

## ZAVJETRENI VALOVI U JUGOSLAVIJI – OPAŽANJA I SINOPTIČKI ASPEKTI POJAVE

### Lee Waves in Yugoslavia – Observation and Synoptic Aspects

VLASTA TUTIŠ

Republički hidrometeorološki zavod SR Hrvatske, Zagreb  
Primljeno 15. lipnja 1987, u konačnom obliku 20. kolovoza 1987.

**Sažetak:** U ovom radu ukratko su obnovljeni najvažniji rezultati mjerenja, opažanja i teorijskih modela zavjetrenih valova stranih autora.

Po prvi put su sustavno obrađena opažanja zavjetrenih valova u našoj zemlji, tako da su, uz anketiranje pilota jedriličara, klasificirana povoljna vremenska stanja i analizirane neke vremenske situacije. S obzirom na orijentaciju većina planina u našoj zemlji osobito su povoljne vremenske situacije onda kad je visinsko strujanje kroz veći dio atmosfere iz jugozapadnog kvadranta.

**Ključne riječi:** zavjetreni valovi, klasifikacija povoljnih vremenskih stanja, karakteristični oblici, opažanja zavjetrenih valova.

**Abstract:** The observations of lee waves in Yugoslavia are discussed systematically. Most of the information is gathered from sailplane-pilots reports. Favourable synoptic situations are classified and some examples are presented.

Regarding the orientation of most mountains in the country, the most favourable conditions for resonant lee wave development are in the case when the airflow is from the southwest quadrant through majority of the atmosphere height.

**Key words:** lee waves, favourable weather types, characteristic clouds, observations

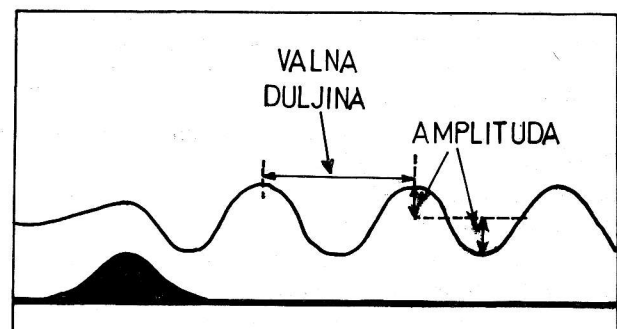
#### 1. UVOD

Atmosferski valovi u zavjetrini planine ili kraće, zavjetreni valovi, otkriveni su tek u ovom stoljeću, iako su ljudi već i prije primjećivali neobične popratne pojave i pridavali im različita, najčešće nadnaravna tumačenja. Tako npr. na otoku Man u Irskom moru (Isle of Man) često postoje povoljni uvjeti za nastajanje zavjetrenih valova (južni dio otoka je brdovit, sjeverni ravan, a južna strujanja na prednjoj strani ciklona su česta), zbog čega se na vrlo ograničenom prostoru javlja jak prizemni vjetar, koji može otpuhati i krov kuće. Ako se npr. ponovi takva nezgoda, lokalna predanja kažu da na taj način vile i vilenjaci iskazuju svoje nezadovoljstvo zbog izgradnje objekta na njihovom teritoriju.

Dvadesetih i tridesetih godina ovog stoljeća u Evropi se intenzivno razvija zrakoplovno jedriličarstvo. Od 1922. godine više se pažnje poklanja proučavanju strujanja zraka u blizini brda, tako da je Njemačko jedriličarsko društvo 1928. godine organiziralo prva visinska mjerenja blizu današnjeg Kaliningrada (SSSR). To je otvorilo nove mogućnosti jedriličarstvu pa se počelo letjeti najprije iznad samih padina brda, a 1933. godine prvi put se letjelo i na zavjetrenim valovima iznad područja Šleske, na jugozapadu današnje Poljske. Danas jedriličari vrlo rado koriste uzlazne struje kod valova u zavjetrini planina i za visinske i za daljinske letove, budući da je takvo jedrenje poznato po uglavnom mirnom letu bez velikih turbulencija.

Fizikalno, zavjetreni valovi su prisilno valno gibanje u stabilno stratificiranoj atmosferi, nakon prelaska zraka preko orografske prepreke. Na sl. 1 dat je shematski prikaz zavjetrenog vala.

Valna duljina zavjetrenih valova je najčešće između 5 i 20 km, a amplituda se obično mijenja s visinom.



Sl. 1. Shematski prikaz zavjetrenog vala  
Fig. 1. Schematic illustration of a lee wave

Kao što im i ime kaže, javljaju se u zavjetrini planine, a njihova pojava ovisi o svojstvima atmosfere (o promjeni statičke stabilnosti s visinom i smicanju vjetra s visinom) i o veličini prepreke.

## 2. UKRATKO O REZULTATIMA MJERENJA I OPAŽANJA ZAVJETRENIH VALOVA U SVIJETU

**Zavjetreni valovi mogu se pojaviti svugdje gdje za to postoje povoljni uvjeti – pogodna veličina prepreke, promjena statičke stabilnosti i smicanje vjetra s visinom.**

U svjetskoj meteorološkoj literaturi naići ćemo na brojne radove koji proučavaju karakteristike određene vremenske situacije (npr. Wooldridge i Lester, 1969; Gjevik i Marthinssen, 1978) kao i na one koji se bave klimatologijom zavjetrenih valova nad nekim područjem (npr. Cruette, 1976). Pri ispitivanju strujanja zraka oko planine potrebno je osigurati što više podataka, i to po mogućnosti simultano iz više izvora. Za pojavu zavjetrenih valova vezani su i karakteristični oblaci (ako ima dosta vlage) pa ih je poželjno fotografirati (Alaka, 1960), a ako je moguće i napraviti fotogrametrijsku analizu kako bi se otprilike odredile valne duljine. Ovu metodu su, između ostalog, primijenili i opisali Wooldridge i Lester (1969).

