

**UTJECAJ OROGRAFIJE U MEZORAZMJERU
NA PONAŠANJE Cb OBLAKA I RAZDIOBU OBORINE:
SLUČAJ 28. SRPNJA 1980. NA PODRUČJU MEDVEDNICE**

**Cb Cloud Behaviour and Rain Distribution
Influenced by the Mesoscale Orography:
Case 28 July 1980 or the Area of Medvednica**

IVAN ČAČIĆ

Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb

Primljeno 26. lipnja 1986, u konačnom obliku 20. listopada 1986.

Sažetak: Istraženi su uzroci ekstremno velike količine oborine (95 mm) koja je nastala zbog izraženog razvoja Cb oblaka na navjetrini jugozapadnog boka Medvednice 28. 7. 1980. Promatran je utjecaj orografske prepreke na termodinamičke i hidrodinamičke uvjete razvoja i gibanja Cb stanice. Ovdje se po prvi puta povezuje studija gibanja i razvoja Cb oblaka nad područjem Medvednice s termodinamičkim i hidrodinamičkim svojstvima donje troposfere, a na osnovi radarskih mjerenja i radiosondažnih podataka. Pored analize radarskih i radiosondažnih podataka obuhvaćena je analiza atmosferskih pojava, smjera i brzine vjetra, te količine oborine na širem području Medvednice. Analiza je pokazala da je ekstremno velika količina oborine nastala nakon oslobađanja velike raspoložive energije konvekcije u uvjetno nestabilnom zraku. Presudnu ulogu u oslobađanju ove energije imalo je polje vjetra pri tlu. Pokazalo se također da je orografija Medvednice značajno utjecala na strujnice prizemnog vjetra, pa prema tome i na razvoj Cumulonimbusa i na trajektorije Cb stanica.

Ključne riječi: Cb stanica, konvekcija, stabilnost atmosfere, razdioba oborine, Medvednica.

Abstract: The causes are investigated of excessive precipitation on the south–west edge of Medvednica which developed on 28 July 1980 due to a severe Cb cell evolution. The obstacle influence on thermodynamic and hydrodynamic conditions of Cb cell motion and the evolution has been considered. This paper, connects for the first time the study of Cb cell motion and evolution over the area of Medvednica with thermodynamic and hydrodynamic characteristics of the low troposphere, on the basis of radar and radio–sounding data. Besides these data the analysis includes data of atmospheric phenomena, ground wind and precipitation data for the wide area of Medvednica. It is shown that excessive precipitation followed the release of high available convective energy in conditionally unstable air. This release was caused by the ground wind field. It is shown, as well, that Medvednica orography significantly influences the configuration of the ground wind field and consequently the Cumulonimbus development and the Cb cell trajectory direction.

Key words: Cb cell, convection, atmospheric stability, precipitation distribution, Medvednica.

1. UVOD

U kasnim večernjim satima 28. 7. 1980. na području Medvednice razvio se cumulonimbus iz kojeg je u blizini sjevernih obronaka jugozapadnog boka Medvednice palo 95 mm oborine. Cilj ovog rada je otkrivanje uzroka nastanka, te posebno uloga orografije Medvednice u nastanku ove ekstremno velike količine oborine. U tom cilju, osnovni zadatak bilo je praćenje termodinamičkih i hidrodinamičkih uvjeta razvoja i gibanja Cb stanica te ocjena utjecaja orografije Medvednice na njihovo gibanje i razvoj.

Treba reći da termodinamika stvaranja olujnih procesa predstavlja predmet mnogih istraživanja i to osobito

u zadnjih nekoliko desetljeća. Pri tome su prisutna dva osnovna proučavanja:

– analiza prostorne razdiobe temperature i vlažnosti zraka, odnosno stabilnosti zračne mase i raspoložive energije konvekcije,

– istraživanje mehanizma oslobađanja energije konvekcije te povezanost tog mehanizma sa sinoptičkim strukturama.

Tako je iz analize radiosondažnih podataka Chalker (1949) pokazao da pojava pljuska ne ovisi samo o stabilnosti atmosfere već i o relativnoj vlažnosti u donjoj troposferi. Fawbush i Miller (1954) i Beebe (1958) analizirali su tip zračne mase u kojoj dolazi do izrazite olujne aktivnosti. Carlson i Ludlam (1968) pokazali su

da stvaranje žestokih oluja značajno ovisi o potencijalnoj temperaturi zasićenog zraka u donjoj troposferi. Utjecaj pojedinih sinoptičkih struktura na oslobađanje nestabilnosti, odnosno na stvaranje grmljavinskih procesa razmatrali su već Means (1952), Porter i suradnici (1955), Winston (1956) i Sartor (1962). Pokazalo se da su za oslobađanje nestabilnosti značajna uzlazna gibanja (Beebe i Bates, 1955, Derome, 1965). Pored „dizanja na fronti“, sve više dolaze do izražaja i drugi mehanizmi stvaranja uzlaznih gibanja kao što su utjecaj mlaznih struja donje troposfere (Pitchford i London, 1962, Bonner, 1966), zone konvergencije (Ogura i Chien, 1977) i suhe linije (Rhea, 1966, Weston, 1972).

U ovom radu obuhvaćena su oba navedena osnovna proučavanja termodinamike olujnih procesa.

Ocjena uloge orografije Medvednice na gibanje i razvoj Cb oblaka te na razdiobu oborine nadovezuje se na radove Gelo (1976), Čačić i Lipovšćak (1982), koji su pokazali utjecaj Medvednice na brzinu i gibanje Cb stanica, prema radarskim podacima, i rad Jurčec (1982) koja je za jednu situaciju prolaza fronte preko sjeverne Hrvatske objasnila utjecaj orografije Medvednice na razdiobu konvektivne oborine.

Ovim radom se po prvi puta povezuje studija razvoja i gibanja Cb oblaka nad područjem Medvednice s termodinamičkim i hidrodinamičkim svojstima zračne mase donje troposfere (tlo – 500 hPa), a na osnovi radarskih mjerenja i radiosondažnih podataka. Preliminarne rezultate ovog proučavanja dali su Čačić i Jurčec (1983) i Čačić (1984).

Pored radarskih mjerenja i radiosondažnih podataka Opservatorija Zagreb proučavanje konvektivnih aktivnosti i njihovih efekata nad promatranim područjem zasniva se na podacima: mjerenja količine oborine, smjera i brzine prizemnog vjetera te motrenja atmosferskih pojava. Istraživanje također obuhvaća analizu prizemnih i visinskih sinoptičkih karata nad područjem Evrope.

