

ANOMALIJE OPĆE CIRKULACIJE ATMOSFERE, SUŠNI PERIODI
I MOGUĆNOSTI PROGNOZE SUŠE

V. JURČEC

ANOMALIES OF THE ATMOSPHERE GENERAL CIRCULATION,
DRY SPELLS, AND POSSIBILITIES OF DROUGHT FORECASTING

V. JURČEC

SAŽETAK

Promatrane su anomalije opće cirkulacije atmosfere u razdoblju 1956-1975 i njihova veza sa sušnim periodima u području gornjeg sliva rijeke Save. Opisani su različiti fizikalni procesi i njihova moguća veza sa sušnim periodima. Naročito su istaknuti procesi interakcija u sistemu troposfera-stratosfera.

Pokazano je da su zimska sušna razdoblja 1971-75 karakterizirana jačim zonalnim strujanjem u troposferi i intenzivnijim ciklonalnim vrtlogom u donjoj stratosferi. U sušnim godinama, 1971 i 1973, su karakteristična zimska stratosferska zagrijavanja.

Na kraju su diskutirana kratko-periodične cirkulacije u troposferi, kojima se pripisuje posebni značaj za prognozu sušnih perioda pojedinih godišnjih doba.

ABSTRACT

Anomalies of the general circulation of the atmosphere during 1956-1975 are studied in relation to dry spells in northwestern Yugoslavia. Various physical processes are described which might affect the dryness of a particular season. Special attention is given to the interaction processes between the troposphere and the stratosphere.

It is shown that the winter dryness of the period 1971-75 is characterized by a more intense zonal circulation in the troposphere and the lower stratosphere. In extremely dry years, 1971 and 1973, winter circulation in the stratosphere breaks down earlier manifested by a sudden stratospheric warming.

Finally, short-periodic fluctuations of the tropospheric circulation are discussed, to which a special importance is attached for the seasonal drought forecasting.

1. UVOD

1.1 Problem dinamičkih metoda dugoročne prognoze vremena

Svrha je ovoga rada da se prouče mogućnosti dugoročne prognoze sušnih perioda, od mjesec dana ili više, definiranih kao razdoblja s deficitom oborina ispod normalnih vrijednosti u nekom odredjenom području. Pored statističkih metoda koje su prikazane u prethodnim radovima ove publikacije [26], [14], [16], preostaje nam da se osvrnemo i na dinamičke metode dugoročne prognoze. Ova metoda zahtijeva proučavanje mehanizma opće cirkulacije atmosfere i njezinih anomalija, ili pomoću dinamičkih hemisferskih modela, ili ispitivanjem pojedinih faktora i fizikalnih procesa koji podržavaju sušna razdoblja u promatranom području u skladu s energetskom ravnotežom u atmosferi.

Medju glavnim faktorima u održavanju energetske ravnoteže je valni režim strujanja u atmosferi, te ciklone i anticiklone koje su sastavni dio opće cirkulacije i posrednici u prenošenju topline i momenta između nižih i viših geografskih širina. Kada bi razumili genezu raznih vidova atmosferske energije i mehanizam njihovih transformacija u vremensko-prostornim koordinatama za spektar atmosferskih gibanja, onda bi uz adekvatna tehnička dostignuća mogli dati točnu prognozu opće cirkulacije atmosfere i njezinih promjena, a time i prognozu sušnih perioda.

U dosadašnjem stadiju znanstvenih i tehničkih dostignuća ovaj problem se rješava parcijalno teorijskim studijama i dinamičkim modelima atmosfere, koji tretiraju pojedine komponente energetskog ciklusa u atmosferi, dok sve brojnija opažanja trodimenzionalne strukture atmosfere i proučavanja atmosferskih procesa različitih dimenzija i njihova međudjelovanja, omogućuju ujedno i napredak u boljem upoznavanju i onih procesa koji nisu dostupni direktnim metodama mjerenja i opažanja.

U ovom radu ćemo pokušati identificirati neke od značajnijih procesa u atmosferi koji bi mogli biti uzrokom sušnih perioda povezanih s anomalijama opće cirkulacije atmosfere, i na koje bi prema našem mišljenju trebalo obratiti više pažnje u dinamičkom modeliranju suše i promjenama hidrološkog ciklusa u atmosferi.

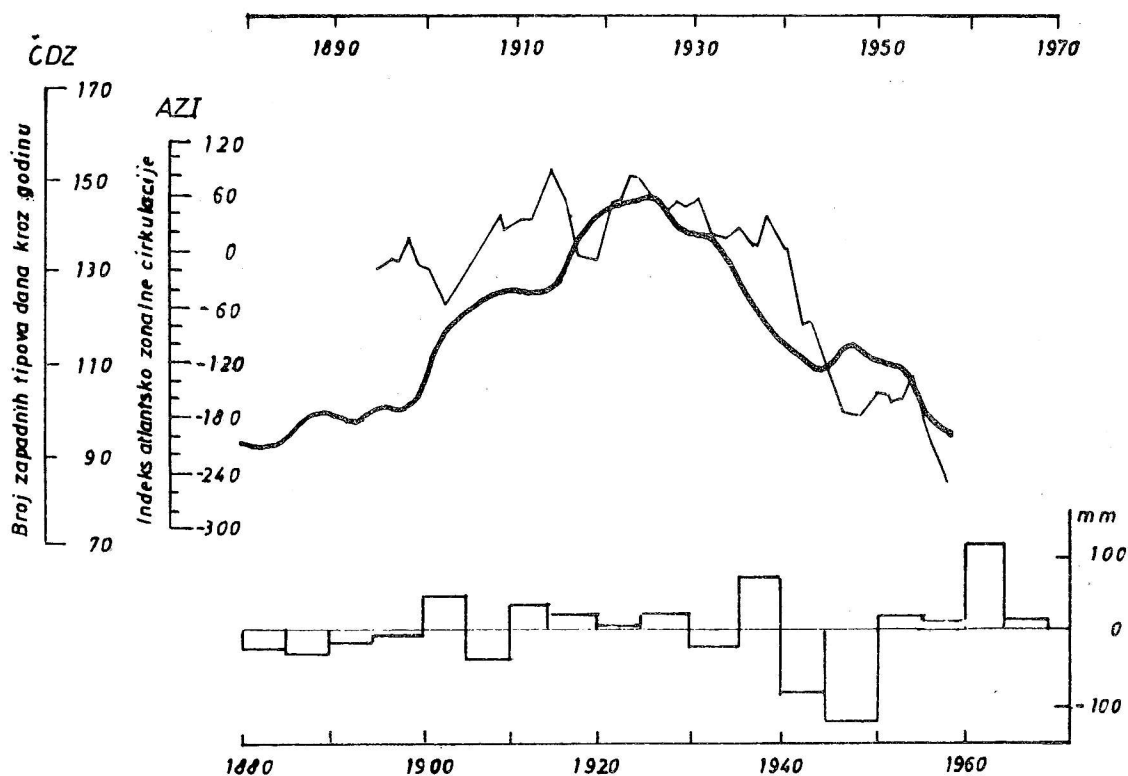
1.2 Opća cirkulacija atmosfere i klimatske promjene

Klimatske promjene i njihovi uzroci su u posljednje vrijeme predmet mnogih istraživanja i diskusija na međunarodnim skupovima. Naročito iscrpna razmatranja ove problematike prikazana su u publikaciji GARP-a [12] i simpozija o dugoročnim klimatskim fluktuacijama u Norwich-u [34]. Ovdje ćemo ukratko iznijeti važnije rezultate ovih istraživanja, koji bi mogli doprinjeti objašnjenju nekih aspekata sušnih razdoblja u nas.

Ispitivanja opće cirkulacije atmosfere su ukazala, da su za vrijeme prve polovine 20. stoljeća postojale indikacije za kontrakciju cirkumpolarnog vrtloga prema polu i smanjenje amplitude planetarnih valova. U to vrijeme je došlo do općeg zagrijavanja zemljine površine, naročito u atlantskom sektoru. Ovo zagrijavanje je bilo praćeno povlačenjem planinskih glečera i proširivanjem flore i faune prema sjeveru. Nakon 1940. godine srednja temperatura površine zemlje se izgleda smanjila, opet jače u atlantskom sektoru, gdje je uz promjenu temperature došlo do povećanja ledenjaka. Time se i atmosferska cirkulacija sjeverne hemisfere izmijenila u smislu povećanja amplitude planetarnih valova i većih ekstrema vremenskih stanja u mnogim područjima zemlje.

Neka ispitivanja u SSSR-u su pokazala znatnu promjenu u karakteru atmosferske cirkulacije iznad oceana u smislu pojačanja ciklonalne aktivnosti od početka do sredine ovog stoljeća. Zimi se ovaj proces očitavao u formiranju dubokih ciklona iznad oceana, a ljeti u smanjenju procesa formiranja vrlo razvijenih suprotropskih anticiklona, ali su ove promjene bile manje od zimskih. Mnogo istraživača ukazuje na izrazite promjene klime nakon 1920. godine, koja je bila najočitija u porastu zimskih temperatura srednjih i viših širina. Porast temperature je djelomično advektivnog karaktera, a djelomično usljed smanjenja efektivne radijacije povećanjem naoblake i razbijanjem prizemne inverzije temperature na Arktiku pojačanjem vjetrova. Povećanje ciklonalne aktivnosti u sjevernom Atlantiku neki autori dovode u vezu s pojačanom aktivnošću Sunca 1930-tih godina, što je doseglo maksimum pri kraju Međunarodne geofizičke godine (1957-58.) kada je redovni jedanaestogodišnji ciklus sunčevih pjega koincidirao sa sekularnim i multisekularnim maksimumom. Smatra se da je sunčeva aktivnost oslabila početkom ove dekade, ali još ne postoji dovoljna dokumentacija o smirivanju ciklonalnih poremećaja u sjevernom Atlantiku.

Frydendahl [34] također pridaje veliku važnost utjecaju varijacija sunčeve aktivnosti na klimatske promjene, i smatra da su one jedinstvene za cijelu zemlju i osjećaju se do velikih visina (100 km). Prema tome on pripisuje uzrok primijećenim klimatskim promjenama između 1894-1913. i 1921-40. Suncu, smatrajući da se solarna konstanta mogla promijeniti oko 1916. godine. Većina autora pridaje veliko značenje razmjeni procesa u sistemu ocean-atmosfera i njihovom



LEGENDA:

- AZI = ZONALNI INDEKS CIRKULACIJE : SREDNJE GODIŠNJE VRIJEDNOSTI RAZLIKE TLAKA AZORI - ISLAND, IZRAŽENE U % SREDNJAKA 1894 - 1952
- ČDZ = ČESTINE DANA SA ZAPADNIM TIPOM STRUJANJA NA BRITANSKIM OTOCIMA

Sl. 1 Usporedba srednjeg godišnjeg zonalnog indeksa cirkulacije i godišnjih čestina dana sa zapadnim tipom strujanja iz [21, 27].

Dolje: Odstupanja srednjih 5-godišnjih količina oborine od normale u razdoblju 1881-1970 za Zagreb-Grič.

medjudjelovanju. Namias [24] je ukazao na izrazite promjene površinske temperature mora 1960-tih godina. Prema Lambu [21] od 1964. godine raspodjela temperature mora u sjevernom Atlantiku je sličnija raspodjeli koju istraživači pridjeljuju razdoblju između 1780. i 1850. godine. Jačina srednjeg zonalnog vjetera se smanjuje u većem dijelu zemlje od njezinog maksimuma koji se pojavio oko 1925. godine (sl. 1). Zajedno sa ovim smanjenjem zonalnih brzina vjetera, za vrijeme 1960-tih godina, povećala se čestina blokinga u višim geografskim širinama. Ispitivanja uzorka bloking situacija po Schuurmans-u [34] stavljaju na prvo mjesto pojačanu baroklinu nestabilnost planetarnih valova uslijed razmjene topline između zemljine površine i atmosfere. Zbog nižih temperatura mora u ekvatorijalnom području Hadley-eva cirkulacija slabi, a time slabi i zapadna struja, što omogućava razvoj blokinga. Ovakva razmatranja ukazuju na važnost lančano povezanih procesa povratne sprege, a ne na vanzemaljske utjecaje u promjenama opće cirkulacije atmosfere.

Ispitivanja režima oborina u tropskom dijelu Afrike u razdoblju 1960-tih godina također su pokazala veću sličnost sa normalama 19. stoljeća nego ranih godina 20. stoljeća. Prema Wahl i Lawson-u [32] i temperaturni režim Sjedinjenih Američkih Država 1960-tih godina izgleda da se vratio u režim koji je vladao ranih godina 19. stoljeća, a isto pokazuje i trend zonalnih srednjih temperatura na globalnoj bazi.

U nedavno publiciranom radu Resio i Hayden [27] su ispitali sekularne varijacije klime u odnosu na zimske vantropske oluje u središnjem dijelu Atlantika statističkom eigen-vektorskom analizom. Oni su našli da povećane čestine blokinga odgovaraju fizikalnoj interpretaciji eigenvektora 2 srednjeg petodnevnog polja tlaka, i da se srednje godišnje vrijednosti težinskog faktora ovog parametra slažu sa tokom čestina dana sa zapadnim tipom strujanja na britanskim otocima, i sa ranije prikazanim zonalnim indeksom cirkulacije atlantskog sektora po Lambu. Sve tri krivulje od početka ovog stoljeća pokazuju maksimum sredinom 1920-tih godina, a zatim postupni pad do 1970. godine, pa je prema tome i prostorna raspodjela eigenvektora 2 interpretirana kao povećanje blokinga viših širina i smanjenje jačine zonalnih strujanja. Ova istraživanja ukazuju na bitne promjene u cirkulaciji makro-sistema, a time i na promjene u putanjama i čestinama ciklona.

Ispitivanje klimatskih fluktuacija u arktičkom dijelu Kanade su ukazala na smanjenje temperature za 1-2°C u području Bafinovog otoka nakon 1950. godine [1]. Sadašnje promjene temperature u području Arktika govore u prilog trendu zahladjenja, iako ovi kratko-periodični trendovi mogu biti vrlo nepouzdana indikatori dugoročnih klimatskih promjena.

U nastavku ovoga rada izraz "kišno" i "sušno", ako nije drugačije specificirano, odnosi se na područje gornjeg sliva rijeke Save.

2. ANOMALIJE GEOPOTENCIJALA NA AT 500 mb ZA VRIJEME SUŠNIH MJESECI U RAZDOBLJU 1953-1975

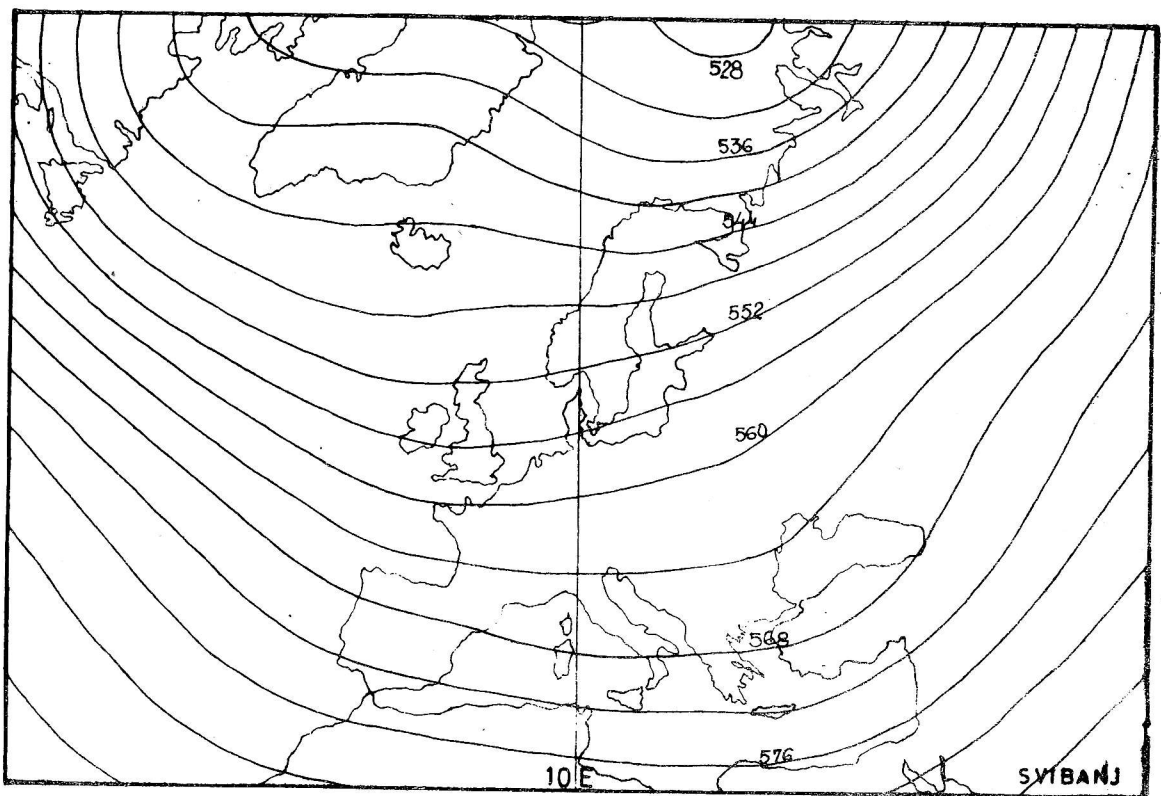
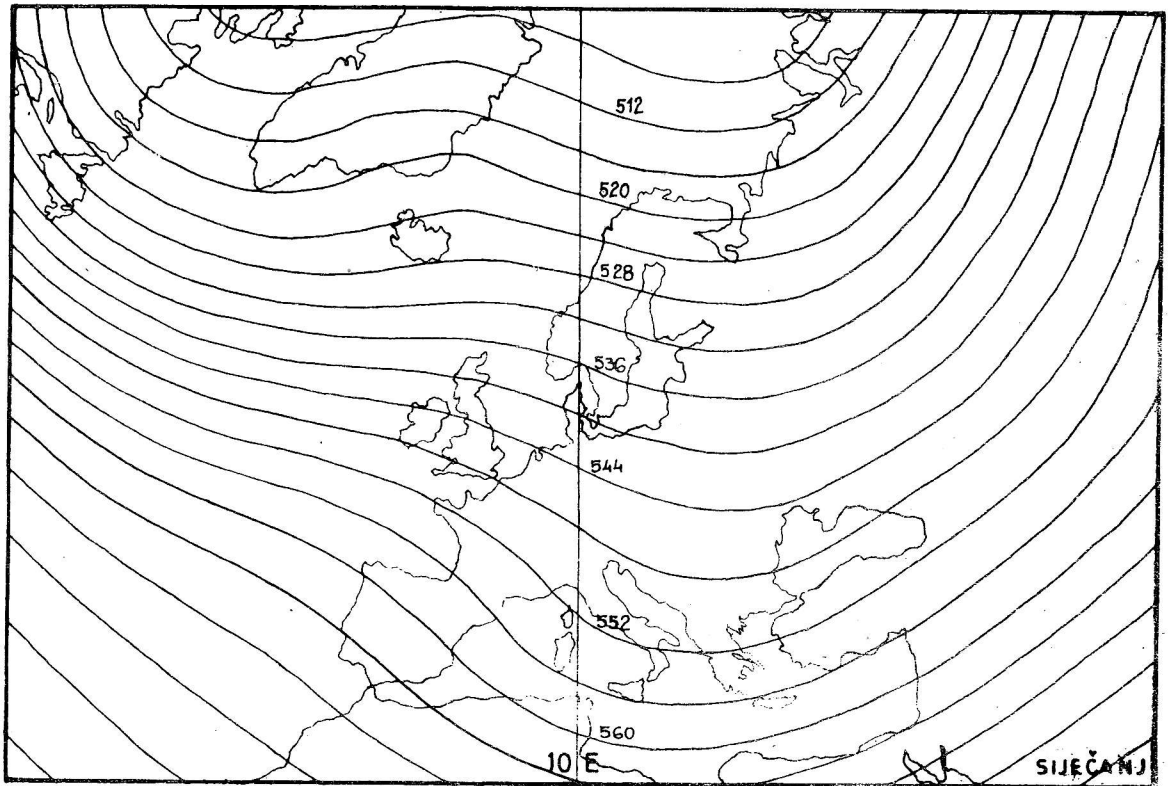
2.1 Srednje mjesečne apsolutne topografije 500 mb

Anomalije AT 500 mb, prikazane u ovom radu, date su kao odstupanja srednjih mjesečnih polja geopotencijala na toj plohi od normalnih polja, dobivenih postupnim osrednjavanjem, u periodu 1949-1973, publiciranih u "Die Grosswetterlagen Europas" [11], redovnom biltenu njemačke meteorološke službe u Offenbachu. Veličine odstupanja za mjesece u pojedinim godinama se ne mogu direktno usporediti, jer je srednjak uključivao različiti broj godina. Prema tome, prva, 1953. godina predstavlja odstupanje od 4-godišnjeg srednjaka 1949-53, a posljednja 1975. godina od 24-godišnjeg srednjaka 1949-73. Za objašnjenja pojedinih slučajeva i detaljniju razdiobu strujanja pri karakterističnim anomalijama korišćene su srednje karte kraćih razdoblja s odredjenim kvazistacionarnim baričkim poljima, takodjer prikazanim u navedenim biltenima, čije je trajanje bilo većinom 2 do 10 dana.