Radiosondažna (kao i pilot-balonska) mjerenja i na prijetrenoj i na zavjetrenoj strani planine su od velike koristi, budući da na temelju vertikalnih profila meteoroloških elemenata možemo ocijeniti utjecaj prepreke na strujanje. Primjer takve analize naći ćemo u publikaciji WMO-Alpex – Preliminary Scientific Results (1982).

Kao što je već i u uvodu rečeno, prve podatke o zavjetrenim valovima pribavili su jedriličari, međutim, danas se sve više upotrebljavaju specijalni avioni koji lete po određenim vertikalnim presjecima mjereći temperaturu, tlak, vjetar, vertikalne akceleracije, vlagu itd. Strujnice zraka se aproksimiraju izolinijama potencijalne temperature, koje pak odgovaraju izentropama, a slične su im i izolinije omjera miješanja ozona ( $\mu$  g/g) (više o tome u: Nicholls, 1973). Specijalnim radarskim tehnikama (npr. Starr i Browning, 1972) može se ispitati i trodimenzionalna struktura zavjetrenih valova. Kao »mete« služe mali kristalčići leda, a ako je pojava u zraku bez ledenih jezgri, koriste se nehomogenosti u refraktivnom indeksu u slojevima velikih promjena vlage ili potencijalne temperature.

U novije vrijeme i analiza satelitskih snimaka naoblake uzima sve više maha. Zavjetreni valovi mogu se lako prepoznati po karakterističnim oblačnim sistemima. Po brzini premještanja oblaka može se zaključiti i o brzini vjetra (Lee i Houghton, 1984). Te slike potvrdile su da se zavjetreni valovi mogu pojaviti svuda u svijetu gdje su ispunjeni određeni uvjeti, te da se oblačni sistemi prostiru i nekoliko stotina kilometara iza prepreke. Tako se otkrilo i postojanje velikih oblaka tipa lenticularis, promjera i oko 25 km.

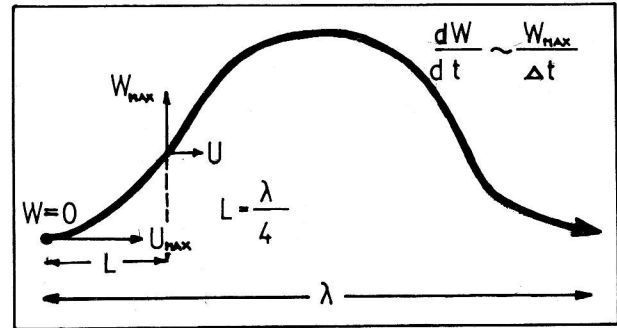
Sumirajući dosadašnje rezultate opažanja možemo reći da je valna duljina  $\lambda$  zavjetrenih valova:

uglavnom  $1,8 \text{ km} < \lambda < 70 \text{ km}$ ,  
ali najčešće  $5 \text{ km} < \lambda < 20 \text{ km}$ .

Blizu slojeva s najvećom statičkom stabilnošću val obično ima najveću amplitudu koja se kreće u rasponu od nekoliko stotina metara do 2 km, ali najčešće od 300 do 500 metra.

Starr i Browning (1972) su, prema svojim mjerenjima, zaključili da je osmotrena valna duljina obično između  $2\pi/l_{\min}$  i  $2\pi/l_{\max}$ , gdje je  $l$  Scorerov parametar.

Vertikalne brzine u valu su najčešće od  $2$  do  $10 \text{ ms}^{-1}$ , ali u ekstremnim slučajevima mogu biti i do  $30 \text{ ms}^{-1}$ . Također je utvrđeno da postoji neka donja granica u brzini vjetra na nivou vrha prepreke i to je obično od  $7$  do  $15 \text{ ms}^{-1}$ .



Sl. 2. Raspored ulaznih i silaznih gibanja u valu  
Fig. 2. Schematic disturbance to illustrate characteristic velocities and lengths.  $\lambda$  is the wavelength.

Pokazalo se da se zavjetreni valovi obično javljaju duž zone najjačih vjetrova na visini 500 mbara, a usporednom analizom visinskog strujanja i satelitskih snimaka da postoji odstupanje smjera gibanja oblaka od smjera vjetra (npr. na visini oko 2000 metara može biti i  $40^\circ$ ). Istovremeno se atmosfera može u grubo podijeliti na 3 sloja različite statičke stabilnosti po vertikali (sloj veće stabilnosti između dva sloja manje stabilnosti), (Cruette, 1976).

Spektralnom analizom podataka (npr. Wooldridge i Lester, 1969) utvrđeno je da je stvarni val obično superpozicija više valova različitih valnih duljina. Kraći val je obično izraženiji u nižim slojevima atmosfere, dok je amplituda duljeg vala maksimalna na većim visinama, kao što je to teoretski pokazao Sawyer (1960).

