promatranoj oblasti i da one nisu izrazito orografskog karaktera već uglavnom posljedica općeg dizanja zraka u atmosferi. Ako bi se količine oborine prikazane na sl. 31, koje su dobijene po modelu i odnose se na jednosatni interval vremena, pomnožile s faktorom 4-6 dobile bi se količine oborine vrlo bliske izmjerenim vrijednostima. Također bi se poklapali i maksimumi na otoku Krku, Velebitu, Gorskom kotaru i Kordunu. Najveća razlika između izmjerenih i po modelu dobijenih količina oborine bila bi u oblasti Učke i Risnjaka. Ovu razliku nije moguće objasniti dok se ne ispita više sličnih sinoptičkih situacija.

Da bi se isprobalo ponašanje modela za izračunavanje količine oborine u dane kad nije bilo oborina odabrana je sinoptička situacija od 16.IX 1962. godine u 01 sat. Tog dana se oblast sjevernog Jadrana nalazila u anticikloni i to u bezgradijentnom polju tlaka zraka (sl. 33). Pri takvom polju tlaka zraka nema horizontalnog strujanja zraka u prizemlju pa ne može doći ni do orografskih oborina. Na visini je bio greben s vrlo slabim vjetrovima (sl. 34) i općom komponentom spuštanja zraka koja onemogućuje stvaranje oborina u atmosferi. Kad su podaci koji odgovaraju opisanoj sinoptičkoj situaciji unjeti u elektronski računar po modelu nisu dobijene oborine, što se slaže sa osmotrenim stanjem.

Slijedećeg dana, tj. 17.IX 1962. godine u 01 sat, sinoptička situacija se znatno izmijenila. U oblast sjevernog Jadrana dospjela je hladna fronta na kojoj se stvorio talas sa centrom u Djenovskom zaljevu (sl. 35). Na visini je ojačala jugozapadna struja s konfluentnim oblikom prednje strane doline (sl. 36). Tlak zraka u prizemlju se nije bitno promijenio, ali je počela jaka advekcija hladnog zraka u promatranu oblast (sl. 37).

Prema dobijenim rezultatima po modelu izlazi da je opća vertikalna komponenta u atmosferi bila nepovoljna za stvaranje oborina. Zonalna komponenta tlaka zraka je u južnom dijelu promatrane oblasti bila usmjerena na istok, a u sjevernom dijelu na zapad. Meridionalna komponenta gradijenta tlaka zraka je u zapadnom dijelu oblasti bila usmjerena na sjever a u istočnom dijelu na jug. Ovakva raspodjela tlaka zraka u prizemlju uvjetovala bi po modelu orografske oborine prikazane na sl. 38. Međjutim, zbog nepovoljne vertikalne komponente orografski uticaj je unekoliko ublažen tako da su dobijene ukupne količine oborine prikazane na sl. 39.

Kad se količine oborine prikazane na sl. 39. usporede sa izmjenjenim količinama oborine, prikazanim na sl. 40. vidi se, da je u oba slučaja raspodjela oborina diktirana izrazito orografijom. Isto tako centri najvećih količina oborina u oba slučaja se nalaze na Učki, u Gorskom kotaru i na Velebitu s tim, što je na Učki prilično odstupanje u količini.

Na dan 2.VI 1969. godine u 01 sat promatrana oblast se nalazila u polju ciklonalne cirkulacije. Centar ciklone u prizemlju nalazio se u južnom Jadranu (sl. 41), a centar visinske depresije na 850 i 700 mb iznad sjeverne Italije. Na većim visinama bila je dolina s južnim odnosno jugozapadnim strujanjem iznad promatrane oblasti (sl. 42). Promjene tlaka zraka u prizemlju i promjene RT 500/1000 mb za posljednja 24-sata bile su neznatne iznad promatrane oblasti.

Opisana vremenska situacija dala je po modelu zbog općeg dizanja zraka u atmosferi količine oborine koje se kreću od 0 u južnom dijelu oblasti do 2,5 mm/h u sjevernom dijelu oblasti (sl. 43). Zonalna komponenta gradijenta tlaka zraka na jugu oblasti bila je usmjerena na istok, a na sjeveru oblasti na zapad. Meridionalna komponenta u cijeloj oblasti bila je usmjerena na jug. Ovakva raspodjela tlaka zraka uvjetovala je orografske oborine prikazane na sl. 44.

Kao što se vidi sa slika pri takvoj raspodjeli tlaka zraka planinski masiv Velebita ne utječe na povećanje već na smanjenje količine oborine. Usporedbom ukupnih količina oborina dobijenih po modelu (sl. 45) i izmjerenih količina oborina (sl. 46) vidi se, da su najveće količine oborine izmjerene i računskim putem dobijene u oblasti Ogulina, Karlovca i Plitvičkog Ljeskovca. U Gorskom kotaru i na Velebitu izmjerene količine oborine su neznatne ili znatno manje od količina oborine u navedenim mjestima. Po modelu u oblasti Velebita i Gorskog kotara nisu uopće dobijene oborine što pokazuje da je negativna tendencija za stvaranje oborina u tim oblastima pri ovakvim sinoptičkim situacijama u modelu više naglašena nego što je u prirodi.

Karta izohijeta jednosatnih količina oborina je dobijena na taj način što je na meteorološkim stanicama na kojima postoji pluviograf izračunata količina oborine koja je pala u vremenskom intervalu od 0,30 do 1,30 sati i to izraženo u procentima od ukupne 24-satne količine. Dobijeni procent je primijenjen na okolne kišomjerne stanice u cilju dobijanja jednosatnih količina oborine za navedeni interval iz 24-satne količine. Na osnovu tako dobijenih količina oborine izrađena je karta izohijeta za spomenuti jednosatni interval vremena.

Glavne karakteristike sinoptičke situacije od 7.VI 1969. godine u 01 sat je postojanje vertikalno razvijene ciklone od prizemlja do nivoa 100 mb. Centar ciklone u prizemlju se nalazio u blizini Zagreba (sl. 47) a na visini iznad sjeverne Italije (sl. 48). Promjene tlaka zraka i RT 500/1000 mb za posljednjih 24 sata bile su neznatne.

Zbog općeg dizanja zraka u atmosferi po modelu se dobijaju količine oborina do 5,5 mm/h u sjevernom dijelu promatrane oblasti (sl. 49). U južnom dijelu promatrane oblasti zonalni gradijent tlaka zraka je usmjeren prema zapadu a u sjevernom dijelu oblasti prema istoku. Meridionalna komponenta gradijenta tlaka zraka je u cijeloj oblasti usmjerena prema jugu.

Opisana raspodjela tlaka zraka daje po modelu orografske oborine prikazane na sl. 50. Ukupna količina oborine dobijena iz opće komponente dizanja zraka i orografskog utjecaja po modelu prikazana je na sl. 51.

Izmjerene količine oborina u oblasti jugozapadnog dijela Hrvatske u vremenu od 0,30 do 1,30 sati 7.VI 1969. godine prikazane su na sl. 52. Usporedbom izmjerenih i računskim putem dobijenih količina oborine vidi se da su u ovoj sinoptičkoj situaciji oborine imale orografski karakter. Maksimum oborine dobija se u oba slučaja na Velebitu. Najveće odstupanje dobijenih po modelu od izmjerenih količina oborine je u Gorskom kotaru i u sjevernim dijelovima promatrane oblasti, gdje su dobijene nešto veće vrijednosti od izmjerenih. Ovo je rezultat općeg dizanja zraka u atmosferi dobijenog po modelu a na osnovu aeroloških podataka za datu sinoptičku situaciju.

L i t e r a t u r a

- /1/ *Estoque, M.A.*: A prediction model for cyclone development integrated by Fjærtøft's method. *J. Met.* 13, 1956, 195-202;
- /2/ *Fjærtøft, R.*: On a numerical method of integrating the barotropic vorticity equation. *Tellus* 4, 1952, 179-194;
- /3/ *Gates, W.L.*: Static stability measures in the atmosphere. *J. Met.* 18, 1961, 526-533;
- /4/ *Palmen, E and E.O. Holopainen*: Divergence, vertical velocity and conversion between potential and kinetic energy in an extratropical disturbance. *Geophysica*, Vol. 8, 1962, No. 2, 89-113;
- /5/ *Petterssen, S.*: Weather analysis and forecasting. Second edition, 1956, Vol I, New York - Toronto - London (McGraw - Hill), 428;
- /6/ *Pichler, H. und. H. Reuter*: Zur graphischen Intergration der Wirbelgleichung mit Berücksichtigung orographischer Effekte, *Arch. Met. Geoph. Biokl. A* 11, 1960, 413-426;
- /7/ *Radinović, Dj.*: Analysis of the cyclogenetic effects in the west Mediterranean. VI Inter. Tagung für Alpine Meteorologie, Bled, 1960, SHMZ, Beograd, 1962 33-40;
- /8/ *Radinović, Dj.*: On forecasting of cyclogenesis in the west Mediterranean and other areas bounded by mountain ranges by baroclinic model. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A* 14, 1965, 279-299;
- /9/ *Radinović, Dj.*: Cyclonic activity in Yugoslavia and surrounding areas. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A* 14, 1965, 391-408.
- /10/ *Radinović, Dj.*: Orographic influence on the air stream deformation in variable static stability of the atmosphere. III Konferencija za karpat-sku meteorologiju, Prirodno-matematički fakultet u Beogradu i Savezni hidrometeorološki zavod, 1966 265-271;

/11/ Radinović, Dj. i F. Mesinger: Dinamičke i energetske karakteristike razvoja ciklona od 24. oktobra 1964. u zapadnom Sredozemlju. Prirodno-matematički fakultet u Beogradu, Meteorološki zavod, Rasprave 7, 1968,

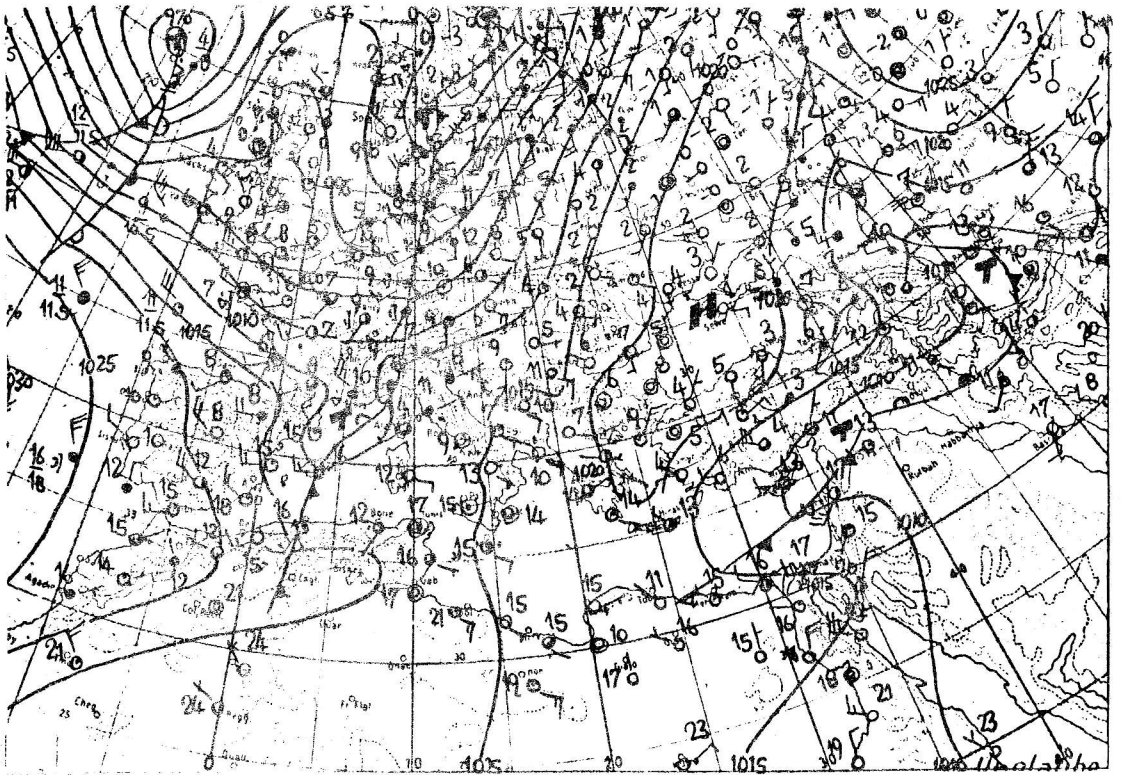
/12/ Sutcliffe, R.C.: A contribution to the problem of development: Quart. J. Roy. Met. Soc. 73, 1947, 370-383.

Tabela 1. Visina terena u točkama mreže s razmakom
0,25° geografske širine i 0,25° geografske
dužine (m)

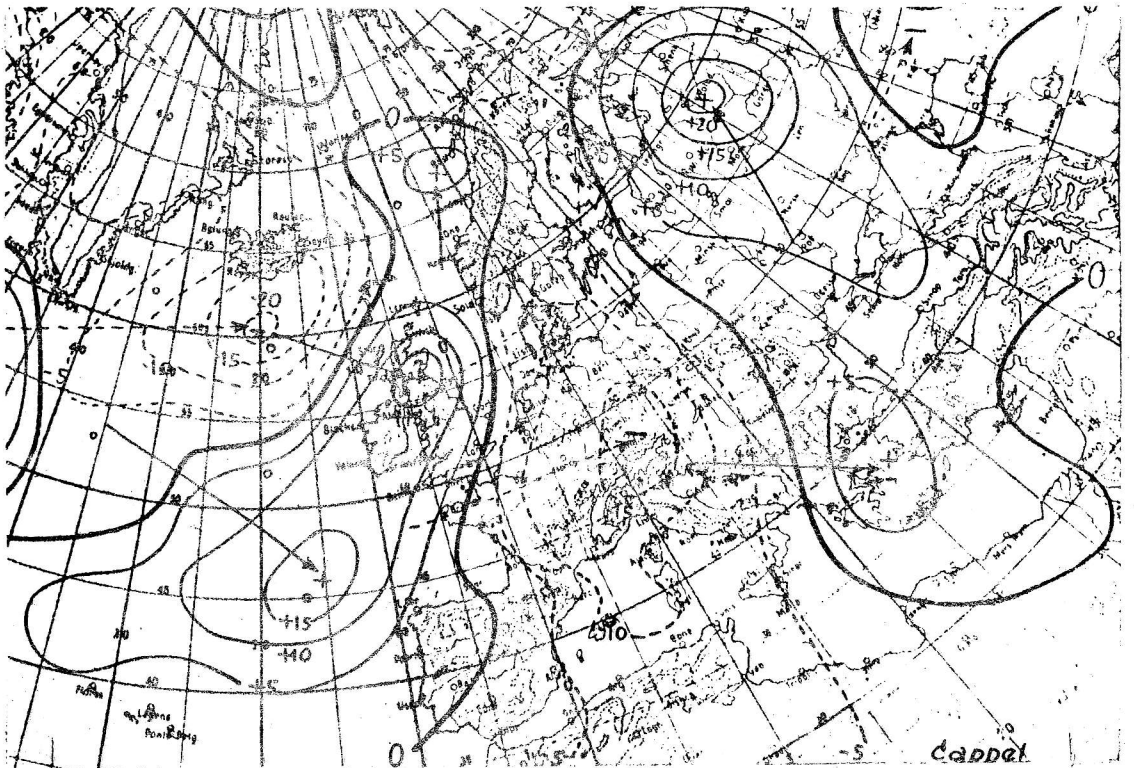
$\psi \backslash \lambda$	14°	14,25°	14,5°	14,75°	15°	15,25°	15,5°	15,75°	16°
46°	295	320	600	480	180	560	180	240	204
45,75°	980	840	480	270	900	600	135	106	102
45,5°	596	1080	810	335	117	110	62	55	101
45,25°	0	120	1199	858	214	170	344	170	318
45°	0	0	0	524	753	480	306	290	140
44,75°	0	0	0	965	850	885	722	931	1208
44,5°	0	0	0	0	561	628	760	670	1147
44,25°	0	0	0	0	60	258	1284	840	800
44°	0	0	0	0	0	164	273	275	229

Tabela 7. Visina terena u točkama mreže s razmakom 0,1° geografske širine i 0,1° geografske dužine (m)