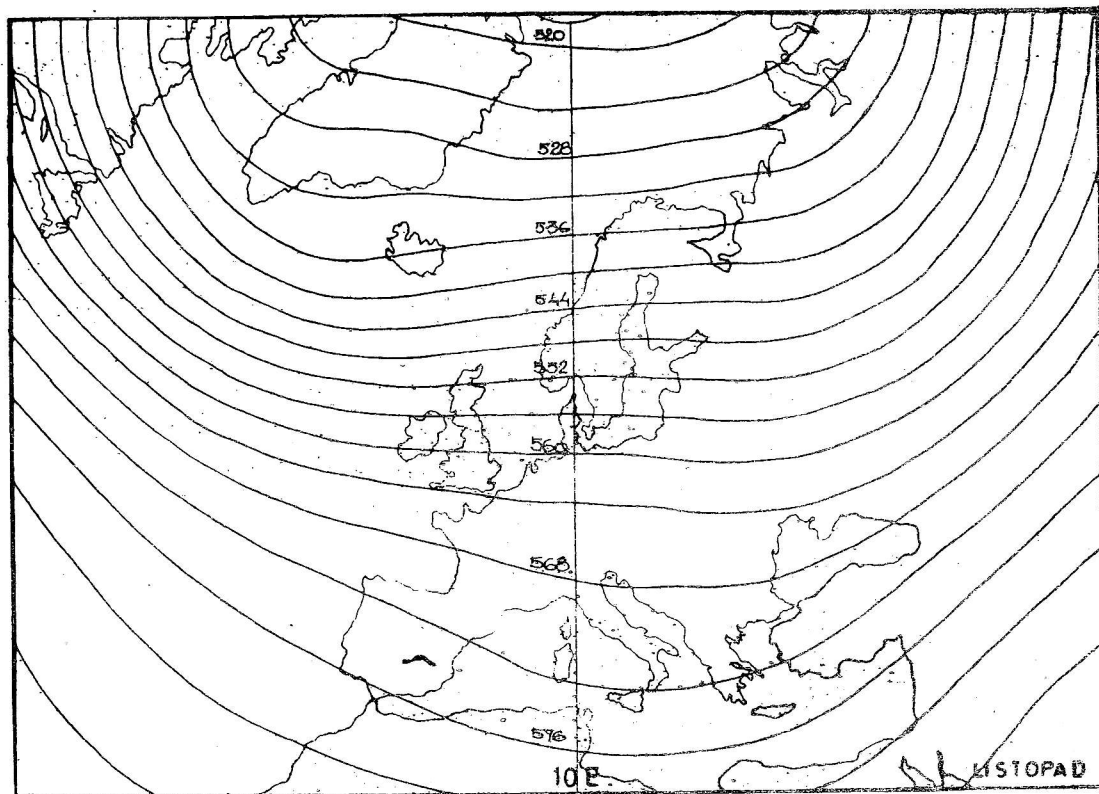
Na sl. 2.1 i 2.2 prikazane su srednje karte AT 500 mb u dekametrima za tri odabrana mjeseca. U siječnju je karakteristična dolina koja se pruža preko istočnog Balkana, a nad jugozapadnom Evropom i Islandom je greben nešto povišenog tlaka. U našem području prevladava sjeverozapadna struja. Slične su i normalne karte za veljaču, ožujak i travanj, ali uz postupni porast geopotencijala. U svibnju prevladava zapadna struja, pa je naše područje izloženo prodorima s Atlantika. Zonalna struja se zadržava do rujna, ali meridionalni gradijenti slabe. Za polje geopotencijala u listopadu je karakteristično formiranje doline u Sredozemlju, ali uz vrlo slabe meridionalne gradijente. Istovremeno je sjevernije od 55°N zonalna struja jača, što ukazuje da frontalni sistemi s Atlantika u promatranom razdoblju imaju veće čestine gibanja sjevernije od našeg područja, gdje su i bolje izraženi. U studenom je zonalna struja gotovo jednolika nad srednjom Evropom, a os doline u ovom mjesecu, kao i u prosincu, prelazi našim područjem.

2.2 Karakteristike polja anomalija ekstremno sušnih mjeseci u razdoblju 1953-1975

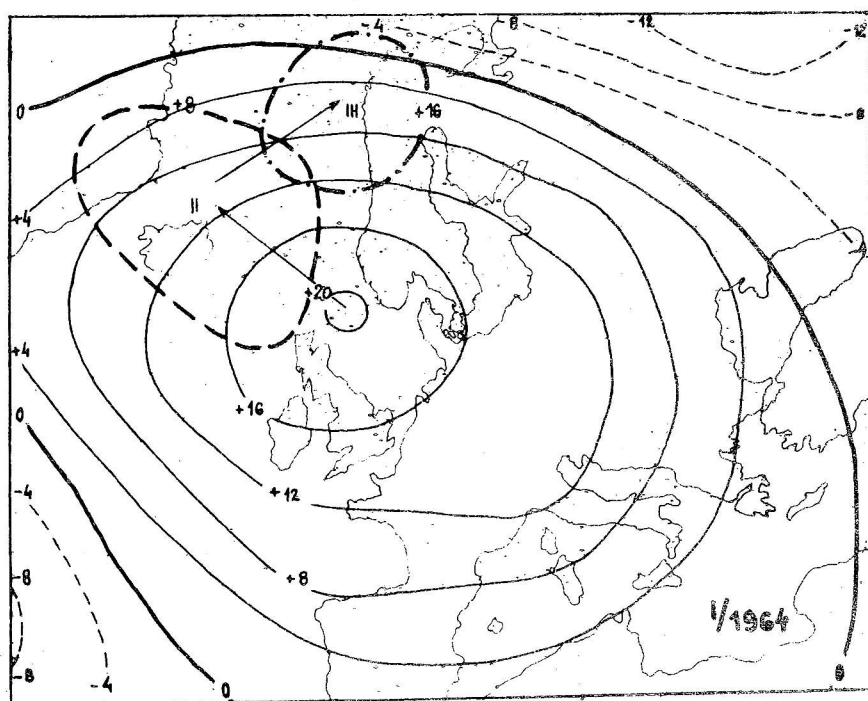
Duga sušna razdoblja pojedinih mjeseci su u većini slučajeva povezana s karakterističnim poljem anomalija. Povoljna polja anomalija za sušne mjesece bi se u grubom mogla svrstati u tri karakteristična tipa:



Sl. 2.1 Srednja mjesečna AT 500 mb za siječanj i svibanj 1949-1973.



Sl. 2.2 Srednja mjesečna AT 500 mb za listopad, 1949-1973.



Sl. 3 Anomalije AT 500 mb za siječanj 1964. Streljice označuju pomake pozitivnih centara anomalije u veljači i ožujku. Debele crtkane linije označuju izolinerije anomalija oko centara za veljaču i ožujak 1964.

A. Zonalna razdioba anomalija. Ovdje je polje pozitivnih anomalija u srednjim, a negativnih u višim širinama, što pojačava meridionalne gradijente tlaka i zapadno strujanje viših širina. Brzo pokretni plitki valovi u sjevernim širinama su van faze s mnogo sporijim gibanjima u srednjim širinama. U perzistentnim situacijama meridionalni gradijenti temperature se povećavaju do kritične barokline nestabilnosti, koja dovodi do formiranja i amplifikacije planetarnih valova. Ovakvo polje anomalija se najčešće javlja sredinom zimskog i ljetnog razdoblja.

B. Planetarni valovi srednjih širina kvazi-stacionarnog karaktera

Polje anomalija je u ovim situacijama meridionalno rasporedjeno, a pozitivna i negativna područja anomalija obuhvaćaju dimenzije planetarnih valova i mogu se pratiti iz mjeseca u mjesec. Ovo su rjedji slučajevi od prethodnih pod A., ali pružaju veće mogućnosti za prognozu dužih sušnih i kišnih perioda.

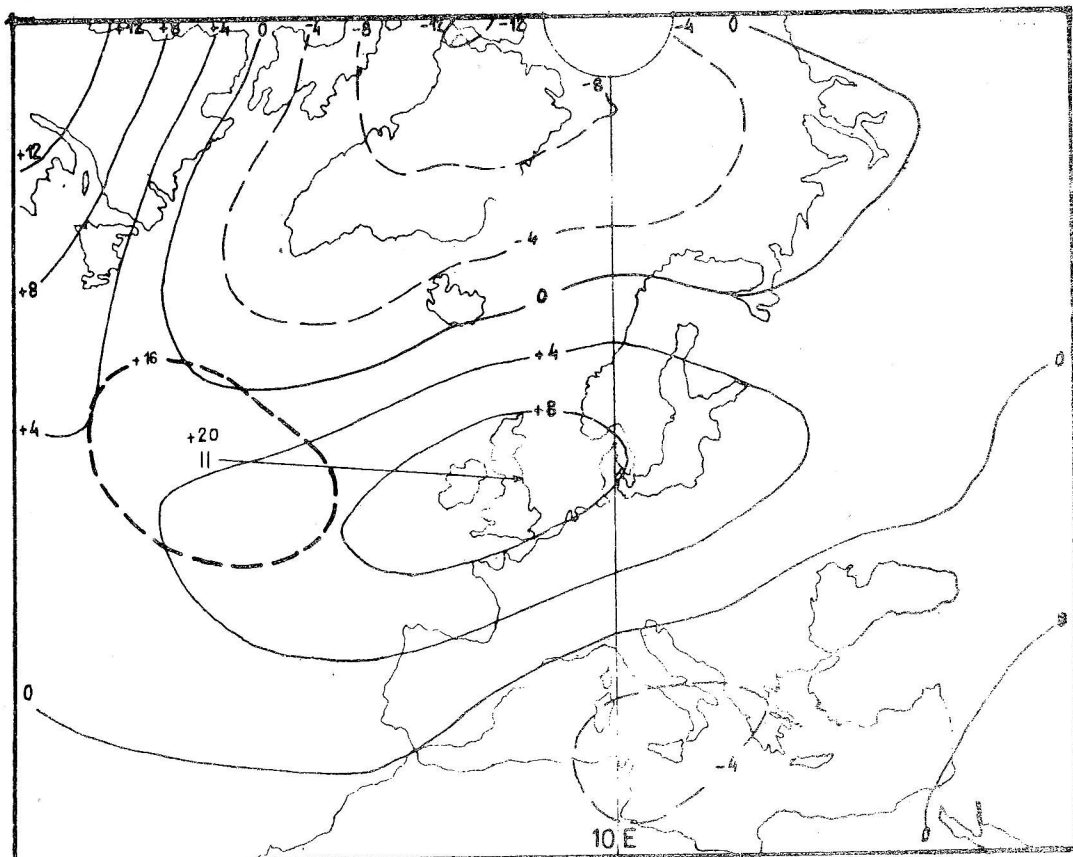
C. Bloking-situacije. Ove situacije su perzistentne i pokazuju prostrana područja izrazitih pozitivnih i negativnih anomalija. Područje Skandinavije i istočne Evrope se pokazuje kao vrlo povoljno za genezu blokinga, karakterističnog za planetarne valove viših geografskih širina u baroklinoj atmosferi. Kako je poznato, u ovakvim situacijama je grupna brzina negativna, a širenje energije valova je uzvodno i suprotno smjeru gibanja, prikazanom pozitivnom faznom brzinom. Jačanje amplitude valova, koje je rezultat ovakvog mehanizma, očituje se u retrogradnom gibanju grebena ili anticiklona, a proces razvoja je spor i može trajati nekoliko mjeseci. Prema tome, ovakve situacije su većinom pogodne za prognozu, ali se manifestiraju u nepovoljnim vremenskim prilikama s perzistentnim kišnim i sušnim periodima. Medjutim, ima bloking-situacija kraćeg trajanja od nekoliko dana što otežava prognozu, a uzroci njihovog stvaranja i razaranja su uglavnom nepoznati.

Većina izrazito sušnih mjeseci, naročito u hladno doba godine, se javlja uz polje pozitivnih anomalija nad područjem zapadne Evrope, ili dominira polje negativnih anomalija s centrom u istočnoj Evropi. U posljednjem slučaju je naše područje pod utjecajem stražnje strane doline s pojačanim sjeverozapadnim strujanjem. Ekstremno sušni mjeseci zimskog doba većinom su vezani uz prostrano polje pozitivnih anomalija koje obuhvaćaju veći dio zapadne Evrope i istočnog Atlantika. Sl. 3 prikazuje anomalije u siječnju 1964. koji je u većem dijelu Slovenije bio potpuno beskišan mjesec. Ovakvo prostrano polje anomalija nije bilo razoreno do proljeća, jer je centar ciklone u području Islanda bio slabije izražen, tako da je i veljača 1964. bila sušna. Sličan je raspored anomalija i u veljači 1975. i 1959. Ova posljednja je bila jedini izrazito sušni mjesec u toj najkišnijoj godini promatranog razdoblja.

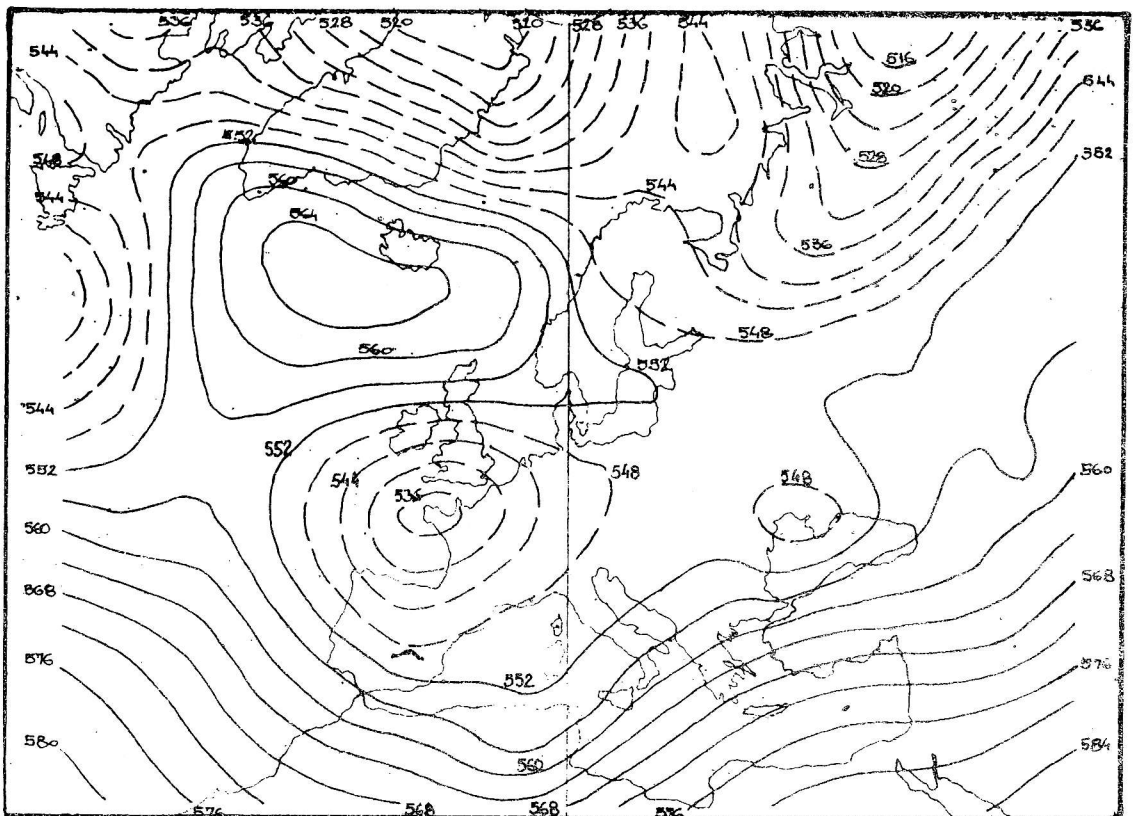
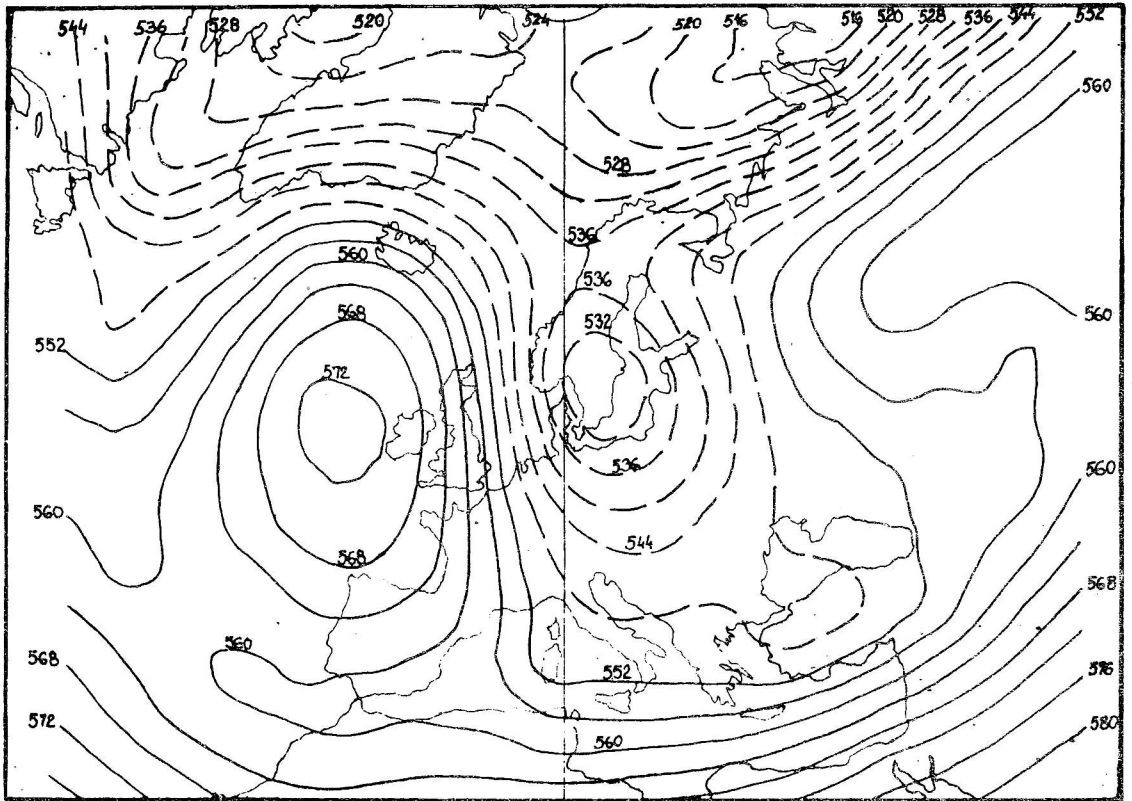
Zimski mjeseci izrazito sušnih godina pokazali su pozitivne anomalije u srednjem, a negativne u sjevernom dijelu Atlantika i u istočnoj Evropi. To ukazuje, da je za zimske sušne mjesece bitan razvoj grebena u centralnom dijelu Atlantika, čime se spriječava jači razvoj ciklonalne aktivnosti i direktni prodori frontalnih sistema u naše područje sa zapada. Negativne anomalije u istočnoj Evropi odražavaju slabije izražen greben sibirске anticiklone.

Karakteristika anomalne cirkulacije za vrijeme sušnih razdoblja u ožujku (sl. 4) slična je kao u veljači, ali s pojačanom cirkulacijom u polarnom području. Za razliku od ožujka, u travnju za ekstremno sušnih mjeseci polje anomalija pokazuje češće oblike meridionalne raspodjele. Nadalje je bitna karakteristika ovih polja, za razliku od prethodnih mjeseci, da je srednji dio Atlantika pokriven negativnim anomalijama, a sjeverni pozitivnim, tako da islandska ciklona nije aktivna. Ovakve situacije su često vezane uz genezu blokiranja na području sjeverozapadne Evrope.

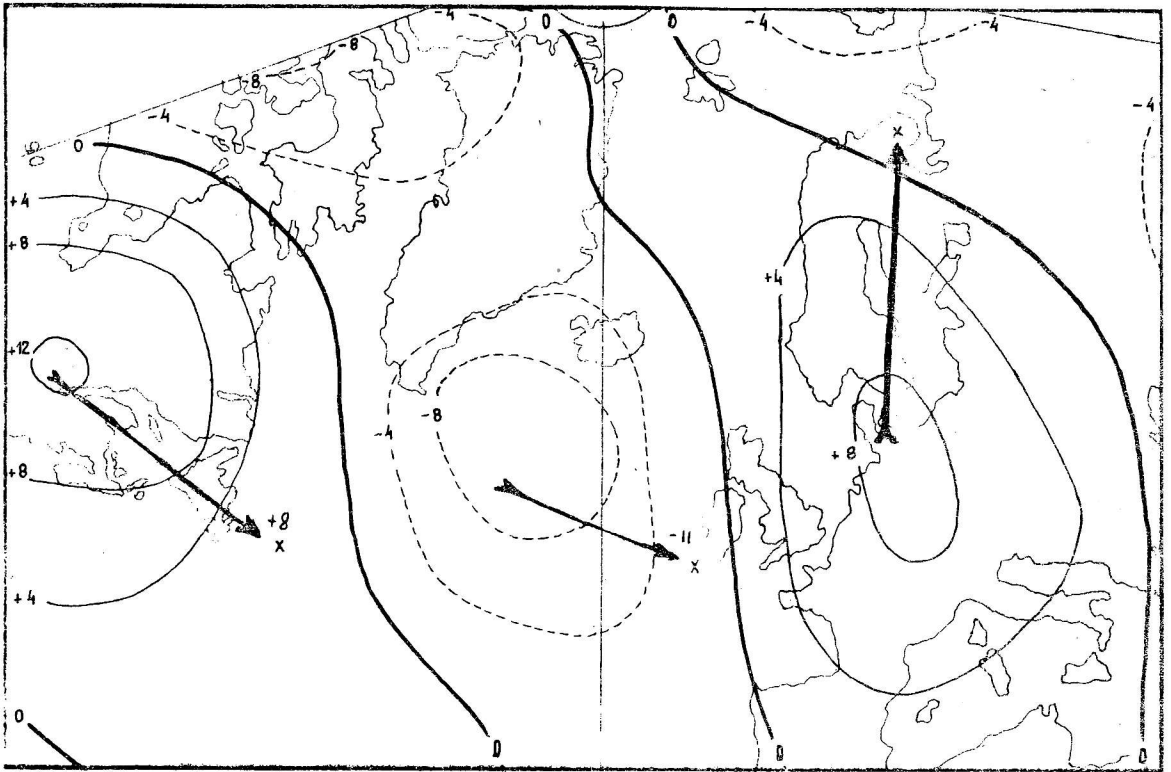
Jedna tipična geneza blokiranja krajem travnja 1973. u području Skandinavije prikazana je na sl. 5. Početni razvoj blokiranja karakterizira naglo jačanje anticiklone u sjevernom Atlantiku i istovremeno produbljavanje doline nad srednjom i istočnom Evropom. Relativno duboka ciklona nad Skandinavijom brzo se gibala u smjeru jugozapada do Biskaja, gdje je zajedno s anticiklonom nad Islandom, a kasnije nad Skandinavijom,



Sl. 4 Anomalije srednje mjesečne AT 500 mb za ožujak 1973. Strelice pokazuju pomak centra od veljače do ožujka



Sl. 5 Srednje AT 500 mb 17.-20.IV 1973. (gore) i 22.-24.IV 1973. (dolje) koje prikazuju razvoj blokiranja.