Pod promatranim područjem podrazumijeva se šire područje Medvednice koje se nalazi unutar kruga polumjera 25 km čije je središte vrh Medvednice.

2. Teorija

Za istraživanje razvoja i gibanja cumulonimbusa od izuzetne važnosti je analiza stabilnosti nezasićene i zasićene zračne mase. U radu je stabilnost zračne mase analizirana na osnovi vrijednosti Brunt – Väisälä frekvencije u nezasićenom i zasićenom zraku.

U nezasićenom zraku Brunt – Väisälä frekvencija se jednostavno može odrediti iz izraza:

$$N^2 = g \frac{d(\ln \Theta)}{dz}; \quad (1)$$

g je akceleracija sile teže, z visina, a Θ potencijalna temperatura.

U zasićenom zraku, međutim, ne postoji formula koja definitivno određuje Brunt – Väisälä frekvenciju.

Razlog tome je vrlo kompleksna uloga vodene pare u analitičkim izrazima, što je pokazano u radovima Durran i Klempa (1982), V. Jurčec (1982), I. Čačić i V. Jurčec (1983) i I. Čačić (1984 a, b). U ovom radu vrijednosti Brunt – Väisälä frekvencije u zasićenom zraku, N_e^2 , dobivene su iz za sada dva najpotpunija analitička izraza od kojih su prvi (2) dali Lalas i Einaudi (1974):

$$N_e^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dz} + \Gamma_m \right) \left(1 + \frac{Lm_s}{R_d T} \right) - \frac{g}{1+m_w} \frac{dm_w}{dz} \quad (2)$$

a drugi Durran i Klemp (1982)

$$N_e^2 = \frac{g}{1+m_w} \left(\frac{\Gamma_m}{\Gamma_d} \frac{d(\ln \Theta_m)}{dz} - \frac{dm_w}{dz} \right), \quad (3)$$

gdje je T temperatura, Γ_d i Γ_m suhoadijabatički i mokroadijabatički temperaturni gradijent, $m_w = m_s + m_l$ ukupan omjer miješanja, m_s omjer miješanja zasićene vodene pare, m_l omjer miješanja tekuće vode,

$$\Theta_m = \Theta_e \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{c_w}{c_d} m_w} \quad (4)$$

c_d i c_w su toplinski kapaciteti suhog zraka i tekuće vode, Θ_e ekvivalentna potencijalna temperatura, $T_0 = 273.15$ K.

Iz izraza (2) i (3) nije moguće izračunati N_e^2 , pa ćemo se poslužiti slijedećim aproksimacijama. U izrazu (4) zanemarit ćemo apsorpciju topline na tekućoj vodi ($c_w = 0$), iz čega slijedi $\Theta_m = \Theta_e$. Također ćemo zanemariti omjer miješanja tekuće vode ($m_l = 0$), što je zadovoljavajuće točno izvan oblačnog sustava, pa je omjer miješanja m_w sveden na račun omjera miješanja m_s kojeg možemo izračunati iz relacije

$$m_s = \frac{\epsilon}{p - \epsilon} E, \quad (5)$$

gdje je E parcijalni tlak zasićene vodene pare iznad ravne površine vode, $\epsilon = R_d/R_v$, R_d i R_v su plinske konstante za suhi zrak i vodenu paru. Pri tome ćemo se u izrazu (5), kao i u Durranovoj i Klempovoj (1981) formuli za određivanje Γ_m u računu za E poslužiti formulom Tetensa (1930) za slučaj temperature veće od 0°C , odnosno formule koju je predložio Bolton (1980) za temperaturu manju ili jednaku 0°C .

Napomenimo da je Θ_e dobijen iz izraza koji je dao Bolton (1980).

Budući da postoje velika odstupanja u vrijednostima N_e^2 dobijenih iz relacija (2) i (3), (Čačić, 1984b), pretpostavit ćemo da je zrak apsolutno stabilan, samo ako su obje vrijednosti N_e^2 pozitivne, dok će se u slučaju barem jedne negativne vrijednosti N_e^2 smatrati da je zasićeni zrak nestabilan.

Pored statičke stabilnosti u radu ćemo također razmatrati termodinamičko svojstvo gibanja zračne mase oko i preko orografske prepreke na osnovi analize vrijednosti internog Froudeovog broja danog izrazom:

$$F_i = \frac{V}{hN}; \quad (6)$$

V je srednja brzina vjetera na određenom nivou navjetrinskog dijela prepreke, a h je vertikalna dimenzija prepreke (u našem slučaju uzeta je relativna visina Medvednice, h = 900 m).

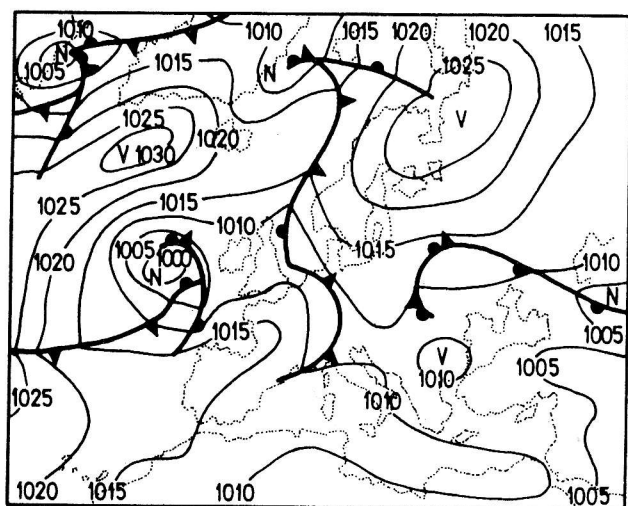
Termodinamičke karakteristike zračnog toka analizirat ćemo samo za slučaj nezasićenog zraka, što bi bilo u skladu s rezultatima Čačića (1984a, b) koji su pokazali da se cumulonimbusi gibaju uglavnom u statički stabilnom nezasićenom zraku. Analizu vrijednosti F_i bazirat ćemo na razmatranjima Waltera i Overlanda (1982) za područje Olimpijskih planina budući da se za Medvednicu i Olimpijske planine može definirati ista vrijednost planinskog aspekta omjera ($h/l = 0.45$), ako se u našem slučaju za h uzme relativna visina Medvednice (h = 900 m), a za horizontalnu dimenziju l – udaljenost između točaka izohipse 400 m na glavnoj osi pružanja Medvednice (l = 20 km). Na taj način može se smatrati da zračna masa koja struji prema Medvednici za $F_i < 1$ ima dominantnu hidrodinamičku karakteristiku gibanja oko prepreke, dok je za $F_i > 1$ naglašeno hidrodinamičko svojstvo gibanja preko prepreke.