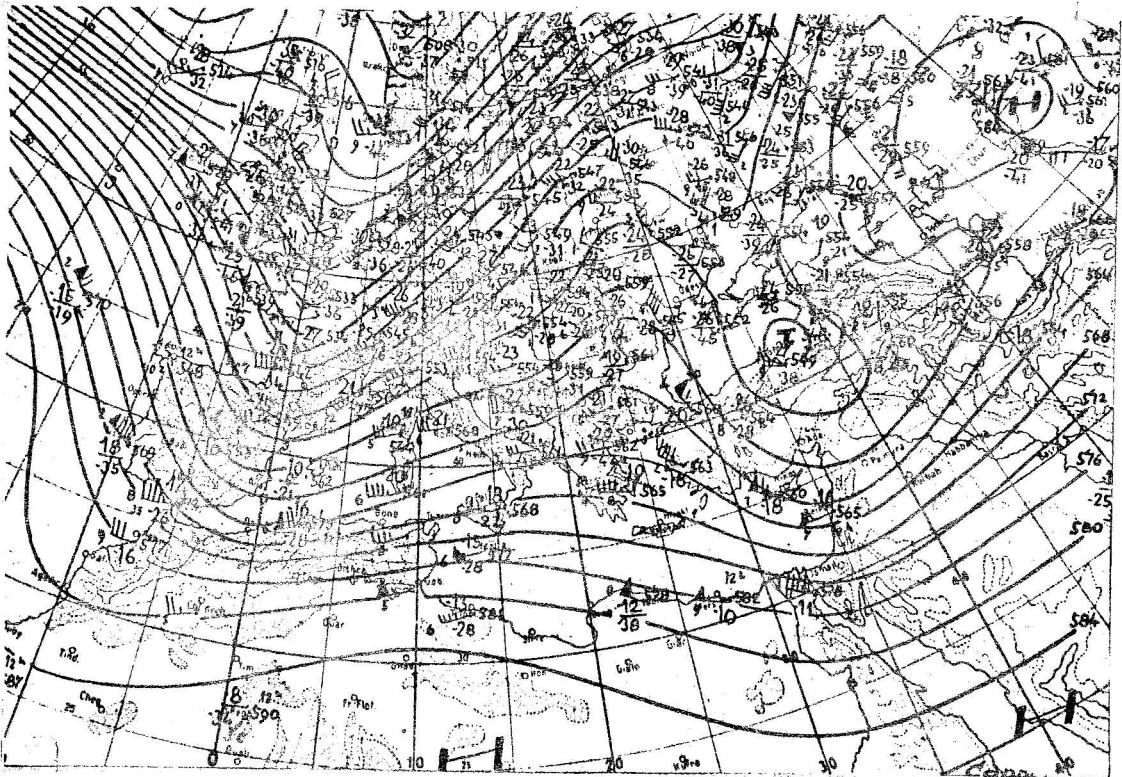
14°	14,1°	14,2°	14,3°	14,4°	14,5°	14,6°	14,7°	14,8°	14,9°	15°	15,1°	15,2°	15,3°	15,4°	15,5°	15,6°	15,7°	15,8°	15,9°	16°	
46°	295	325	284	360	380	660	540	520	340	240	180	540	440	180	220	200	160	220	200	240	204
45,9°	720	780	680	520	480	308	340	360	420	260	172	160	157	140	280	130	640	350	180	170	130
45,8°	630	825	720	580	480	600	260	460	174	230	520	840	500	560	168	135	122	110	107	105	106
45,7°	907	660	1020	940	640	475	540	640	340	420	460	260	240	200	175	133	121	114	103	100	99
45,6°	1020	1140	980	740	1180	700	460	640	400	180	160	380	112	110	100	130	195	225	124	98	98
45,5°	590	956	1300	580	880	820	480	720	580	240	220	220	110	112	104	95	122	140	160	102	101
45,4°	420	420	560	980	920	820	860	510	400	260	200	180	160	220	257	261	180	152	105	230	220
45,3°	0	0	200	665	709	960	1120	1180	640	380	230	210	220	230	240	290	170	200	125	280	270
45,2°	0	0	20	0	480	920	1020	660	625	360	340	210	240	280	200	280	160	185	420	620	320
45,1°	460	0	110	175	0	0	1080	820	560	680	500	415	310	320	420	460	340	375	340	380	180
45°	0	0	0	20	380	0	530	620	500	720	750	400	880	485	430	306	310	420	410	240	140
44,9°	360	220	0	0	0	57	220	1210	480	460	820	920	980	700	340	420	320	400	220	380	320
44,8°	0	182	0	0	80	0	960	1420	920	760	470	1080	1040	920	1100	230	410	920	560	355	510
44,7°	170	90	0	0	33	0	380	1380	1020	620	620	690	1204	800	900	1180	520	540	1400	550	1180
44,6°	0	0	0	0	0	40	0	1010	1220	680	570	581	940	680	633	1340	840	640	360	670	900
44,5°	0	0	40	0	0	0	100	80	540	800	561	580	600	940	764	1040	1200	680	420	1100	1140
44,4°	0	0	0	0	0	0	0	20	120	0	960	1460	640	590	720	720	820	1140	572	980	500
44,3°	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	10	20	680	1180	910	570	780	720	920	1360	940
44,2°	0	0	0	0	0	40	0	0	0	40	70	100	0	219	91	360	620	720	1110	860	900
44,1°	0	0	0	0	0	0	60	0	160	0	83	127	210	150	580	410	160	280	560	460	1040
44°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	180	154	236	273	249	250	300	360	620



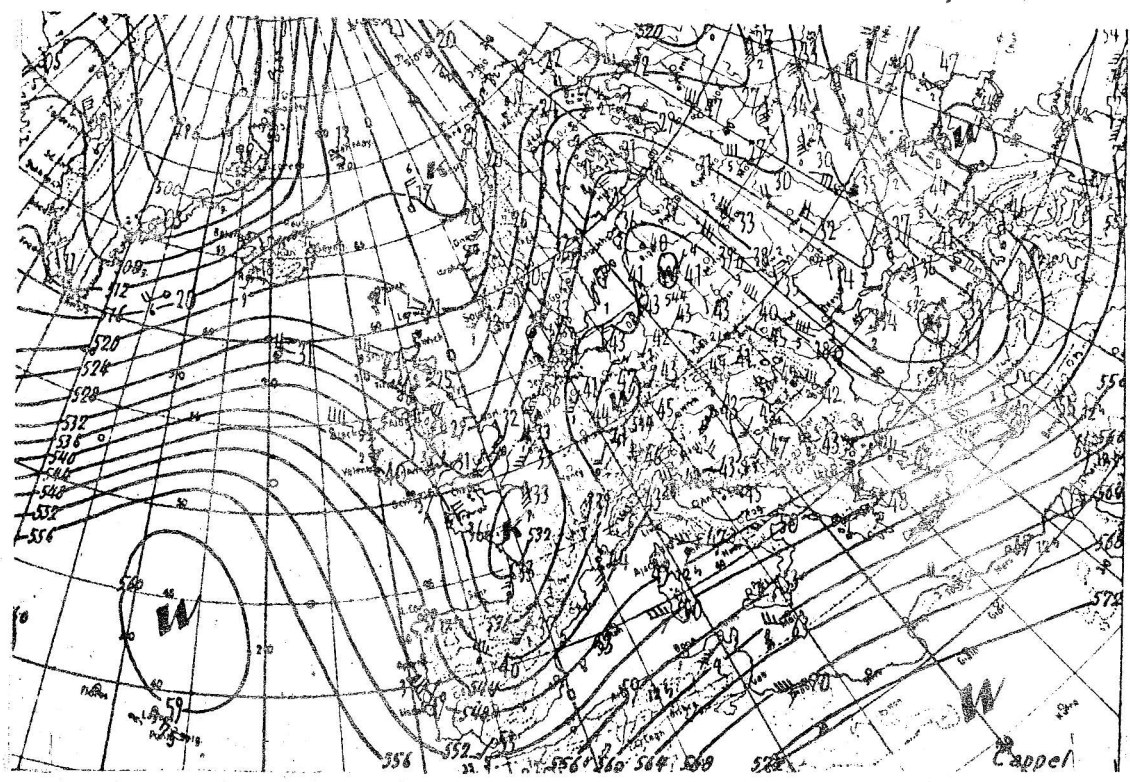
Sl. 12. Sinoptička situacija 4.IV 1962. u 01^h SEV



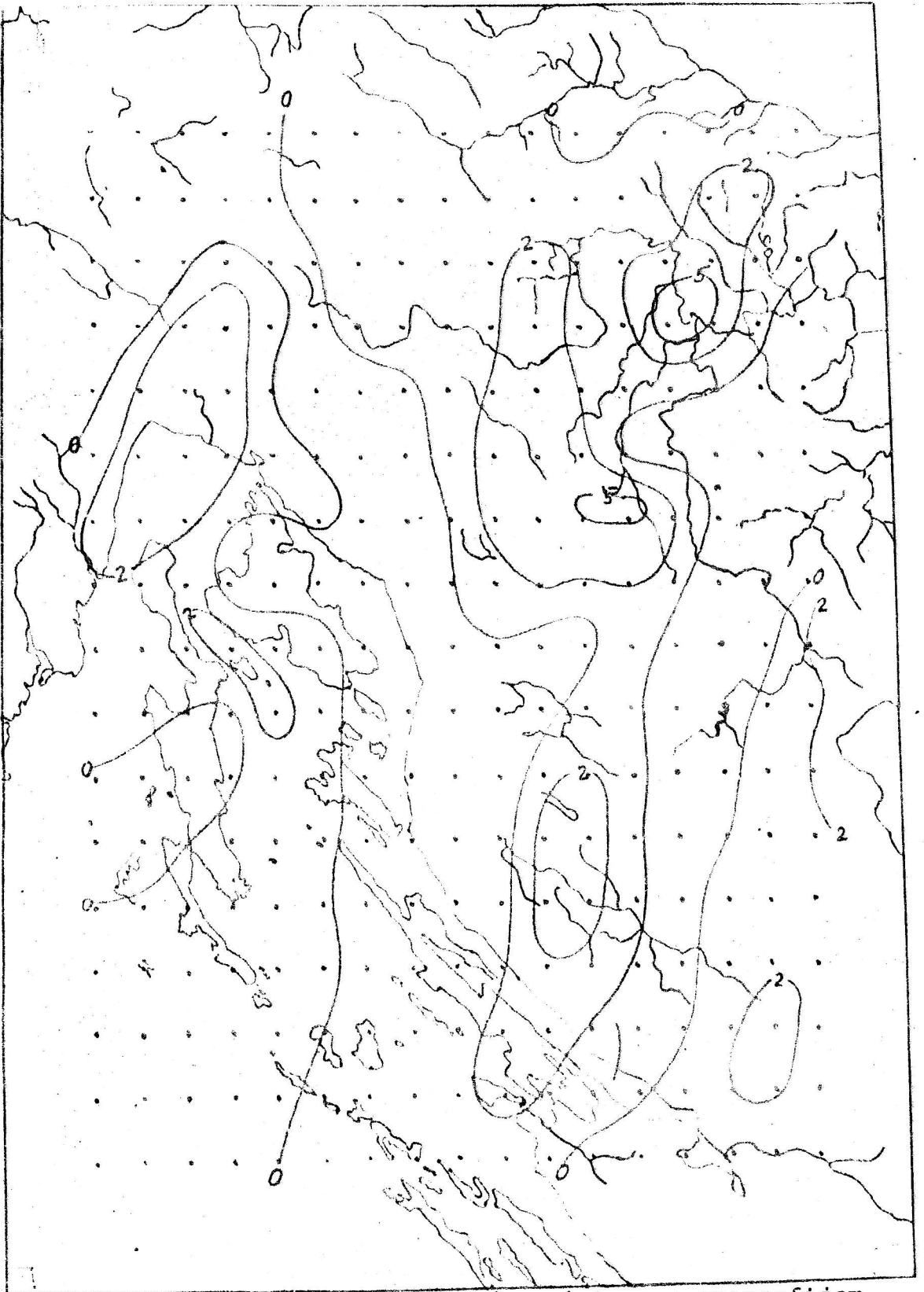
Sl. 13. 24-satne promjene tlaka zraka 4.IV 1962. u 01^h SEV



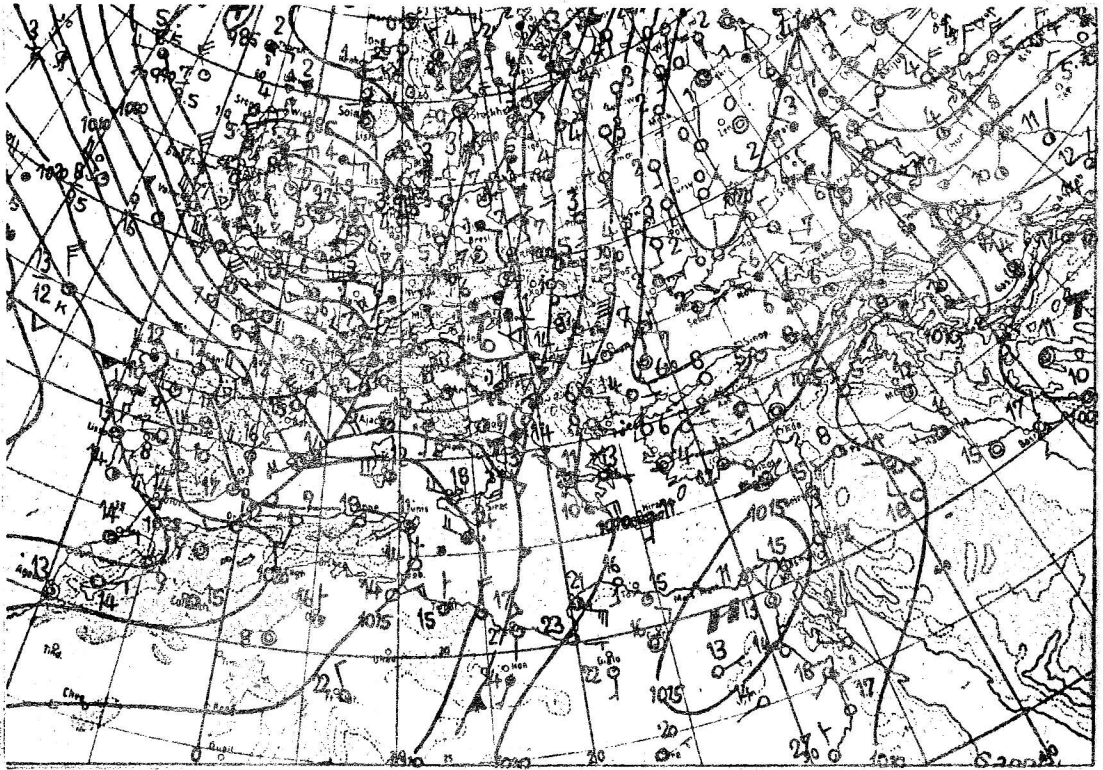
Sl. 14. AT 500 mb 4.IV 1962. u 01^h SEV



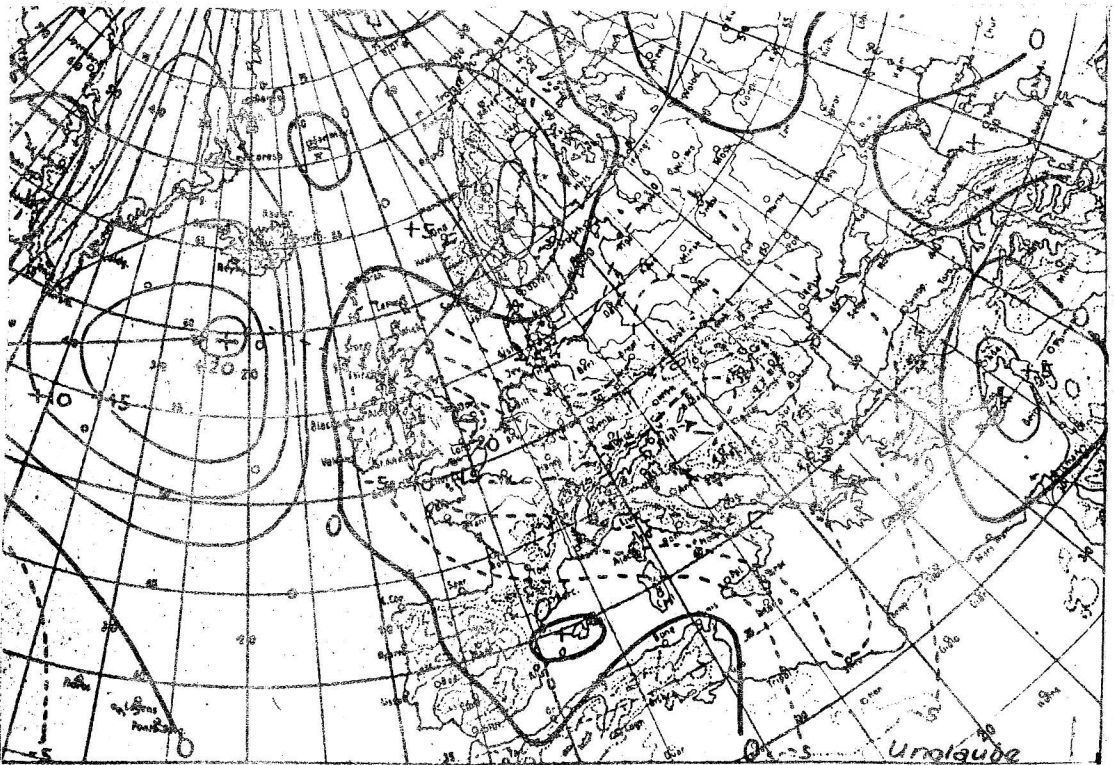
Sl. 15. RT 500/1000 mb 4.IV 1962. u 01^h SEV



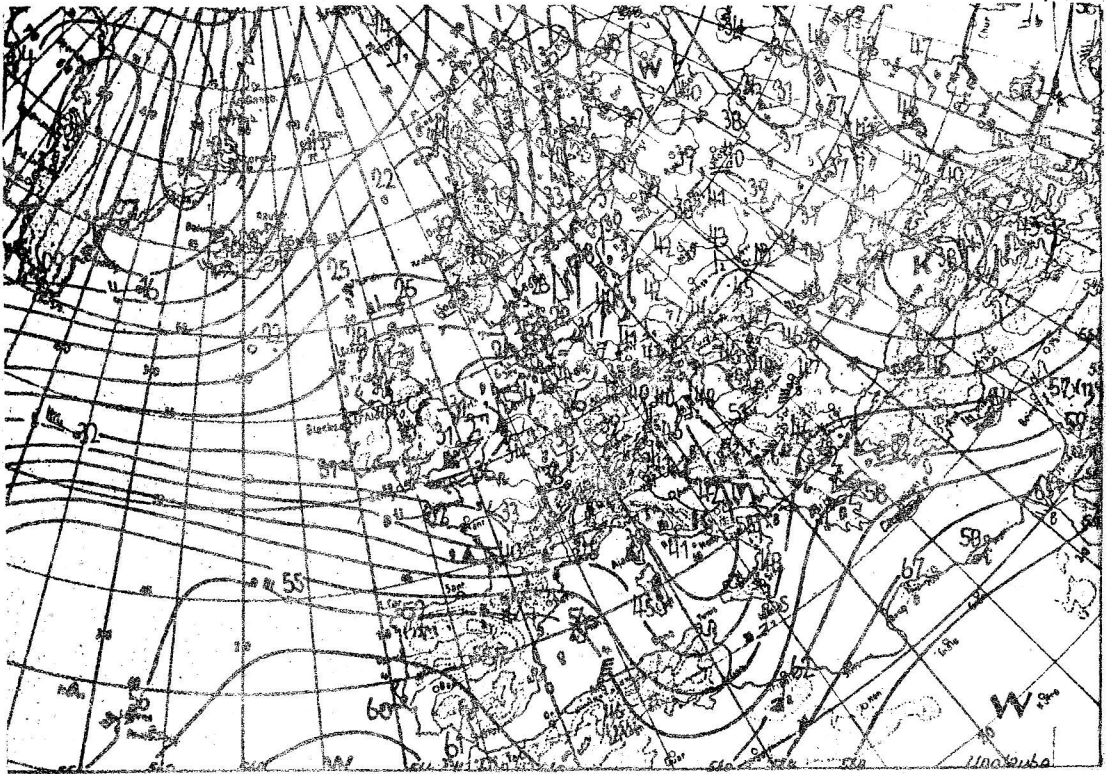
Sl. 16. Količine oborina u mm/h uvjetovane orografijom i prizemnim poljem strujanja 4.IV 1962. u 01h SEV, dobijene po modelu