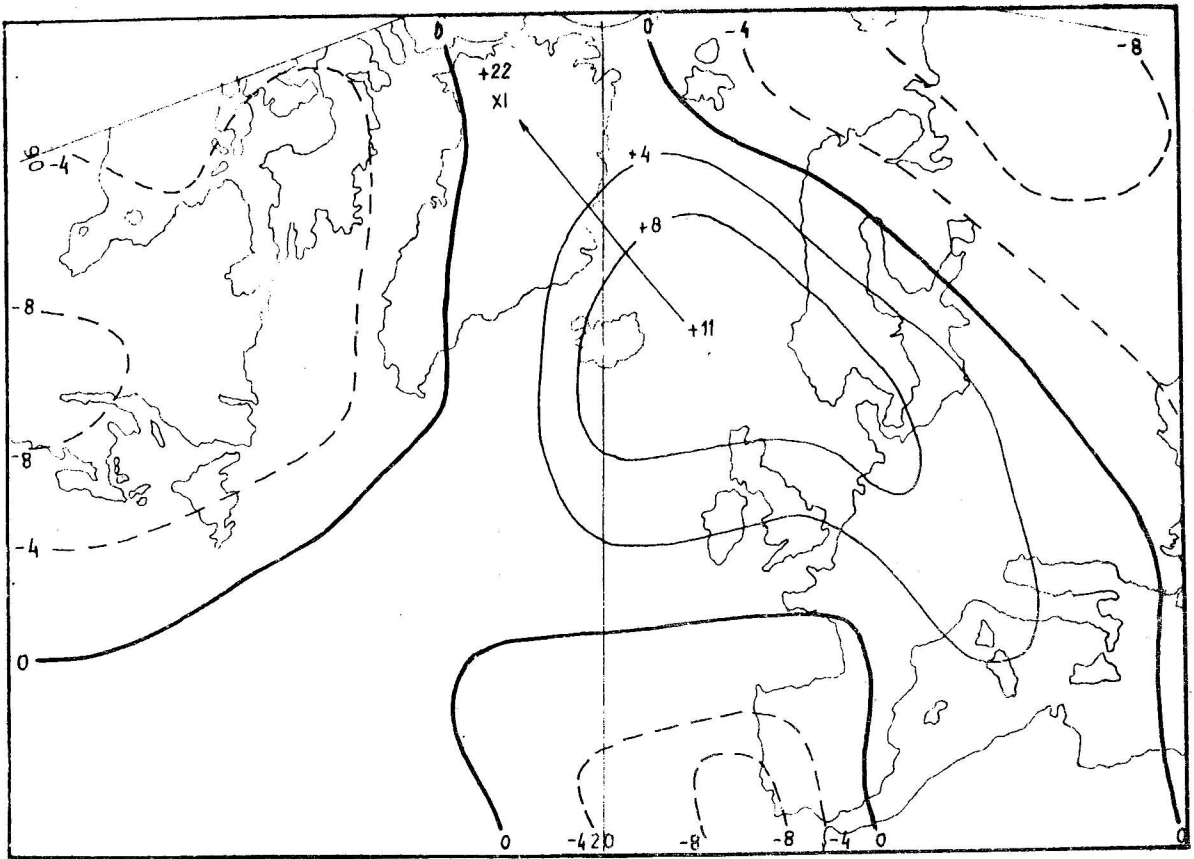


Sl. 6 Anomalije srednje mjesečne AT 500 mb za rujan 1961. s pomacima označenim strelicama od rujna do listopada.

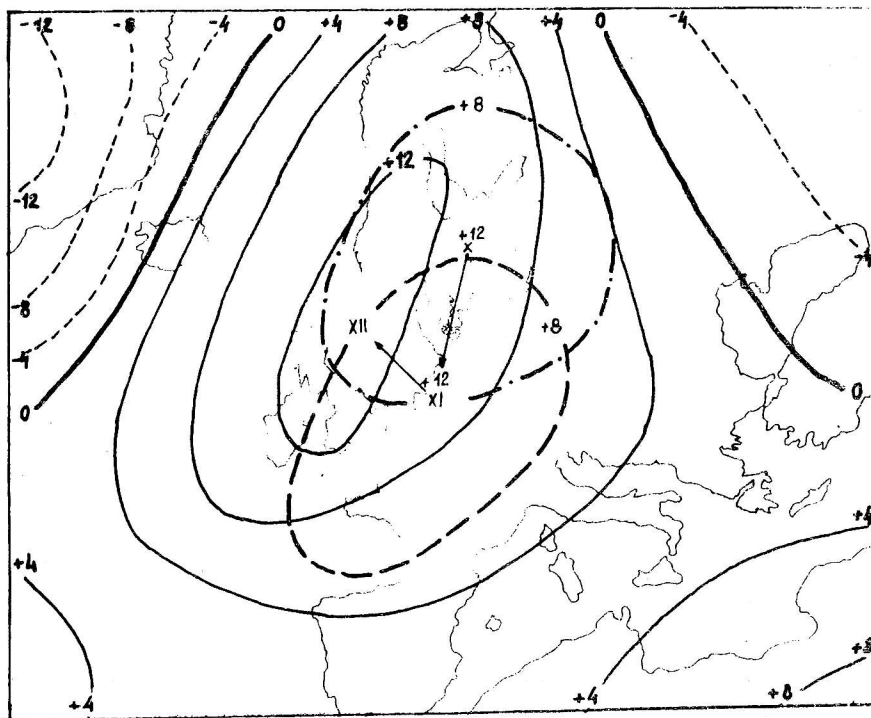
podržavala bloking situaciju, te je svibanj 1973. bio izrazito sušan mjesec. Općenito je karakteristika sušnih mjeseci svibnja vezana uz pojačane meridionalne gradijente tlaka u višim geografskim širinama, što održava frontalne poremećaje u tom području. U srednjim širinama istovremeno prevladavaju ili bloking situacije ili omega situacije s dva ciklonalna centra i grebenom koji se postupno razvija u odcijepljenu anticiklonu koja se teško razara, pa su i ovakve situacije kvazi-stacionarne i pogodne za prognozu duljih sušnih i kišnih perioda.

Prikazane situacije nisu općenita karakteristika proljetnog razdoblja, već je njihova čestina veća u jesen. Naročito se u lipnju ne mogu definirati neke izraženije karakteristike mjesečnih anomalija vezanih uz sušna razdoblja. Treba međutim istaknuti, da izrazito sušnih perioda tijekom lipnja u ovom razdoblju nije bilo, a oborine pljuskovitog karaktera očito se ne mogu prognozirati na ovaj način i ne javljaju se uvijek uz određeni tip anomalija.

Za sušne mjeseci u ljetno doba godine karakterističan je zonalni raspored anomalija koje pojačavaju meridionalni gradijent tlaka i održavaju ciklonalnu i frontalnu aktivnost u višim geografskim širinama (na primjer kolovoz 1962.). Ovakav tip cirkulacije nije dugo održiv, jer istovremeno jača meridionalni gradijent temperature, a kao posljedica javlja se dinamička nestabilnost atmosfere i valni režim cirkulacije. Rujan 1962. je bio vrlo kišan mjesec, dok je listopad bio



Sl. 7 Anomalije srednje mjesečne AT 500 mb za listopad 1965. Strelica označuje pomak pozitivnog centra od listopada do studenog.



Sl. 8 Anomalije srednje mjesečne AT 500 mb za prosinac 1953. s pomacima pozitivnog centra anomalije od listopada do prosinca.

ponovo izrazito sušan. Perzistencija ovog razdoblja naročito dolazi do izražaja u daljnjem razvoju ove situacije kada je studeni iste godine bio najkišovitiji mjesec u 113-godišnjem razdoblju Zagreba.

Sl. 6 još zornije prikazuje prijelaz iz zonalnog tipa cirkulacije u valni režim strujanja početkom sušnog rujna 1961. Daljnji kvazi-stacionarni karakter ovakovog strujanja očituje se u sporom pomaku dolina i grebena na istok, a time i prijelazu u kišno razdoblje listopada te godine.

Ovo su, međutim, rjedje situacije u toplo doba godine, u kojem dominiraju tipovi blokinga, koji se često produžuju i na jesenske mjesece. Kao primjer navodimo situaciju iz 1965. godine, kada je najkišniji rujna na području zapadne Slovenije, slijedio potpuno beskišan listopad na cijelom promatranom području. Sl. 7 prikazuje polje anomalija ovog mjeseca, a izduženi oblik pozitivnog područja prema sjeverozapadu rezultat je širenja grebena i njegove amplifikacije u tom smjeru. Daljnji pomak pozitivnog centra prema Grenlandu uvjetuje ponovo intenzivno kišno razdoblje u studenom te godine.

Perzistencija jesenskog razdoblja često se nastavlja i u prosincu (sl. 8), koji, međutim, sve više poprima karakteristike cijelog zimskog razdoblja s prostranim poljem pozitivnih anomalija u području zapadne Evrope i istočnog Atlantika, a negativnih u istočnoj i jugoistočnoj Evropi. Ovo posljednje područje negativnih anomalija naročito je došlo do izražaja u kvantitativnoj analizi korelacija oborine i polja anomalija u jesenskom i zimskom periodu. Negativne anomalije geopotencijala u jugoistočnoj Evropi i zapadnom dijelu Azije kompenziraju se pozitivnim anomalijama na području istočne Azije i zapadnog dijela Pacifika, pa se pripisuju pomaku sibirskog anticiklona na istok i jačanju subtropske mlazne struje u tom dijelu hemisfere (vidi 4.5 u poglavlju 4.). Kvantitativna veza anomalija oborine i geopotencijala na AT 500 mb prikazana je u radu Jurčec i Papišta [17], a rezime toga rada dat je u poglavlju 5.

2.3 Anomalije visinskog strujanja za vrijeme sušnih mjeseci za Zagreb-Maksimir, 1956-1975

Analiza anomalija polja geopotencijala na 500 mb, kao i sinoptičko iskustvo, ukazuju da je prevladavajuće visinsko strujanje nad našim područjem za vrijeme sušnih mjeseci u hladno doba godine pretežno iz sjevernog ili sjeverozapadnog smjera. To je potvrdila i analiza srednjeg mjesečnog vektora vjetra u donjoj troposferi za Zagreb-Maksimir prema raspoloživim radio-sondažnim podacima u razdoblju 1956-1975.

Tabela 1 prikazuje srednji smjer i jačinu vjetra za cijelo 20-godišnje razdoblje na nivou 850 mb i 500 mb u 01

Tabela 1 Srednji smjer (d) i jačina vjetra (f) u m/sek na 850 mb i 500 mb za Zagreb-Maksimir u razdoblju 1956-1975 za 01 sat (a) i srednje mjesečne vrijednosti za najsušniji (b) i najkišniji (c) mjesec u tom razdoblju. σ označuje standardnu devijaciju.

| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a) <u>Normala</u> | | | | | | | | | | | | |
| 850 mb | | | | | | | | | | | | |
| d | 288 | 287 | 300 | 315 | 293 | 306 | 351 | 288 | 267 | 247 | 246 | 272 |
| f | 1.40 | 2.58 | 1.16 | 1.07 | 1.30 | 1.48 | 1.88 | 0.99 | 1.07 | 1.20 | 3.45 | 2.20 |
| σ | 3.71 | 4.53 | 2.70 | 2.18 | 2.70 | 2.27 | 2.34 | 2.04 | 2.17 | 3.36 | 3.65 | 3.36 |
| 500 mb | | | | | | | | | | | | |
| d | 293 | 287 | 282 | 265 | 271 | 273 | 288 | 275 | 279 | 275 | 262 | 281 |
| f | 6.77 | 7.14 | 5.70 | 5.54 | 5.91 | 5.67 | 6.63 | 8.12 | 6.89 | 4.70 | 8.16 | 7.14 |
| σ | 5.49 | 7.11 | 4.89 | 3.74 | 4.16 | 3.30 | 4.58 | 4.16 | 4.23 | 5.82 | 5.76 | 5.46 |
| b) <u>Najsušni mjesec</u> | | | | | | | | | | | | |
| 850 mb | | | | | | | | | | | | |
| d | 066 | 037 | 040 | 251 | 272 | 325 | 286 | 232 | 231 | 002 | 248 | 157 |
| f | 2.6 | 3.7 | 4.2 | 3.6 | 4.1 | 1.6 | 3.1 | 1.1 | 2.8 | 0.2 | 1.8 | 3.0 |
| 500 mb | | | | | | | | | | | | |
| d | 058 | 022 | 025 | 253 | 277 | 295 | 288 | 278 | 283 | 325 | 205 | 214 |
| f | 3.7 | 6.2 | 4.3 | 10.2 | 11.5 | 5.8 | 13.1 | 8.4 | 10.3 | 3.0 | 2.6 | 3.4 |
| god. | 1964 | 1975 | 1973 | 1968 | 1973 | 1957 | 1956 | 1962 | 1956 | 1965 | 1957 | 1972 |
| c) <u>Najkišniji mjesec</u> | | | | | | | | | | | | |
| 850 mb | | | | | | | | | | | | |
| d | 249 | 247 | 275 | 274 | 239 | 016 | 044 | 014 | 207 | 287 | 207 | 236 |
| f | 3.9 | 2.8 | 2.0 | 4.1 | 2.7 | 5.3 | 3.4 | 1.2 | 0.7 | 2.7 | 2.1 | 5.1 |
| 500 mb | | | | | | | | | | | | |
| d | 278 | 245 | 257 | 255 | 248 | 329 | 002 | 259 | 250 | 239 | 210 | 258 |
| f | 9.1 | 11.9 | 9.8 | 10.9 | 7.3 | 4.3 | 0.7 | 7.6 | 7.8 | 15.6 | 9.2 | 8.9 |
| god. | 1962 | 1969 | 1970 | 1970 | 1972 | 1959 | 1972 | 1969 | 1963 | 1974 | 1962 | 1959 |

sat, kao i srednje mjesečne vrijednosti na tim nivoima za najsušniji i najkišniji mjesec u promatranom razdoblju.

Prevladavajući sjeverozapadni smjer srednjeg vektora vjetra (a) na 850 mb ima izraženiju sjevernu komponentu u proljeće i ljeti, koja se s visinom smanjuje, te vjetar pokazuje karakteristično ciklonalno smicanje s visinom od ožujka do kolovoza. U jesenskom razdoblju je vjetar na 850 mb jugozapadni, a

na 500 mb se ova komponenta zadržava samo u studenom. Smicanje vjetra s visinom je u hladno doba godine, ili točnije, od rujna do veljače, u anticiklonalnom smislu, tj. uz izraženu zapadnu komponentu na 500 mb ujesen i sjeverozapadnu zimi. Jačina vjetra u prosjeku raste od 850 mb do 500 mb za 4-5 m/sek, uz najveći porast od 7 m/sek u kolovozu, a najmanji od 3.5 m/sek u listopadu.

U najsušnijim mjesecima prvog tromjesečja (b) očigledna je sjeverozapadna komponenta vjetra i ciklonalno smicanje vjetra s visinom. Najkišniji mjeseci ovog razdoblja pokazuju odklanjanje smjera vjetra prema jugu, a smicanje je u istom smislu kao kod normala.

Prema tome, za sušna razdoblja u ovom tromjesečju je karakteristično, da se u zračnoj masi prilikom spuštanja povećava anticiklonalna vrtložnost, a time jača silazna komponenta gibanja uvjetovana trenjem pri tlu, što pogoduje održavanju sušnog perioda u ovo doba godine.

Za cijelo hladno razdoblje (X-III) karakterističan je slabiji vjetar od prosjeka na 500 mb u sušnom, a mnogo jači u kišnom periodu (c). Ove se karakteristike naročito ističu u listopadu, koji u sušnom periodu pokazuje izrazitu sjevernu komponentu i tendenciju zračnih masa da u stabilnoj atmosferi jesenskog razdoblja obilaze sjeverne obronke Alpa uz vrlo slabi vjetar u nižoj troposferi. Jači vjetar na 500 mb s južnijom komponentom od normalnih je općenita karakteristika kišnih mjeseci od rujna do prosinca.

Za razliku od hladnog doba godine, u proljetnim i ljetnim mjesecima se vrlo sušna razdoblja pojavljuju uz mnogo jači porast vjetra s visinom, ali većinom bez bitne promjene smjera. Za kišne mjesece ljeta karakteristično je, uz sjeverozapadno strujanje na 850 mb, izrazito ciklonalno smicanje i slabljenje vjetra s visinom. Ove karakteristike su logična posljedica uvjeta za jači razvoj nestabilnosti u to doba godine. Jako smicanje vjetra ne pogoduje razvoju konvektivne naoblake, osim u slučaju izrazite baroklinosti, dok atmosfera sa slabim vjetrom u visini omogućava intenzivniji razvoj konvekcije u nestabilnoj zračnoj masi.

Medjutim, navedene karakteristike vjetra u ovim ekstremnim situacijama nisu tako izrazite kao u hladno doba godine, što je naročito slučaj u ostalim kišnim i sušnim mjesecima, koji ovdje nisu prikazani. To je u skladu s ranije iznesenim zaključkom o karakteristikama anomalija cirkulacije u proljeće i ljeto, s obzirom na manju perzistenciju i kompleksne uvjete koji pogoduju kišnim i sušnim tipovima vremena u to doba godine.

3. SUŠA KAO POSLJEDICA ENERGETSKE RAVNOTEŽE U TROPOSFERI

3.1 Atmosferska energija

Fizikalni mehanizam koji podržava atmosfersku cirkulaciju je vrlo kompleksan, jer sadrži različite procese interakcija i procese povratne sprege (feed-back processes). Interesantna je činjenica da se numeričkim modelima atmosfere i laboratorijskim eksperimentima uspješno prilično dobro simuliraju osnovna stanja i gibanja u atmosferi. Međutim, mehanizam i bitni efekti koji su odgovorni za pojedina stanja u ciklusu ovih procesa, malo su poznati. To znači, da odgovor na ovo pitanje ne treba tražiti u kompleksnom rješenju sistema termodinamičkih jednažbi, već u kvalitativnim (put kojim je krenuo Rossby), polu-kvantitativnim i teorijskim radovima, te maksimalnim pojednostavljenjima i aproksimacijama sistema jednažbi i strukture atmosfere u modelima, kako je predložio Lorenz [23].

U današnjem stadiju razvitka meteorologije ovu zadaću najbolje obavljaju modeli opće cirkulacije, koji tretiraju pojedinačne efekte i njihov utjecaj na energetska stanja atmosfere i transformacije raznih vidova energije.

Naš je zadatak da zapažena stanja atmosferske cirkulacije, specijalno ona povezana s duljim sušnim periodima u pojedinim godišnjim dobama, pripišemo nekim fizikalnim procesima i komponentama energetske ravnoteže u atmosferi.

3.2 Charney-ev model za studiju suše u pustinja predjelima

Na efektu radijacione ravnoteže Charney [4] je izradio model geneze i održavanja suše, u kojem je bitni faktor pustinjska kao radijacioni ponor topline u odnosu na okolinu. S obzirom da suho i pjeskovito tlo ima veći albedo od tla pokrivenog vegetacijom, pustinjski predjeli reflektiraju više sunčeve radijacije nego njihova okolina. Pored toga, pustinjsko tlo je jače zagrijano, a zračne mase iznad njega imaju malu naoblaku, pa pustinjska emitira više dugovalne radijacije u prostor od okolnog područja. U održavanju termalne ravnoteže zrak se spušta, adijabatski sažima i još više suši. Na taj način pustinjska podržava svoju suhoću, a taj se efekt najviše pripisuje promjenama albeda za dugotrajnih suša.

Prema tome, ovaj je model suše naročito primjenljiv na one vrste tla koje imaju veći albedo kao što su pijesak i stjenovito područje. To bi općenito značilo da po ovakvom

modelu radijacioni efekti podržavaju sušu reguliranjem toplinske bilance površinskog sloja uz tlo, a time se modificira sistem strujanja, dok s druge strane cirkulacija većih razmjera omogućava silazna gibanja u području radijacionog ponora topline. Tu se, dakle, radi o procesu povratne sprege i jednom mehanizmu u kojem se zrak stabilizira povećanjem raspoložive potencijalne energije, pa se može smatrati kao suprotan efekt kondicionalnoj nestabilnosti drugog reda, poznatij kao CISK [7] pri genezi penetrativne konvekcije u tropskom području.

Iako ovaj model suše nije direktno primjenljiv na prognozu sušnih perioda u našem području, teoretska osnova ovoga modela ukazuje na važnost energetske ravnoteže u sistemu atmosfera - tlo, kao i na mogućnost prognoze suše velikih razmjera, s obzirom da geneza opisanog procesa i njezino samoodržavanje mogu poremetiti globalnu cirkulaciju atmosfere do velikih visina, kao što je to bio slučaj sa sušom u Sahelu 1973. godine.

3.3 Toplinska bilanca u sistemu atmosfera-tlo u sjeverozapadnoj Hrvatskoj

Šinik i Pleško [30] su odredjivale komponente vodne i radijacione bilance modificiranim metodom Budyka u svrhu odredjivanja klimatskog potencijala na području Hrvatske u razdoblju 1949-73. U njihovoj publikaciji prikazane su samo komponente radijacione bilance za cijelo promatrano razdoblje, a vodna bilanca se upotrijebila za odredjivanje vrijednosti isparavanja. Zahvaljujući autorima koji su nam dali na raspolaganje nepublicirane podatke ovoga rada, ovdje ćemo prikazati neke rezultate analize za 1950. godinu za Zagreb-Maksimir, koja je predstavljala kraj najduljeg sušnog razdoblja u nizu Zagreba (sl. 1) i sadrži vrlo sušno ljeto s apsolutnim maksimumom temperature.

Tabela 2 pokazuje srednje mjesečne vrijednosti komponenta radijacione bilance R izračunate iz podataka za 6 stanica u sjeverozapadnoj Hrvatskoj i iste vrijednosti u 1950. godini za Zagreb-Maksimir.

R predstavlja razliku efektivne globalne radijacije i dugovalnog izjaravanja tla. Ova količina topline se troši na isparavanje LE , na turbulentnu razmjenu topline TR , i na razmjenu topline sa tlom TL . (Za detaljniji opis metode vidi [30]). R je u zimskim mjesecima u prosjeku negativan, što znači da je gubitak topline dugovalnim izjaravanjem veći od primitka.

Tabela 2 pokazuje, da se od raspoložive topline u prosjeku najviše troši na proces isparavanja, a maksimum pada u srpanj. TR je općenito manja s maksimumom u kolovozu, a njezina uloga je naročito značajna zimi kada je fluks topline

Tabela 2 Srednje mjesečne vrijednosti radijacione bilance R , topline isparavanja LE , turbulentne razmjene topline TR , i razmjene topline sa tlom TL , u jedinica-
ma kcal cm^{-2} mj^{-1} za područje sjeverozapadne Hrvatske u periodu 1949-73
prema [30], i mjesečne vrijednosti istih komponenti za 1950. godinu za
Zagreb-Maksimir, B_0 je Bowen-ov omjer.

| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|----------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Srednjak | | | | | | | | | | | | |
| R | -0.74 | -0.07 | 2.19 | 4.65 | 7.22 | 8.25 | 9.79 | 7.90 | 4.87 | 2.16 | 0.10 | -0.64 |
| LE | 0.33 | 0.72 | 1.81 | 3.74 | 5.42 | 6.38 | 7.45 | 4.37 | 2.45 | 2.09 | 0.76 | 0.37 |
| TR | -0.62 | -0.47 | 0.24 | 0.60 | 1.26 | 1.64 | 1.98 | 3.32 | 2.45 | 0.31 | -0.35 | -0.57 |
| TL | -0.45 | -0.32 | 0.14 | 0.31 | 0.54 | 0.23 | 0.36 | 0.21 | -0.03 | -0.24 | -0.31 | -0.44 |
| B_0 | -1.88 | -0.65 | 0.13 | 0.16 | 0.23 | 0.26 | 0.27 | 0.76 | 1.00 | 0.15 | -0.46 | -1.54 |
| 1950. | | | | | | | | | | | | |
| R | -0.44 | 0.30 | 3.14 | 6.31 | 9.88 | 10.64 | 11.42 | 9.69 | 5.27 | 2.48 | 0.56 | -0.58 |
| LE | 0.39 | 0.58 | 2.14 | 2.88 | 6.43 | 3.63 | 2.69 | 2.12 | 4.87 | 1.95 | 0.88 | 0.19 |
| TR | -0.28 | 0.07 | 0.81 | 3.07 | 2.89 | 6.46 | 8.28 | 7.29 | 0.60 | 0.82 | 0.14 | -0.23 |
| TL | -0.55 | -0.35 | 0.19 | 0.36 | 0.56 | 0.55 | 0.45 | 0.28 | -0.20 | -0.29 | -0.46 | -0.54 |
| B_0 | -0.72 | 0.12 | 0.38 | 1.07 | 0.45 | 1.78 | 3.08 | 3.44 | 0.12 | 0.42 | 0.16 | -1.21 |

negativan, što označava nižu temperaturu tla od temperature zraka. Komponenta TL sačinjava ostatak topline koji se nije utrošio na isparavanje i turbulenciju i prikazuje razmjenu topline u tlu. Pozitivne vrijednosti znače fluks topline prema nižim slojevima tla, koji je najveći u svibnju i lipnju, dok je u prosincu i siječnju fluks u obrnutom smjeru.