Najnovija istraživanja su pokazala da se valovi mogu naći i visoko u atmosferi – avioni su ih potvrdili na visini oko 18 km, sedefasti oblaci ih nagovještavaju na visini oko 30 km, a radarski odrazi i na visinama oko 64 km. Ipak, za dovoljno veliki pad Scorerova parametra s visinom u nižoj atmosferi, može se uzeti da je valno gibanje u troposferi nezavisno od gibanja u stratosferi (obrat ne vrijedi).

Budući da pojava i intenzitet zavjetrenih valova jako ovisi o stabilnosti atmosfere, valna duljina vala i njegova amplituda imaju izražen dnevni hod.

Valovi su najjači obično navečer, u noći i ujutro, a najslabiji ili potpuno nestaju poslijepodne zbog insolacije i takosmanjene stabilnosti.

Pretpostavlja se da zavjetreni valovi igraju važnu ulogu u vertikalnom prijenosu horizontalne količine gibanja u atmosferi. Evo nekoliko rezultata dobivenih mjerenjima:

autor	količina gibanja
Bretherton (1969)	$0,4 \text{ Nm}^{-2}$
Lilly i Kennedy (1973)	$0,4 \text{ do } 0,6 \text{ Nm}^{-2}$
Alpex-WMO (1982)	$0,2 \text{ Nm}^{-2}$
Brown (1983)	$0,35 \text{ Nm}^{-2}$

Naravno, ti rezultati su još uvijek diskutabilni zbog složenosti atmosferskih procesa iznad nekog mjesta u nekom vremenu.

### 3. ZAVJETRENI VALOVI U NAŠOJ ZEMLJI

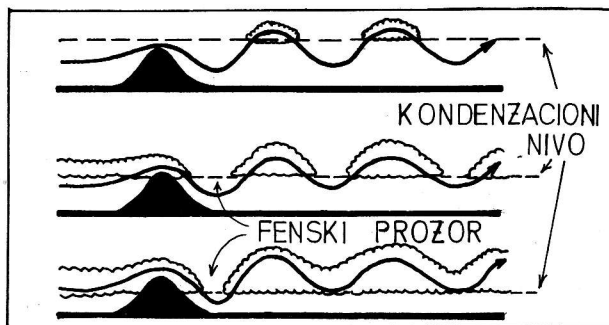
Zahvaljujući razvijenom reljefu realno je očekivati postojanje zavjetrenih valova kod pogodnih vremenskih situacija u mnogim krajevima naše zemlje. Naravno, najviše iskustva i podataka o toj pojavi imaju naši jedriličari (i općenito piloti) koji su se ljubazno odazvali i pomogli mi u sakupljanju postojećeg materijala. Kao osobito pogodan lokalitet za

jedrenje na zavjetrenim valovima izdvojena je lička Plješe-  
vica (najviši vrh je Gola Plješe-  
vica – 1649 m), tako da je  
najviše podataka upravo s tog područja.

Sa zadovoljstvom možemo konstatirati da su rezultati  
ovoga rada pomogli boljem upoznavanju pilota jedriličara  
sa pojavom zavjetrenih valova, te su im omogućili prepo-  
znavanje povoljnih vremenskih situacija i dostizanje većih  
visina letenjem na valovima.

### 3.1. Oblaci

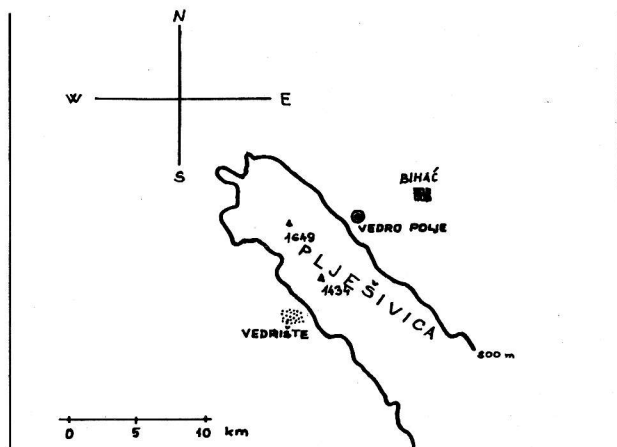
Nastajanje i oblik oblaka karakterističnih za zavjetrene  
valove ovisit će o količini vlage u zraku i visini kondenzacij-  
skog nivoa, kao i o brzini vjetera. Oblaci će, naravno, nastajati  
u područjima uzlaznog strujanja u valu, a nestajati u  
zonama silaznih struja.



Sl. 3. Oblaci kod strujanja zraka preko planine  
Fig. 3. Clouds connected with the airflow over a mountain

U sporopromjenljivim vremenskim prilikama jedna od  
karakteristika oblaka je da su, s obzirom na promatrača na  
zemlji, uglavnom stacionarni. Ako je brzina vjetera dosta  
velika, rubovi im se izgledaju, pa obično imamo Ac lenticularis.  
Također, ovisno o brzini vjetera, u zavjetrini se u najni-  
žem sloju atmosfere stvaraju rotori, a na vrhu rotora stva-  
raju se cumulusi karakterističnog rastrganog oblika.

Zbog silaznih gibanja odmah u zavjetreni se stvara »fen-  
ski prozor«. Zanimljivo je spomenuti da je učestalost te  
pojave ostavila traga i u geografskim imenima. Na sjever-  
noj strani Plješevice nalazi se mjesto Vedro Polje (fenski  
prozor nastaje pri jugozapadnim vremenskim situacijama),  
a na južnoj strani ime jedne zaravni je Vedrište (fenski pro-  
zor nastaje pri sjevernim vremenskim stanjima), sl. 4.