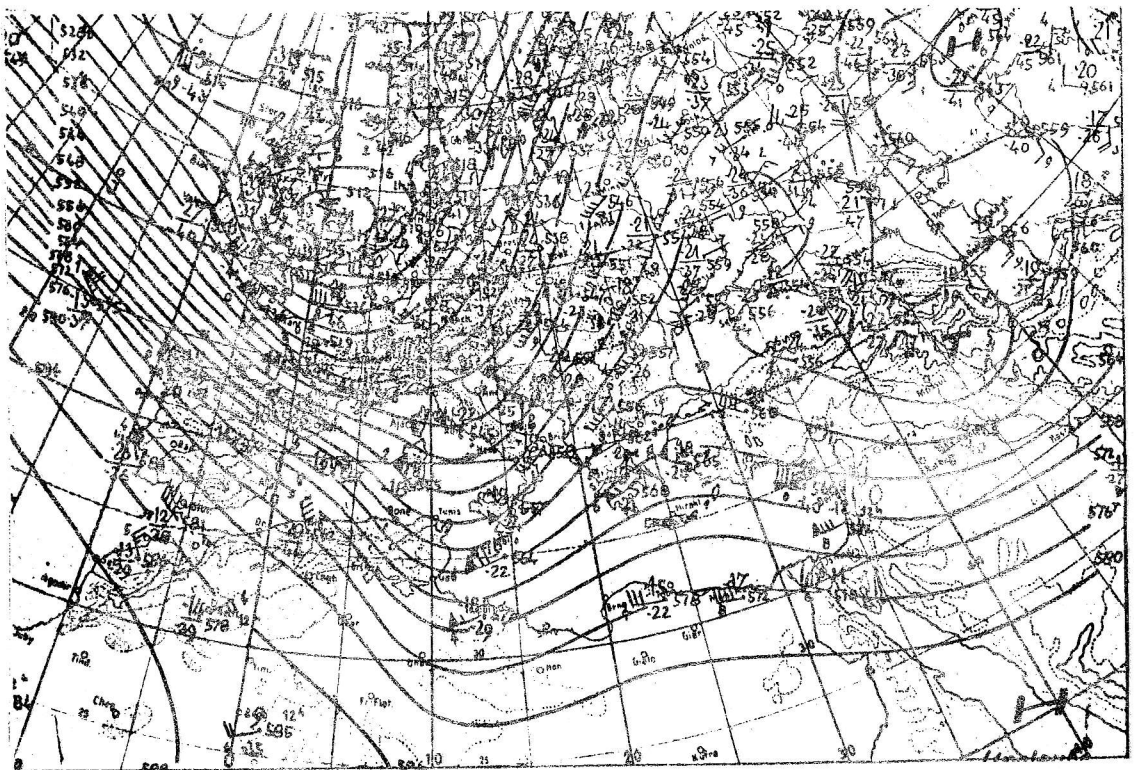
Sl. 17. Sinoptička situacija 5.IV 1962. u 01^h SEV



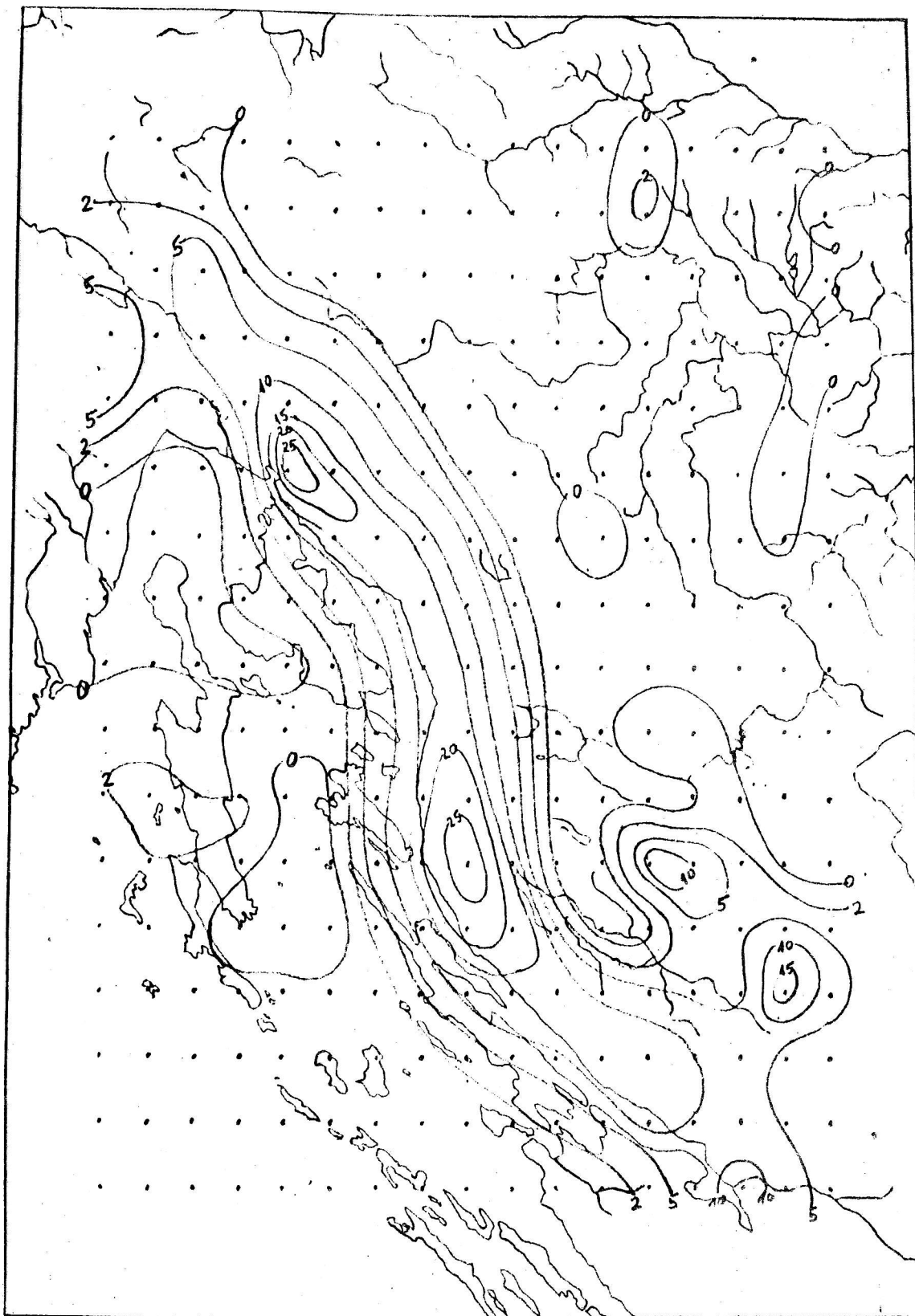
Sl. 18. 24-satne promjene tlaka zraka 5.IV 1962. u 01^h SEV



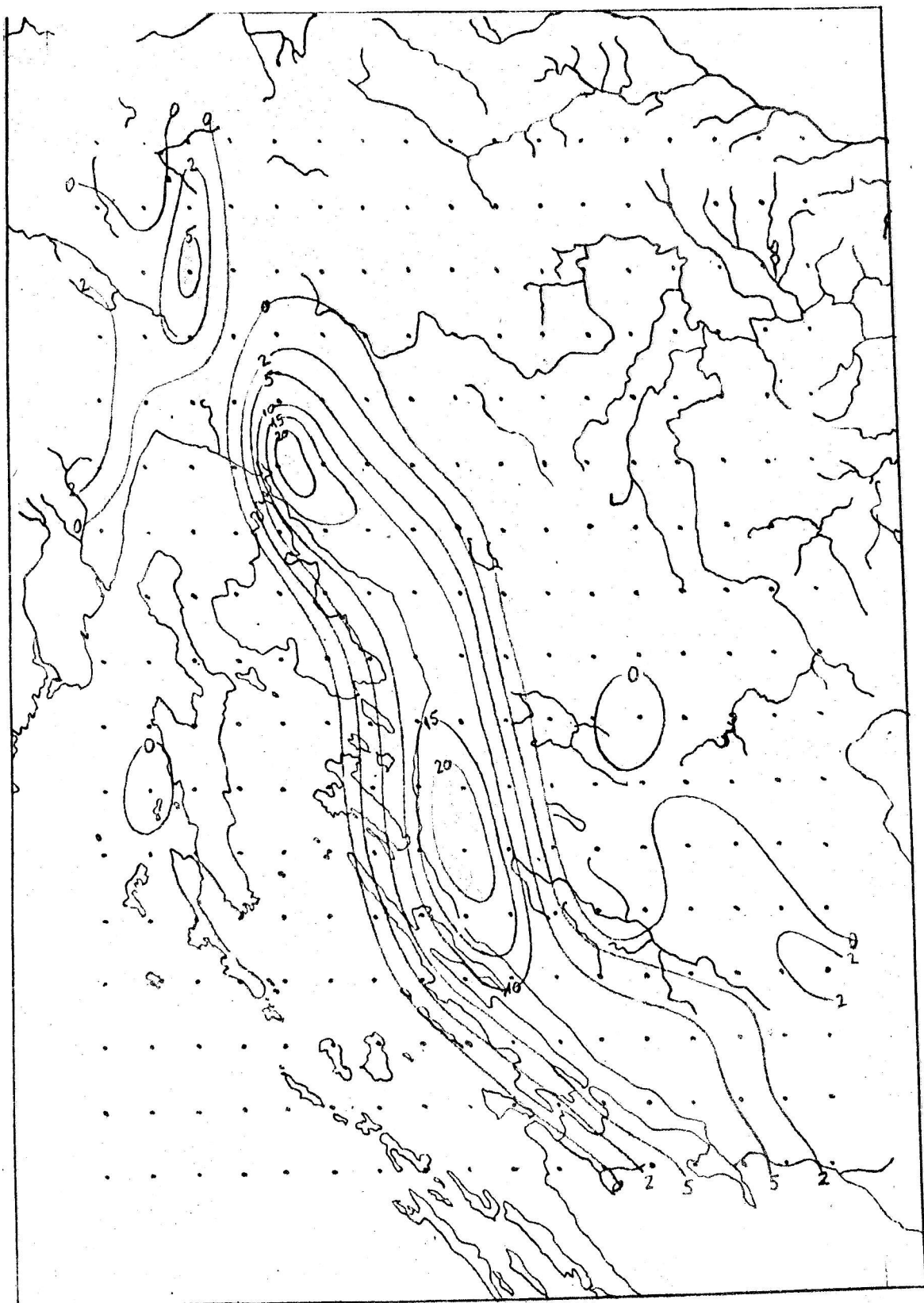
S1. 19. RT 500/1000 mb 5.IV 1962. u 01^h SEV



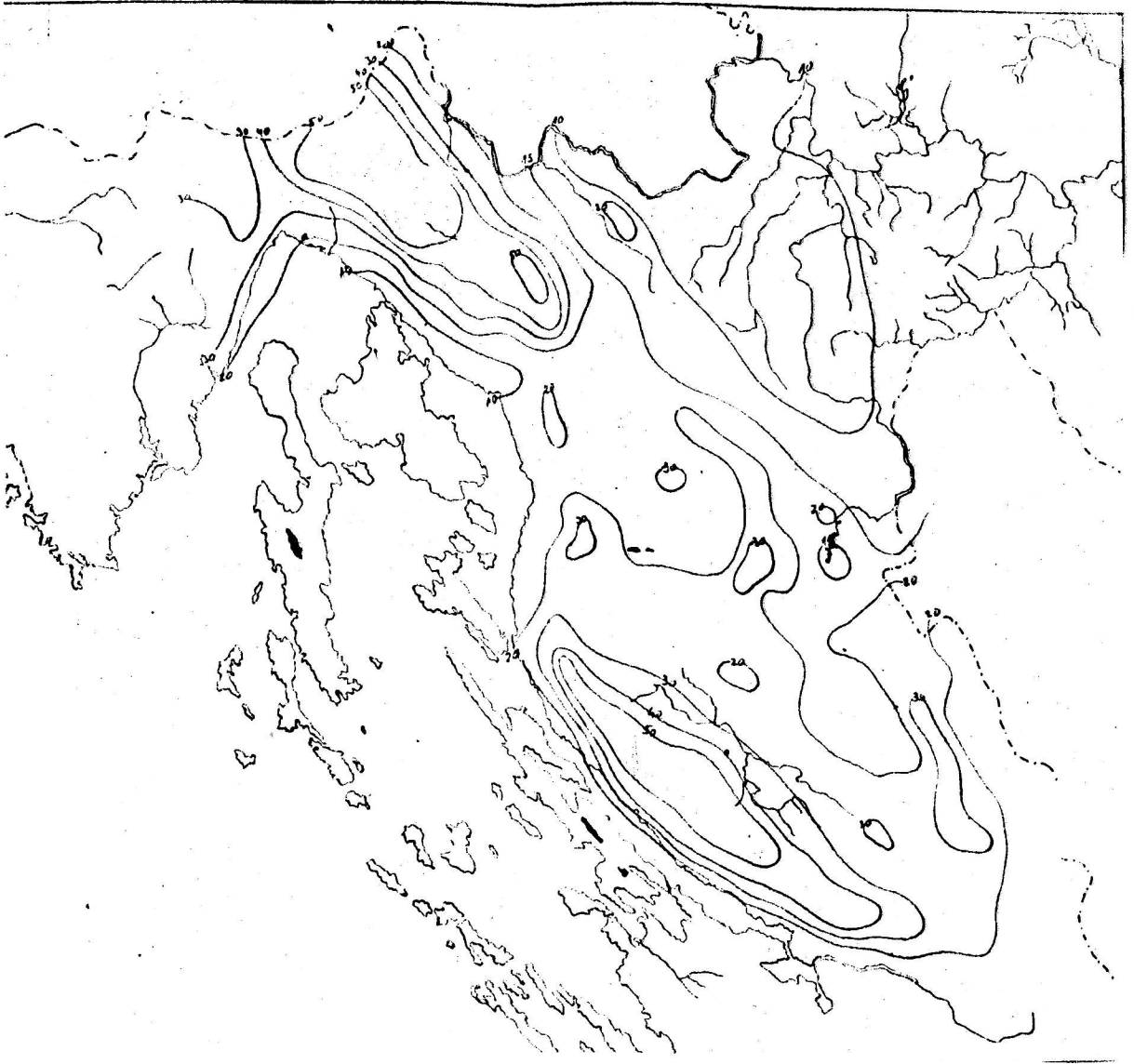
S1. 20. AT 500 mb 5.IV 1962. u 01^h SEV



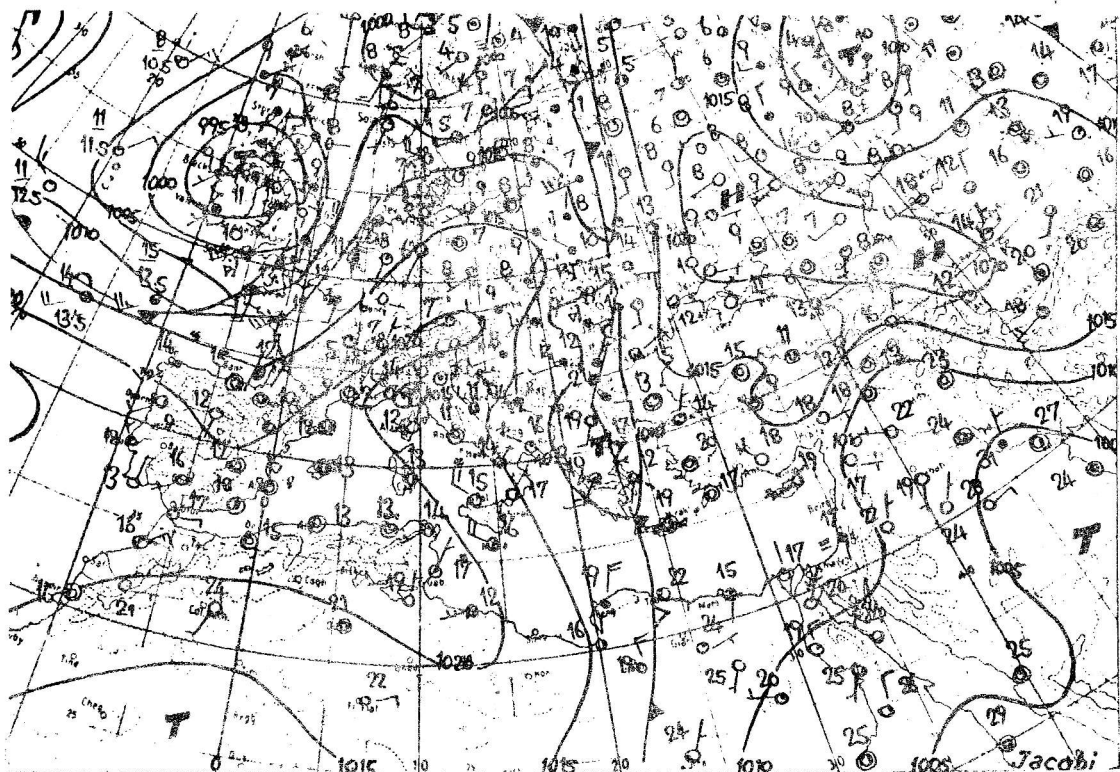
Sl. 21. Količine oborine u mm/h uvjetovane orografijom i prizemnim poljem strujanja 5.IV 1962. u 01h SEV, dobijene po modelu