Treba napomenuti da se vrijednosti svih računatih termodinamičkih veličina odnose na značajne slojeve u donjoj troposferi, a vrijednosti su (uz uvažavanje navedenih aproksimacija) dobivene na računskom stroju HP 1000 F pomoću programa ANA koji je dan u radu Čačića (1984 b).

3. SLUČAJ JAKE OBORINE 28. 7. 1980.

3. 1. Sinoptička situacija

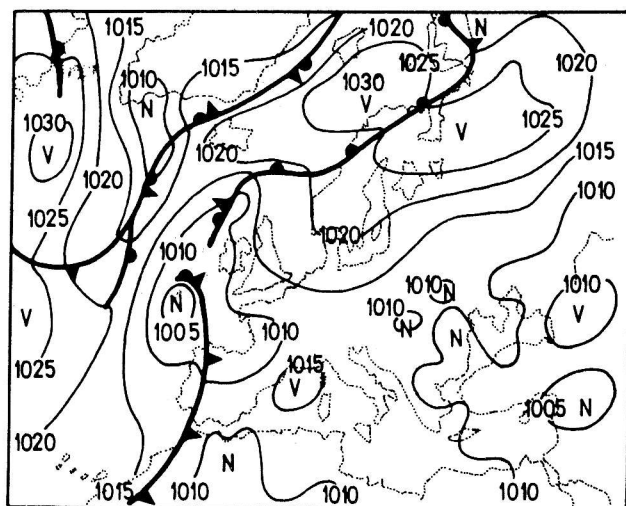
Na osnovi prizemnih sinoptičkih karata 27. 7. u 00 GMT (sl. 1) i 28. 7. u 12 GMT (sl. 2) jasno se može uočiti da je preko promatranog područja prošla hladna



Sl. 1. Prizemna sinoptička situacija nad područjem Evrope 27. 7. 1980. u 00 GMT.

Fig. 1. The surface synoptic situation on 27 July 1980 at 00 GMT.

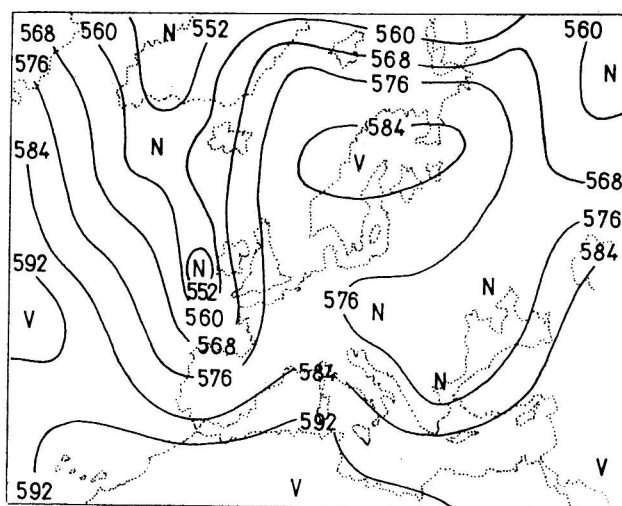
fronta, a zatim je uspostavljeno prostrano bezgradijentno polje tlaka.



Sl. 2. Prizemna sinoptička situacija nad područjem Evrope 28. 7. 1980. u 12 GMT.

Fig. 2. The surface synoptic situation on 28 July 1980 at 12 GMT.

Analiza visinskih karata pokazuje da raspodjela tlaka u vrijeme nastanka Cb stanica pogoduje razvoju slobodne konvekcije. Tako je na nivoima AT 700 – 200 hPa iznad naših krajeva prisutna visinska dolina (sl. 3), dok na AT 850 hPa postoje dva uska zatvorena centra niskog tlaka. Također, iz analize možemo uočiti pretežno sjeverozapadni smjer struje zraka iznad Jugoslavije u većem dijelu troposfere.



Sl. 3. Karta AT 500 hPa nad područjem Evrope 29. 7. 1980. u 00 GMT.

Fig. 3. Absolute topography 500 hPa on 29 July 1980 at 00 GMT.

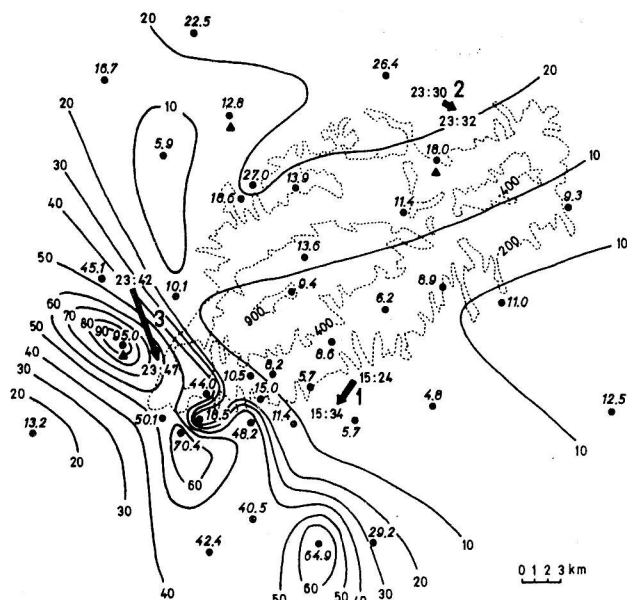
3. 2. Radarska slika

Analiza radarskih podataka pokazuje da su se 28. 7. nad promatranim područjem javile Cb stanice duž trajektorija prikazanih na slici 4.

Napomenimo da je identifikacija oblačnih stanica određena prema kriterijima koje su dali Čačić i Lipovšćak (1982), dok je trajektorija Cb stanica dobivena spajanjem točaka maksimalne radarske refleksije u horizontalnoj ravnini. Pri tome su, pored iznosa brzine gibanja Cb stanice, praćene vrijednosti visine točke maksimalne radarske refleksije $H_{z_{max}}$, visine vrha zone pojačanog radarskog odraza H_{vz} , visine radarskog vrha oblaka H_v te vrijednosti logaritma kompleksnog koeficijenta maksimalne radarske refleksije $\log z_{max}$. Početak i kraj mjerenja Cb stanice na slici 4. zabilježeni su na početku i kraju trajektorije.