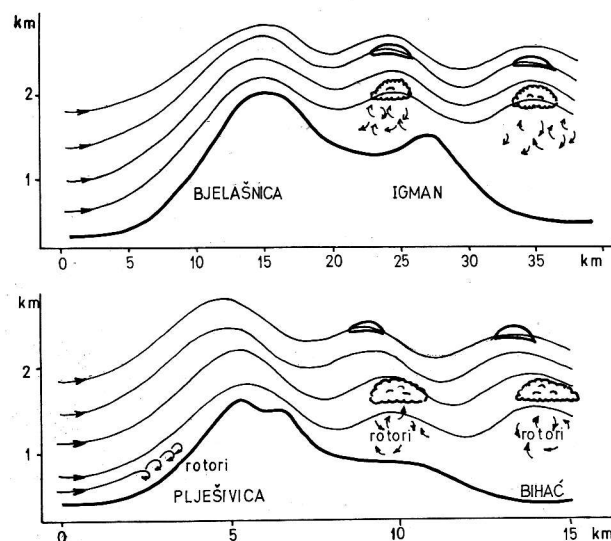
Sl. 4. Skica Plješevice uz naznaku položaja mjesta Vedro  
Polje i zaravni Vedrište.  
Fig. 4. Schematic illustration of mountain Plješe-  
vica. Locations of village Vedro Polje and plateau Vedrište  
are indicated.

### 3.2. Opažanja naših jedriličara

Da bismo stekli dojam o pojavi zavjetrenih valova u našoj  
zemlji, sastavila sam nekoliko pitanja i u obliku upitnika  
podijelila jedriličarima s letačkim iskustvom od 5 do 40  
godina.

Sumirajući njihove odgovore, može se reći da su često  
letjeli na zavjetrenim valovima i da je, prema njihovim opa-  
žanjima, njihova pojava bila češća u proljeće i jesen, oso-  
bito kod jačih jugozapadnih prodora. Budući da ih je većina  
letjela i iznad ličke Plješevice, ta planina je i najviše spomi-  
njana kao lokalitet iznad kojeg su zavjetreni valovi dobro  
razvijeni. Međutim, spominju se još i Velebit, Kapela, Alpe  
u zapadnoj Sloveniji, planine u sjevernoj Bosni, Šarplani-  
na, Bjelašnica, Igman, itd.

Jedan od najiskusnijih jedriličara, Z. Rain opisuje struja-  
nje preko Plješevice i Bjelašnice kao na sl. 5 i ističe da su  
valovi općenito razvijeniji kod asimetričnih planina.



Sl. 5. Valovito strujanje preko Bjelašnice i Plješevice  
prema Z. Rainu  
Fig. 5. Wave streaming over mountains Bjelašnica and Plje-  
še-  
vica, as observed by sailplane pilot Z. Rain

Na pitanje da li je pojava zavjetrenih valova bila vezana  
za kakav karakteristični vertikalni profil vjetera, svi su odgo-  
vorili da je brzina vjetera općenito rasla s visinom, a da je u  
prizemnom sloju bila obično oko  $10 \text{ ms}^{-1}$ .

Opažene vertikalne brzine bile su uglavnom između  $2$  i  $6$   
 $\text{ms}^{-1}$  (tu je uračunato i prosječno propadanje jedrilice od  
 $-1 \text{ ms}^{-1}$ ), ali i do  $10 \text{ ms}^{-1}$ .

Na pitanje da li je intenzitet pojave bio na svim visinama  
isti, odgovori su bili dosta različiti budući da ih većina nije  
letjela iznad  $5 \text{ km}$  visine zbog neopremljenosti za visinske  
letove. Ipak, može se zaključiti o složenoj strukturi pojave  
(S. Benčić; datum: 02.05.1979):

»Od visine QNH (nadmorska visina)  $1000$  do  $4000 \text{ m}$   
ulazne brzine bile su cca  $1$  do  $3 \text{ ms}^{-1}$ , iznad  $4000 \text{ m}$  ulazne  
brzine zraka bile su i do  $8 \text{ ms}^{-1}$  do  $6000 \text{ m}$ , a zatim do  $8000$   
 $\text{m}$  cca  $2 \text{ ms}^{-1}$ .«

Na deseto pitanje o rasprostranjenosti valova nisam  
dobila sasvim zadovoljavajuće odgovore, vjerojatno zbog  
nejasnoće samog pitanja. U usmenim diskusijama saznala  
sam da su se valovi, ovisno o vremenskoj situaciji raspro-  
stirali i oko  $100 \text{ km}$  iza prepreke. Zbog složenosti orografi-  
je, u slučaju Plješevice, realno je bilo očekivati da će posto-

jati još kakav val prije same planine kao posljedica prethodnih prepreka u zračnoj struji, a neki jedriličari su ih, štoviše, i iskusili.

S obzirom na najčešću izduženost naših planina i rijetkost potpuno izoliranih vrhunaca, izraženi trodimenzionalni zavjetreni valovi (slično tragu broda na moru), osim jednog izuzetka, nisu opažani.

### 3.3. Vremenska stanja povoljna za razvoj zavjetrenih valova u našoj zemlji

Za klasifikaciju vremenskih stanja kod kojih možemo očekivati nastajanje zavjetrenih valova u našoj zemlji, osim vlastitog iskustva u sinoptici, bile su mi vrlo korisne i usmene konzultacije sa N. Tepešom, Z. Rainom, S. Benčićem i mr J. Midžićem. Raspodjela vremenskih stanja urađena je prema Đ. Radinoviću (1981).