B_0 označuje Bowen-ov omjer TR/LE . Zimi B_0 ima visoke negativne vrijednosti, jer je TR po apsolutnoj vrijednosti veća, dok je u proljeće u prosjeku vrlo nizak, jer se LE naglo povećava. To se može objasniti time, što promjena tlaka zasićene vodene pare u odnosu na temperaturu bitno raste s povećanjem temperature, pa vertikalni gradijent tlaka zasićene pare raste jače od vertikalnog gradijenta temperature, a time se B_0 smanjuje. Maksimalni B_0 je u prosjeku jednak jedinici u rujnu, kada se toplina jednako troši na isparavanje i na turbulenciju, a u listopadu ponovo naglo pada uslijed znatnog smanjenja TR .

Za razliku od srednjih vrijednosti, u 1950. godini je radijaciona bilanca veća, LE je manja, a TR veća. Povišena evaporacija u svibnju je samo rezultat kraćih intenzivnijih pljuskova.

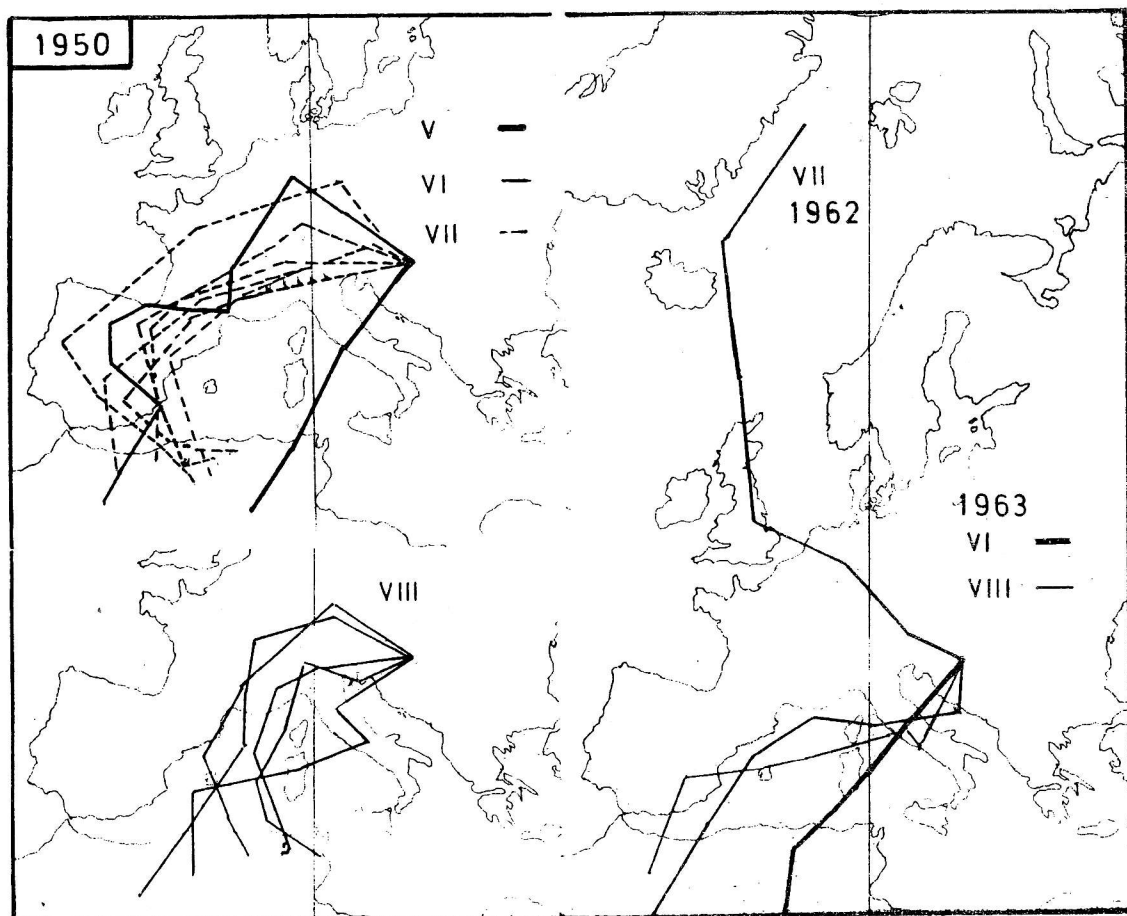
Bitan je rezultat ove analize da se u sušnom ljetnom periodu najviše topline trošilo na turbulentnu razmjenu, pa Bowen-ov omjer poprima ekstremno visoke vrijednosti. Ovakav proces omogućava zagrijavanje debljeg prizemnog sloja zraka, što povećava raspoloživu potencijalnu energiju područja koje takav mehanizam zahvaća.

3.4 Cirkulacija i izvorišno područje zračnih masa koje podržavaju ljetne suše

Sada nam preostaje da ispitujemo što održava termalnu ravnotežu i cirkulaciju iznad prizemnog sloja uz tlo, i koji efekti je narušavaju. Sinoptičke analize pokazuju, da su za situacije vezane uz sušne periode ljeti karakteristične prostrane anticiklone nad velikim područjem Evrope, ili prošireni greben azorske anticiklone na području jugozapadne Evrope i Balkana. Kako je poznato da su suprotropske anticiklone i njihovo jačanje vezani uz Hadleyevu tropsku cirkulaciju, to je logično pretpostaviti da ova cirkulacija podržava anticiklone nad našim područjem, a time i spuštanje i adijabatsko sažimanje zraka, koji se u prizemnom sloju sve više suši. Medjutim, to s druge strane zahtijeva da je i zrak iznad prizemnog sloja suh, i da su advektivni efekti spori i ne smiju dozvoliti da se zrak koji zahvaća naše područje dulje zadržava iznad mora ili predjela s višom vlagom. To drugim riječima znači, da bi direktna cirkulacija s područja sjeverne Afrike do južne Evrope trebala biti intenzivnija, ili se bitna grana ove cirkulacije odvija na

zapadnom dijelu Evrope, gdje zračna masa ne mora prelaziti morskou površinou, te u naše krajeve dolazi sa zapada.

Da bi pokazali da je ovo posljednje vjerojatnije za održavanje intenzivnijih sušnih perioda ljeti, koristili smo se kartama trajektorija koje je odredio Rupnik [29] za razdoblje 1950-63, na nivou 850 mb, za dane s visokim maksimalnim temperaturama ($\geq 35^{\circ}$) na području sjeverne Hrvatske. Sl. 9 prikazuje geostrofičke trajektorije za navedene dane prema 12-satnim kartama u razdoblju od svibnja do kolovoza 1950. i 1963. Ova analiza je pokazala da su se čestice zraka gibale relativno sporo s područja zapadne Sahare, preko Pirinejskog poluotoka, do našeg područja. Za trajektorije koje prelaze direktno preko Mediterana, karakteristično je



Sl. 9 Geostrofičke trajektorije na 850 mb za dane s ekstremno visokom temperaturom u sjevernoj Hrvatskoj ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) u 1950. i 1963. god., i trajektorija u 1962. god. za vrijeme hladnog prodora ljeti. Prema Rupniku [29].

da su kraće, što znači da je cirkulacija intenzivnija, ali se i brže mijenja. Ovakve kraće trajektorije su se pojavile 1950. u svibnju, i pri kraju sušnog perioda u kolovozu, te 1963., kada je i sušni period bio manje intenzivan i kraće trajao. Međutim, ova cirkulacija nije direktno odgovorna za narušavanje suše, i vlažni zrak koji dolazi u naše krajeve početkom kišnog perioda, nije mediteranskog porijekla.

Van granica područja u kojem se ranije opisanim procesima povećava turbulentni prenos topline i raspoloživa potencijalna energija, istovremeno jača kinetička energija vrtložnih gibanja, jer se na samim granicama razvija baroklina nestabilnost, pa time i advektivni efekti jačaju. Analize anomalija su pokazale da je izvorišno područje jače nestabilnosti u sjevernom dijelu Atlantika, a Rupnik je primjerom trajektorija u 1962. na sl. 9 pokazao da je izvorišno područje hladnog zraka za ljetnih prodora istočno od Grenlanda.

U slučajevima kada je Hadley-eva cirkulacija nad zapadnom Evropom vrlo intenzivna, anticiklonalno područje se može proširiti mnogo sjevernije i do Skandinavije. Tada trajektorije hladnog zraka sa sjevernog Atlantika obilaze Skandinaviju i iz sjeverne Evrope dolaze u naše područje sa sjeveroistoka. To su kišna ljeta u nas sa čestim prodorima nestabilnog zraka, na koje smo ukazali u poglavlju 2 (na primjer ljeto 1975.).

S obzirom da sadašnji valni režim strujanja u atmosferi djeluje i na položaj i intenzitet morskih struja, to je i ovaj efekt značajan za razvoj i asimetriju Hadley-eve cirkulacije. Posebno je za ljetne situacije u nas značajna intertropska zona konvergencije u zapadnom dijelu Afrike, čiji je položaj oko 20°N , te se najviše temperature ljeti javljaju u sjeverozapadnom dijelu Afrike, tj. upravo u onom području odakle potječu trajektorije na sl. 9. Prema tome bi se uzrok jačanju grebena nad zapadnom Evropom mogao tražiti u jačanju relativno kratke intertropske zone konvergencije u zapadnom dijelu Afričkog kontinenta, i u uskom pojasu na Atlantiku zapadno od Senegala. Ako je ova zona oslabljena, uslijed nedostatka vlage i prizemnih konvergentnih strujanja u tom području, suša zahvaća prostrani dio sjeverne Afrike, a suprotropska mlazna struja ima sjeverniji položaj, preko južne Evrope. To omogućava i intenzivniji razvoj anticiklonalnog vrtloga u sjeverozapadnoj Africi, čije su strujnice gotovo identične s počecima trajektorija u 1950. godini. Detaljniji opis ovih strujnica, kao i opširniji prikaz gornje problematike, dat je u ranijem radu autora [15].

3.5 Sušne zime

Dugotrajni sušni periodi zimi su rezultat permanentne visinske doline i ciklonalne aktivnosti na području sjevernog Atlantika i izrazitog grebena s prizemnim anticiklonalnim poljem u zapadnoj i srednjoj Evropi. Pitanje, koje se ovdje

prvo postavlja, odnosi se na mehanizam koji podržava ovu cirkulaciju i koji uzrokuje ranije spomenute najizraženije klimatske promjene u polarnoj troposferi sjevernog Atlantika.

Od procesa povratne sprege važno je istaći, da smanjenjem snježnog pokrivača u polarnom području ostaje više toplinske energije za zagrijavanje površine mora i termičku konvekciju u moru i u atmosferi. Postupnim hladjenjem polarne troposfere i jačanjem vjetera jača i dinamička konvekcija u moru, što omogućava stvaranje toplinskog rezervoara, dok s druge strane češći prodori hladnijeg zraka nad toplom morskom površinom omogućuju dijabatskim efektima održavanje ciklonalne aktivnosti. Ovi procesi su naročito izraženi u hladno doba godine. Održavanje anticiklonalne situacije i sušnog razdoblja u zapadnoj Evropi i u nas u zimsko doba ovisi i o raznim drugim faktorima. Među njima, kao i u ljetno doba, važnu ulogu imaju fizički procesi u prizemnom graničnom sloju uz tlo.

Ranije smo ukazali (tabela 2), da se zimi u prosjeku vrijednosti radijacione bilance, kao i turbulentna toplina i razmjena topline s tлом, javljaju kao negativne vrijednosti, što označava nižu temperaturu tla od temperature zraka, pa su ovi procesi vezani uz česte pojave inverzija. Inverzije su najizraženije u makrosituacijama s anticiklonalnim tipovima vremena, a permanentna spuštanja zraka još više jačaju inverzije. Prema tome i ovdje dolaze do izražaja procesi povratne sprege, koji djeluju frontolitički pri rjedjim prolazima frontalnih sistema preko našeg područja, što je jedan od važnih efekata u održavanju suše. Nadalje, ovi procesi su povezani sa smanjenjem snježnog pokrivača, i smanjenjem albeda čiji je utjecaj, kao i kod ljetnih situacija, važan za održanje suše. Jedan od važnih faktora, koji doprinosi smanjenju područja sa snijegom i povećava količinu radijacije koju zemlja apsorbira, je povećanje količine ugljičnog dioksida [12]. Zagrijavanje je ograničeno na donji dio troposfere u relativno plitkom sloju, jer je vertikalno mješanje turbulencijom smanjeno u stabilnom pograničnom sloju. Prema tome, toplinska energija se troši na povećanje temperature ovog sloja, umjesto da se proširi kroz cijelu troposferu, pa je efekt smanjenja mješanja, zajedno sa otapanjem snijega u višim predjelima, uzrok daljnjem zagrijavanju tog područja. S obzirom da je ovaj efekt jače izražen u zapadnim predjelima Slovenije, to je i sušnost tamo veća, a to se odražava u većoj perzistenciji sušnih dana u tom području.

I konačno, inverzije temperature su često vezane uz maglu i nisku naoblaku, pa je važno istaći i zapaženo povećanje aerosola u atmosferi, koji takodjer ima indirektni utjecaj na radijacionu ravnotežu. Povećanjem aerosola u magli i oblaku vodene čestice su manje, ali ih ima više. Ova promjena u mikrostrukturi povećava albedo oblaka, ali povećava i apsorpciju, pa se ta dva efekta djelomično kompenziraju. Medjutim, oblaci s manjim kapljicama teže formiraju kišu, pa je hidrološki ciklus poremećen, a vjerojatnost suše veća.

4. PROCESI INTERAKCIJA TROPOSFERSKE I STRATOSFERSKE CIRKULACIJE ZA VRIJEME SUŠNIH RAZDOBLJA

4.1 Teorije i opažanja

Globalni modeli za simulaciju troposferskih procesa, kao i nastojanja da se nadju razlozi za podbačaje pojedinih razvoja troposferske cirkulacije, sve više upućuju na studije stratosferske cirkulacije i njezinog energetskog ciklusa. Zbog vrlo visoke statičke stabilnosti u donjoj stratosferi, baroklina nestabilnost se ne može razviti kao u troposferi, pa teoretski rezultati i mnoga opažanja ukazuju da je izvor kinetičke energije, barem u donjoj stratosferi, vertikalno propagiranje troposferske kinetičke energije. Smatra se da troposferski valovi propagiraju u stratosferu samo za vrijeme zimske stratosferske cirkulacije, iako kriteriji odnosa vertikalno-propagirajućih valova i srednjeg zonalnog vjetera nisu jedinstveno usvojeni [5,10]. Prihvaćene su međjutim teoretske osnove prema kojima jedino planetarni valovi vrlo dugih valnih dužina mogu propagirati znatne količine energije, što je u skladu s opaženim dugim valovima u stratosferi. U godišnjem prosjeku je stratosfera u polarnom području toplija nego u ekvatorijalnom, a s obzirom da radijacioni procesi zagrijavaju ekvator, a hlade polarnu stratosferu, vrtložna gibanja obavljaju transport topline prema sjeveru nasuprot gradijentu temperature. Time je stratosfera u prosjeku termodinamički ekvivalent frižideru, ili "pasivni" sloj atmosfere, kojega podržava troposferski toplinski stroj vertikalnim propagiranjem valova. Kvantitativne analize energetskog ciklusa u sistemu troposfera - stratosfera pokazuju da postoje vremenske i prostorne promjene ovog ciklusa u različitim stanjima razvoja stratosferske cirkulacije, vezane uz sezonske, a posebno anomalne cirkulacije u troposferi i u mezosferi. Od specijalnog su interesa procjene energetskog ciklusa za vrijeme naglog stratosferskog zagrijavanja u zimskom periodu, s obzirom da se ovo zagrijavanje dovodi u vezu s pojačanim procesom blokiranja u troposferi.

Unatoč mnogih uspješnih simulacija pojedinih stratosferskih fenomena, pokazalo se da teoretska istraživanja i numerički modeli suviše pojednostavljaju fiziku troposferskih procesa (promjenu temperaturnih gradijenata između zimskog i ljetnog pola, način zagrijavanja i slično) da bi mogli objasniti kompletne dinamičke interakcije u sistemu troposfera-stratosfera.

Cilj je našeg slijedećeg prikaza da ukažemo na neke karakteristike ovih interakcija u odnosu na anomalije troposferske i stratosferske cirkulacije za vrijeme sušnih razdoblja u našem području.

4.2 Anomalije temperature i geopotencijala u donjoj stratosferi u razdoblju 1971-1975.

Da bi dobili grubi uvid u karakteristična stanja na području donje stratosfere za vrijeme sušnih razdoblja, promatrano je najprije polje anomalija geopotencijala i temperature na 50 mb plohi u razdoblju 1971-75. U tom su razdoblju pored izrazito sušnih godina 1971 i 1973, i ekstremno suhe zime 1974/75, u ostalim godinama pojedini mjeseci u toplo doba godine i u jesen dosegli ekstremno visoke količine oborina (vidi tabelu 5).

U tabeli 3 prikazane su najprije po mjesecima srednje visine 50 mb plohe na polu za razdoblje 1956-1971, i srednje mjesečne temperature na polu za razdoblje 1965-1969 [18]. Za svaku od promatranih godina 1971-75 dana su odstupanja od srednjaka. Podaci za pojedine godine su dobiveni iz [19].

Iz ovih podataka nalazimo najprije da je u dugogodišnjem srednjaku visina pola bila najniža u siječnju, dok je u srednjaku 1971-75 najniža u prosincu, koji takodjer pokazuje velika odstupanja temperature u svim promatranim godinama.

Karakteristična su velika pozitivna odstupanja geopotencijala u ožujku i travnju, praćena izrazitim porastom temperature u ožujku u svim godinama. Iz ovoga se općenito može zaključiti da zagrijavanje donje stratosfere u promatranom razdoblju započinje ranije, a time su temperature u svibnju i lipnju niže od prosjeka. Napose, u sušnim godinama karakteristično je još ranije zagrijavanje - u 1971 već u siječnju, a u 1973 u veljači ali uz veći porast temperature i geopotencijala nego u 1971. U obe godine temperatura je bila od travnja do lipnja niža nego u ostalim godinama, a u 1973 je i srpanj bio hladniji.

Važno je istaknuti da klimatološki podaci o temperaturi na 50 mb [18] pokazuju da je *srednja mjesečna temperatura u ožujku za razdoblje 1965-69 na polu bila niža za 12°C od srednjaka ranijeg 5-godišnjeg razdoblja 1957-61*, pa je očito fenomen ranog stratosferskog zagrijavanja u ožujku rezultat kraće-periodičnih oscilacija troposferske cirkulacije (vidi poglavlje 5).

U jesenskom razdoblju su karakteristične više temperature i geopotencijal u kišnu jesen 1974, i niski geopotencijal uz jači pad temperature u studenom ostalih godina.

Kako je u jesen 1974 polarno područje još u studenom bilo toplije od suprotropskog, a srednja temperatura je ostala viša od normale i u toku zime, to najvjerojatiju zimu 1974/75 karakterizira više statička stabilnost donje stratosfere polarnog područje.