Prva Cb stanica zabilježena je u poslijepodnevnom satima na južnim obroncima Medvednice duž trajektorije 1. Prema karakteristikama radarskih parametara (tabela 1) radi se o slabo pokretnom jednostaničnom Cb ograničenih dimenzija (maksimalan $H_v = 6.7$ km), uz kojeg je vezana i slabo izražena pojava kiše. Valja istaći da je smjer gibanja ovog Cb suprotan od smjera vjetra u prizemlju, a također znatno se razlikuje od smjera vjetra na svim značajnim nivoima u donjoj troposferi (sl. 4, tabele 1. i 2). Ova pojava je u skladu s opće poznatom prirodom jednostaničnih Cb (WMO, 1981) koji često mogu biti kvazistacionarni, dakle bez nekog određenog smjera, pa stoga smjer Cb stanice u jednom trenutku može biti i suprotan od smjera slabe zračne struje u većem dijelu troposfere.

U kasnim večernjim satima pojavljuju se Cb stanice na sjeveroistočnom i jugozapadnom boku Medvednice duž trajektorija 2 i 3, koje ukazuju na gibanje Cb stanica oko orografske prepreke. Mala duljina trajektorije 2 rezultat je nedostatka radarskih podataka. Stvarna trajektorija vjerojatno je zamjetno duža od prikazane. Na to ukazuje brzina gibanja Cb stanice, razdioba oborine i konačno podatak o pojavi tuče. Sličan zaključak možemo izvesti i za trajektoriju 3, duž koje se umjerenom brzinom (14.2 m/s) gibao vrlo razvijen Cb ($H_v = 11.5$ km) uz kojeg je vezana ekstremno velika količina oborine u blizini sjevernih obronaka jugozapadnog boka Medvednice (95 mm), gdje je zabilježena i pojava tuče. Razdioba količine oborine, razvijenost i brzina gibanja ukazuju da se na Cb stanicu duž trajektorije 3 odnose i sekundarni oborinski maksimumi u Podsusedu (70.4 mm) i Odri (64.7 mm).



Sl. 4. Prikaz trajektorija Cb stanica te razdiobe izohijeta i pojave tuče na području Medvednice 28. 7. 1980.

Fig. 4. The Cb cell trajectories and the convective rain distribution over Medvednica on 28 July 1980.

Prema usvojenoj klasifikaciji Cb stanica (WMO, 1981), radarskih karakteristika te atmosferskih pojava, oblačnoj stanici duž trajektorije 3 ne možemo pridijeliti niti jedan određen tip pa ćemo stanicu svrstati u grupu „ostali Cb”. Naime, brzina gibanja, vertikalna razvijenost (H_v i $H_{z_{max}}$) i ekstremno velika količina oborine svojstveni su superstaničnoj oluji, dok odsutnost traga zrna tuče govori više u prilog jednostanične oluje. S druge strane, razdioba oborine, vrijeme javljanja Cb stanica duž trajektorija 2 i 3 (prvo na lijevoj pa na desnoj strani u odnosu na smjer gibanja Cb stanice) te podatak o pojavi zrna tuče na dvije udaljene lokacije ukazuju na postojanje povezanog višestaničnog sustava, dakle višestaničnog Cb. To je i razlog da je oblačna stanica duž trajektorije 2 također svrstana u grupu „ostali Cb”.

3. 3. Stanje donje troposfere

Analiza aeroloških parametara provedena je na podacima radiosondaže Opservatorija Zagreb, 28. 7. u 12 GMT, koja je prethodila pojavi Cb stanica na

Tabela 1. Karakteristika Cb stanica duž pojedinih trajektorija na području Medvednice 28. 7. 1980.

Table 1. The Cb cell characteristics along trajectories in the area of Medvednica, 28 July 1980.

vrijeme mjerenja (sat: minuta)	trajektorija			$H_{z_{max}}$ (km)		H_v (km)		log	Z_{max}	tip Cb	posebne pojave ▲, △, ▽ (mm)
	broj	smjer	brzina (m/s)	min.	max.	min.	max.				
15:24-15:34	1	NE	3.3	4.1	4.4	5.0	6.7	1.9	5.5	jednost.	—
23:30-23:32	2	NW	6.7	4.6	4.6	6.8	7.5	6.1	6.6	ostali	▲
23:42-23:53	3	NNW	14.2	6.9	9.8	11.1	11.5	6.3	7.2	ostali	▲, ▽ : 95

Tabela 2. Prikaz osnovnih ulaznih i izlaznih podataka za značajne razine do prve značajne razine iznad 5000 metara dobivenih iz sondaže Opservatorija Zagreb 28. 7. 1980. u 12 GMT.

Table 2. Basic input and output data up to the first significant level above 5000 m from the radio-sounding data of Zagreb, 28 July 1980.

ULAZNI PODACI						IZVEDENI OSNOVNI PODACI					
z (m)	p (hPa)	T (°C)	m (g/kg)	VJETAR		m _s (g/kg)	e (hPa)	E (hPa)	r (%)	Θ (°C)	Θ _e (°C)
				W (m/s)	FF (deg)						
128	998	27.6	12.2	1.0	210	23.9	19.2	36.9	51	27.8	63.9
408	967	23.7	11.1	1.6	232	19.4	17.0	29.3	57	26.6	59.3
1417	860	14.0	10.1	2.5	314	11.8	13.7	16.0	85	26.6	56.5
2214	782	9.3	6.4	3.2	321	9.5	8.0	11.7	67	29.8	49.3
3335	682	1.6	5.0	5.2	301	6.3	5.4	6.9	79	33.3	48.9
4461	592	-5.8	3.0	6.1	314	4.2	2.8	4.0	71	37.4	47.1
4676	576	-5.2	2.4	6.1	317	4.5	2.2	4.2	53	40.5	48.5
5398	525	-10.2	2.1	6.5	324	3.4	1.0	2.0	62	42.9	50.0

promatranom području. Karakteristike termodinamičkih parametara odnose se na značajne nivoe i dane su u tabelama 2. i 3. Pored relevantnih veličina navedenih u poglavlju 2, u tabeli 2. prikazani su i omjer miješanja vodene pare nezasićenog zraka m , parcijalni tlak nezasićene vodene pare iznad ravne površine vode e , kao i relativna vlažnost r .