Pri određenoj vremenskoj situaciji moramo imati zadovoljene slijedeće osnovne uvjete:

- 1) poželjno je da vjetar istovremeno po visini jača i da nema velikih promjena smjera vjetra,
- 2) da stabilniji sloj bude ispod ili između dva manje stabilna sloja.

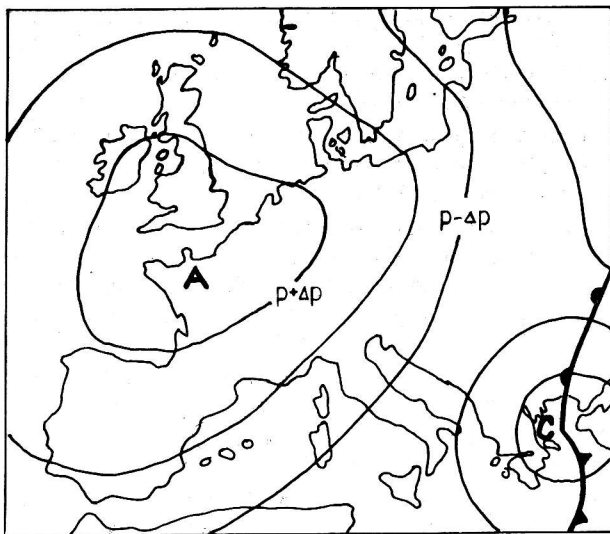
Pri računanju stabilnosti, numeričke će se vrijednosti, npr. Scorerova parametra  $I$ , dosta razlikovati s obzirom na vrstu zračne mase. Tako će npr. vrijednost za  $I^2$  u najstabilnijem sloju kod sjevernih strujanja biti veća i od  $10^{-4} \text{ m}^{-2}$ , dok će kod južnih biti tek oko  $10^{-7} \text{ m}^{-2}$ . To je potrebno imati na umu pri usporedbi vlastitih  $I^2$  krivulja s onima iz svjetske literature.

#### 3.3.1. Sjeverno vremensko stanje

Sjeverno vremensko stanje, prema Radinoviću imamo u tri slučaja:

- 1) ciklona s centrom iznad istočne Evrope,
- 2) anticiklona iznad zapadne ili sjeverozapadne Evrope,
- 3) oba sistema su dobro razvijena.

Poželjno je da se naši krajevi po visini nalaze na prednjoj strani grebena, tj. također u sjevernoj struji. Tada se zavjetreni valovi javljaju na južnim obroncima planina. Takva sinoptička situacija donosi poboljšanje vremena u zapadnim krajevima po povećano osunčavanje destabilizira



Sl. 6. Karakteristična prizemna raspodjela tlaka kod sjevernog vremenskog stanja  
Fig. 6. Characteristic surface pressure distribution during northerly weather type

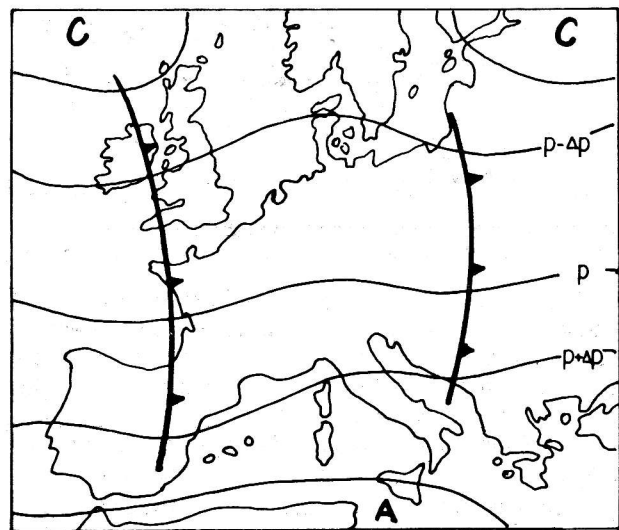
atmosferu. Stoga izraženije valove valja očekivati u večernjim, noćnim i jutarnjim satima. Prema izjavama jedriličara tako nastali zavjetreni valovi su kratkotrajni, a letenje na njima često je praćeno turbulencijom.

Slična vremenska situacija bila je kod fotografiranih zavjetrenih valova na sjevernom Velebitu, 13.08.1984. (oko podneva, uz buru) i 18.08.1983. (kasno poslijepodne) iznad Plješevice (prema izjavama jedriličara).

#### 3.3.2. Zapadno vremensko stanje

Zapadno vremensko stanje imamo kada je iznad naših krajeva zapadno zonalno strujanje tako da serija slabih poremećaja brzo prelazi preko naše zemlje.

Jaki zavjetreni valovi kod takvog vremenskog stanja primijećeni su u Sloveniji (u alpskom području), osobito u zimi i u proljeće. U hladnom dijelu godine ovakva vremenska situacija donosi nam relativno toplo i vlažno vrijeme, ali zbog hladnog tla prizemni je sloj atmosfere obično stabilniji od viših.