Tabela 3. Srednja mjesečne vrijednosti geopotencijala (Z_p u gpm) 1956-71, i temperature (T_p u °C) 1965-69, i anomalije (Z_p' , T_p') u razdoblju 1971-75
 ΔZ i ΔT su razlike geopotencijala (u gpm), i temperature od 30°N do 70°N na 40°W, a ostale vrijednosti s indeksom "o" su na polu. AT 50 mb

| Mjesec | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|--------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Godina | | | | | | | | | | | | | |
| a) | Z_p | | | | | | | | | | | | |
| | 1956-71 | 19344 | 19409 | 19667 | 20250 | 20735 | 21035 | 21149 | 20970 | 20529 | 20027 | 19699 | 19456 |
| | Z_p' | | | | | | | | | | | | |
| | 1971-75 | -129 | -95 | +173 | +224 | -21 | -3 | -9 | -16 | +34 | +9 | -86 | -280 |
| | 1971 | +188 | -17 | +409 | +141 | -97 | +26 | +10 | -32 | +21 | -105 | -308 | -331 |
| | 1972 | -233 | -341 | -125 | +196 | +41 | +23 | +11 | -5 | +106 | +57 | +10 | -278 |
| | 1973 | -227 | +379 | +159 | +160 | -82 | -19 | -25 | -21 | +1 | +31 | +11 | -213 |
| | 1974 | -147 | -404 | +205 | +315 | +20 | -64 | -3 | -3 | +53 | +162 | +115 | -161 |
| | 1975 | -222 | -94 | +216 | +307 | +14 | +19 | -40 | -21 | -12 | -97 | -259 | -416 |
| b) | T_p | | | | | | | | | | | | |
| | 1965-69 | -70.8 | -71.0 | -65.1 | -49.7 | -40.7 | -38.1 | -38.0 | -42.9 | -50.9 | -60.0 | -64.0 | -67.4 |
| | T_p' | | | | | | | | | | | | |
| | 1971-75 | -0.4 | +4.0 | +10.9 | +3.0 | -2.7 | -1.8 | -0.9 | +0.4 | +0.8 | +0.9 | -2.7 | -7.3 |
| | 1971 | +13.7 | +3.2 | +10.7 | -0.9 | -4.1 | -3.5 | -0.8 | +1.1 | +1.3 | +0.3 | -5.6 | -8.6 |
| | 1972 | -7.7 | -1.9 | +6.3 | +6.7 | -1.5 | -1.3 | -0.8 | +0.2 | -0.2 | 0.0 | -2.3 | -9.8 |
| | 1973 | -3.9 | +23.4 | +10.8 | -2.2 | -5.3 | -2.9 | -1.9 | -0.1 | +0.6 | +0.5 | -3.9 | -7.3 |
| | 1974 | -5.6 | -7.7 | +12.3 | +3.8 | -0.6 | -0.5 | -0.6 | -0.6 | +0.8 | +3.5 | +2.2 | -3.3 |
| | 1975 | +1.6 | +3.2 | +14.6 | +4.7 | -2.2 | -0.6 | -0.4 | +1.4 | +1.7 | +0.3 | -4.0 | -7.6 |
| c) | ΔZ | | | | | | | | | | | | |
| | 1971 | -60 | -51 | -20 | -8 | 2 | 22 | 24 | 7 | -12 | -40 | -57 | -97 |
| | 1972 | -106 | -104 | -61 | 3 | 5 | 18 | 22 | 11 | -8 | -33 | -73 | -109 |
| | 1973 | -107 | -63 | -50 | -22 | -2 | 13 | 19 | 8 | -14 | -36 | -62 | -91 |
| | 1974 | -123 | -125 | -56 | 3 | 9 | 18 | 21 | 7 | -17 | -25 | -49 | -87 |
| | 1975 | -100 | -81 | -36 | 1 | 8 | 22 | 23 | 15 | -18 | -33 | -53 | -99 |
| | ΔT | | | | | | | | | | | | |
| | 1971 | 5.4 | 6.4 | 8.7 | 9.1 | 11.8 | 14.9 | 14.8 | 13.9 | 9.3 | 2.6 | -2.4 | -7.5 |
| | 1972 | -9.2 | -5.7 | 6.0 | 12.8 | 12.8 | 16.3 | 15.5 | 15.1 | 8.2 | 4.4 | -1.9 | -6.7 |
| | 1973 | -9.0 | 14.2 | 7.3 | 8.6 | 10.8 | 14.8 | 15.0 | 13.9 | 9.1 | 1.8 | -6.0 | -8.6 |
| | 1974 | -12.4 | -11.2 | 3.6 | 11.0 | 13.8 | 15.6 | 14.6 | 14.4 | 13.2 | 5.5 | 2.7 | -2.0 |
| | 1975 | 0.2 | -1.9 | 10.2 | 12.5 | 12.6 | 15.6 | 16.6 | 14.3 | 9.5 | 3.0 | 0.0 | -7.8 |

Dalje su u tabeli 3 prikazani meridionalni gradijenti geopotencijala (ΔZ) i temperature (ΔT) duž $40^{\circ}W$ od $30^{\circ}N$ do $70^{\circ}N$. I ovdje uočavamo relativno mala kolebanja u ljetnim mjesecima i izrazite promjene u hladno doba godine, kako iz mjeseca u mjesec tako i u promatranim godinama. Karakteristično je da gradijent geopotencijala u svim godinama u jesenskom razdoblju mijenja smjer u rujnu, a gradijent temperature u studenom, s izuzetkom u 1974 anomalnoj godini po jesenskom razdoblju. Međutim u proljeće postoje velike razlike u promatranim godinama. Za sušnih godina, i u suhoj zimi 1974/75, uz rano zagrijavanje pola i gradijent temperature mijenja smjer ranije, pa je kroz dulje razdoblje termalni vjetar u suprotnom smjeru od geostrofičkog. Time je i vertikalna struktura atmosfere različita od ostalih godina kada smjer geostrofičkog vjetra mnogo brže slijedi obrat u termalnom vjetru. Pored toga je termalni vjetar u promatranom području u sušnim godinama slabiji od travnja do lipnja iako se razlika u ΔT početkom ljeta smanjuje.

4.3 Kolebanja zonalnog indeksa cirkulacije u troposferi

Da bi pokazali da su anomalije stratosferske cirkulacije povezane s anomalijama cirkulacije u troposferi u tabeli 4 su prikazane vrijednosti zonalnog indeksa, danim u redovnim mjesečnim izvještajima u [11]. Sa ZI_c označen je cirkumpolarni zonalni indeks, kao razlika srednjeg prizemnog tlaka između $35^{\circ}N - 55^{\circ}N$ za razdoblje 1899-1974 i 1971-75, te srednji zonalni indeks između istih geografskih širina za područje Evrope $20^{\circ}W - 40^{\circ}E$, ZI_e , za razdoblje 1940-74 i 1971-75.

Iz razlika dugogodišnjih vrijednosti ZI_c i srednjaka za posljednje 5-godišnje razdoblje očito je pojačanje hemisferske zonalne cirkulacije od listopada do veljače, i smanjenje u ožujku i travnju. ZI_e pokazuje još veći porast zonalne cirkulacije u zimskom razdoblju, naročito u prosincu kada je pokazano da je i cirkumpolarni vrtlog na 50 mb dublji. Od ožujka do srpnja oba indeksa su niža u posljednjih 5 godina, s izrazitim minimumom od ZI_c u ožujku, a ZI_e u svibnju.

U nastavku tabele 4 prikazane su srednje mjesečne vrijednosti ZI_e za svaku godinu posljednjeg razdoblja. Od ovih vrijednosti naročito je karakterističan visoki indeks u prosincu 1974 i siječnju slijedeće godine, u odnosu na niski indeks u siječnju 1972, jedinom mjesecu s oborinom iznad normale u promatranom razdoblju.

Radi usporedbe ovih indeksa s kišnim i sušnim mjesecima u ovom razdoblju i njihov odnos sa normalama, u tabeli 5 su prikazane količine oborine za Zagreb-Grič. Iz

Tabela 4. Cirkumpolarni zonalni indeks ZI_c (razlika srednjeg prizemnog tlaka u mb između $35^\circ N$ i $55^\circ N$), zonalni indeks ZI_e (istih geografskih širina za područje $20^\circ W - 40^\circ E$), u označenim razdobljima i godinama

| Mjesec | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|-----------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Godina | | | | | | | | | | | | |
| ZI_c | | | | | | | | | | | | |
| 1899-1974 | 5.5 | 3.0 | 2.3 | 2.6 | 1.3 | 2.4 | 3.8 | 3.5 | 4.9 | 7.7 | 7.2 | 6.8 |
| 1971-75 | 6.5 | 5.3 | 1.0 | 1.6 | 1.6 | 2.5 | 3.0 | 4.0 | 4.6 | 8.0 | 8.5 | 9.0 |
| ZI_e | | | | | | | | | | | | |
| 1940-74 | 10.1 | 7.1 | 5.8 | 4.5 | 0.0 | 2.7 | 2.6 | 2.7 | 6.6 | 8.5 | 9.9 | 13.7 |
| 1971-75 | 15.5 | 11.0 | 4.5 | 1.5 | -0.7 | 2.2 | 1.8 | 2.8 | 6.7 | 6.9 | 16.4 | 21.4 |
| 1971 | 16.4 | 9.0 | 1.0 | -1.6 | 0.4 | 0.8 | -1.2 | 6.1 | 2.7 | 12.9 | 17.0 | 17.1 |
| 1972 | 0.9 | 4.7 | 6.9 | 5.9 | 0.5 | 4.0 | -1.2 | 1.5 | -0.3 | 5.8 | 21.7 | 20.5 |
| 1973 | 11.7 | 20.0 | 9.8 | 2.6 | 1.1 | 3.5 | -0.3 | 4.1 | 3.9 | 6.8 | 18.3 | 19.4 |
| 1974 | 20.7 | 13.7 | -3.8 | -3.6 | -1.5 | 2.1 | 8.5 | 3.0 | 10.7 | 3.7 | 12.8 | 27.7 |
| 1975 | 27.6 | 7.8 | 7.8 | 4.3 | -3.8 | 0.4 | 3.1 | -0.7 | 13.3 | 5.1 | 12.0 | 22.3 |

Tabela 5. Srednje mjesečne količine oborine (mm) za Zagreb-Grič u naznačenim periodima, i količine oborine u pojedinim godinama razdoblja 1971-75.

| Mjesec | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|---------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Godina | | | | | | | | | | | | |
| 1941-70 | 56 | 53 | 48 | 64 | 84 | 100 | 87 | 79 | 74 | 65 | 96 | 71 |
| 1971-75 | 41 | 33 | 42 | 74 | 93 | 94 | 100 | 88 | 80 | 90 | 72 | 32 |
| 1971 | 44 | 16 | 66 | 54 | 42 | 63 | 38 | 131 | 46 | 11 | 80 | 25 |
| 1972 | 60 | 52 | 46 | 152 | 140 | 86 | 225 | 61 | 68 | 24 | 113 | 16 |
| 1973 | 38 | 50 | 11 | 81 | 24 | 74 | 82 | 33 | 97 | 18 | 56 | 43 |
| 1974 | 47 | 34 | 32 | 37 | 189 | 127 | 52 | 118 | 142 | 224 | 62 | 23 |
| 1975 | 18 | 12 | 57 | 44 | 71 | 117 | 104 | 99 | 29 | 93 | 51 | 51 |

ove usporedbe je naročito karakteristično smanjenje oborine u zimskim mjesecima s povećanjem indeksa, i obrnuti odnos u toplo doba godine. Dakako da u pojedinačnim godinama ova veza nije toliko čvrsta kao u srednjacima duljih razdoblja, naročito za niske vrijednosti ZI_e u toplo doba godine. Iznimku čine ekstremno niske negativne vrijednosti u proljeće 1974 i 1975, koje prethode duljim kišnim razdobljima tih godina. Smanjenje oborine u srpnju 1974 i rujnu 1975 unutar kišnih perioda uz povećani ZI_e je u skladu s ranije iznešenom vezom oborina i anomalija cirkulacije (poglavlje 2), koja zahtjeva jači meridionalni gradijent tlaka za vrijeme sušnijih perioda u to doba godine. Međutim izrazite razlike u oborinama srpnja s istom niskom vrijednosti indeksa u 1971 i 1972 očito ukazuju na potrebu odvajanja meridionalnog gradijenta nad Evropom i Atlantikom u svrhu dobivanja bolje kvantitativne veze oborine i tipova cirkulacije. Raspodjela koeficijenta korelacije između oborine Zagreba i anomalija cirkulacije prikazana u [17], pokazuje u kojem smislu bi se ovakvi "tipovi" trebali definirati.

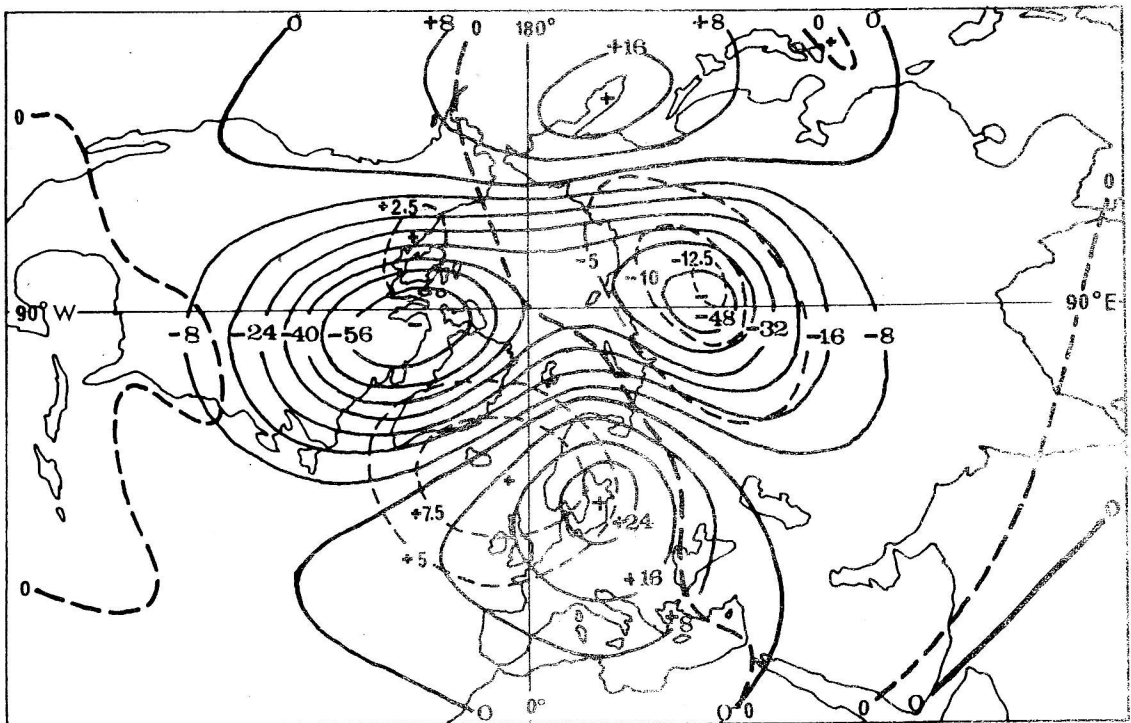
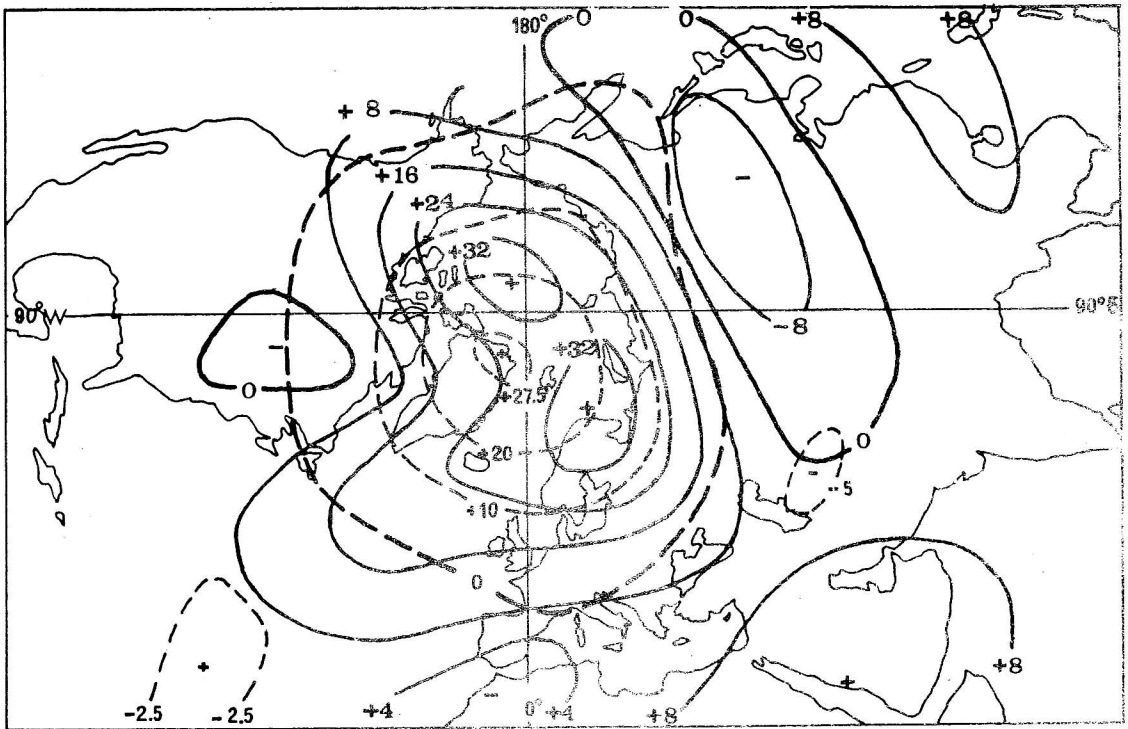
Ukažimo još na kraju ove diskusije na visoki indeks u veljači 1973, kao posljedicu duboke Isländske ciklone, za razliku od niskog indeksa u veljači 1972, uvjetovanog proširenjem grebena Sibirske anticiklone preko evropskog kopna, koja je bila uzrok još nižem indeksu u siječnju te godine. Njihovim karakteristikama u stratosferi iznešenim u tabeli 3, pridružiti ćemo detaljniji prikaz stratosferskih anomalija u sljedećoj točki.

4.4 Anomalije temperature i geopotencijala na 50 mb u veljači 1973 i 1972.

U siječnju 1973 srednje prizemno polje tlaka pokazuje duboku ciklonu u sjevernom Atlantiku i prostrano ciklonalno polje u sjevernom Pacifiku. Negativne anomalije su prelazile u blizini pola i 15 mb. U veljači je negativno polje prizemnih anomalija tlaka zahvaćalo područje Evrope i zapadni Pacifik, a temperatura je na većem dijelu istočne hemisfere bila viša od prosjeka [11].

Istovremeno je u polarnom području donje stratosfere došlo do izrazitog porasta temperature i geopotencijala, te su anomalije ovih polja na 50 mb zahvaćale prostrana područja oko pola, kako je pokazano na gornjem dijelu slike 10. Dnevne karte 50 mb pleše pokazuju još izrazitije efekte ovog zagrijavanja, koje je započelo na području Aljaske. Na sjevernom dijelu Grenlanda temperatura je porasla od -30°C (27.I) do -35°C (5.II).

Ova situacija odgovara opisu procesa u [28] za vrijeme naglog stratosferskog zagrijavanja od 25 siječnja do 9 veljače 1957 godine. U toj analizi Reed i suradnici su



Sl. 10 AT 50 mb. Odstupanje visine u gpDm (pune linije) od srednjaka 1956-1966, i temperature u $^{\circ}\text{C}$ (crtkane linije) od srednjaka 1965-1969, za veljaču 1973 (gore) i veljaču 1972 (dolje). Iz [19]

ukazali na karakteristične promjene energetskog ciklusa na 50 mb u početnoj (25.I - 4.II) i završnoj (4. - 9.II) fazi zagrijavanja.

U prvoj fazi vertikalni fluks energije troposferskih valova uvjetuje genezu kinetičke energije vrtložnih gibanja K' u donjoj stratosferi, koja konvergencijom horizontalnog momenta, prelazi u zonalnu kinetičku energiju \bar{K} . Srednja meridionalna cirkulacija u indirektnom smislu, karakteristična za zimsko razdoblje viših širina (vidi sl. 12) uvjetuje prijelaz iz \bar{K} u \bar{P} , a zatim u vrtložnu (eddy) raspoloživu potencijalnu energiju P' . Međutim pojačani vertikalni fluks energije pojačava K' i smanjuje \bar{K} , a vertikalni fluks topline uzrokuje i smanjenje \bar{P} na račun povećanja P' . Prema tome energetski ciklus teče u smislu:

$$\text{I faza } K'_+ \rightarrow \bar{K}_- \rightarrow \bar{P}_- \rightarrow P'_+ \rightarrow K'_+$$

gdje indeksi označuju povećanje (+) ili smanjenje (-) pojedine komponente u ovom ciklusu.

Druga faza odgovara Oort-ovom ciklusu [25] i započinje obratom u meridionalnom gradijentu temperature, pa i energetski ciklus mijenja smjer po kojem \bar{P} raste na račun ostalih komponentata energetske ravnoteže, u smislu:

$$\text{II faza } K'_- \rightarrow \bar{K}_- \leftarrow \bar{P}_+ \leftarrow P'_- \leftarrow K'_-$$

Ostatak energije se gubi radijacijom i trenjem. (Za detaljniji prikaz gornjeg ciklusa vidi [28] ili [13, str.22].

Ovakav ciklus potpuno odgovara razvoju sinoptičke situacije krajem siječnja i početkom veljače 1973 u donjoj stratosferi, a polje temperature i tlaka u donjoj troposferi uz permanentne polarne ciklone moglo je uvjetovati vertikalni fluks topline i energije u donju stratosferu, i time podržavati transport topline prema polu nasuprot gradijentu temperature, što odgovara Oort-ovom ciklusu frižidera.

Iz gornjeg opisa slijedi pretpostavka da se gubitak energije iz troposfere u stratosferu odrazio u slabljenju daljnjeg energetskog ciklusa u samoj troposferi, a time je i hidrološki ciklus bio poremećen.

Kao kontrast gore opisane situacije na donjem dijelu sl. 10 prikazane su anomalije geopotencijala i temperature u veljači 1972. Karakteristika ovih polja je deformacija cirkumpolarnog vrtloga uz dva duboka centra na području Kanade i Sibira. Ovaj posljednji se javlja uz vrlo niske temperature, pa su potencijalna i kinetička energija

virtložnih gibanja podvrgnuti jakim transformacijama pri konačnom stratosferskom zagrijavanju i promjeni u ljetni sistem strujanja. Time je moguće da više kinetičke energije virtložnih gibanja ostaje raspoloživo u troposferi, pored mogućeg transporta energije iz stratosfere u troposferu prilikom razaranja cirkumpolarnog vrtloga u silaznim strujanjima srednjih geografskih širina tijekom proljetnih mjeseci.

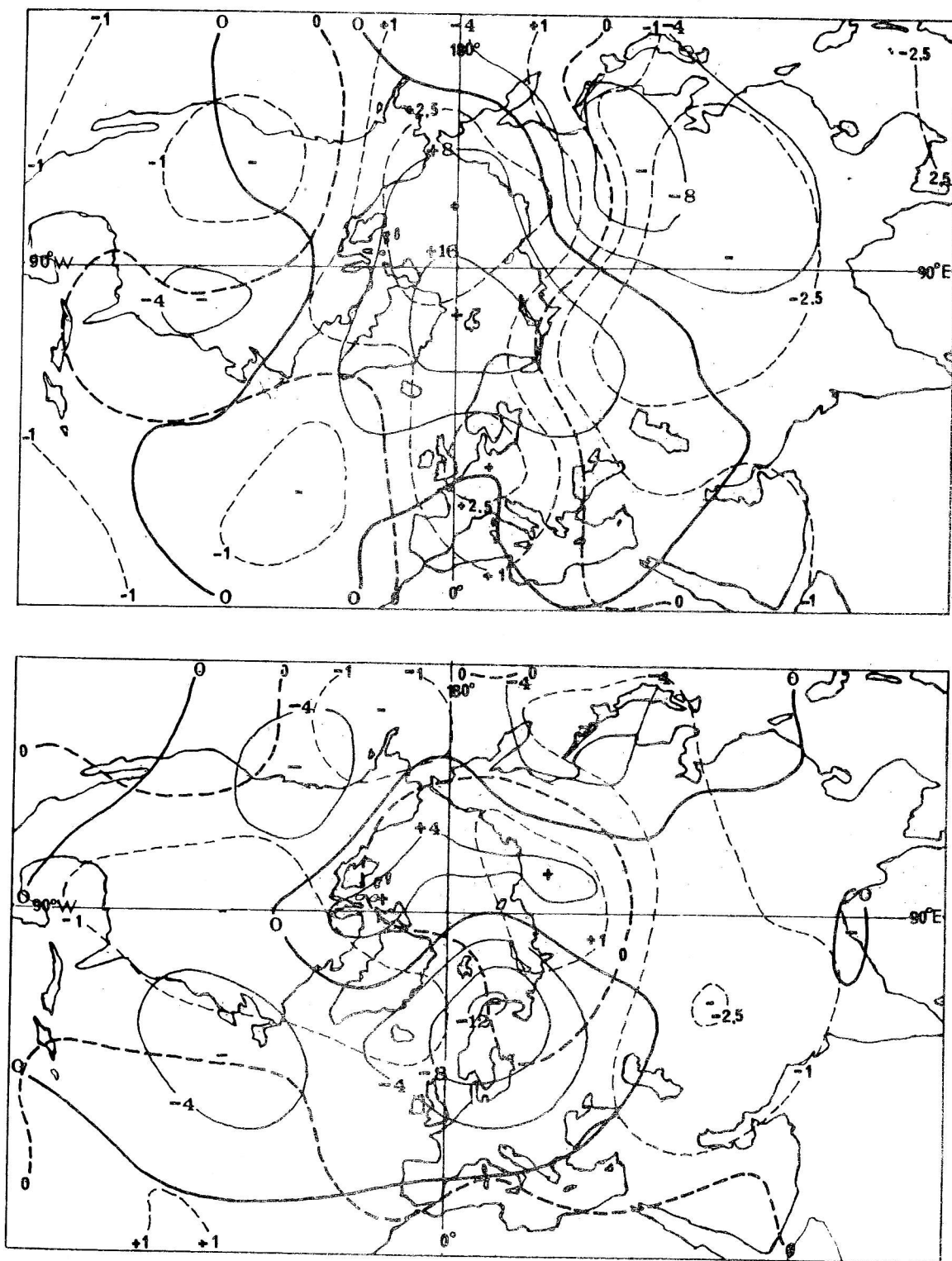
4.5 Karakteristike anomalija stratosferske cirkulacije za vrijeme sušnih perioda u jesen

Poznato je da se kišni listopadi u nas javljaju uz duboku troposfersku dolinu u zapadnoj Evropi, nižu tropopauzu u tom području i povišenu temperaturu u donjoj stratosferi. Na gornjem dijelu sl. 11 prikazane su anomalije temperature i geopotencijala u kišnom listopadu 1974. Ove anomalije su rezultat plićeg i deformiranog cirkumpolarnog vrtloga, s izrazitijim dolinama u srednjim geografskim širinama.