Tako pri tlu možemo uočiti visoku vrijednost temperature, kao i potencijalne ekvivalentne temperature ($\Theta_e = 63.9^\circ\text{C}$) koja je čak za 19.9°C veća od desetogodišnjeg srednjaka za srpanj. U prisutnoj sinoptičkoj

situaciji (bez fronte u prizemlju i ciklonalna aktivnost po visini) mala brzina vjetra, kao i malo smicanje brzine vjetra po visini također doprinose povoljnim uvjetima razvoja slobodne konvekcije. Isto tako, u najdonjem značajnom sloju planetarnog graničnog sloja (ukupne visine 280 m) možemo uočiti superdijabatičke gradijente temperature dT/dz , potencijalne temperature $d\Theta/dz$ i potencijalne ekvivalentne temperature $d\Theta_e/dz$, što unatoč razmjerno maloj relativnoj vlažnosti r ukazuje na apsolutno nestabilnu zračnu masu neposredno uz tlo.

Tabela 3. Prikaz Brunt-Väisälä frekvencije N^2 , internog Froudeovog broja F_i te gradijenata temperature dT/dz i potencijalne temperature $d\Theta/dz$ u nezasićenom zraku, gradijenata potencijalne ekvivalentne temperature $d\Theta_e/dz$, Brunt-Väisälä frekvencije (dobivene iz formule (3), $N_e^2(3)$ i formule (2), $N_e^2(2)$) te gradijenata omjera miješanja dm_s/dz u zasićenom zraku kao i mokroadijabatičkog gradijenta temperature Γ_m za značajne slojeve do prve značajne razine iznad 5000 metara dobivenih iz sondaže Opservatorija Zagreb 28.7.1980. u 12 GMTTable 3. Brunt-Väisälä frequency N^2 , internal Froude number F_i , temperature (dT/dz) and potential temperature ($d\Theta/dz$) lapse rate in unsaturated air, equivalent potential lapse rate ($d\Theta_e/dz$), Brunt-Väisälä frequencies $N_e^2(3)$ derived from the relation (3) and $N_e^2(2)$ from (2) and mixing ratio vertical gradient (dm_s/dz) in saturated air and wet adiabatic temperature lapse rate Γ_m from selected layers up to the first significant level above 5000 m from Zagreb radio-sounding on 28 July 1980, 12 GMT.

donja granica sloja (m)	visina sloja (m)	$\frac{dT}{dz}$ (deg/100m)	Γ_m (deg/100m)	$\frac{d\Theta}{dz}$ (deg/100m)	$\frac{d\Theta_e}{dz}$ (deg/100m)	$\frac{dm_s}{dz}$	N^2 $\times 10^{-4}$ (s ⁻²)	$N_e^2(3)$ $\times 10$ (s ⁻²)	$N_e^2(2)$ $\times 10^{-4}$ (s ⁻²)	F_i
128	280	-1.39	0.38	0.43	-1.63	-15.9	-1.40	0.31	-3.83	xxxxx
409	1009	0.96	0.42	0.01	0.28	-7.6	0.02	0.38	-1.91	1.47
1417	797	0.59	0.47	0.40	0.90	-2.9	1.31	-1.01	0.25	0.28
2214	1121	0.69	0.52	0.31	0.04	-2.8	1.00	0.22	0.40	0.47
3335	1126	0.66	0.58	0.36	0.16	-1.9	1.14	0.11	0.15	0.59
4461	215	0.28	0.61	1.46	0.64	1.5	4.59	1.08	3.57	0.32
4676	722	0.69	0.62	0.33	0.21	-1.6	1.04	0.56	0.13	0.69

Iz krivulje stanja, slika 5, lako se može zapaziti velika raspoloživa energija konvekcije od tla do promatrane polovice troposfere (500 hPa) već u ranim poslijepodnevima satima.

Na visini od oko 4.5 km (sl. 5, tabela 2. i 3) važno je uočiti sloj inverzije debljine 215 m unutar kojeg je zračna masa izrazito stabilna.

Vrijednost Brunt–Väisälä-ove frekvencije (tabela 3) govore nam o uvjetno nestabilnoj zračnoj masi u većem dijelu donje troposfere, s izuzetkom spomenutog apsolutno nestabilnog zraka uz tlo, kao i apsolutno stabilnog sloja inverzije na oko 4.5 km.