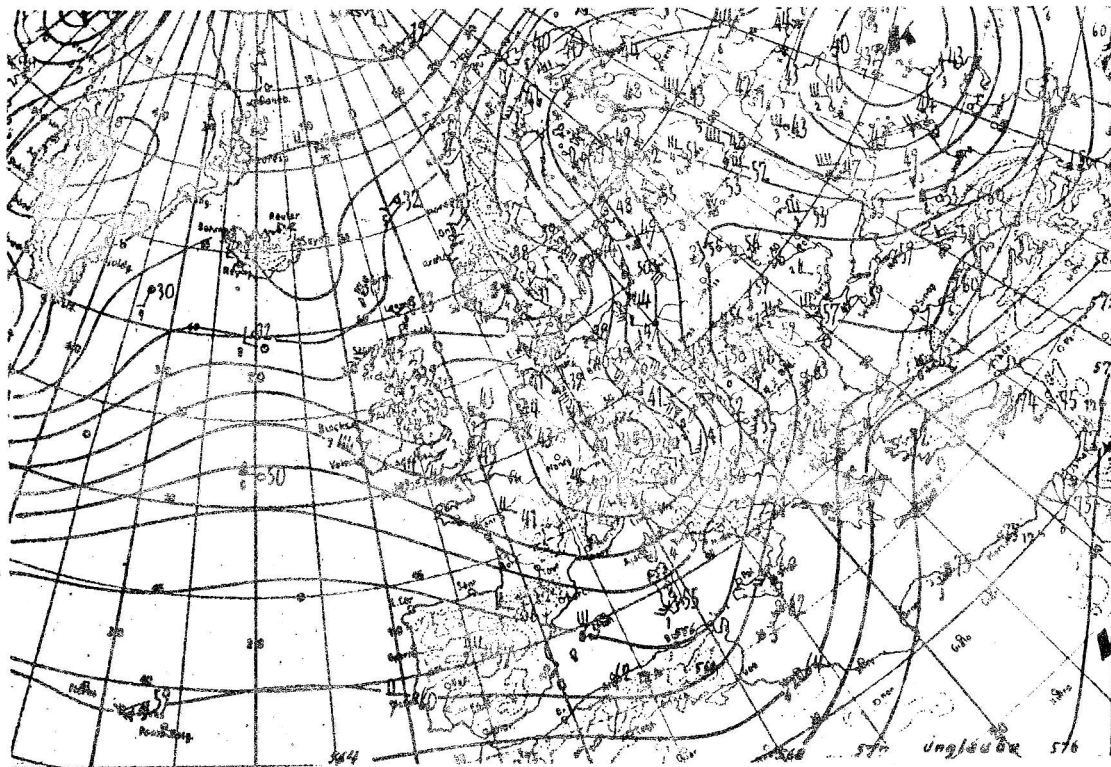
Sl. 22. Ukupna količina oborine u mm/h 5.IV 1962.
u 01^h SEV, dobijena po modelu



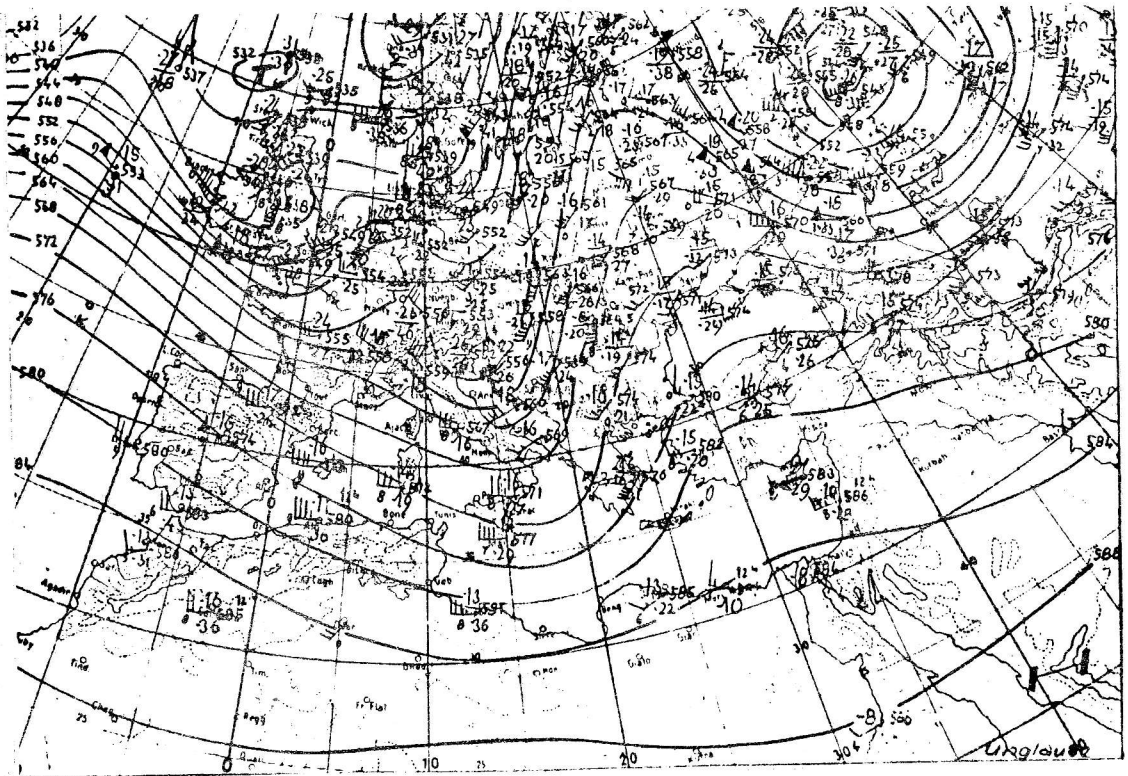
Sl. 23. Količine oborine u mm/24^h izmjerene
5.IV 1962. u 07^h SEV.



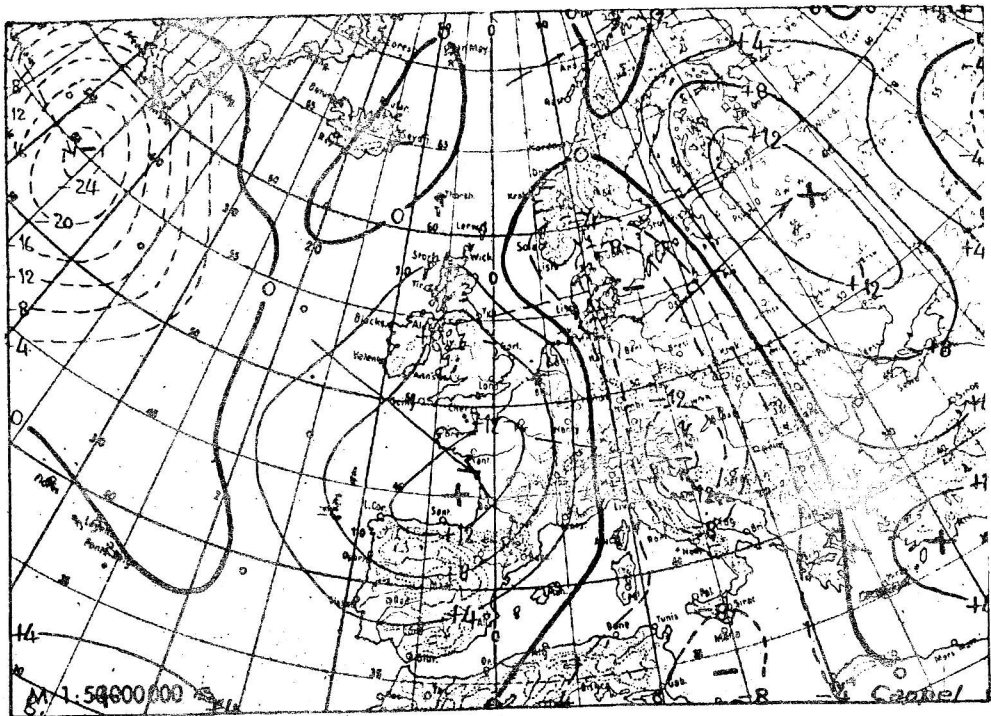
Sl. 24. Sinoptička situacija 21.V 1962. u 01^h SEV



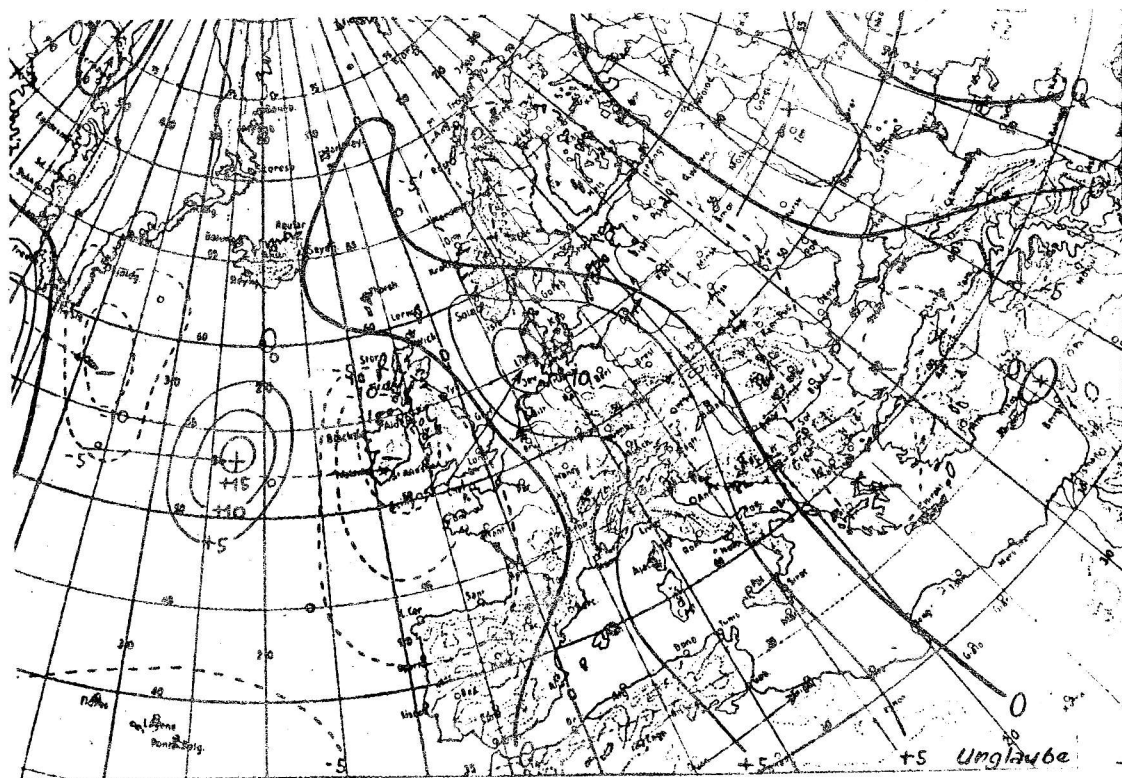
Sl. 25. RT 500/1000 mb 21.V 1962. u 01^h SEV



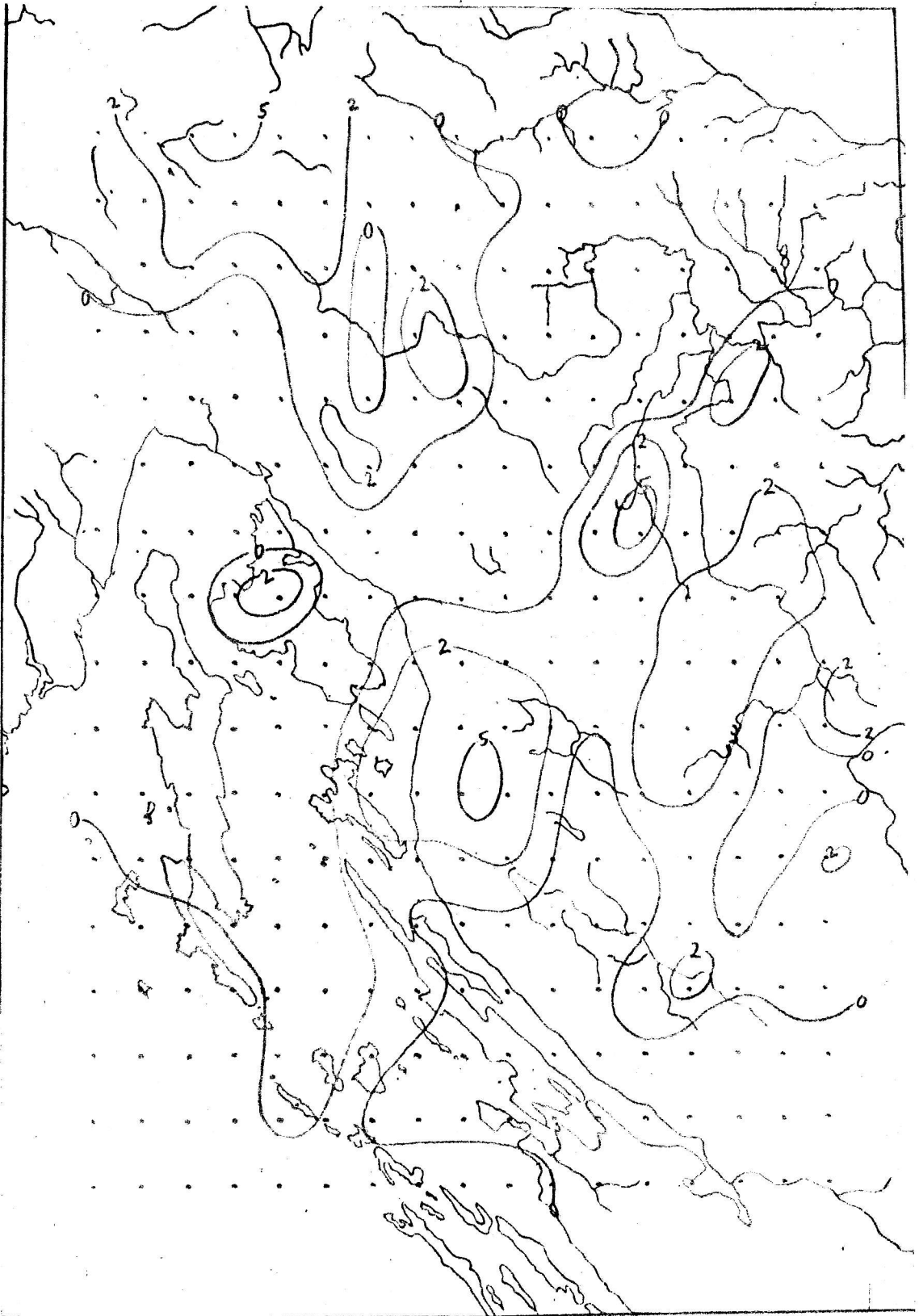
Sl. 26. AT 500 mb 21.V 1962. u 01^h SEV



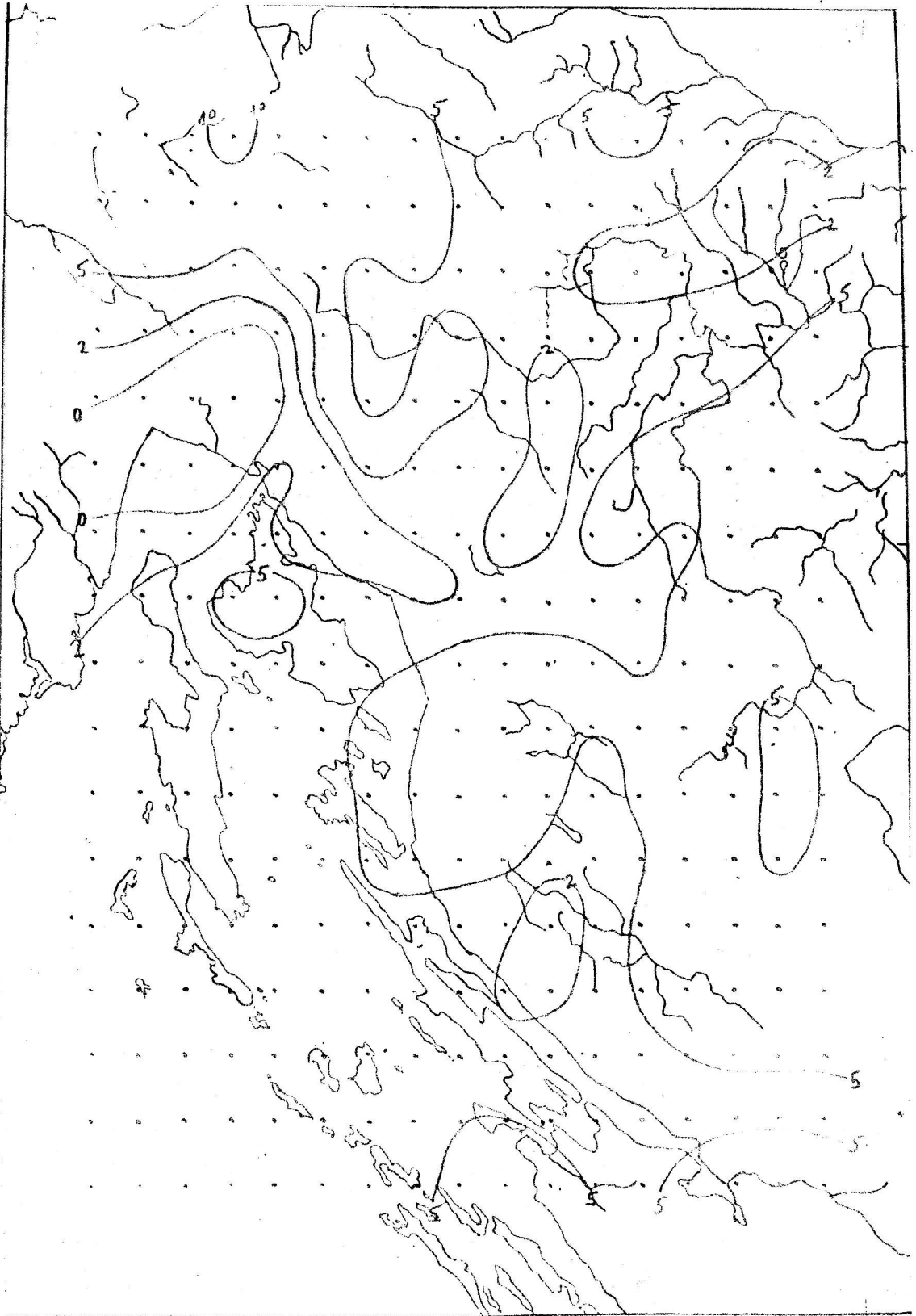
Sl. 27. 24-satne promjene RT 500/1000 mb
21.V 1962. u 01^h SEV