Nasuprot tome, u sušnom listopadu 1973 (sl. 11, dole) opaža se raniji i jači razvoj cirkumpolarnog vrtloga s maksimalnim negativnim anomalijama geopotencijala u području sjeverne Evrope. Isto polje anomalija nad Evropom na toj plohi nalazimo u listopadu 1971, s razlikom da su negativne anomalije zahvatile i cijelo područje pola, ali s manjim odstupanjima nego u sjevernoj Evropi.

Potpuno sušan listopad 1965 ima iste karakteristike kao 1971 i 1973, ali je centar negativnih anomalija na 50 mb (istog intenziteta) na području srednje Evrope. Ovaj mjesec je općenito poznat po ekstremno anomalnoj stratosferskoj cirkulaciji uz vrlo intenzivni razvoj zimskog polarnog vrtloga. Na većim visinama su ove anomalije još više izražene. Na 10 mb centar vrtloga je za 16 dekametara niži nego ranijih godina, a pad geopotencijala je za 50% veći nego na 30 mb. Radijaciono hladjenje unutar područja polarne noći je uzrokovalo pad temperature na 10 mb od 0.5°C na dan, za razliku od kišnog listopada 1964, kada je pad bio 0.3°C na dan.

Daljnja karakteristika listopada 1965 u srednjoj i višoj stratosferi je viši geopotencijal u subtropskom pojasu, uz jake istočne vjetrove na 30 mb, naročito u području zapadnog Pacifika, koji su bili na kraju maksimalnog intenziteta unutar 26-mjesečnog ciklusa. Na 10 mb vjetar je u tom području već pokazivao prijelaz na zapadni smjer, pri kojem se općenito pojavljuju više temperature. Ovakova cirkulacija je omogućila vrlo jako smicanje vjetra i izraziti gradijent potencijalne virtložnosti na području Pacifika, pa nije isključeno da na daljnji razvoj ovako ekstremnih situacija može utjecati i pojava dinamičke nestabilnosti prema



Sl. 11 AT 50 mb. Odstupanje visine u gpDm (pune linije) od srednjaka 1956-1966, i temperature u °C (crtkane linije) od srednjaka 1965-1969, za listopad 1974 (gore) i listopad 1973 (dolje). Iz [19]

poznatom kriteriju Charney-Stern [6]. Razvoj situacije od listopada na studeni ove godine diktiralo je jačanje Aleutske anticiklone u polarnom dijelu Pacifika, a intenzivni ciklonalni vrtlog se pomakao prema Atlantiku i sjevernoj Evropi. Time je dugu sušu u listopadu zamjenio izrazito kišan studeni. Iste karakteristike stratosferske cirkulacije je pokazivao i studeni 1966, također vrlo kišan u našem području i poznat po velikim poplavama u Italiji, kao i kišni listopad 1964.

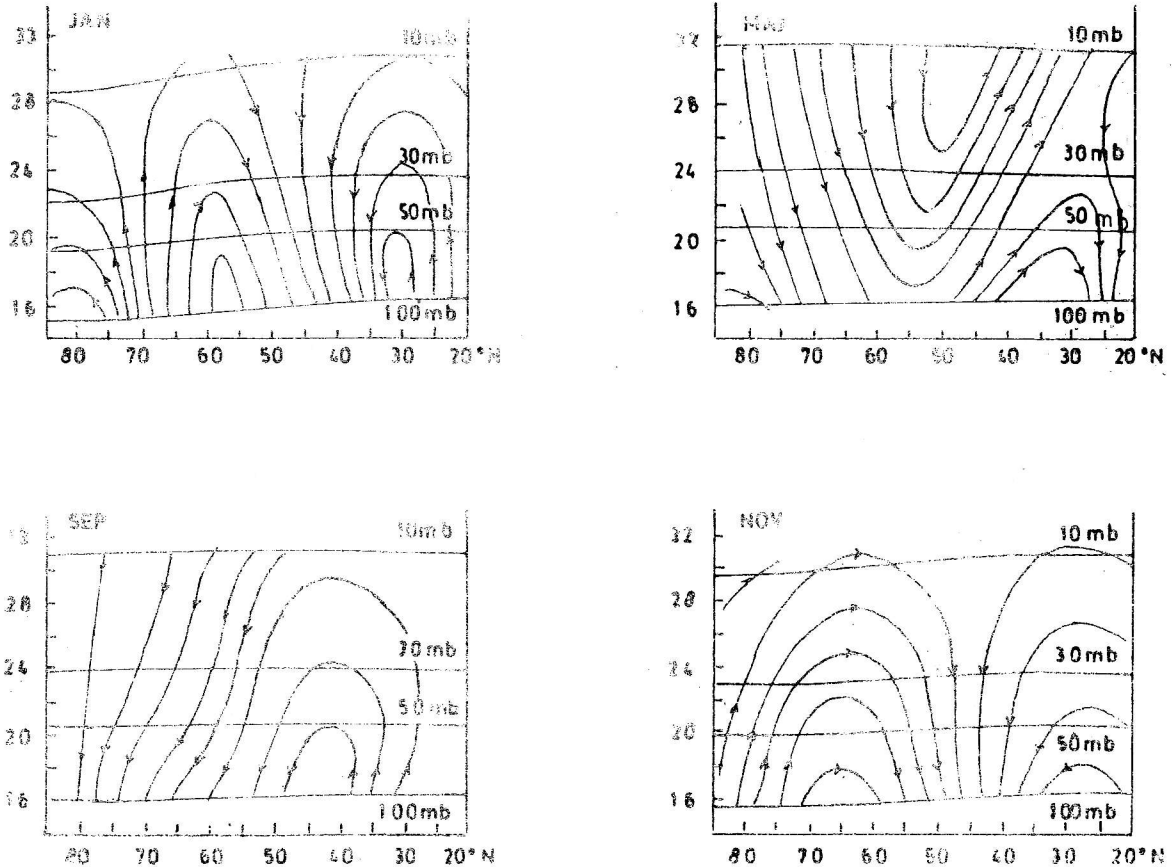
Iz ovoga se može zaključiti da je za kišna razdoblja u listopadu i studenom, karakteristična stratosferska cirkulacija u kojoj dominira postepeni razvoj Aleutske anticiklone u sjevernom dijelu Pacifika. U većini slučajeva razvoj anticiklone nije dovoljno intenzivan da deformira cirkulaciju u gornjoj stratosferi pa je na 10 mb polarni vrtlog neporemećen, što ukazuje, s druge strane, da je zagrijavanje pretežno posljedica razvoja u troposferi i donjoj stratosferi. Kako je jačanje ove anticiklone u stratosferi povezano s jačanjem suprotropske mlazne struje na području Azije, ovim procesom jača i meridionalni, a očito i vertikalni transport topline i momenta na području istočne Evrope i zapadnog dijela Azije, što podržava perzistenciju kišnog perioda u nas.

Gornji proces ujedno ukazuje da perzistentni sušni periodi zahtijevaju deficit tlaka u zapadnom dijelu Azije, tj. slabiji razvoj suprotropske mlazne struje, što umanjuje meridionalni transport topline i momenta u tom dijelu hemisfere.

4.6 Meridionalna cirkulacija u stratosferi

Za razmjenu zonalne kinetičke i potencijalne energije, prijenos energije u meridionalnom i vertikalnom smjeru, kao i za transport topline i momenta, koji bitno utječu na promjene hemisferske cirkulacije, važno je poznavati srednju meridionalnu cirkulaciju, na koju ćemo se sada ukratko osvrnuti.

Od različitih procjena ove cirkulacije za nas su najinteresantniji rezultati Vincenta [31] za sve mjesece u toku 1964-1965 godine. Meridionalna cirkulacija za područje stratosfere od 100-10 mb određena je indirektnom metodom iz zonalnih srednjaka izvora i ponora momenta i izvora topline, uvjetovanog fluksom konvergentnih vrtložnih gibanja. Na sl. 12 prikazani su oblici ove cirkulacije za četiri odabrana mjeseca iz rada Vincenta prema smjeru strujanja, bez uzimanja u obzir razmaka strujnica u odnosu na vektor brzine.

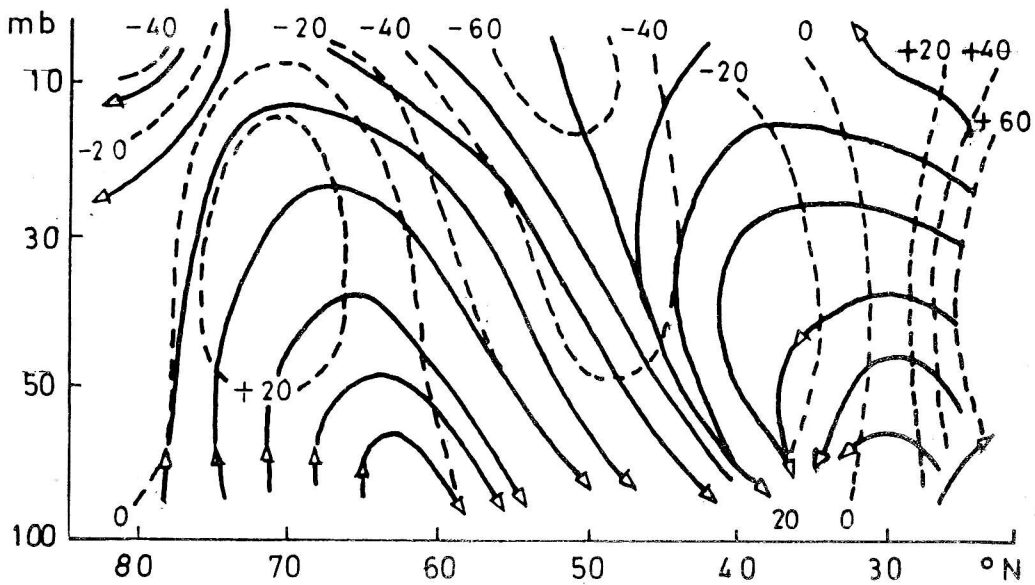


Sl. 12 Srednja meridionalna cirkulacija u stratosferi za siječanj, svibanj, rujan i studeni 1965. prema Vincent-u [31].

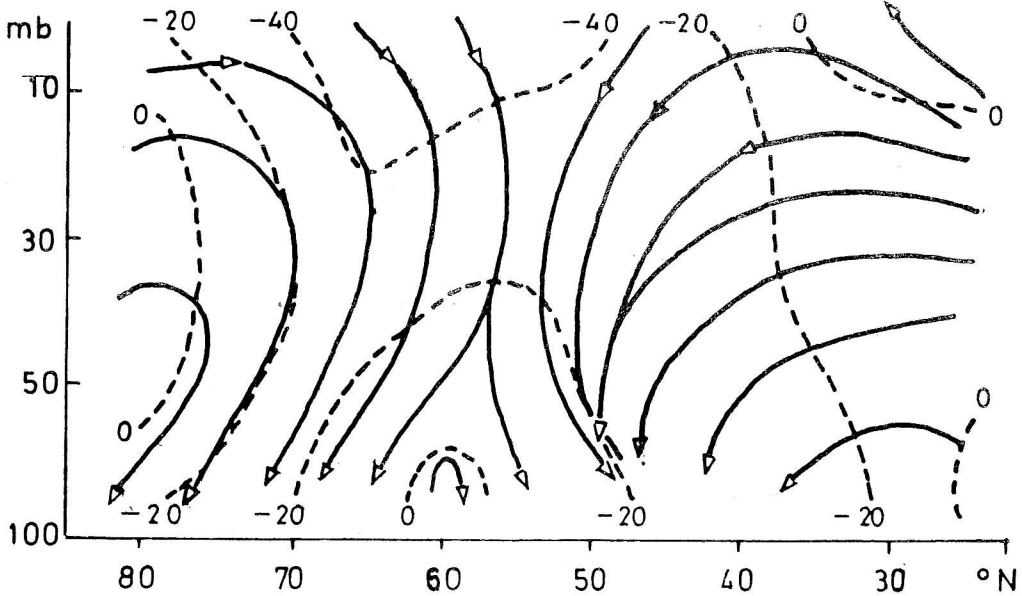
Zimi se cirkulacija vrlo malo mijenja od pokazane u studenom, sa uzlaznim gibanjima u višim širinama, a spuštanjem u srednjim širinama. U proljeće je uočljiv pomak cirkulacione ćelije viših širina prema polu, a u jesen ponovni pomak prema ekvatoru. Prema ovim rezultatima očita je promjena smjera vertikalnih gibanja u višim i srednjim širinama u travnju i listopadu. Komponenta spuštanja sjeverno od 50°N , je u svibnju usmjerena prema ekvatoru, a u rujnu prema polu. U srpnju je cirkulacija nepravilnija, ali se nazire prisutnost direktne ćelije na nižim nivoima u blizini 50°N . Ova ćelija ojača do rujna i proširuje se do većih visina, ali joj je centar pomaknut prema ekvatoru. S obzirom da su oblici strujanja isti u obe promatrane godine, može se zaključiti da su ovo opće karakteristike meridionalne cirkulacije u stratosferi. Ipak, postoje izvjesne razlike u obje komponente gibanja, i one su najveće pri prijelazu iz zimskog u ljetni sistem cirkulacije i obrnuto.

Na sl. 13. je prikazana srednja meridionalna cirkulacija za listopad 1964 i 1965, dobivena iz tabelarnih podataka Vincenta. Razlike su očite. Cirkulacija u 1964 s intenzivnijom vertikalnom komponentom gibanja (crtkane

1964



1965



Sl. 13 Srednja meridionalna cirkulacija u stratosferi za listopad 1964 i 1965 prema podacima Vincent-a [31]. Crtkane linije označuju srednju vertikalnu komponentu gibanja u 10^{-2} mm, a debele linije su strujnice analizirane prema podacima vertikalne i meridionalne komponente gibanja.

linije) već pokazuje prijelaz u zimski režim strujanja, i liči na studeni 1965 na sl. 12, s jače izraženom polarnom ćelijom i prevladavajućom sjevernom komponentom do 40°N u donjoj stratosferi, i 50°N u višoj stratosferi. Na 10 mb u blizini pola je intenzivnija južna komponenta kao rezultat izrazite asimetrije polarnog vrtloga na toj visini. U 1965 na 10 mb prevladava sjeverna komponenta gibanja, u skladu s ranije navedenim intenzivnim polarnim vrtlogom te godine. Cirkulacija u donjoj stratosferi ukazuje na srednju horizontalnu divergenciju vjetra u području od 50°N - 65°N , a slabije izražena pozitivna komponenta unutar toga područja na 100 mb, liči na produženje Ferrellove ćelije unutar troposferske cirkulacije. Međjutim, glavna karakteristika ove cirkulacije su prostrana spuštavanja kroz cijelu stratosferu, osim ekvatorskog područja na najnižem i najvišem nivou. Logično je dakle pretpostaviti da ova stratosferska spuštavanja podržavaju supsidenciju u onim područjima troposfere, koja obuhvaćaju prostrane anticiklone, a u područjima s uzlaznim gibanjima ograničavaju ili prigušuju ovu cirkulaciju samo na troposferske razmjere. Sudeći prema anomalijama troposferske cirkulacije i modelima simulacije za to doba godine, uzlazna gibanja su većinom koncentrirana u višim geografskim širinama između $60-70^{\circ}\text{N}$, što je i teoretski određeno područje između Ferrellove i polarne ćelije. Prema tome ovakove perzistentne situacije omogućuju jačanje meridionalnih gradijenata tlaka, što objašnjava pojačanje cirkumpolarnog zonalnog indeksa u kasnu jesen i u toku zime, ali ujedno jača i baroklinu nestabilnost, uz povremeni intenzivniji razvoj valnog režima troposferske cirkulacije. Dodajmo zato, da, pored srednje meridionalne cirkulacije, treba imati u vidu i zonalnu asimetriju komponenata vjetra i temperatura.

Valni režim s prevladavajućom sjevernom ili južnom komponentom vjetra, preferira pojedina područja hemisfere, koja se ističu na srednjim zonalnim vertikalnim presjecima kroz troposferu i stratosferu. U [18] su prikazani ovakovi presjeci za polje temperature i komponenata geostrofičkog vjetra u pojedinim mjesecima i geografskim širinama. U hladno doba godine naročito se ističe relativno viša temperatura, u odnosu na zonalni srednjak na pojedinim visinama, i jača južna komponenta vjetra nad istočnim dijelom Sibira i nad polarnim područjem Pacifika. Raspodjela ovih polja s visinom, jasno ukazuje na vezu troposferske i stratosferske cirkulacije u to doba godine. To daje još veću težinu pretpostavki da uz pojačanu južnu struju u višoj troposferi na zapadnom Pacifiku transport topline u polarno područje može biti suviše jak da bi se održala ravnoteža s adijabatskim i radijacionim hladjenjem, pa se polarna stratosfera povremeno naglo zagrijava, uz istovremeno jačanje Aleutske anticiklone.

Spomenimo još na kraju da je većinu procesa interakcija u sistemu troposfera - stratosfera moguće simulirati već sa kvazi-geostrofičkim globalnim modelima, od kojih je vjerojatno najbolji model Cunnolda i dr. [8], sa 25 nivoa, do visine od 71,6 km. Međutim, svi ovi modeli nisu stvarni prognostički, jer je raspodjela temperature na granicama zadana, a nije određena internim fizikalnim procesima. Na taj način je radijaciona ravnoteža tako odabrana da prisiljava polje srednjeg vjetera i temperature da liče na opaženu razdiobu. Ipak već ovi modeli, kao i eksperimenti pojedinih procesa sa modelima s primitivnim jednadžbama, već u ranom stadiju pokazuju da će, uz bolju vertikalnu strukturu modela i fizikalnu parameterizaciju, moći dati odgovore na mnogo značajnih pitanja u vezi sa dinamikom stratosfere i procesima interakcije s troposferom, kojima se pridaje sve više važnosti u problemu dugoročne prognoze vremena.

5. KRAĆE PERIODIČNE OSCILACIJE TROPOSFERSKE CIRKULACIJE

5.1 Rezultati ranijih istraživanja

Namias je [u 34] ukazao na vezu anomalija hemisferske cirkulacije na 700 mb u zimskom razdoblju (1947-72) - (1972-75) s anomalijama temperature mora na području Pacifičkog oceana. Ova analiza pokazuje da su najveće anomalije u periodu 1972-75 obuhvatile područje sjevernog Atlantika i Evrope.

Za ranije razdoblje (1880-1960) je Bjerknes [2] još zornije pokazao korelacionu vezu između temperature mora u Atlantiku, i anomalija prizemnog tlaka, i naročito istakao visoku pozitivnu korelaciju od 0.80 između temperature mora u pojasu 50° - 60° N i prizemnog tlaka na području Islanda. Time je pokazao da nižoj temperaturi mora odgovara dublja Islandska ciklona, odnosno veći gradijent tlaka u pojasu 50° - 60° N. Dugi trend hlađenja mora u tom pojasu u razdoblju od 1890-tih do 1930-tih godina bio je praćen sa zatopljenjem mora južno od 50° N u području Golske struje. Time se smatra da je porast baroklinosti u oceanu uzrokovao postupni porast atmosferske baroklinosti u tom razdoblju, i opskrbio potrebnu energiju za procese ciklogeneze u sjevernom Atlantiku za vrijeme visokog zonalnog indeksa 1920-tih godina (vidi sl.1). Bitno je međutim za našu daljnju diskusiju da su na taj dugogodišnji trend bile superponirane kraće-periodične oscilacije od 2 do 5 godina. Pokazano je

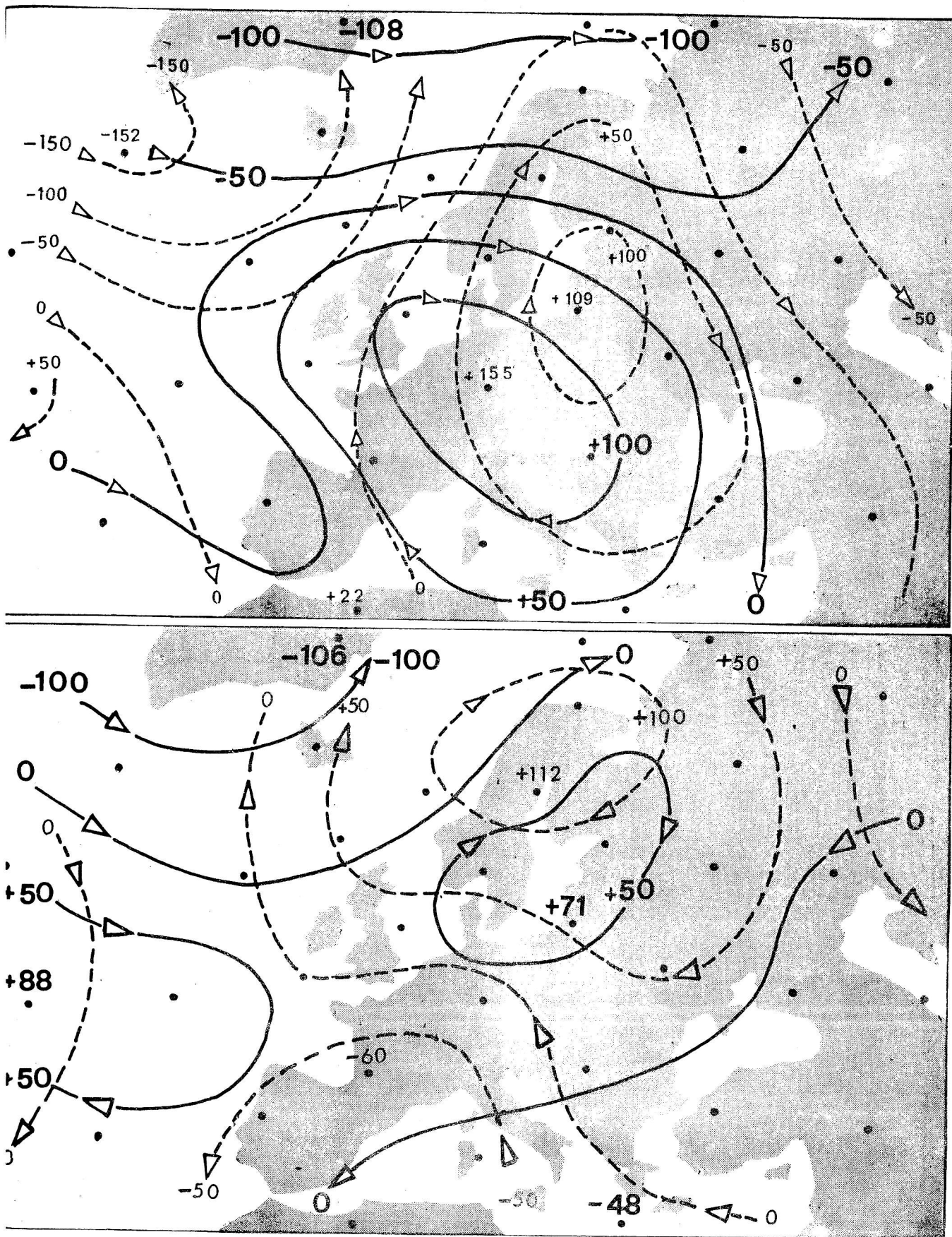
da polje promjena srednjeg prizemnog tlaka između godina s visokim indeksom (1904, 1913, 1920) i godina s niskim indeksom (1902, 1909, 1915) ima karakteristični oblik strujnica izalobaričkog vjetra, s pojačanim gradijentom izalobara u pojasu 50° - 60° N, dakle u istom području koje je bilo značajno za dugogodišnji trend temperature i gradijenta tlaka. Izrazita južna komponenta izalobaričkog vjetra se pojavljuje uz sjeverozapadnu obalu Evrope, uz porast temperature mora u istom obalnom području.