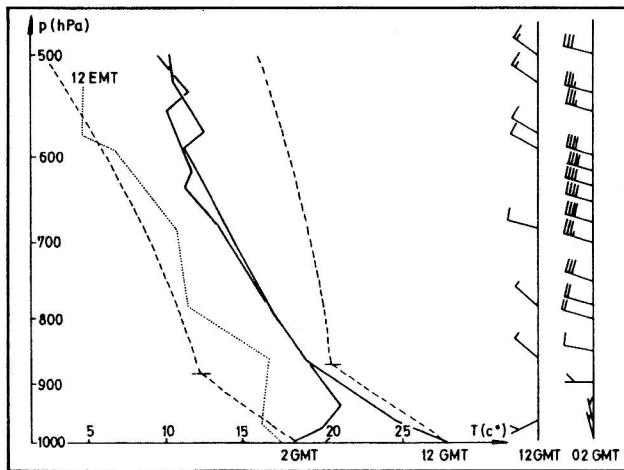


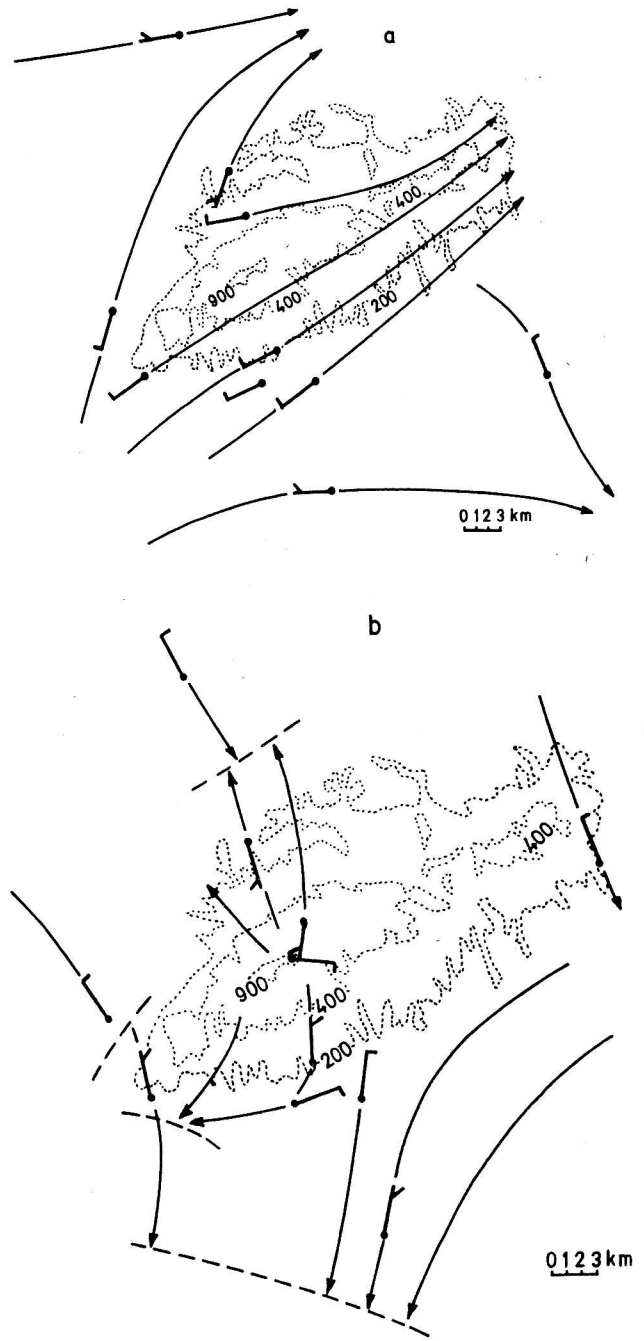
Fig. 5. Temperature and wind profile of the low troposphere on the basis of Zagreb radio-sounding data on 28 July 1980, 12 GMT, and on 29 July 1980, 2 GMT. Solid lines: temperature profiles, dashed lines: dry and wet adiabats, dotted lines: dew point profile.

Sl. 5. Stratifikacija donje troposfere s vertikalnim profilom vjetra na osnovi sondaže Opservatorija Zagreb 28. 7. 1980. u 12 GMT i 29. 7. 1980. u 2 GMT (neprekinute linije: krivulje stanja, crtkane linije: suhe i mokre adijabate, točkasta linija: krivulja rosišta).

Iz vrijednosti internog Froudeovog broja vidimo da u ranim poslijepodnevima satima vrlo spora zračna masa, zbog male statičke stabilnosti, ima u većem dijelu planetarnog graničnog sloja naglašeno svojstvo gibanja preko prepreke ($F_i > 1$), dok iznad 1.4 km nešto brži zračni tok ima, zbog veće statičke stabilnosti, vrlo izraženu hidrodinamičku karakteristiku gibanja oko prepreke ($F_i < 1$).

Oblik strujnica vjetra u prizemlju u 12 GMT, slika 6a, ukazuje na blago izražen dolinski vjetar, što je u skladu s vrijednostima internog Froudeovog broja F_i u većem dijelu planetarnog graničnog sloja. Ipak, prisutna je i komponenta gibanja zračnog toka oko Medvednice na jugozapadnom boku planine.

U večernjim satima, slika 6b, možemo uočiti promjenu strujnica prizemnog polja vjetra. Oblik strujnica i dalje je pod utjecajem orografije Medvednice, no sad je naglašena cirkulacija vjetra niz obronak planine. Ovakva lokalna cirkulacija, odnosno cirkulacija zraka na mikro β i α skali, u međudjelovanju je s cirkulacijom zraka na mezo γ i β skali te se tako u prizemlju stvaraju



Sl. 6. Strujnice prizemnog polja vjetra na području Medvednice 28. 7. 1980. u 12 GMT (a) i 19 GMT (b).

Fig. 6. The surface wind streamlines on the area of Medvednica on 28. July 1980. a) at 12 GMT, b) at 19 GMT.

područja nakupljanja zračne mase, bilo gomilanjem zraka uz prepreku (jugozapadni bok Medvednice), bilo stvaranjem zona konvergencije (sjeverni i jugozapadni obronci Medvednice, područje Odre). Područja nakupljanja zračne mase označena su crtkanom linijom.

Napomenimo da je oblik strujnica na slici 6. dobijen, pored podataka o smjeru i brzini vjetra na promatranom području, na osnovi cjelokupnih podataka o smjeru i brzini vjetra na području sjeverozapadne Hrvatske.

Premda ne raspoložemo aerološkim podacima, ima smisla pretpostaviti da je u večernjim satima ohlađiva-

njem uz tlo došlo do povećanja statičke stabilnosti u planetarnom graničnom sloju te tako do jačanja komponente gibanja zračnog toka oko prepreke zbog manje vrijednosti internog Froudeovog broja.

Valja posebno napomenuti da je sondaža od 12 sati GMT jedina iz koje se mogu promatrati termodinamički i hidrodinamički parametri odgovorni za gibanje i razvoj Cb stanica na promatranom području. Već podaci prve slijedeće sondaže Opservatorija Zagreb od 29. 7. u 2 sata GMT odnose se na termodinamička i hidrodinamička svojstva zračne mase nakon prolaza i razvoja Cb stanica, što jasno pokazuje stabilna stratifikacija donje troposfere na slici 5.

4. DISKUSIJA I REZULTATI

Analiza sinoptičke situacije, te stanja atmosfere pokazuje da 28. 7. 1980. već u ranim poslijepodnevima satima u donjoj troposferi nad promatranim područjem postoji niz vrlo povoljnih uvjeta za značajan razvoj konvekcije, odnosno konvektivnih struktura. Ovi uvjeti prvenstveno se odnose na razvoj slobodne konvekcije. Tako je u donjoj troposferi (tlo – 500 hPa) akumulirana razmjerno velika energija konvekcije, zračna masa je u gotovo svim značajnim slojevima uvjetno nestabilna, na svim standardnim izobarnim plohama naglašena je ciklonalna aktivnost, većinom (700 – 200 hPa) u sklopu prostrane visinske doline, a na svim značajnim razinama (situacija bez fronte pri tlu i po visini) prisutna je mala vrijednost brzine vjetra. Također, pri tlu se nalazi prostrano bezgradijentno polje tlaka te velika vrijednost potencijalne ekvivalentne temperature, a uz tlo 280 metara visok apsolutno nestabilan sloj zraka s vrlo izraženim gradijentima temperature i potencijalne temperature.