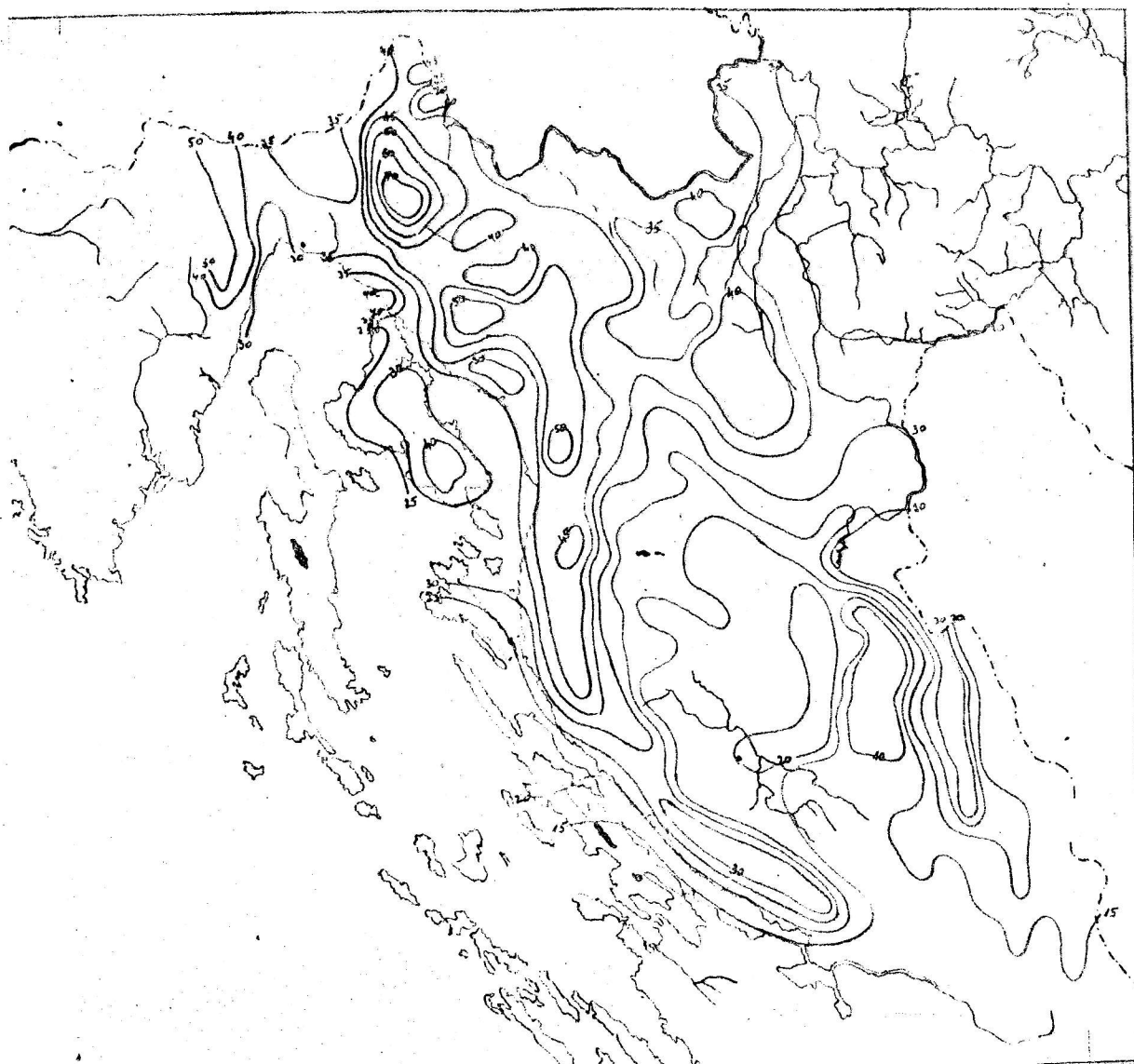
Sl. 28. 24-satne promjene tlaka zraka
21.V 1962. u 01^h SEV



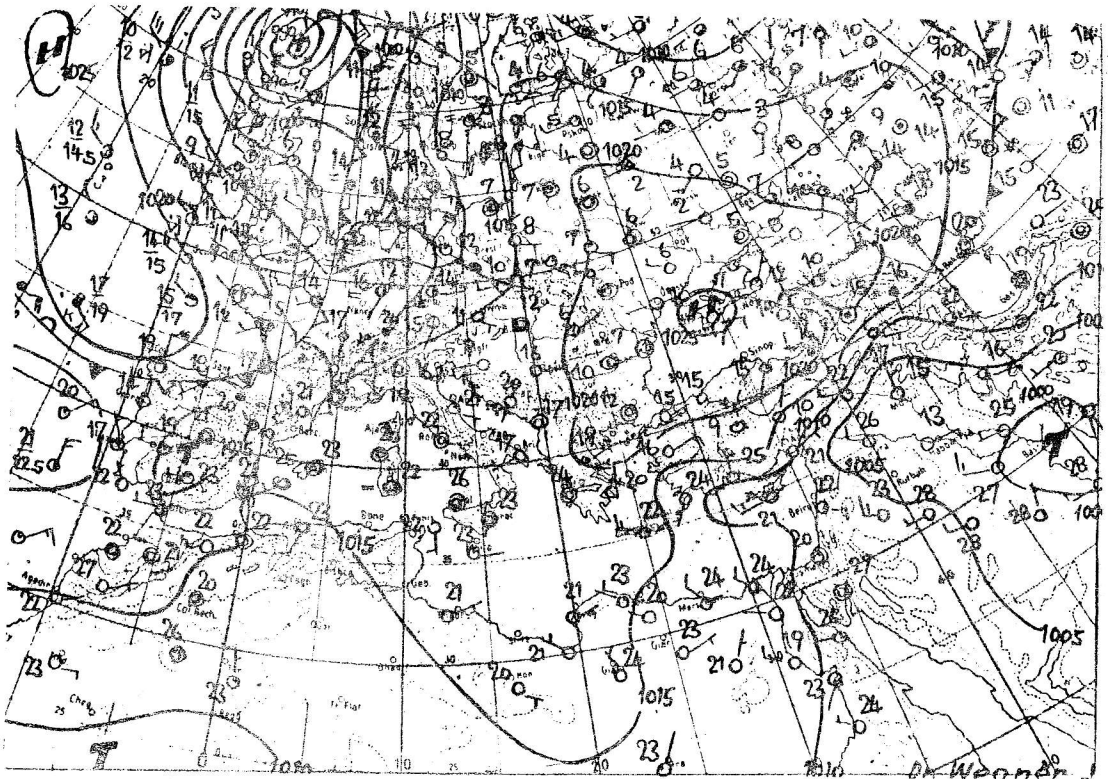
Sl. 30. Količine oborine u mm/h uvjetovane orografijom i prizemnim poljem strujanja 21.V 1962. u 01h SEV, dobijene po modelu



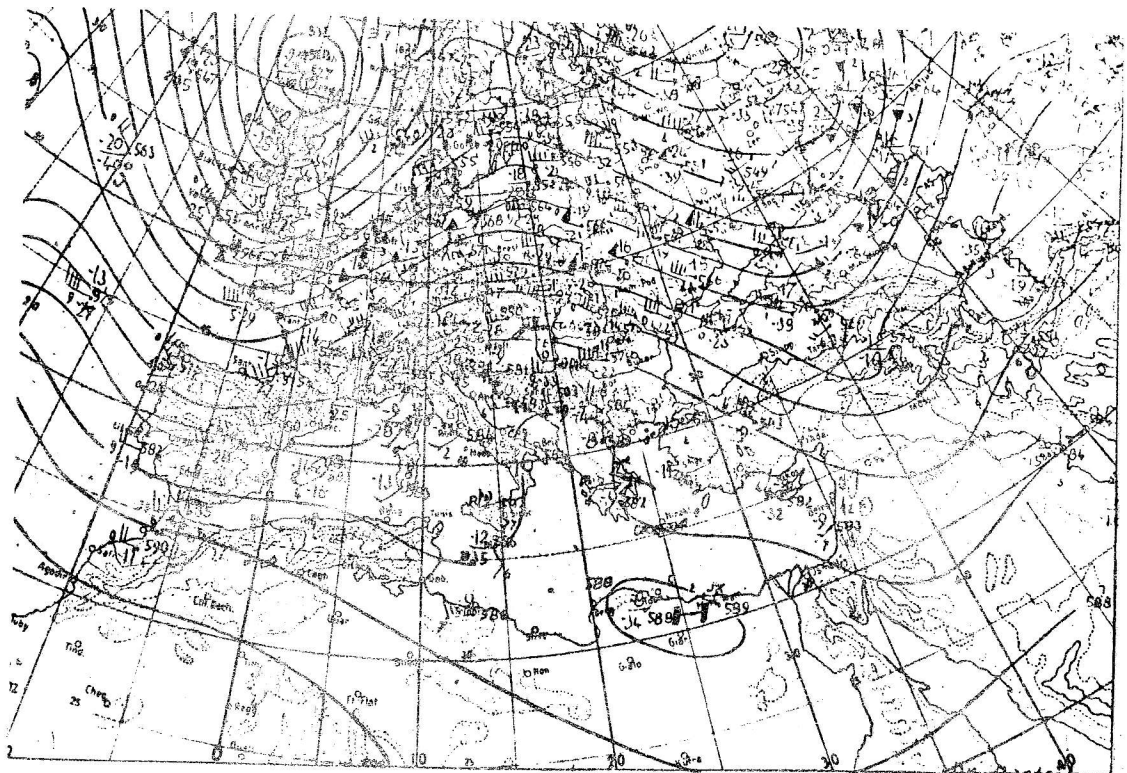
Sl. 31. Ukupna količina oborine u mm/h
21.V 1962. u 01^h SEV, dobijena
po modelu



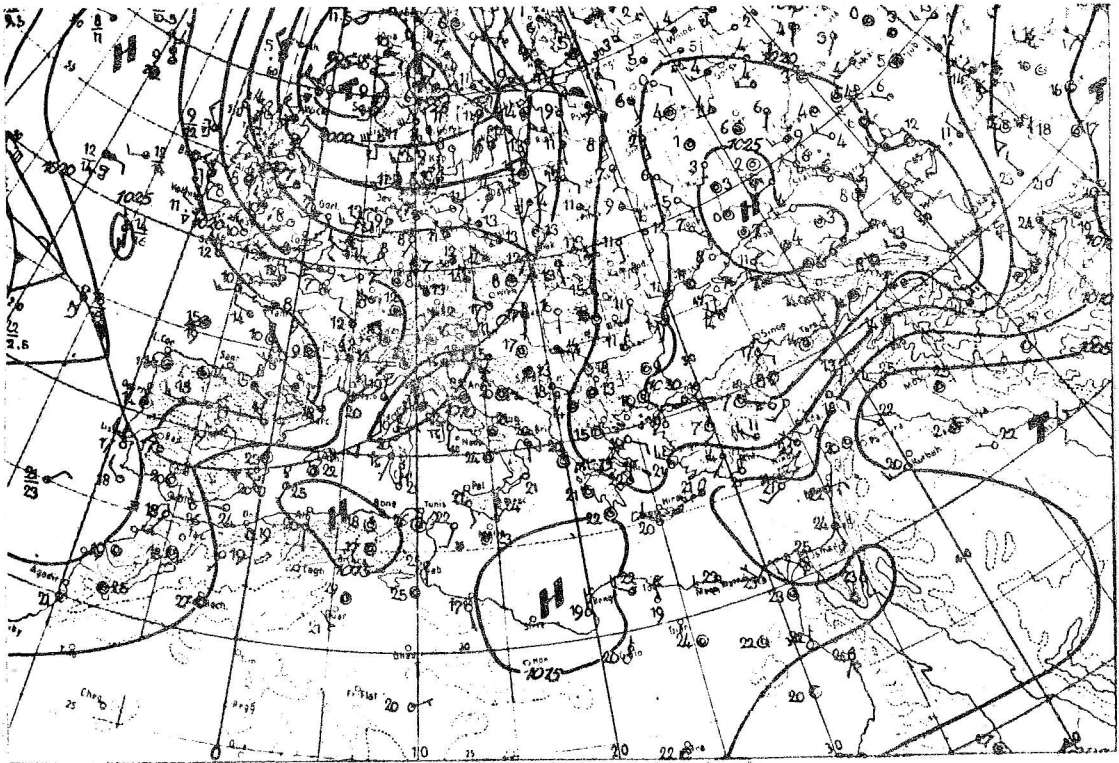
Sl. 32. Količine oborine u mm/24^h izmjerene
21.V 1962. u 07^h SEV



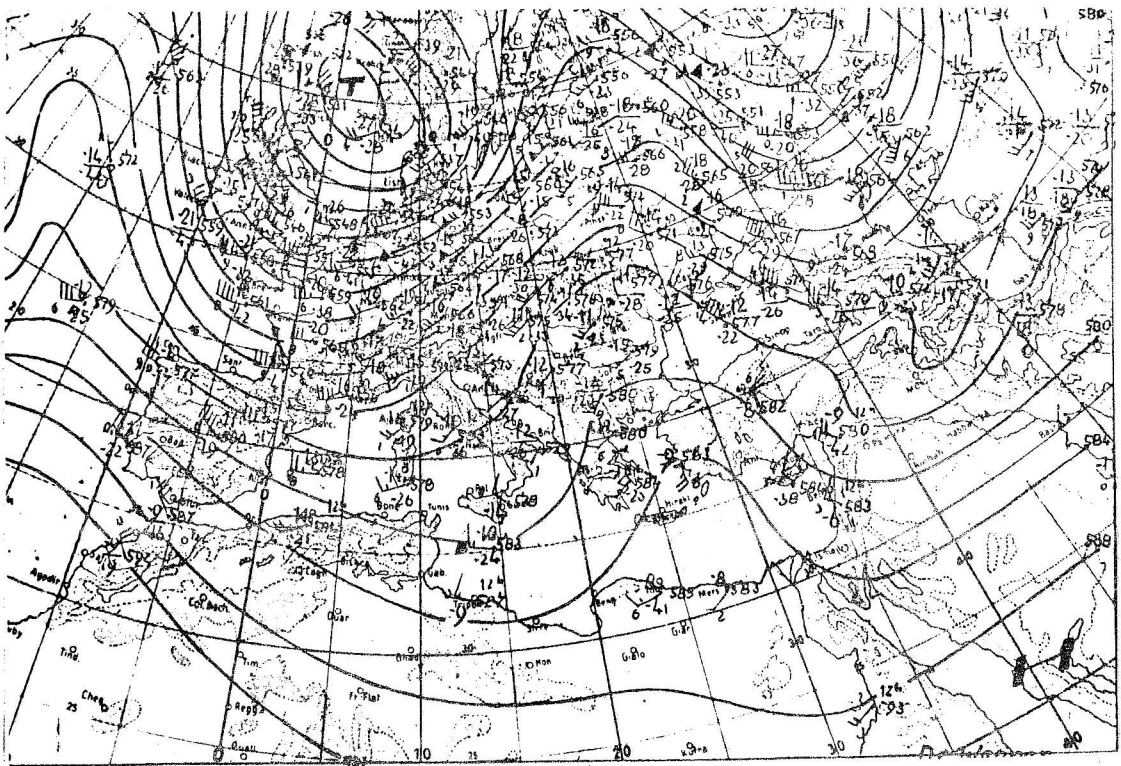
Sl. 33. Sinoptička situacija 16.IX 1962. u 01^h SEV



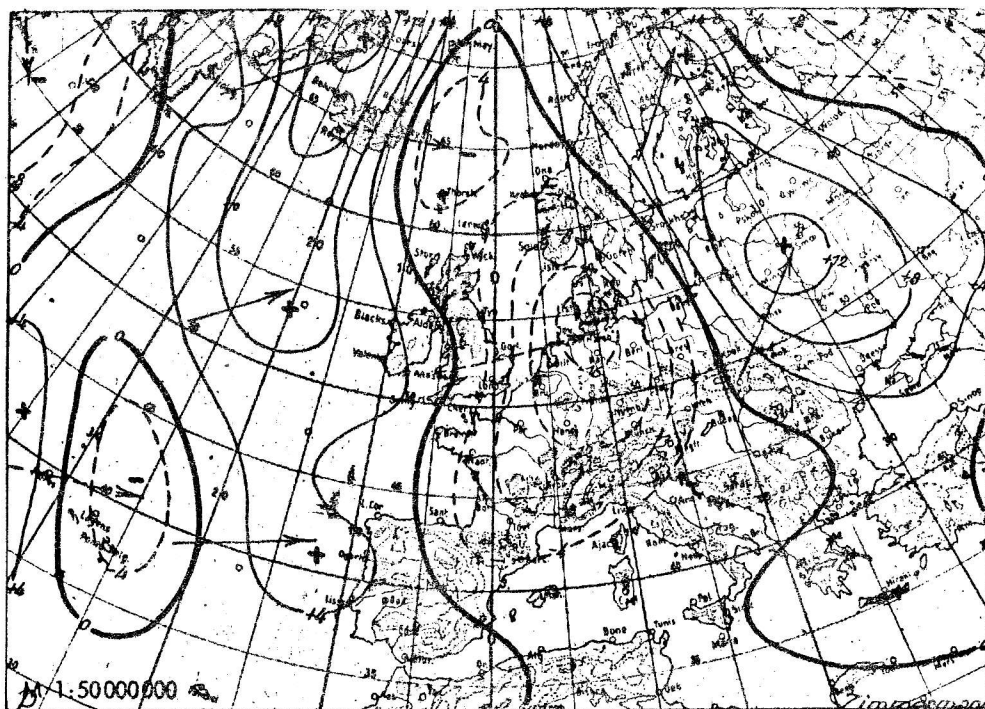
Sl. 34. AT 500 mb 16.IX 1962. u 01^h SEV