Sl. 7. Karakteristična prizemna raspodjela tlaka kod zapadnog vremenskog stanja  
Fig. 7. Characteristic surface pressure distribution during westerly weather type

Pogledamo li kartu Hrvatske, tada možemo očekivati pojavu zavjetrenih valova u sjeverozapadnoj i sjevernoj Hrvatskoj, npr. u zavjetrini Medvednice, Ivančice, Kalnika, Žumberačkog gorja, Psunja i ostalih brda koje su orijentirana sjever ili sjeveroistok – jug ili jugozapad. Primjer takve zapadne situacije je 31.07.1985. kada su slovenski jedriličari letjeli na jakim zavjetrenim valovima iznad alpskog područja Slovenije.

#### 3.3.3. Jugozapadno i južno vremensko stanje

Zbog povoljne orijentacije Dinarskog gorja, kod oba vremenska stanja zavjetreni valovi se javljaju na sjevernoj strani planina, dok istovremeno pri tlu puše fen. Pri ovakvoj vremenskoj situaciji jedriličari su letjeli na valovima u zavjetrini ovih planina:

- Hrvatska: Plješevica;
- Bih: Bjelašnica, Staretina, Treskavica, Velež, Lelija;
- Srbija: Kopaonik;
- Makedonija: Šar Plaina;
- Crna Gora: Sinjajevina, Durmitor.

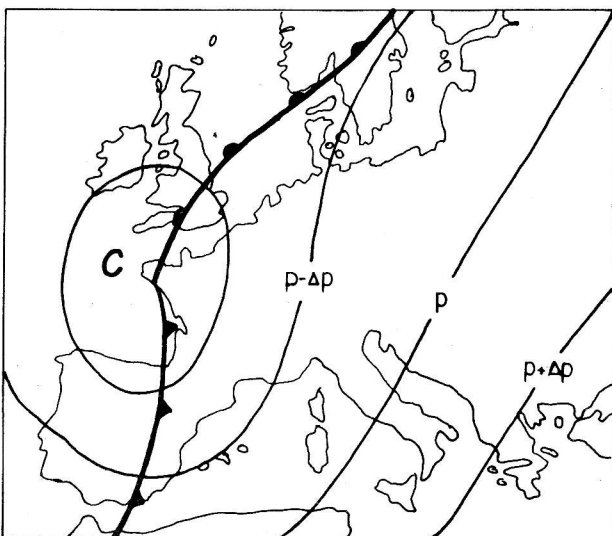
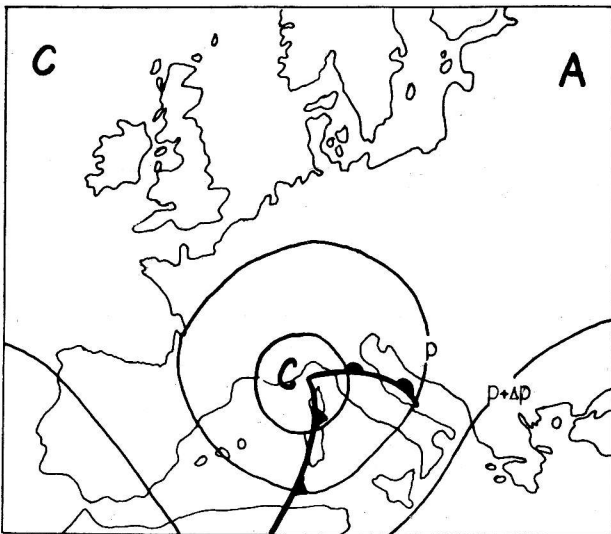
Uzmemo li u obzir da bilo koja planina može prouzročiti zavjetrene valove uz povoljne vremenske uvjete i pogle-

damo li detaljnije geografsku kartu Jugoslavije, vidimo da je, u stvari, većina planina koje pripadaju lancu Dinarida dobro orijentirana. Tako kod neke kvazistacionarne južne ili jugozapadne vremenske situacije sa povoljnim visinskim vjetrom možemo očekivati prostorno čestu pojavu zavjetrenih valova.

U slijedećoj tablici je popis datuma kad su jedriličari letjeli na zavjetrenim valovima uz kratku naznaku vremenskog stanja i prevladavajućeg smjera vjetra po visini:

Na slikama 8.i 9. prikazane su karakteristične prizemne raspodjele tlaka zraka kod južnog i jugozapadnog vremenskog stanja.

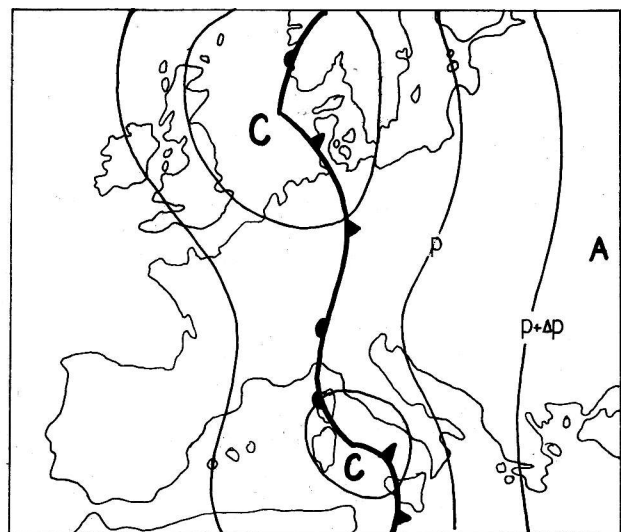
datum	vrem.stanje	vjetar po visini
20.10.1957.	S	SW
01.11.1957.	S	SW
04.11.1957.	SW	SW
06.11.1957.	SSW	SW
07.11.1957.	S	SSW
08.11.1957.	S	S
09.11.1957.	S	SSE
02.05.1979.	SW	SW
13.10.1979.	SW	S
14.10.1979.	S	SW
15.10.1979.	S	S
03.07.1981.	S	WSW
08.05.1983.	SW	WSW
05.04.1985.	SW	SW
06.04.1985.	WSW	SW