No unatoč brojnih povoljnih uvjeta za razvoj žestoke konvekcije na račun velike akumulirane energije konvekcije, radarska mjerenja te podaci o oborini pokazuju da se u poslijepodnevima satima na južnim obroncima Medvednice razvio tek jednostanični, kvazistacionarni Cb ograničenih dimenzija (visine radarskog vrha oblaka do 6.7 km) u sklopu dnevnog razvoja naoblake. Presudnu ulogu u gušenju konvekcije očito je imao vrlo stabilni sloj inverzije debljine 215 metara na visini od oko 4.5 km, koji je značajno reducirao oslobađanje energije konvekcije isključivo mehanizmom slobodne konvekcije. Premda ne raspoložemo dovoljno gustom mrežom za zadovoljavajuću analizu razdiobe toplinske energije u najdonjim slojevima troposfere na promatranom području, razvoj Cb-a na južnim obroncima Medvednice nameće pretpostavku da je do oslobađanja dijela energije konvekcije došlo na lokalitetu gdje je, zbog većeg upadnog kuta sunčevih zraka, akumulacija toplinske energije uz tlo bila najveća.

Ovakav razmjerno slab razvoj Cb oblaka na vrlo ograničenom području (trajektorija 1) ima za posljedicu i dalje prisutnu veliku raspoloživu energiju konvek-

cije i razmjerno veliku količinu vodenog sadržaja u planetarnom graničnom sloju.

U večernjim satima, zbog ohlađivanja, mijenja se polje vjetra u prizemlju, a sloj uz tlo se sve više stabilizira. Uspostavlja se lokalna cirkulacija zraka niz obronak planine, što u međudjelovanju sa strujanjem zraka na širem području uvjetuje nakupljanje, pa tako i prisilnu konvekciju zračne mase, bilo gomilanjem zraka na najvjetrini obronka, bilo stvaranjem konvergentnih strujnica prizemnog vjetra. Ovo međudjelovanje cirkulacije zraka na mikro (β i α) i mezo (γ i β) razmjeru najvjerojatnije je uvjetovalo i jačanje prisilne konvekcije do kritične vrijednosti u kasnim večernjim satima, kad dolazi do dizanja zračne mase iznad kondenzacijskog nivoa, a zatim do superpozicije prisilne i slobodne konvekcije u statički nestabilnom zasićenom zraku, što je najvjerojatnije dovelo do razbijanja sloja inverzije na visini te do konačnog oslobađanja raspoložive energije konvekcije. Navedeno razmatranje potvrđuje i činjenica da se glavni maksimum oborine (kojeg čini ekstremno velika količina oborine od 95 mm), te sekundarni oborinski maksimumi (70.4 i 64.9 mm) i lokacija pojave tuče vrlo jasno koincidiraju s područjima gomilanja i konvergencije zračne mase pri tlu. Analiza radarskih podataka pokazuje da su se duž trajektorija 2 i 3 razvile, vrlo vjerojatno, međusobno povezane Cb stanice koje se ne mogu posebno kategorizirati jer sadrže osobine različitih tipova cumulonimbusa.

Možemo zaključiti da promatrani slučaj nastanka Cb stanica duž prikazanih trajektorija dobro ilustrira činjenicu da žestina konvekcije, pored velike raspoložive energije konvekcije, značajno ovisi i o mehanizmu oslobađanja te energije.

Na osnovi podataka sondaže te strujanja na visinskim kartama može se zaključiti da se srednji smjer gibanja Cb stanica duž trajektorija 2 i 3 podudara s prevladavajućim smjerom vjetra iznad promatranog područja. Ipak, smjer svake trajektorije posebno ukazuje na gibanje Cb stanica oko Medvednice. To je najvjerojatnije posljedica hidrodinamičkih karakteristika nezasićenog zračnog toka unutar koje su se Cb stanice gibale. Pokazuje se da zračni tok u donjoj troposferi iznad 1.4 km ima $F_i < 1$, te tako vrlo izraženo hidrodinamičko svojstvo gibanja oko prepreke. Povećanje statičke stabilnosti u planetarnom graničnom sloju, zbog ohlađivanja tla, upućuje na isti zaključak za glavninu planetarnog graničnog sloja u kasnim večernjim satima.

5. ZAKLJUČAK

U promatranom slučaju analiza je pokazala da je ekstremno velika količina oborine (95 mm) u blizini sjevernih obronaka jugozapadnog boka Medvednice nastala nakon oslobađanja velike raspoložive energije konvekcije u uvjetno nestabilnom zraku. Pokazano je također da za izražen razvoj Cb stanice nije bila dovoljna sama količina raspoložive energije konvekcije

već se morao stvoriti mehanizam oslobađanja te energije. Pri tome je presudnu ulogu imalo polje vjetera pri tlu na koje je značajno utjecala orografija Medvednice. U kasnim večernjim satima uspostavlja se lokalna cirkulacija zraka s obronka planine te dolazi do međudjelovanja zračne struje na mikro (β i α) i mezo (γ i β) razmjeru. Posljedica toga je prisilna konvekcija zraka na području međudjelovanja. Nakon dizanja zračne mase iznad razine kondenzacije dolazi do superpozicije prisilne i slobodne konvekcije u statički nestabilnom zasićenom zraku. Na taj način je najvjerojatnije došlo do razbijanja vrlo stabilnog sloja inverzije temperature na visini od oko 4.5 km, koji je u toku dana značajno reducirao oslobađanje energije konvekcije isključivo mehanizmom slobodne konvekcije. Nakon toga došlo je do potpunog oslobađanja energije konvekcije, i kao posljedica značajan razvoj cumulonimbusa i pojava ekstremno velike količine oborine. Ekstremno velika količina oborine očito se javila na lokalitetu gdje je prisilna konvekcija bila najizraženija, a to je blizina sjevernih obronaka jugozapadnog boka Medvednice gdje je došlo do izraženog gomilanja zračne mase na orografskoj prepreci.