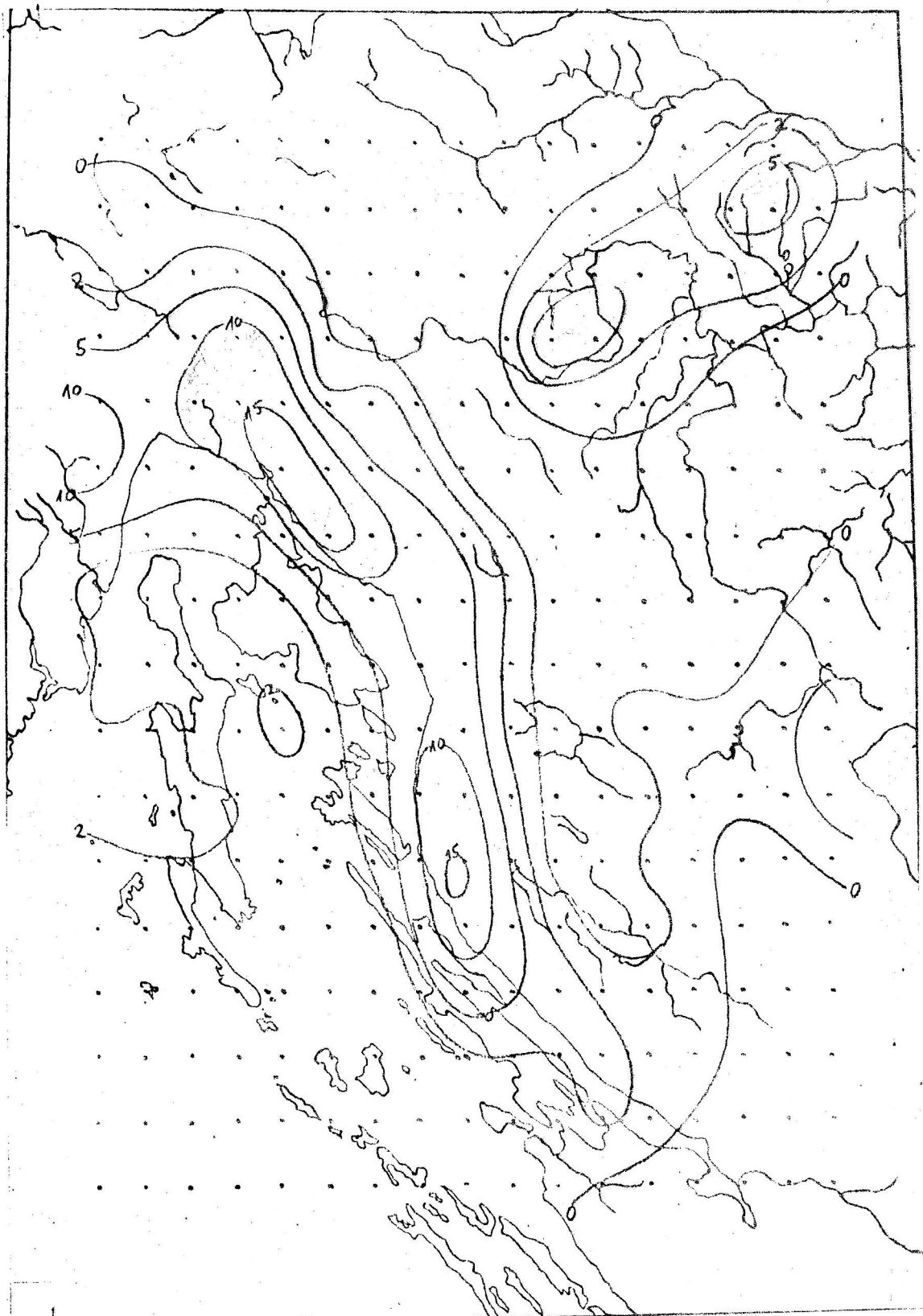
Sl. 35. Sinoptička situacija 17.IX 1962. u 01^h SEV



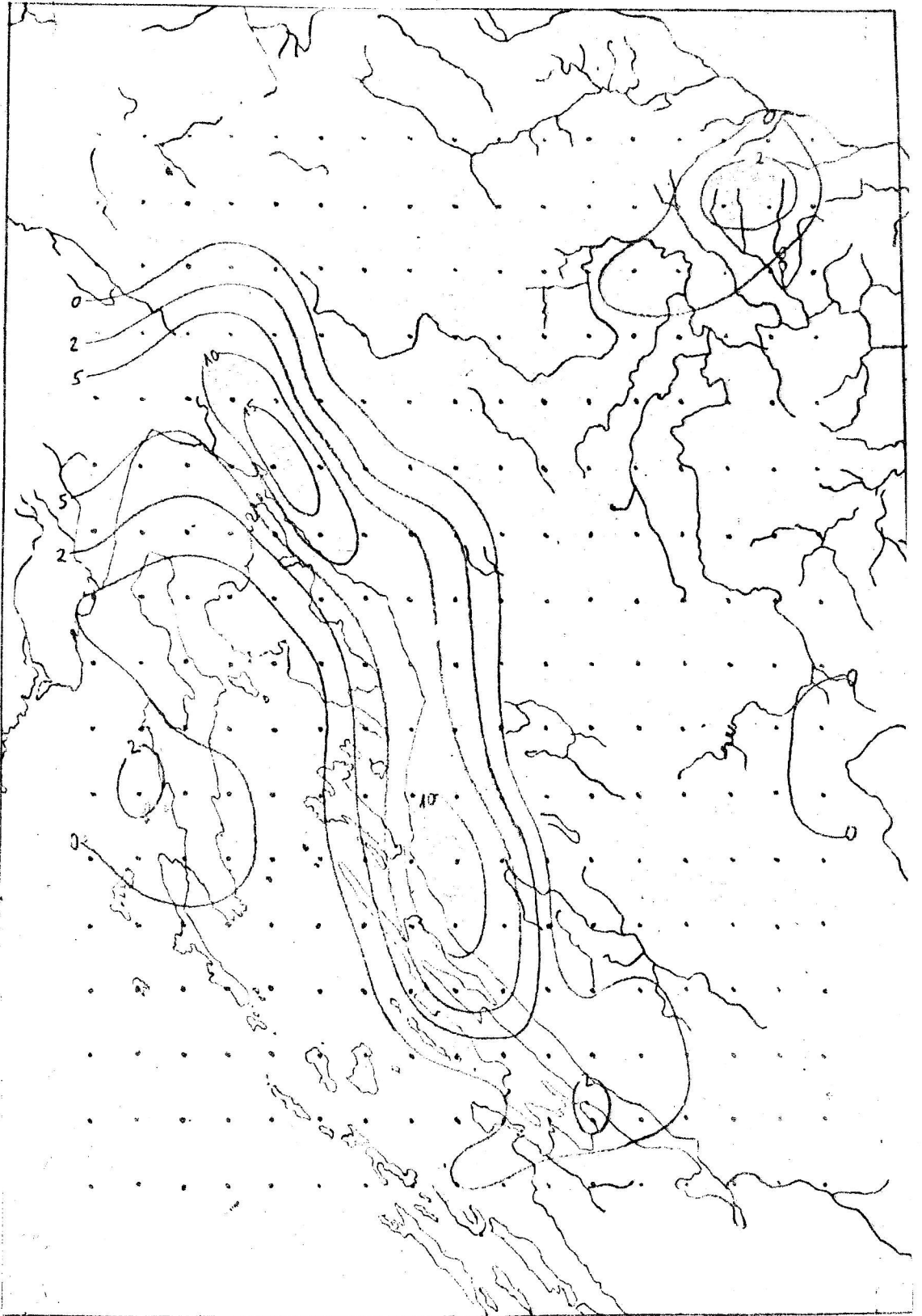
Sl. 36. AT 500 mb 17.IX 1962. u 01^h SEV



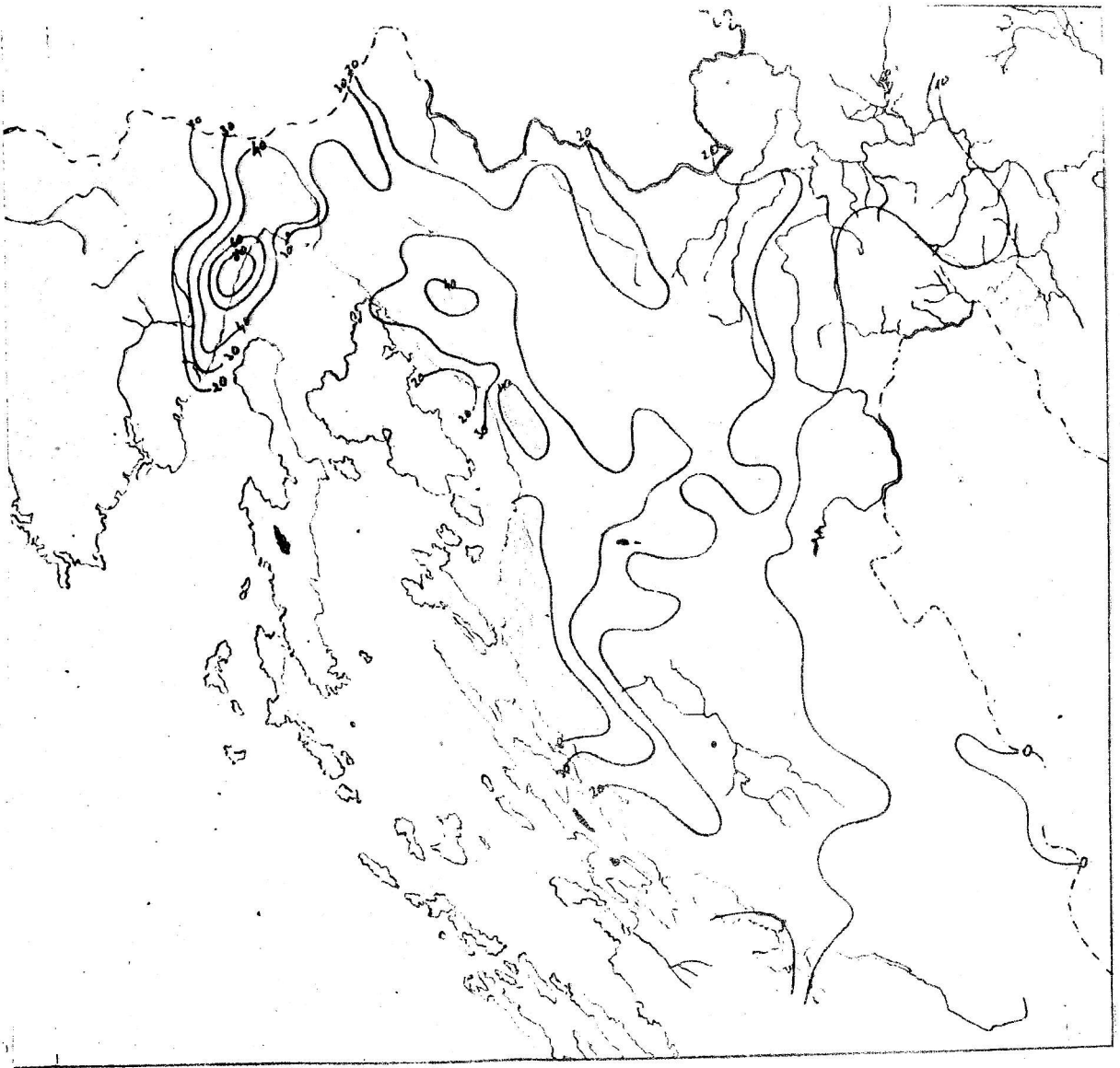
Sl. 37. 24-satne promjene RT 500/100 mb 17.IX 1962.
u 01^h SEV



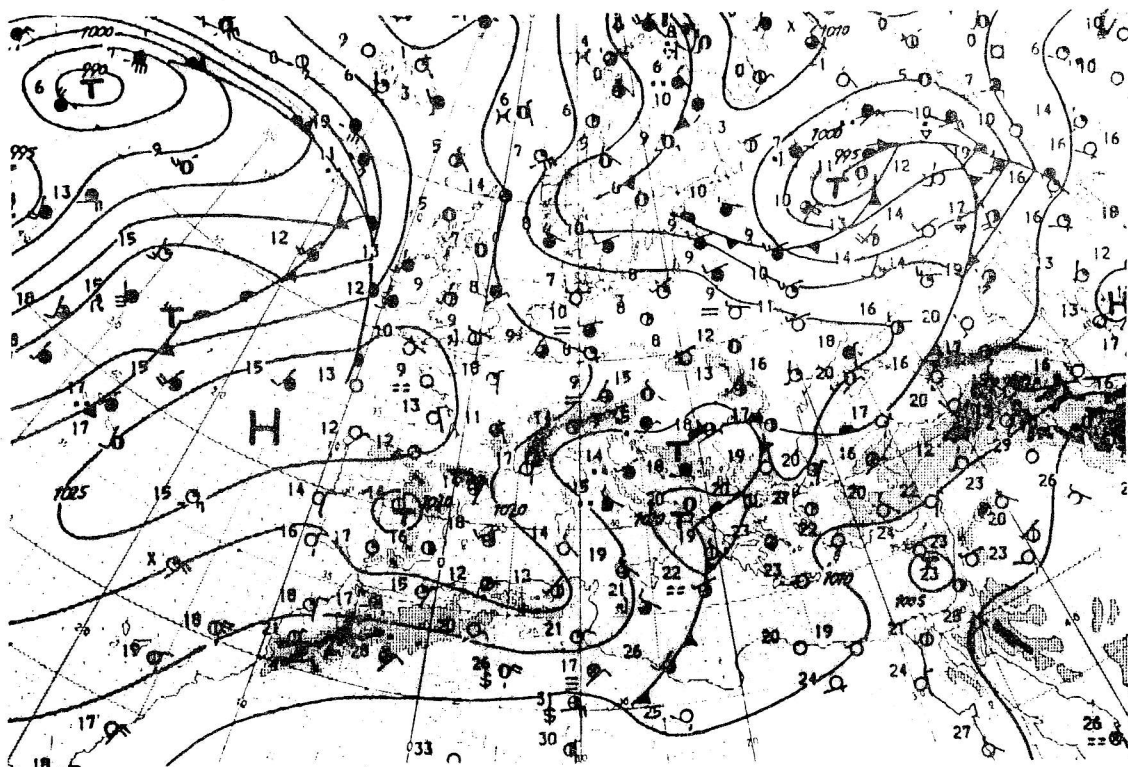
Sl. 38. Količine oborine u mm/h uvjetovane orografijom i prizemnim poljem strujanja 17.IX 1962. u 01h SEV, dobijene po modelu



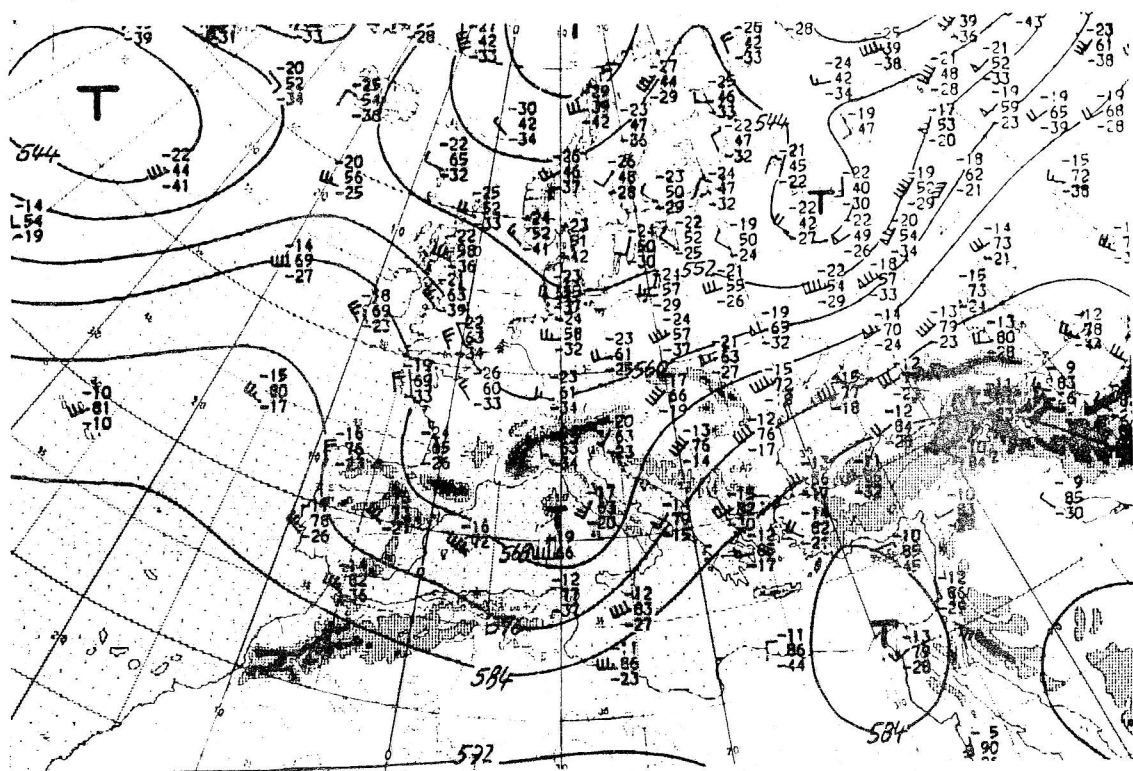
Sl. 39. Ukupna količina oborine u mm/h 17.IX 1962.
u 01^h SEV, dobijena po modelu