Od 1920-tih do 1940-tih godina zatopljenje mora u pojasu 50° - 60° N je išlo paralelno s progresivnim slabljenjem Islandске ciklone i smanjenjem zonalnog indeksa. Prateći kolebanja godišnjih količina oborine na sl.1 vidimo da je u tom razdoblju općem trendu pada indeksa cirkulacije odgovaralo smanjenje dugogodišnjeg srednjaka oborine, izraženo na pr. 30-godišnjim normalama. Očito je međjutim da su i na ovaj trend bile superponirane kraće-periodične oscilacije, koje su uvjetovale nagli porast oborine krajem 1930-tih godina, a zatim izraziti pad u slijedećoj dekadi.

Svrha je gornjeg prikaza, kao i diskusije koja slijedi, da iz razmatranja tipova cirkulacije i njihovih promjena, nadjemo neka ključna područja koja pokazuju najviše korelacije s anomalijama oborine u našem području, a specijalno područja najvećih promjena cirkulacije povezanih s prijelazom iz kišnog u sušno razdoblje u nas.

5.2 Oscilacije cirkulacije na 500 mb u razdoblju 1957-75

Iz ranijih razmatranja stratosferskih anomalija, i kolebanja zonalnog indeksa prizemnog tlaka, očito je da postoje kratko-periodične oscilacije i u cirkulaciji srednje troposfere. Jurčec i Papišta [17] su pokazali da su promjene troposferske cirkulacije u razdoblju 1957-75 bile vrlo izrazite u pojedinim 5-godišnjim periodima. Promatranja su tri takova perioda 1957-61, 1965-69 i 1971-75, a njihov izbor je diktiran ranije ukazanim promjenama temperature i geopotencijala na 50 mb u ožujku (Tabela 3 i str. 170). U tom radu su prikazane promjene srednjeg polja geopotencijala na 500 mb od prvog do drugog navedenog perioda od studenog do ožujka. Istaknuto je da je u studenom bio karakterističan pad geopotencijala nad Skandinavijom i porast u sjeverno-Atlantskom sektoru. U istom razdoblju geopotencijal je pao u zimskom razdoblju na području srednjeg Atlantika i u većem dijelu Evrope, a naročito je značajan pad (s maksimumom od 117 gpm) nad Skandinavijom u ožujku. Analiza izalobaričkih polja ostalih mjeseci toga razdoblja pokazuje karakterističan porast geopotencijala na području Atlantika južno od Grenlanda, u svim mjesecima osim rane jeseni kada je porast primjeđen u području južne i istočne Evrope. Pad visina je u polarnom području ljeti, i u sjeverozapadnoj Evropi u jesen, izražen porastom zonalne



Sl. 14 Promjene srednjeg mjesečnog polja geopotencijala na 500 mb u gpm od perioda 1965-69 do 1971-75.
 Gore: prosinac (pune linije), siječanj (crtkane linije)
 Dolje: veljača (pune linije), ožujak (crtkane linije)

struje viših širina, dok je za zimsko razdoblje karakteristično smanjenje meridionalnog gradijenta geopotencijala srednjih geografskih širina.

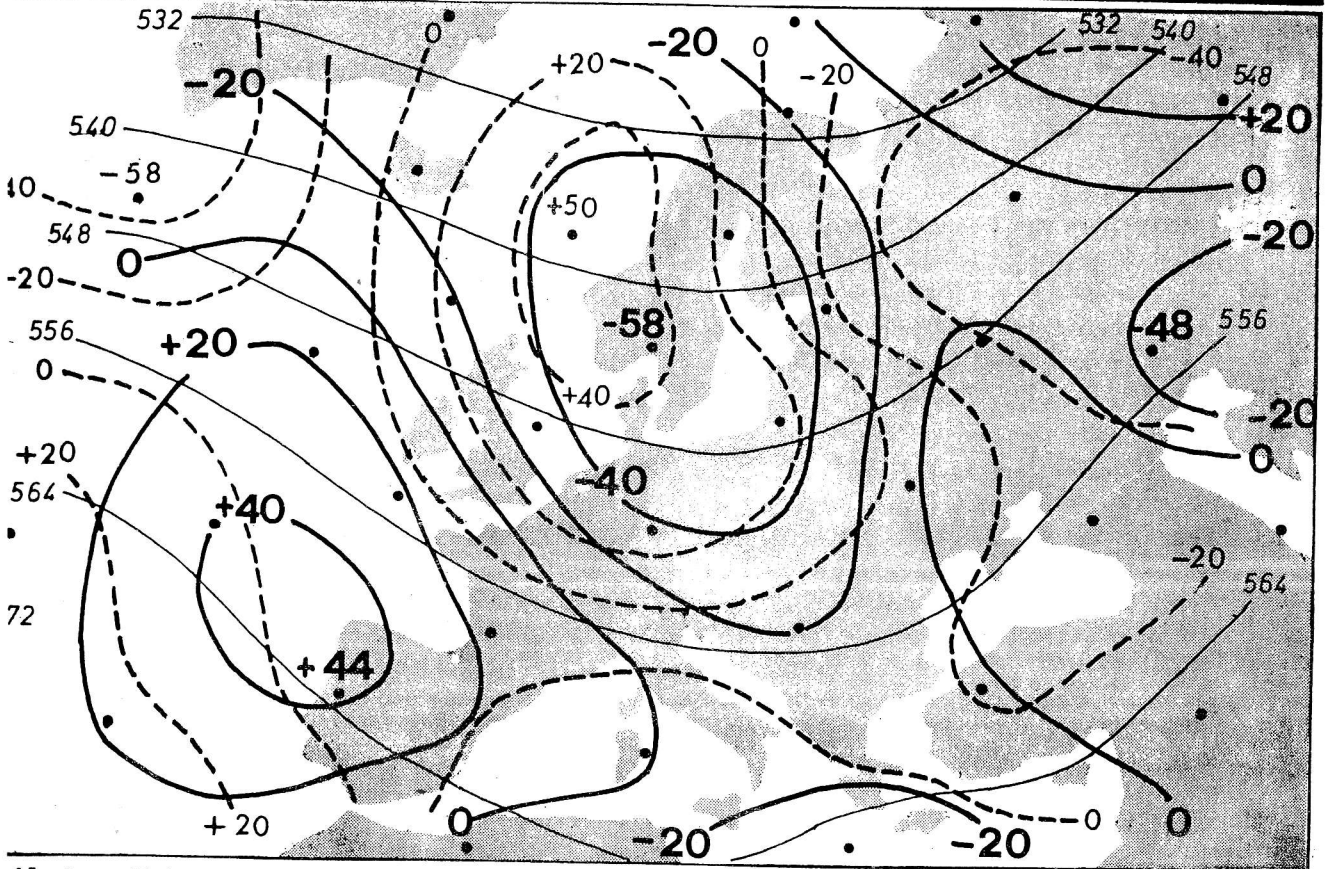
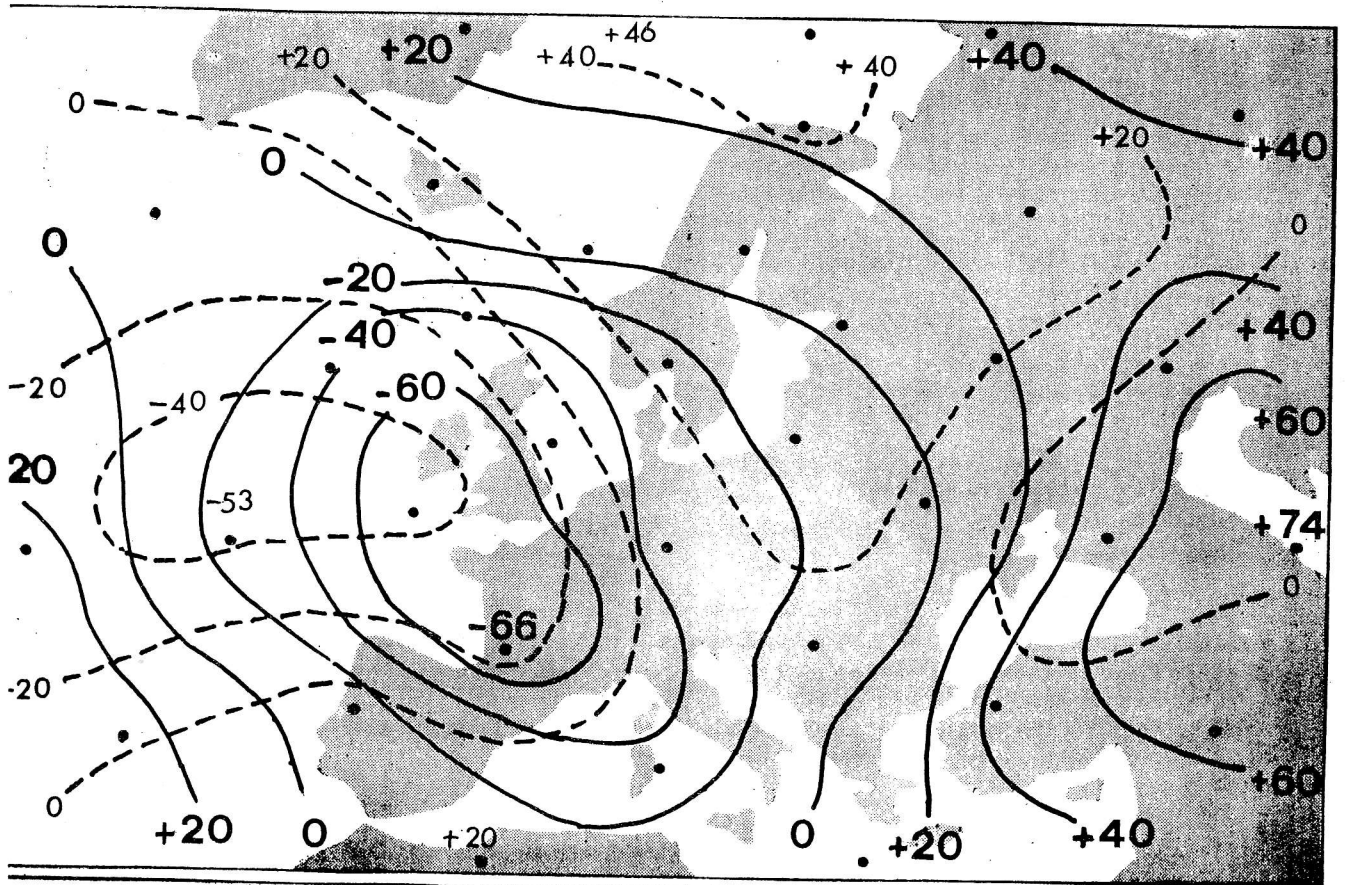
U razdoblju 1965-69 do 1971-75 karakterističan je slijed pomaka izalobaričkih polja u zimskom razdoblju prikazanom na sl.14. U pozadini izalobaričke doline u istočnoj Evropi u studenom, koji ovdje nije prikazan, raste geopotencijal na području jugozapadne Evrope i srednjeg Atlantika. U prosincu nalazimo izraziti porast u centralnom dijelu Evrope (pune linije na gornjem dijelu sl.14), uz istovremeni pad geopotencijala u polarnom području, što očito jača zonalnu struju viših širina. U siječnju (crtkane linije na istoj slici) izalobaričko polje pokazuje izrazitu amplifikaciju vala u smjeru sjeverozapadne Evrope, dok u sjeverno-Atlantskom sektoru tlak drastično pada. Time jača južna komponenta izalobaričkog vjetra uz sjeverozapadnu obalu Evrope, i zapadna komponenta na Atlantiku. Na donjem dijelu sl.14 vidimo daljnje jačanje zonalne struje nad Atlantikom u veljači (pune linije), razdvajanje anticiklonalnih vrtloga nad Atlantikom i Evropom, do konačnog fenomena anticiklonalnog vrtloga nad Skandinavijom i pojavu ciklonalnog vrtloga u jugozapadnoj Evropi. Ovaj proces je izražen i na prizemnim kartama porastom tlaka nad Skandinavijom za 10 mb između dva promatrana perioda.

Prema tome u gornjem slijedu procesa prepoznavamo poznati razvoj grebena nad Evropom, sve do odcjepljenja (cut-off) anticiklone nad Skandinavijom ili formiranja tipičnog blokinga u zapadnoj Evropi. Razvoj se nastavlja i dalje u travnju u smislu retrogradnog gibanja izalobaričkih centara, i njihovog slabljenja, ali istovremeno i slabljenja zonalne struje na Atlantiku.

To ukazuje da su se oscilacije srednjeg stanja atmosfere odvijale po fizikalnim zakonima i aproksimacijama atmosferskih gibanja, analogno onima kojima podliježu i kratko-periodični procesi u vremenskim razmjerima od nekoliko dana ili tjedana. Prema tome je logično pretpostaviti da bi se ovakove promjene mogle i prognozirati uz isti rizik kojemu podliježe današnja srednjoročna prognoza razvoja sinoptičkih situacija. Jedan način verifikacije ovih pretpostavki bio bi na pr. ponovo slabljenje bloking-procesa nad Skandinavijom u ožujku narednih godina, uz sve posljedice koje su ovom procesu pripisane.

5.3 Korelacije anomalija cirkulacije na 500 mb i oborine u Zagrebu

Osvrnimo se sada na raspodjelu koeficijenta korelacije između anomalija geopotencijala na 500 mb i anomalija količine oborine u Zagrebu, koji su detaljnije opisani u [17]. Na sl.15 (gore) prikazana je raspodjela koeficijenta



15 Raspodjela koeficijenta korelacije ($k \cdot 10^{-2}$) između mjesečnih anomalija geopotencijala na 500 mb i mjesečne količine oborine za Zagreb-Grič, 1956-1975.
 Gore: korelacije za prosinac (pune linije) i fazne korelacije ("prognoza") anomalija za studeni i oborine za prosinac.
 Dolje: korelacije za travanj (pune linije), i fazne korelacije anomalija za svibanj. Tanke linije označuju srednje polje geopotencijala na 500 mb, 1956-1975, za travanj.

korelacije za prosinac u razdoblju 1956-75 (pune linije). Negativne korelacije na području zapadne Evrope pokazuju da su sušni mjeseci prosinca vezani uz pozitivne anomalije, odnosno pojačani greben u jugozapadnoj Evropi. Najviše pozitivne korelacije u tom mjesecu su na području Kaspijskog mora. Crtkanim linijama je prikazana razdioba faznih korelacija, tj. korelacija oborine i anomalija prethodnog mjeseca. Sličnost ovih polja ukazuje na veću perzistenciju zimskih situacija, i karakterizira vezu sušnih razdoblja u to doba godine s pojačanim zonalnim strujanjem viših geografskih širina. Važno je primjetiti da su u ovom razdoblju, koje označava prijelaz u zimski sistem strujanja, najviše korelacije u području Atlantika 50° - 60° N, koje je istaknuto kao ključno područje u ranije prikazanim analizama Bjerknesa.

Nasuprot tome, na donjoj slici je prikazano polje korelacija za travanj, s faznim korelacijama za svibanj, za koje je karakteristična mala perzistencija proljetnog razdoblja. Ova razdioba pokazuje da jače izražena dolina na području Skandinavije u travnju, ima za posljedicu veće količine oborine u nas, dok pozitivne anomalije na tom području, i negativne na srednjem Atlantiku karakteriziraju sušni travanj s oborinom ispod normale. Međutim, fazne korelacije za prognozu oborine u svibnju, na temelju srednjeg polja geopotencijala u travnju, pokazuju da je predznak korelacija u području sjeverozapadne Evrope obrnut, odnosno da bi u slučaju pozitivnih anomalija na području Skandinavije tijekom travnja naše područje imalo veće količine oborine u svibnju, što je u skladu s ranije diskutiranim promjenama cirkulacije i manjom perzistencijom pojedinih tipova strujanja u proljeće i ljeto. Iako su upravo zbog ovih činjenica iznosi korelacije relativno mali, bitna je njihova fizikalna interpretacija, dok se za kvantitativnu analizu mjesečne količine oborine planira kombinacija ovih korelacija s korelacijama oborine i anomalija RT 500/1000 mb i/ili anomalija prizemnog polja tlaka pomoću jednadžbe regresije.

Napomenimo, međutim, da se gornja analiza odnosi samo na mjesečne količine oborina, dok ekstremno sušna i kišna razdoblja nisu vezana uz kalendarski mjese, što je također jedan od razloga manjih iznosa korelacije za relativno kratki niz godina. Analiza sezonskih i godišnjih količina oborina nije za sada učinjena, ali kvantitativna usporedba ovih anomalija ukazuje na neke interesantne činjenice, kao i na probleme u takovoj analizi. Na primjer, obje sušne godine 1971 i 1973 pokazuju pozitivne anomalije u ranije ukazanom sektoru 50° - 60° N na Atlantiku. Treća po redu sušna godina u promatranom razdoblju, 1968, ima pozitivne anomalije u sjevernijim širinama Atlantika, ali je sušnost ove godine karakterizirana niskim količinama oborine samo u prvoj polovini godine. Time i anomalije nose obilježja cirkulacije toga razdoblja. Nadalje, slabljenje zonalne cirkulacije 1940-tih godina i odgovarajući pad *godišnjih* oborina,

istovremeno pokazuje da je za to razdoblje značajan trend porasta zimskih oborina (vidi sl.6.1 u [16]), i smanjenje količina oborina u ostalim godišnjim dobima. Posljednje 5-godišnje razdoblje pokazuje obrnuti trend zimskih i ljetnih oborina.

Studije klimatskih fluktuacija na području zapadne Amerike [3] ukazuju također na kraće-periodične oscilacije, s češćim meridionalnim tipovima cirkulacije, sušnijim zimama i kišnijim ljetima nakon 1960, ali ovakove oscilacije uvjetuju da je normala 1941-70 u tom području vrlo "anomalna" u odnosu na dugogodišnje nizove. To je u skladu s našim zaključcima u odnosu na normalu oborine 1931-60 prema podacima za Zagreb-Grič [16].

Prema tome je značajno, kako je naglasio Lamb [22], "da se *trend* oborina mijenja gotovo uniformno na prostoranom području zemlje, i da su ove promjene vezane uz atmosfersku cirkulaciju velikih razmjera". Međutim, istovremeno postoje kraće-periodične oscilacije, koje se ne mijenjaju ravnomjerno na svim područjima zemlje, jer karakteristični valni režim gibanja uvjetuje da se suše kraćeg trajanja na jednom području kompenziraju kišnim razdobljima u drugom. Isto vrijedi i za oscilacije unutar hidrološkog ciklusa na jednom odredjenom području.

6. OPĆE PRIMJEDBE I ZAKLJUČCI

Proučavanja mehanizma opće cirkulacije atmosfere i njezinih anomalija za vrijeme sušnih perioda u području gornjeg sliva rijeke Save ukazali su na nekoliko faktora i fizikalnih procesa karakterističnih za sušne periode u pojedino doba godine, kao i na utjecaj atmosferske cirkulacije na dugotrajnije suše većih razmjera.

Ovdje su promatrani sušni periodi kao deficiti oborina u odnosu na dugogodišnje srednje vrijednosti u razdobljima od mjesec dana ili duljim vremenskim razdobljima. Prema tome, ovako dugi sušni periodi povezani su s anomalijama cirkulacije hemisferskih razmjera, što je u ovom radu i naglašeno. Promatrano područje Evrope i Atlantika, nije svakako dovoljno za ovakovu analizu, iako ukazuje na neke karakteristične anomalije cirkulacije koje su nedvojbeno posljedica hemisferske, ili čak globalne, cirkulacije i različitih procesa povratne sprege i interakcija s graničnim područjima. Na takove procese i njihove posljedice smo ukazali uglavnom na temelju ranijih radova i raspoloživih materijala drugih autora. Srećom, ove analize ukazuju da je ključno područje

kratko-periodičnih oscilacija opće cirkulacije, kao i klimatskih fluktuacija, sektor sjevernog Atlantika, a time procesi disipacije energije uvjetuju i izrazite promjene na području Evrope.

Za dugo-periodične oscilacije cirkulacije važno je istaći procese povratne sprege, od kojih vjerojatno najveću ulogu igraju dugi trendovi hladjenja i zagrijavanja oceana, a time i promjene površine leda u arktičkom području. Za kraće-periodične oscilacije cirkulacije se smatra da su uvjetovani uglavnom procesima interakcija u sistemu atmosfera-ocean, kao i interakcionim procesima između tropske i vantropske cirkulacije, iako su svi ovi procesi usko povezani. Definitivne uzroke i posljedice ovih procesa, a time i vezu promjena cirkulacije s izmjenama kišnih i sušnih razdoblja u nas, današnja meteorologija ne može riješiti sve dok se bolje ne upozna udio koji u ovim procesima ima cirkulacija u oceanu.