Analiza hidrodinamičkih karakteristika zračnog toka na osnovi vrijednosti internog Froudeovog broja nezasićenog zraka, F_i , te smjera trajektorija Cb stanica pokazala je značajan utjecaj orografije Medvednice na gibanje Cb stanica u kasnim večernjim satima. Naime, u vrijeme intenzivnog razvoja Cb stanica, a to su kasni večernji sati, nezasićen zračni tok u većem dijelu troposfere (pa tako i Cb stanice koje se u njemu nalaze) ima izraženo svojstvo gibanja oko prepreke ($F_i < 1$), a to znači i izražen utjecaj orografije prepreke na smjer toka, odnosno na trajektorije Cb stanica.

LITERATURA

- Beebe, R. G., 1958: Tornado proximity soundings, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 39, 195–210.
- Beebe, R. G. i F. C. Bates, 1955: A mechanism for assisting in the release of convective instability, *Mon. Wea. Rev.* 83, 1–10.
- Bolton, D., 1980: The computation of equivalent potential temperature, *Mon. Wea. Rev.* 108, 1046–1053.
- Bonner, W. D., 1966: Case study of thunderstorm activity in relation to the low-level jet, *Mon. Wea. Rev.* 94, 167–178.
- Carlson, T. N. i F. H. Ludlam, 1968: Conditions of the occurrence of severe local storms, *Tellus*, 20, 203–226.
- Chalker, W. R., 1949: Vertical stability in regions of air mass showers, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 63, 178–185.
- Čačić, I. i B. Lipovšćak, 1982: Mezoanaliza radarskih mjerenja 29. 6. 1982. nad područjem sjeverozapadne Hrvatske, *Rasprave – Papers*, 17, 51–57.
- Čačić, I. i V. Jurčec, 1983: Proučavanje termodinamičkih parametara značajnih za gibanje olujnih oblaka, V znanstveni skup Proračunavanje i projektiranje pomoću računala. Stubičke toplice, 16–18. studeni 1983, 561–566.
- Čačić, I., 1984a: Conditions of a storm motion over Medvednica, 18 ICAM, Opatija, 25–29 September 1984, 175–177.
- Čačić, I., 1984b: Termodinamički uvjeti gibanja i razvoja Cumulonimbus oblaka nad područjem Medvednice, Magistrski rad, PMF Zagreb, 125 str.
- Derome, J. F., 1965: Large-scale vertical motions and the occurrence of severe storms, Scientific Report MW-42, Stormy Weather Group, Mc Gill University, Montreal, 1–41.
- Durran, D. R. i J. B. Klemp, 1981: The effects of moisture on trapped lee waves, Second Conference of Mountain Meteorology, Seaboard Springs, 106–113.
- Durran, D. R. i J. B. Klemp, 1982: On the effects of moisture on the Brunt-Väisälä frequency, *J. Atmos. Sci.* 39, 2152–2158.
- Fawbush, E. J. i R. C. Miller, 1954: Types of air masses in which North American tornadoes form, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 35, 154–165.
- Jurčec, V., 1982: Mezoefekti orografije na povećanje i razdiobu konvektivne oborine nad područjem Zagreba, *Rasprave – Papers*, 17, 39–49.
- Lalas, D. P. i F. Einaudi, 1974: On the correct use of the wet bulb adiabatic lapse rate in the stability criteria of saturated atmosphere, *J. Appl. Meteor.* 13, 318–324.
- Means, L. L., 1952: On thunderstorm forecasting in central USA, *Mon. Wea. Rev.* 80, 165–188.
- Ogura, Y. i Y. L. Chen, 1977: A life history of an intense meso-scale convective storm in Oklahoma, *J. Atmos. Sci.* 34, 1458–1476.
- Pitchford, K. L. i J. London, 1962: Low-level jet as related to nocturnal thunderstorms in mid-west of US, *J. Appl. Meteor.* 1, 43–47.
- Porter, J. M., L. L. Means, J. E. Hovde i W. B. Chappel, 1955: A synoptic study of formation squall lines in northern central US, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 36, 390–396.
- Rhea, J. O., 1966: A study of thunderstorm formation along dry-lines, *J. Appl. Meteor.* 5, 58–63.
- Sartor, J. D., 1962: Essential factors of thunderstorm forecasting, Memorandum RM-3049-PR, USAF Project Rand, Rand Corp., Santa Monica, California.
- Tetens, O., 1930: Über einige meteorologische Begriffe, *Z. Geophysics*, 279–309.
- Walter, B. A. i J. E. Overland, 1982: Response of stratified flow in the lee of the Olympic Mountains, *Mon. Wea. Rev.* 110, 1458–1473.
- Weston, K. J., 1972: The dry-line of Northern India and its role in cumulonimbus convection, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 98, 519–531.
- Winston, J. S. (ed), 1956: Forecasting tornadoes and severe thunderstorms, Forecasting Guide No 1, US Weather Bureau, Washington.
- WMO, 1981: The dynamic of hailstorms and related uncertainties of hail suppression, Hali Report No 3, Geneva, 22 pp.

SUMMARY

The paper investigates the causes of excessive precipitation (95 mm) in the vicinity of the south-west edge of Medvednica developed by a severe Cb cell in the late evening hours on 28 July 1980. The role is specially examined of Medvednica orography on the evolution and motion of the Cb cell related to this extreme amount. Investigation of Cb cell thermodynamic development conditions and the hydrodynamic conditions of air flow within which the Cb cells existed was based on radar and radio-sounding data, ground wind and precipitation data and atmospheric phenomena for the wide area of Medvednica and, as well, on analysis of ground and upper air synoptic charts. On these basis, this paper makes for the first time, a connection between the Cb cell motion and evolution study for the area of Medvednica and the thermodynamic and hydrodynamic characteristics of the low troposphere (ground – 500 hPa).

It is shown that excessive precipitation followed release of high available convective energy in conditionally unstable air. A decisive role in this release was played by the ground wind field which was under the significant influence of Medvednica orography. Investigation has shown that the Cb cell was severely developed on the localities where the interaction of the mountain wind and the mesoscale air flow occurred, that is, on localities where the conditions of forced convection existed which then initiated and was superimposed on free convection in the statically unstable saturated air.

It is shown, as well, that in the late evening hours, because of the well marked hydrodynamic air flow motion characteristics around the obstacle, the orography of Medvednica had an explicit influence on the air flow direction and, therefore, on the Cb cell trajectories within this flow.