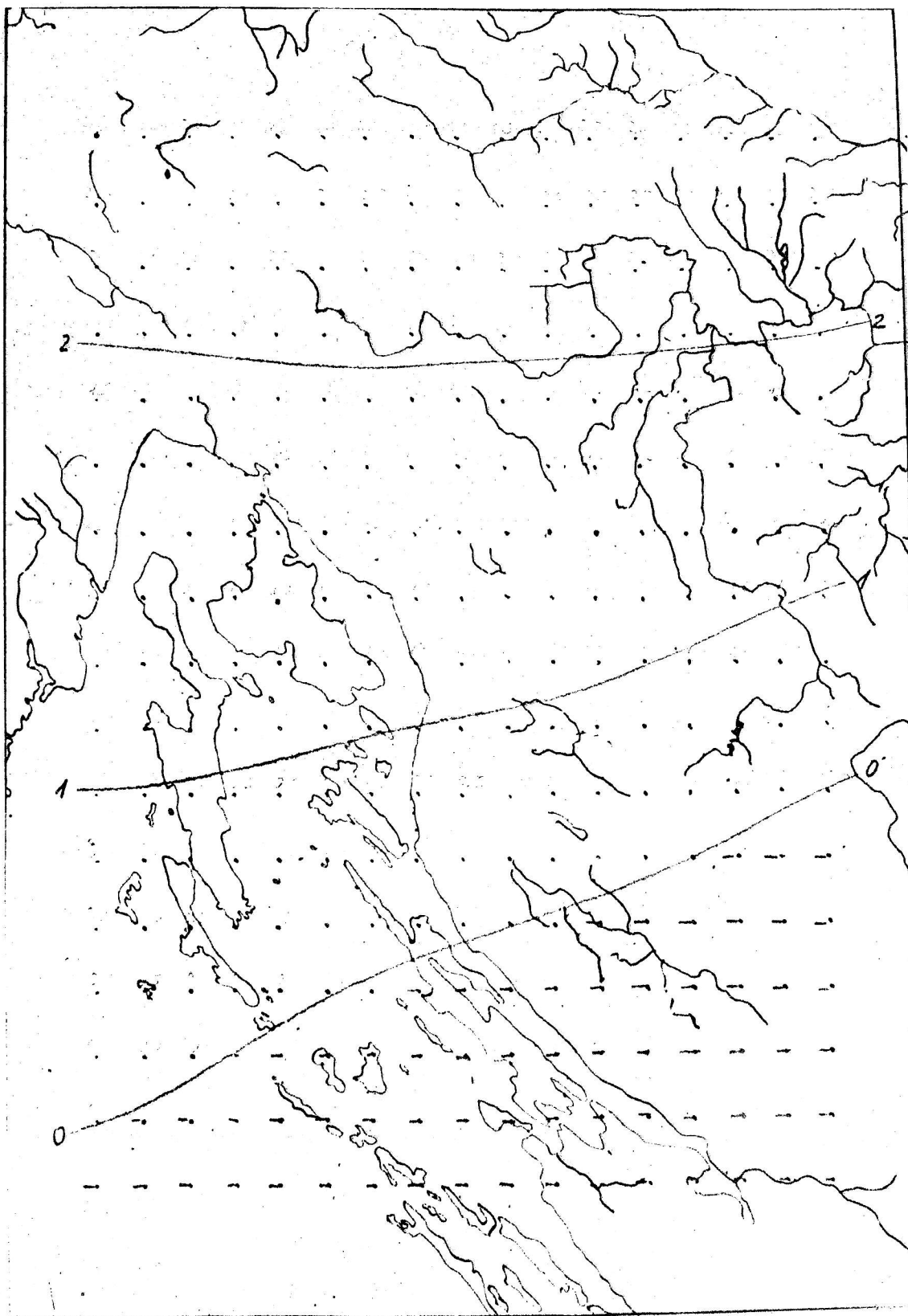
Sl. 40. Količine oborine, u mm/24^h izmjerene
17.IX 1962. u 07^h SEV



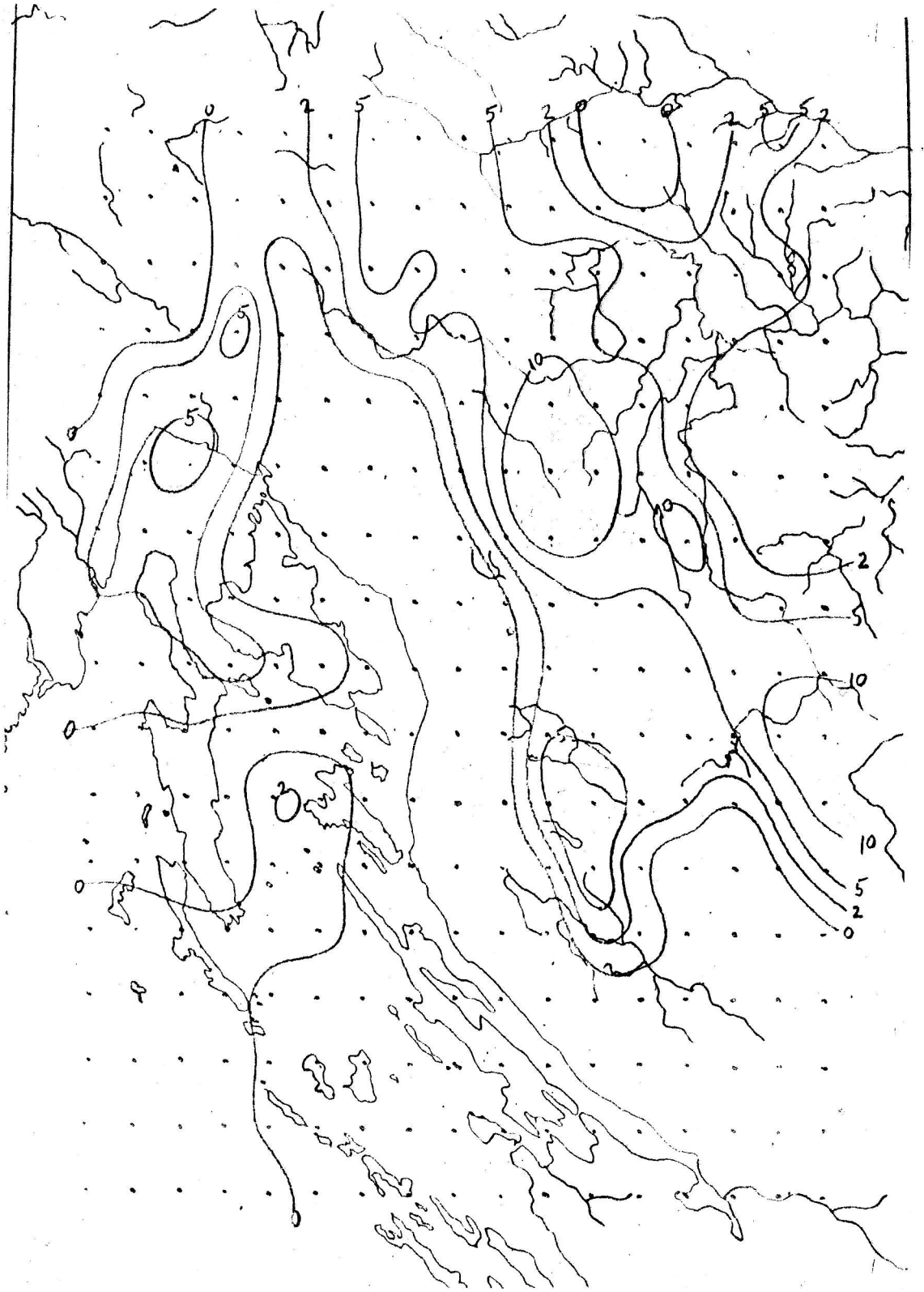
Sl. 41. Sinoptička situacija 2.VI 1969. u 01^h SEV



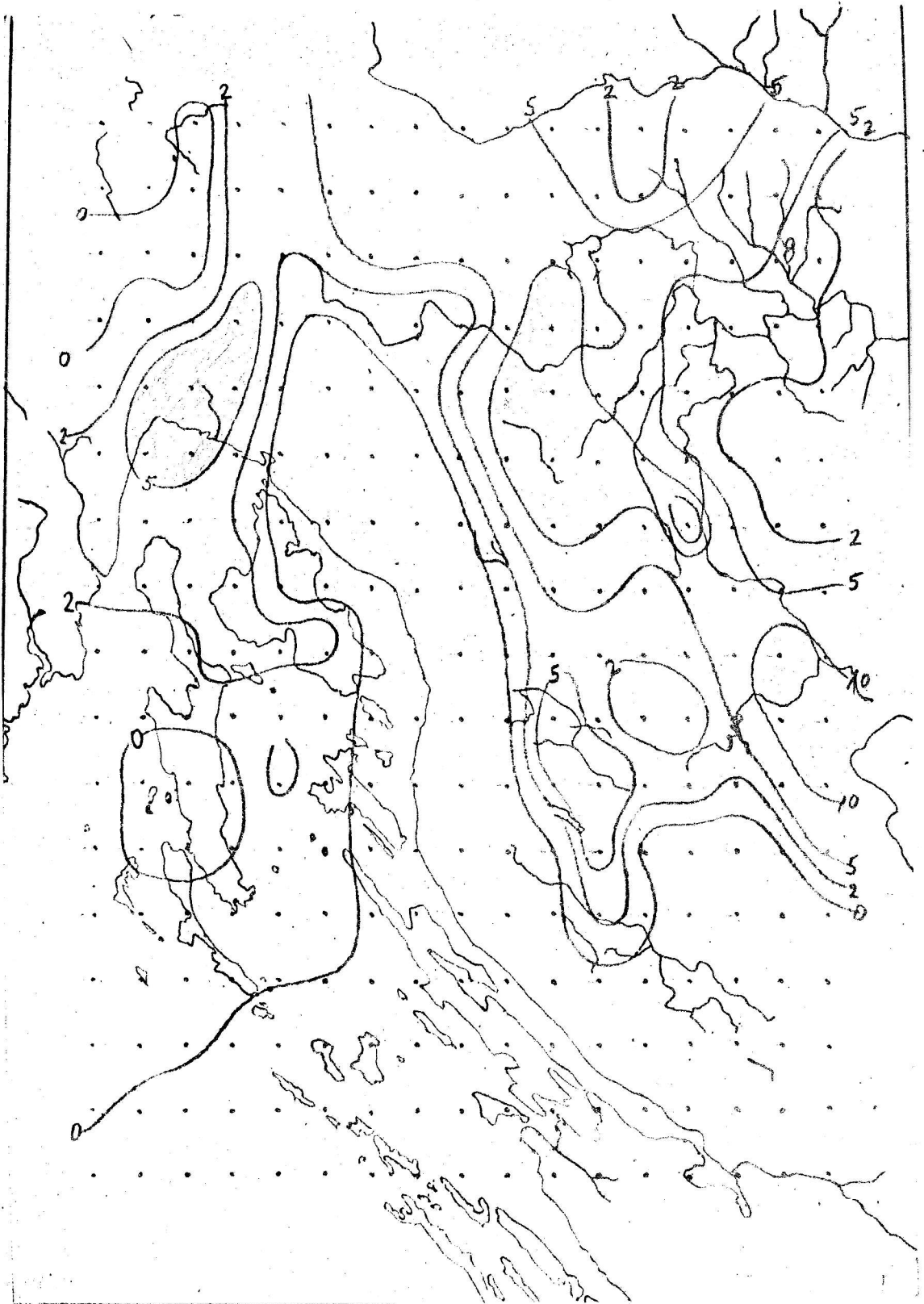
Sl. 42. AT 500 mb 2.VI 1962. u 01^h SEV



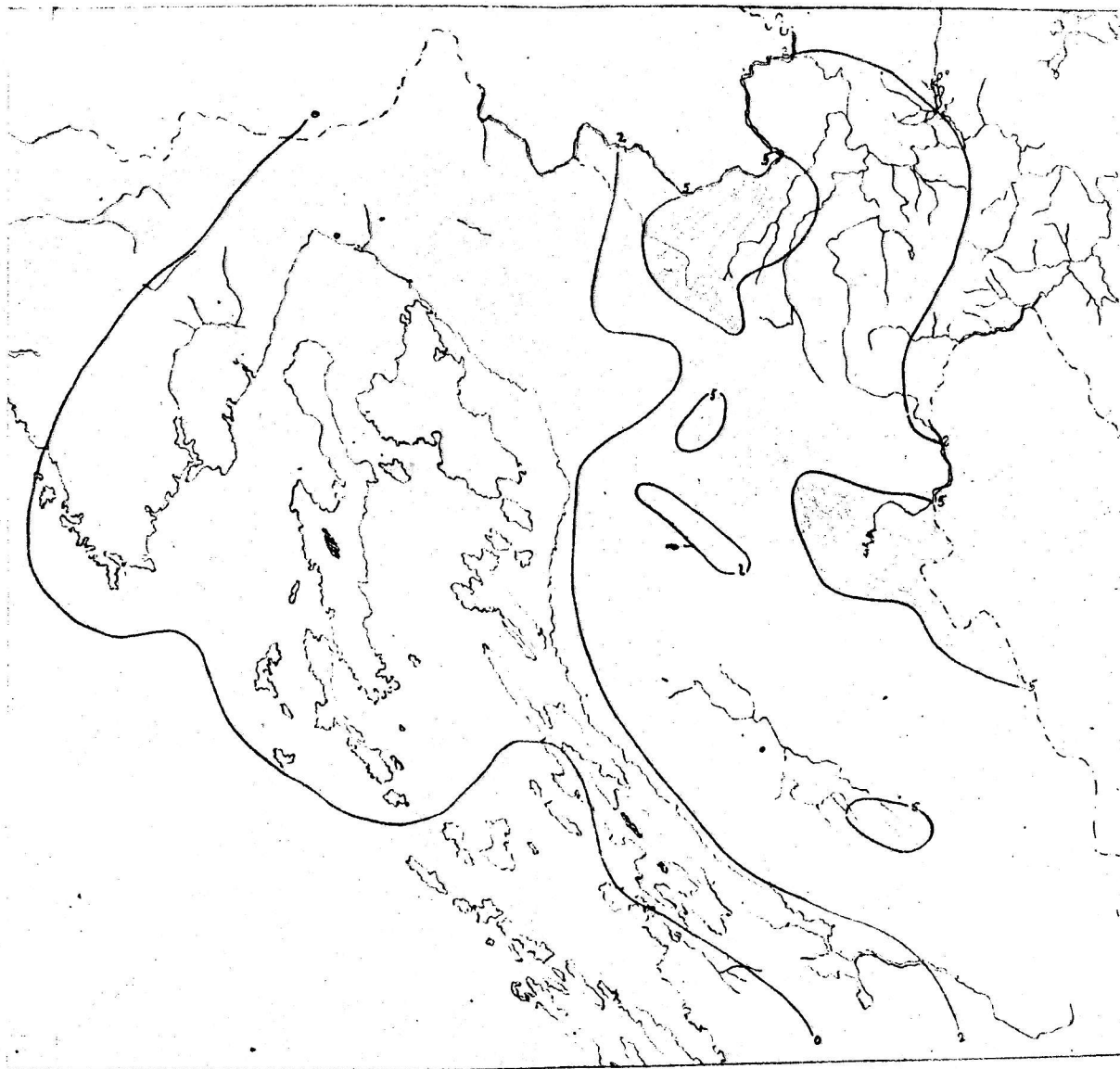
Sl. 43. Količine oborina u mm/h uvjetovane općim dizanjem zraka u atmosferi 2.VI 1962. u 01ⁿ SEV, dobijene po modelu



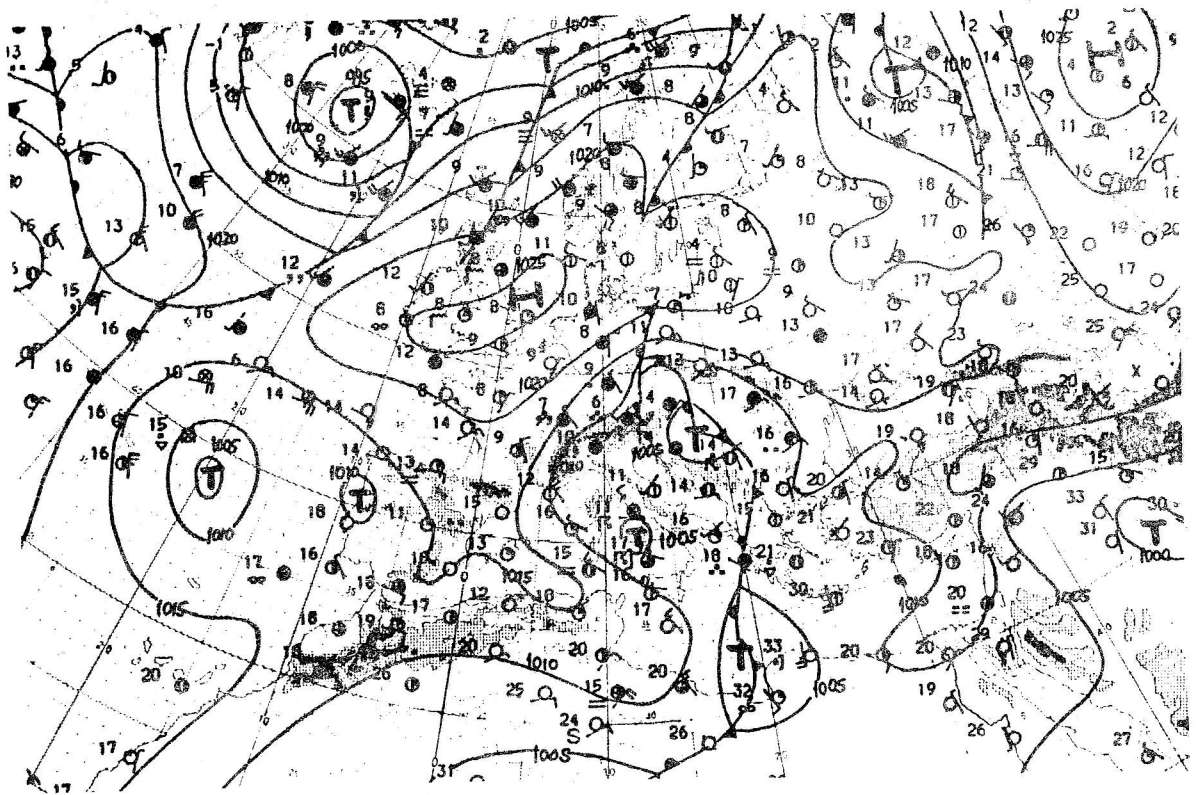
Sl. 44. Količine oborina u mm/h uvjetovane orografijom i prizemnim poljem strujanja 2.VI 1969. u 01^h SEV, dobijene po modelu