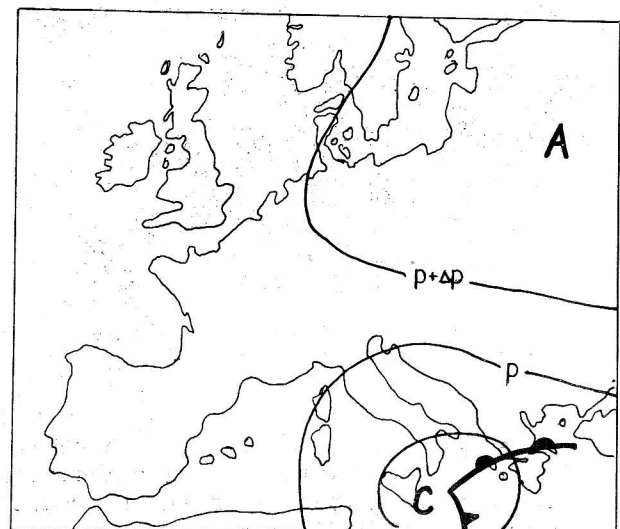
Sl. 8. a,b Karakteristična prizemna raspodjela tlaka kod jugozapadnog vremenskog stanja  
Fig. 8. a,b Characteristic surface pressure distribution during southwesterly weather type

### 3.3.4. Istočno vremensko stanje

Za istočno vremensko stanje karakteristično je postojanje anticiklone u evropskom dijelu SSSR-a ili ciklone u srednjem i istočnom Mediteranu, kao što je prikazano na sl. 10.



Sl. 9. Karakteristična raspodjela prizemnog tlaka kod južnog vremenskog stanja  
Fig. 9. Characteristic surface pressure distribution during southerly weather type



Sl. 10. Karakteristična raspodjela prizemnog polja tlaka kod istočnog vremenskog stanja  
Fig. 10. Characteristic surface pressure distribution during easterly weather type

Zavjetreni valovi pri ovakvim vremenskim situacijama primijećeni su u Srbiji (najčešće u proljeće i jesen) i ako pogledamo geografsku kartu, vidimo da su osobito povoljno orijentirane planine koje pripadaju lancu Karpatata.

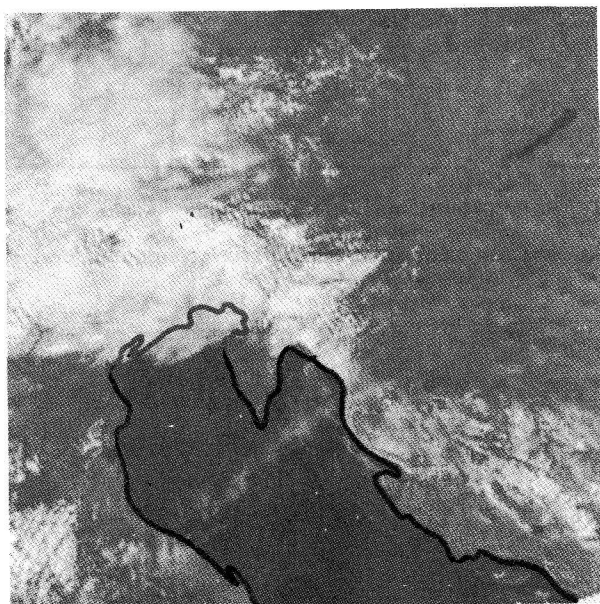
### 3.4. Zavjetreni valovi na satelitskim snimkama

Zavjetrene valove možemo raspoznati na satelitskim snimkama po karakterističnim kvazistacionarnim oblačnim prugama. Njihovo prisustvo ukazuje na stabilnu stratifikaciju atmosfere iznad tog područja.

Od kolovoza 1986. godine Sinoptički sektor RHMZ SRH raspolaže satelitskim uređajem, zahvaljujući kojem možemo vidjeti da se zavjetreni valovi relativno često javljaju iznad područja naše zemlje u slučaju povoljnih atmosferskih uvjeta. Za primjer su uzete tri situacije – dvije iz ALPEX perioda (za koje postoje već uvećane satelitske snimke u izdanju Berlinskog Univerziteta) i jedna iz 1986. godine (za koju je raspoloživa samo skica budući da još ne raspolažemo uređajem za prijenos satelitske slike na foto-grafski papir).

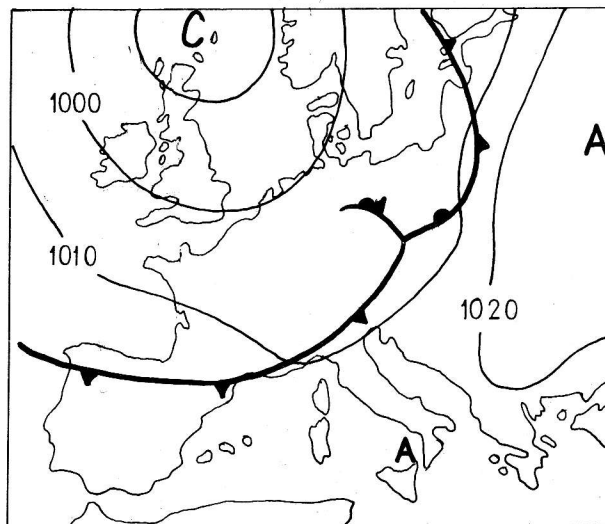
#### 3.4.1. Situacija 17.03.1982.