Najveću težinu u našem istraživanju dato je rezultatima interakcija u sistemu troposfera-stratosfera. Iako je nepobitna veza između promjena troposferske i stratosferske zimske cirkulacije u promatranom 20-godišnjem periodu, rezultati ove analize u svrhu prognoze sušnih perioda ne mogu imati konkluzivni karakter bez daljnjih numeričkih eksperimenata s globalnim modelima atmosfere ili daljnjim istraživanjima budućih pojava suše. Srećom (za naša istraživanja), sušnu godinu 1971, koja je bila povod ovome radu, slijedila je ubrzo isto tako sušna 1973. Obe godine su pokazivale iste karakteristike, tj. naglo zimsko zagrijavanje donje stratosfere i slabljenje cirkumpolarnog vrtloga u odnosu na ostale godine raspoloživog materijala. Pitanje, koje ovdje ostaje otvoreno, je da li je gubitak troposferske kinetičke energije za održavanje zimske stratosferske cirkulacije i naglog stratosferskog zagrijavanja, direktno vezan s daljnjim slabijim razvojem valnog režima i baroklinih procesa u troposferi, ili su ovi posljednji jedino odraz procesa povratne sprege nakon zimske anomalne situacije u troposferi. Slično se pitanje odnosi na suprotni fenomen kišnih proljeća i ljeta u ostalim godinama 1971-75, jer se i tih godina troposferska energija trošila na održavanje zimske stratosferske cirkulacije. Međutim, bitna je razlika u ovom slučaju da se stratosferski vrtlog mogao maksimalno razviti do kraja zimskog perioda, pa se može pretpostaviti da je dio energije vraćen u troposferu prilikom razaranja ovog vrtloga u rano proljeće. U svakom slučaju je već značajna sama činjenica da su karakteristike stratosferske cirkulacije zimi različite u sušnim i kišnim godinama, pa se s jedne strane ovi fenomeni mogu upotrebiti kao *indikator* mnogo kompleksnijih hemisferskih ili globalnih procesa u troposferi, dok s druge strane mogu predstavljati podlogu za definiciju početnih uslova u modelima dugoročne prognoze, kao i daljnjem istraživanju u prognozi suše u našem području.

Od zaključaka koji se odnose na problem prognoze sušnih perioda u pojedinim mjesecima ili sezoni, izdvojimo uočenu činjenicu da srednje 5-godišnje promjene troposferske cirkulacije pokazuju vrlo karakterističan slijed procesa u samoj troposferi, pa se smatra da ovakav razvoj ima bitan značaj za prognozu sušnih perioda u pojedinim mjesecima zbog pojave kraće-periodičnih oscilacija troposferske cirkulacije. Ova analiza, zajedno s analizom korelacija je pokazala da su ključna područja za praćenje promjena cirkulacije, a time i za prognozu sušnih perioda, 1) u zimskom razdoblju i u godišnjim fluktuacijama, pojas između 50° - 60° N na Atlantiku, 2) u proljetnom i ljetnom razdoblju područje Skandinavije, i 3) u jesenskom razdoblju, a djelomično i zimi, istočna i jugoistočna Evropa. Dakako, ova analiza ne isključuje mogućnosti još veće važnosti drugih sektora sjeverne hemisfere. Naročito u jesenskom periodu analiza ukazuje na važnost intenziteta suprotropske mlazne struje od područja Afrike, preko Azije do Pacifika, kao i na potrebu detaljnijeg upoznavanja procesa u višoj stratosferi u to doba godine, koji bi mogli imati utjecaja na razvoj Aleutske anticiklone u stratosferi.

Analiza korelacije između mjesečnih anomalija cirkulacije i oborine u Zagrebu, koja je u ovom radu samo dotaknuta, ukazuje na mogućnost boljeg upoznavanja onih područja i indeksa cirkulacije, koji prethode sušnim mjesecima. Međutim ova analiza je ograničena samo na oborine Zagreba i anomalije cirkulacije u području Evrope i Atlantika, pa bi bilo poželjno njezino proširenje na hemisferske razmjere i srednjak oborina s većeg područja Hrvatske.

Konačno, veliki nedostatak i zapreka u dobivanju konkluzivnijih rezultata ove problematike je suviše kratki niz aeroloških podataka, i još kraći niz numeričkih podataka iz stratosfere. No, iako je s raspoloživim materijalom teško dokazati, ili opovrći, pretpostavke o efektima izrazitih anomalija opće cirkulacije atmosfere na hidrološki ciklus u našem području, posebno na duge i katastrofalne suše, smatramo da je već ova analiza dovoljna da ukaže na važnost studija sinoptičke klimatologije troposfere i stratosfere i na mogućnost ovakvih metoda da prognoziraju dulja sušna razdoblja s većom vjerojatnošću od onih koje nam pružaju čiste statističke metode.

Literatura:

- [1] Barry, R.G., R.S. Bradley and J.D. Jacobs, 1975: Synoptic climatological studies of the Baffin area. In *Climate of the Arctic*. Univ. of Alaska Press, Fairbanks, 82-90.
- [2] Bjerknes, J., 1962: Synoptic survey of the interaction of sea and atmosphere in the north Atlantic. *Geof. Publikasjoner*, Vol. 24, 115-145.
- [3] Bradley, R.S. and R.G. Barry, 1975: Secular fluctuations of precipitation in the Rocky Mountain region. In [34], 215-222.
- [4] Charney, J., 1975: Dynamics of deserts and drought in the Sahel. In [12], 171-176.
- [5] —————, and P.G. Drazin, 1961: Propagation of planetary scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 66, 83-109.
- [6] —————, and M.E. Stern, 1962: On the stability of internal baroclinic jets in a rotating atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 19, 159-172.
- [7] —————, and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 21, 68-75.
- [8] Cunnold, D., F. Aleyea, N. Phillips and R. Prinn, 1975: A Three-dimensional dynamical-chemical model of atmospheric ozone. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 32, 170-194.
- [9] Defant, F., 1959: On the hydrodynamic instability caused by an approach of subtropical and polar jet stream in northern latitudes before the onset of strong cyclogenesis. In *The atmosphere and the sea in motion*, (Rossby Memorial Volume) 305-325.

- [10] *Dickinson, R.E., 1969: Vertical propagation of planetary Rossby waves through an atmosphere with Newtonian cooling. J. Geophys. Res., Vol. 74, 929-938.*
- [11] *Deutscher Wetterdienst, Offenbach: Die Grosswetterlagen Europas. Jahr 1956-1975.*
- [12] *GARP publication series, No. 16, 1975: The physical basis of climate and climate modelling, WMO-ICSU, Geneva.*
- [13] *Holton, J.R., 1975: The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere. Met. Monographs, Vol. 15, No. 37, 216 pp.*
- [14] *Juras, J. i V. Jurčec, 1976: Statistička analiza sušnih i kišnih razdoblja primjenom modela Markovljevih lanaca. Rasprave i prikazi RHMZ SRH br. 13, 59-98.*
- [15] *Jurčec, V., 1970: On the problem of forecasting in subtropical Africa and the Middle East. U.A.R. Met. Bull., Vol. 2, Cairo, 63-96.*
- [16] ————, *1976: Statistička analiza ekstremnih količina oborina u gornjem slivu rijeke Save. Rasprave i prikazi RHMZ SRH br. 13, 99-141.*
- [17] ————, *and D. Papišta, 1976: On the relation between the precipitation amount in the northwestern Yugoslavia and the anomalies of the general circulation of the atmosphere. 14th International Meeting on Alpine Meteorology. Rauris, Sept. 14-19. 1976 (in press).*
- [18] *Labitzke, K. and coll., 1972: Climatology of the stratosphere in the northern hemisphere, 1. Meteor. Abhandl. 100.*
- [19] ————, *Meteor. Abhandl., Band 123, 131, 137, 143, and Serie B, Band 3. Berlin.*
- [20] *Labović, N., 1965: Pojava dinamičke nestabilnosti u atmosferskim makro-procesima. Zbornik met. i hidr. radova br. 2, Beograd, 8-17.*

- [21] *Lamb, H.H., 1965: Britain changing climate. In The biological significance of climatic changes in Britain, C.G. Johnson and L.P. Smith, Eds. Academic Press, 3-31.*
- [22] ———, *1966: Changes in the world's wind circulation reflected in prevailing temperature, rainfall patterns and the levels of African Lakes. Geogr. J., Vol. 13, part 2, 183-212.*
- [23] *Lorenz, E.N., 1960: Maximum simplification of the dynamic equations. Tellus, Vol. 12, 243-254.*
- [24] *Namias, J., 1972: Experiments in objectively predicting some atmospheric and oceanic variables for the winter of 1971-1972. J. Appl. Meteor., Vol. 11, 1164-1174.*
- [25] *Oort, A.H., 1964: On the energetics of the mean and eddy circulations in the lower stratosphere. Tellus, Vol. 16, 309-327.*
- [26] *Penzar, B., 1976: Indeksi suhoće za Zagreb i njihova statistička prognoza. Rasprave i prikazi RHMZ SRH br. 13, 1-58.*
- [27] *Resio, D.T. and B.P. Hayden, 1975: Recent secular variations in Mid-Atlantic extratropical storm climate. J. Appl. Meteor., Vol. 14, 1223-1234.*
- [28] *Reed, R.J., J. Wolfe and H. Bishimoto, 1963: A special analysis of the energetics of the stratospheric sudden warming of early 1957. J. Atmos. Sci., Vol. 20, 256-275.*
- [29] *Rupnik, I. 1964: Izvorna područja i trajektorije zračnih masa u unutrašnjosti Hrvatske. Stručni rad, SHMZ, 30 str. (nepublicirano).*
- [30] *Šinik, N. i N. Pleško, 1976: Ravnoteža energija u prizemnom sloju u SR Hrvatskoj, Rasprave i prikazi RHMZ SRH br. 12, 88 str.*
- [31] *Vincent, D.G., 1968: Mean meridional circulation in the Northern Hemisphere lower stratosphere during 1964 and 1965. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 94, 333-349.*

- [32] *Wahl, E.W. and T.L. Lawson, 1970: The climate of the mid-nineteenth century United States compared to current normals. Mon. Wea. Rev., Vol. 98, 259-265.*
- [33] *Wetherland, R.T. and S. Manabe, 1975: The effects of changing the solar constant on the climate of a general circulation model. J.Atmos. Sci., Vol. 32, 2044-2059.*
- [34] *WMO - No.421, 1975: WMO/IAMAP Symposium on long term climatic fluctuation. Norwich, 18-23 Aug. 1975, Geneva, 503 pp.*

LIST OF TABLES

1. Mean wind direction (d) and speed (f) in m/sec at 850 and 500 mb level at Zagreb-Maksimir for the period 1956-75 at 00 GMT (a). The mean monthly values for the driest (b) and the wettest (c) month in this period. σ is the standard deviation.
2. Mean monthly values for the radiation balance R , the heat of evaporation LE , heat turbulent exchange TR , and the heat flux in the soil TL (units kcal cm⁻² month⁻¹) for the northwestern Croatia, for the period 1949-73, from [30], and the monthly mean values of the same components for the year at Zagreb-Maksimir. B_o is the Bowen ratio TR/LE .
3. 50 mb level mean monthly geopotential heights (Z_p in gpm) for the period 1956-71, and the mean temperature (T_p in °C) for the period 1965-69. Z'_p and T'_p are the anomalies for the period 1971-75. ΔZ and ΔT are the heights- (in gpm) and temperature- (in °C) differences 30 - 70 °N at 40°W.
4. Circumpolar zonal index ZI_e (mean pressure difference in mb 35 - 55 °N), zonal index ZI_e (for the same latitudes and area 20°W - 40°E) for the indicated months and periods.
5. Mean monthly precipitation amount (mm) at Zagreb-Grič for the indicated periods, and the precipitations in each year of 1971-75.

LIST OF FIGURES

1. Comparison of the annual mean zonal circulation index, and annual frequency with the westerly weather types. AZI is the zonal circulation index, as the mean annual pressure difference Azori-Island, in % of the 1894-1952 mean. ČDZ are daily frequencies with westerlies in the British Isles. After Lamb [21, 27].
Below: Departure of the 5-yearly mean precipitation amount from the normal 1881-1970 at Zagreb-Grič.
- 2.1 Mean monthly geopotential field at 500 mb for January (above) and May (below), 1949-1973. From [11].
- 2.2 The same as Fig. 2.1, for October.
3. Anomalies of the 500 mb geopotential field for January 1964. Arrows indicate displacements of positive anomaly-centers in February and March. Dashed lines around the centers are isolines of anomalies in these months for the same year.
4. Mean geopotential field at 500 mb for the period 17-20 April, 1973 (above), and 22-24 April, 1973 (below), indicating the development of blockingtype circulation. From [11].
6. Mean monthly anomalies of 500 mb heights for September 1961. Arrows indicate the displacements of the centers from September to October.
7. The same as Fig.6, but for October 1965, and the displacement of the center to November.
8. The same as Fig.6, but for December 1953, and the indicated centers with the closest isolines of anomalies from October to December.
9. Geostrophic trajectories at 850 mb for extremely hot days ($\geq 35^{\circ}\text{C}$) in the northern Croatia, in 1950 and 1963. The trajectory in 1962 indicates the origin of the cold air typical for summer outbreaks in this area. After Rupnik [29].

10. Anomalies of the 50 mb heights in $gpDm$ (solid lines) as the departure from the normal 1956-66, and the temperature anomalies (dashed lines), as the departure from the normal 1965-69, for February 1973 (above), and February 1972 (below). From [19, No.137, and No.131].
11. The same as Fig.10, but for October 1974 (above) and October 1973 (below). From [19, No.143 and No.137].
12. Mean meridional circulations in the Northern Hemisphere stratosphere for January, May, September and March 1965. After Vincent [31].
13. Mean meridional circulation in the Northern Hemisphere stratosphere for October 1964, and 1965 calculated from Vincent's [31] data. Dashed lines indicate mean vertical velocity in 10^{-2} mm, and solid lines are streamlines analysed from the mean vertical and horizontal velocity components.
14. Change of the mean monthly geopotential heights at 500 mb (gpm) from 1965-69 to 1971-75 period.
Above: December (solid lines), January (dashed lines)
Below: February (solid lines), March (dashed lines).
15. The distribution of the correlation coefficients between 500 mb anomalies and the precipitation amounts at Zagreb-Grič 1956-75, and the phase-correlations ("forecast") coefficients between the 500 mb anomalies and the precipitations for the next month in Zagreb.
Above: correlation coefficients for December (solid lines), and phase-correlation coefficients from November's anomalies and the precipitation of December (dashed lines).
Below: correlation coefficients for April (solid lines), and phase correlations from April's anomalies and May's precipitation (dashed lines). Thin lines show the mean monthly geopotential field for April 1956-75.

ANOMALIES OF THE ATMOSPHERE GENERAL CIRCULATION, DRY SPELLS, AND POSSIBILITIES OF DROUGHT FORECASTING

SUMMARY

As an introductory part to this problem, an emphasis was placed on longterm changes in the general circulation of the atmosphere, with apparently a poleward contraction of the circumpolar vortex, and decrease amplitude of the planetary waves in the northern hemisphere circulation, during the first half of the 20th century (Fig. 1). Since the 1940's and 1950's there were indications of general cooling of the earth, and the atmospheric circulation appears with an increasing amplitude of the planetary waves. The changes in the 5-years mean precipitation amounts at Zagreb follow such circulation anomalies in a manner shown in Fig. 1.

The anomalies of the geopotential heights at 500 mb in the months of distinct dryness during 1956-1975 in the area studied, exhibit some particular pattern, more expressed during the cold part of the year (Figs. 3-8 in Chapter 2).

The statistical analyses of the monthly mean upper level winds at Zagreb (Table 1) indicate that dry months during the cold season are associated with prevailing north or north-westerly winds, revealing an anticyclonic shear from 500 down to 850 mb level. This is considered as an important feature for an increased sinking in the lee of Alps, contributing to the maintenance of dryness.

The discussion in Chapter 3 concerns the dry spells as a result of energy balance-components in the surface boundary layer (Table 2). A distinct characteristic of the dry summer of 1950 in the northern Croatia, in respect of the average condition, was the large turbulent heat exchange, and therefore an extremely high Bowen ratio. It is considered that this process increases the available potential energy in the lower tropospheric layers. The trajectories of this dry and very hot air have their origin in the African desert, and reach our area mainly by slowly moving over the southwestern Europe continental area (Fig.9). The trajectories coming straight across the Mediterranean are less frequent and with faster moving air masses.

The radiation processes are also important during the cold season dryness, when the turbulent heat exchange and the heat flux in the soil are negative (Table 2). These processes are associated with the frequent inversion layers in the persistent anticyclonic types of circulation during wintertime.

A brief review is given of the possible influences of natural as well as man-made factors (particularly the carbon dioxide increase) for the winter dry spells.

The essential part of this research is contained in Chapters 4 and 5. They contain the studies of the interaction processes between the northern hemisphere troposphere and the lower stratosphere, and the associated changes in midtropospheric circulation. The basic results from these Chapters were reviewed in [17]. Here, in Table 3 we present some more details of 50 mb heights and temperature anomalies during 1971-75 period in terms of the available normals [17,18]. These anomalies particularly express an earlier warming in March, and the cooling in December in the lower stratosphere. These changes in the stratosphere are then related to the surface pressure anomalies in terms of zonal index (Table 4), and the precipitation changes in Zagreb (Table 5).

Typical anomalies in February 1973, in comparison to the anomalies of February 1972 at 50 mb are presented in Fig. 10. Both 1971 and 1973, the driest years since 1949 in this area, are characterised by an early stratospheric warming (Table 3). In maintaining the stratospheric circulation through the vertical propagation of kinetic energy, the latter is lost in the troposphere, what could be an important factor for further development in the tropospheric circulation. Although the same is true for the other years during the winter stratospheric circulation, there is a possibility of some downward propagation of energy during the destruction of a strong cyclonic vortex in the stratosphere of these winters. In any case these phenomena are essential at least as the *response* of far more complex tropospheric motion systems, and as such could be further studied in numerical modelling procedures.

The Autumn's anomalies stress the higher temperature and heights in the western Europe during the rainy month of October 1974. The dryness of October 1973 is attributed to a deeper polar vortex, with negative anomalies at 50 mb in western or the central Europe, due to weaker developments of the Aleutian high. The latter is apparently related to the strengthening of the subtropical jet stream over the northern Africa and Asia. The driest October in this area was in 1965, and Fig. 13 shows the mean meridional circulation in the stratosphere of this month, from the calculations made by Vincent [31]. Its characteristic feature is a widespread mean subsidence, likely to occur in September (Fig. 12) in contrast to the rainy October in 1964 with prevailing ascends in the polar latitudes, which are more typical for November (Fig. 12).

The most pronounced features discussed in Chapter 5 are the changes in mean tropospheric circulation from 1965-69 to 1971-75. Fig. 14 indicates an amplification of the Europe during the wintertime of the latest years, and

stresses the importance of March cut-off processes over Scandinavia, associated with the earlier stratospheric warming and transfer to the summer circulation. More details of these phenomena are given in [17]. Here we stress the importance of some key-area apparently essential in short periodic fluctuations of the northern hemisphere circulation: 1) 50-60°N belt in Atlantic at wintertime, also discussed by Bjerknes [2] in connection with the air-sea interactions during the short-period fluctuations between 1900-1920, and also important in our phase correlation coefficients between the circulation anomalies and the precipitation in Zagreb from November to December (Fig. 15, above), 2) the area of Scandinavia in spring and summer (Fig. 15, below), and 3) Eastern Europe in autumn and winter. It is suggested that these regions should be given special attention in the future studies of seasonal drought forecasting.

PRILOG

PROCJENA HIDRODINAMIČKE NESTABILNOSTI

Kvantitativna analiza razvoja valova se može dobiti hemisferskim numeričkim modelima sa barem dva nivoa, dok se polu-kvantitativna analiza može postići procjenom parametara o kojima ovisi baroklina nestabilnost i amplifikacija valova [20].

Slijedeći način procjene razvoja daje analiza stadija hidrodinamičke nestabilnosti po kriteriju Van Mieghem-a prikazana u [11]. Ovaj kriterij je dan relacijom

$$N^2 \begin{cases} > \\ \approx \\ < \end{cases} v_i^2 \cdot v_s^2 \quad \begin{array}{l} \text{nestabilno} \\ \text{neutralno} \\ \text{stabilno} \end{array} \quad (1)$$

a hidrodinamička stabilnost je definirana kao

$$v_d^2 \approx v_i^2 - \frac{N^2}{v_s^2} \quad (2)$$

v_d^2 je hidrodinamička stabilnost ovisna o tri parametra:

(i) inercijalna stabilnost $v_i^2 \equiv f(f - \frac{\partial u}{\partial y})$,

koja je i glavni kriterij za barotropsku nestabilnost, a ovisi o odnosu Koriolisovog parametra f i horizontalnog smicanja zonalne komponente vjetra $\partial u / \partial y$. Iz gornje relacije se vidi da je v_d^2 uvijek manja od v_i^2 , tj. hidrodinamička nestabilnost je veća od inercijalne.

(ii) baroklinost $N \equiv f \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial y}$,

izražena termalnim vjetrom, kao glavnim parametrom barokline nestabilnosti. $\partial \theta / \partial y$ je meridionalni gradijent potencijalne temperature, g je gravitacija, a $\partial u / \partial z$ je vertikalno smicanje zonalne komponente vjetra. Prema ranije iznešenim analizama ova komponenta je naročito izražena u zimsko doba, kako u troposferi, tako i u donjoj stratosferi kada je cirkumpolarni vrtlog jako razvijen uz pojačanu mlaznu struju polarne noći.

(iii) statička stabilnost $v_s^2 \equiv \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$.

U kriteriju (1) se pretpostavlja da je $v_s^2 > 0$, što je prihvatljiva pretpostavka za gibanja velikih razmjera. Uz spori porast potencijalne temperature sa visinom statička stabilnost je mala, a to je slučaj u hladnoj polarnoj stratosferi zimi, kao što je prikazano u tabeli 3. Pri ranom stratosferskom zagrijavanju u siječnju i veljači, porast temperature sa visinom je veći, atmosfera je statički stabilnija, što povećava i dinamičku stabilnost atmosfere.

Prema tome vjerojatnost duljeg sušnog razdoblja je veća u dinamički stabilnoj atmosferi uz manju baroklinost i veću statičku stabilnost. To su bile glavne karakteristike 1971 i 1973 godine, u kojima pojedini sušni periodi nisu bili dugi, ali je valni režim bio slabije izražen, pa su prema tome procesi ciklogeneze i frontogeneze, kao i procesi koji uvjetuju lokalne nestabilnosti u ljetnom periodu, bili rjedji i manje efektivni nego u ostalim godinama promatranog razdoblja. To se odrazilo na dnevnim količinama oborina, koje su bile slabog intenziteta, pa je broj dana u 1971 i 1973 godini s oborinom ≥ 10.0 mm bio izrazito mali (18 i 19 dana) u odnosu na normalu u razdoblju 1862-1961 (30 dana).