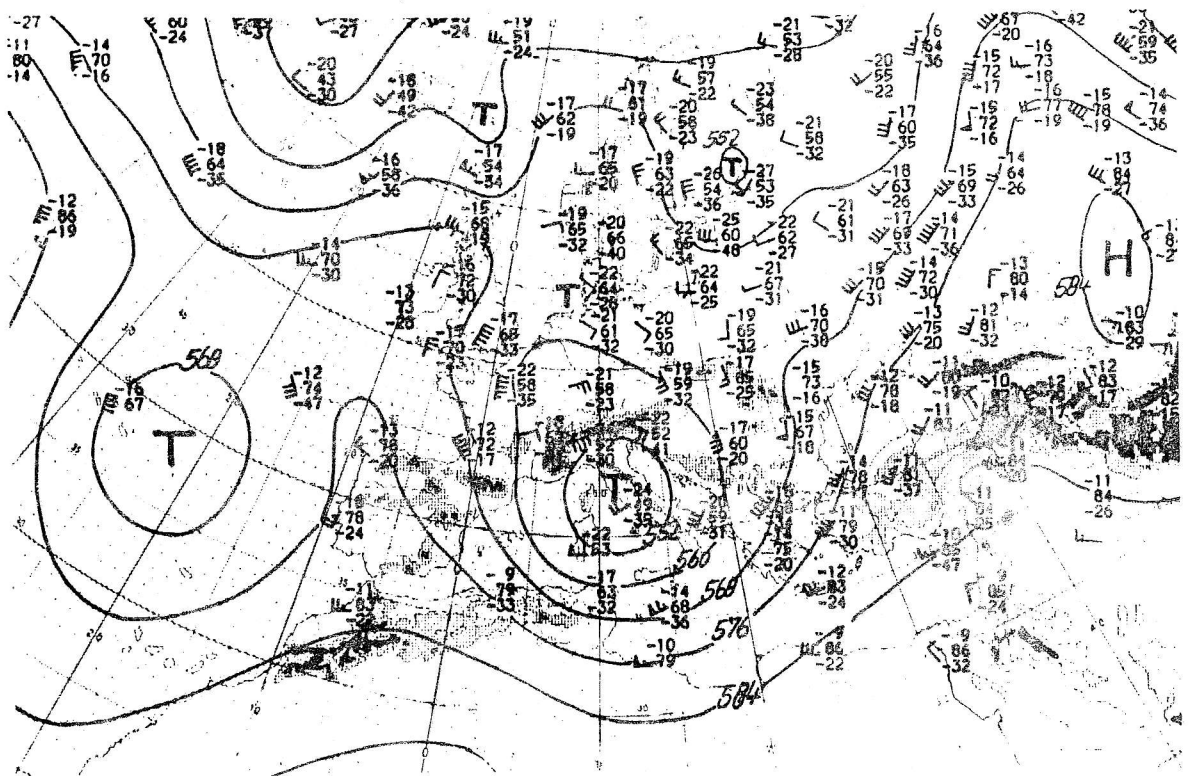
Sl. 45. Ukupna količina oborine u mm/h 2.VI 1962.
u 01^h SEV, dobijena po modelu



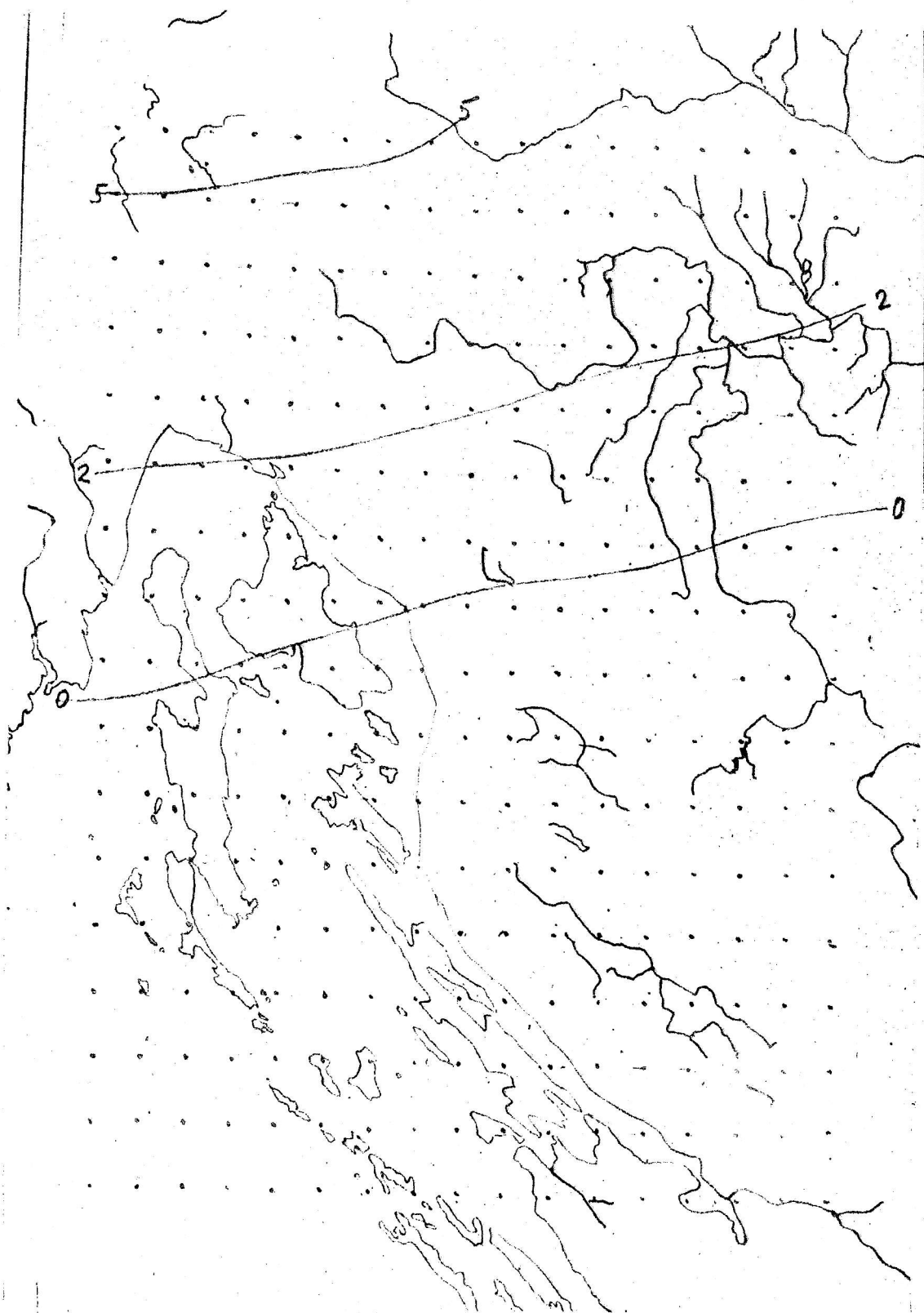
Sl. 46. Količine oborine u mm/h izmjerene
2.VI 1969. u 01^h SEV



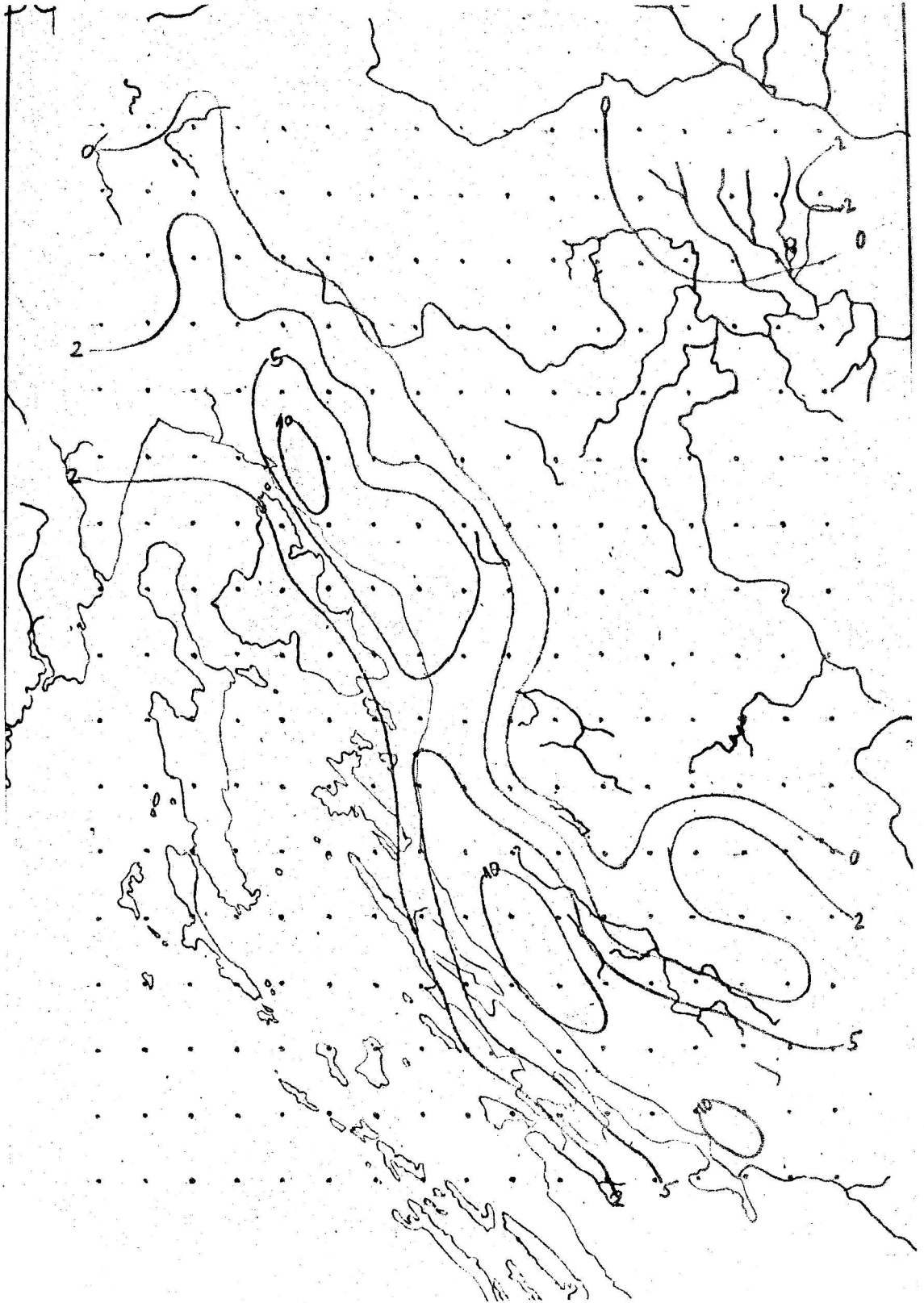
Sl. 47. Sinoptička situacija 7.VI 1969. u 01^h SEV



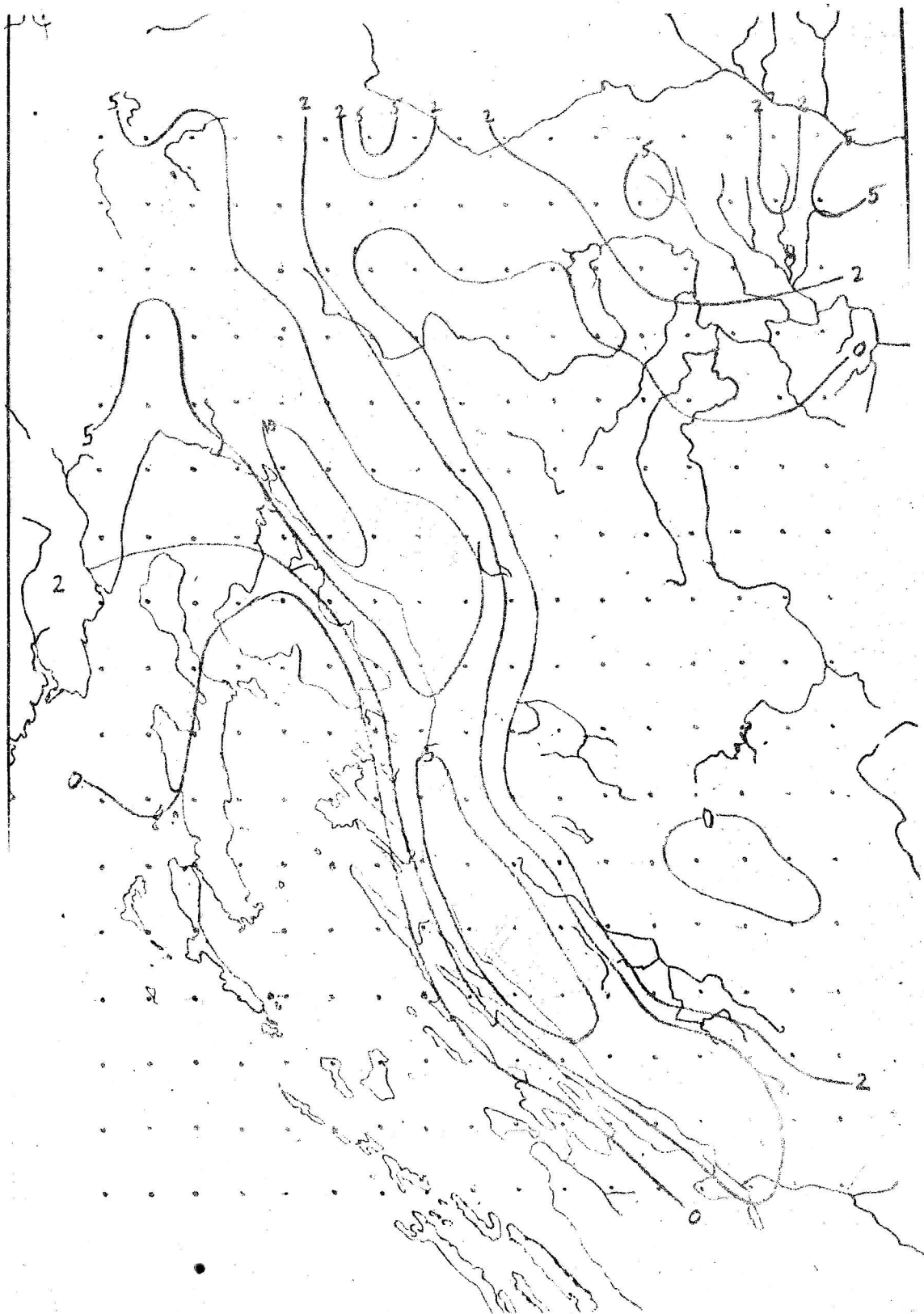
Sl. 48. AT 500 mb 7.VI 1969. u 01^h SEV



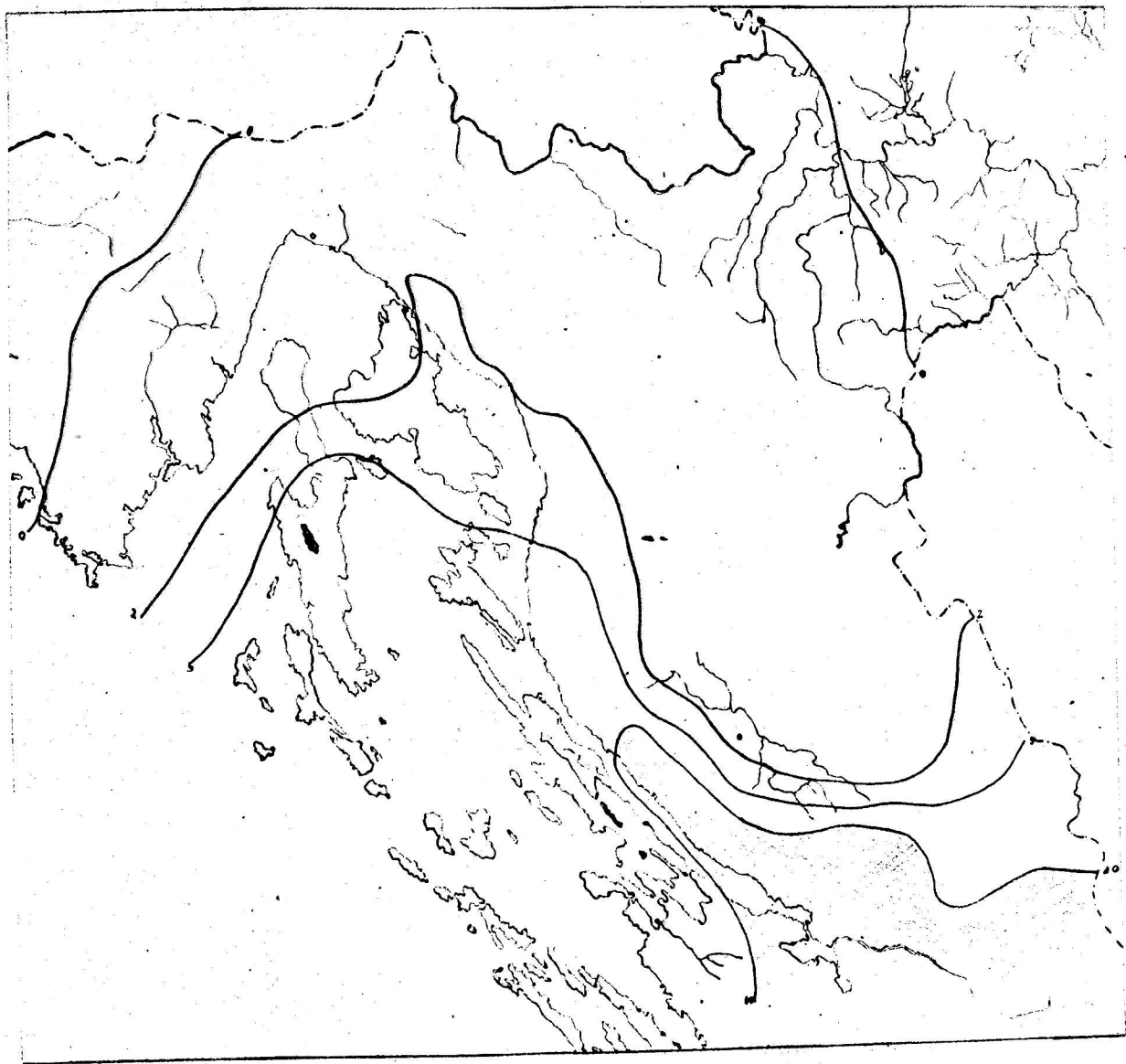
Sl. 49. Količine oborina u mm/h uvjetovane općim dizanjem zraka u atmosferi 7.VI 1969. u 01h SEV, dobijene po modelu



Sl. 50. Količine oborina u mm/h uvjetovane orografijom i prizemnim poljem strujanja 7.VI 1969. u 01h SEV, dobijene po modelu



S1. 51. Ukupna količina oborine u mm/h 7.VI 1969.
u 01^h SEV, dobijena po modelu



Sl. 52. Količine oborine u mm/24 izmjerene 7.VI 1969.
u 01^h SEV