Na satelitskom snimku (sl. 11) možemo vidjeti oblačne pruge koje odaju prisustvo zavjetrenih valova iznad područja Slovenije i zapadne Hrvatske u 14 sati po srednjeevropskom vremenu. Prosječna valna duljina (procijenjena iz satelitskog snimka) je oko 6 do 8 km.

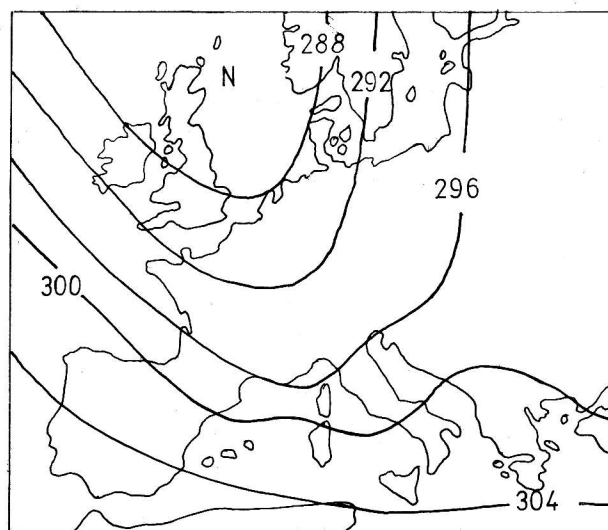


Sl. 11. Satelitska fotografija 17.03.1982. u 13 UTC (NOAA 7).  
Fig. 11. Satellite photograph, 17.03.1982 at 13 UTC (NOAA 7)

Sinoptička situacija pripada tipu jugozapadnog vremenskog stanja. Na prizemnoj karti (sl. 12) frontalni poremećaj se nalazi sjeverozapadno od naše zemlje, a u 13 sati UTC (po satelitskom snimku) oblačni sistem upravo zahvaća Alpsko područje. Po visini su Slovenija i zapadna Hrvatska pod utjecajem jugozapadnog strujanja sve do vrha troposfere (na prednjoj strani visinske doline čija je os iznad zapadne Evrope), sl. 13.



Sl. 12. Prizemna sinoptička situacija, 17.03.1982 u 12 UTC  
Fig. 12. Surface synoptic situation, 17.03.1982. at 12 UTC



Sl. 13. AT 700 hPa, 18.03.1982. u 00 UTC  
Fig. 13. AT 700 hPa, 18.03.1982 at 00 UTC

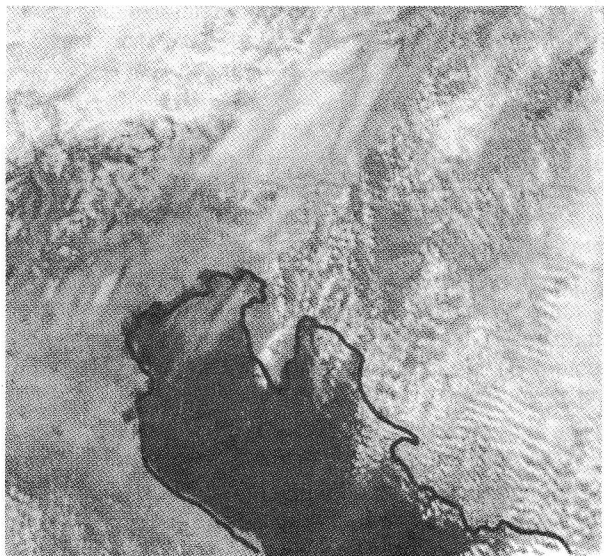
#### 3.4.2. Situacija 28.04.1982.

Na satelitskom snimku u 13 UTC oblačne pruge odaju prisustvo valova iznad većeg dijela Slovenije, Hrvatske i zapadne Bosne. Procijenjena valna duljina je od 6 do 12 km. (sl. 14).

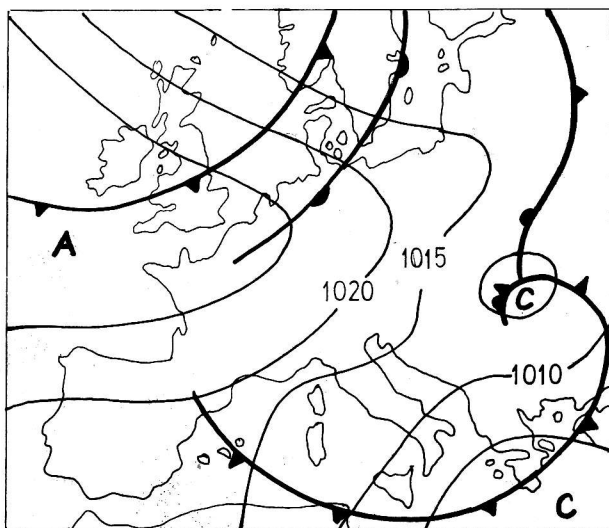
Sinoptička situacija pripada tipu sjevernog vremenskog stanja. Iznad zapadnog dijela zemlje (sl. 15) pri tlu jača greben anticiklone sa zapada, dok smo po visini na zadnjoj strani visinske doline (sl. 16).

Iznad promatranog područja strujanja je sjeverno kroz veći dio troposfere.

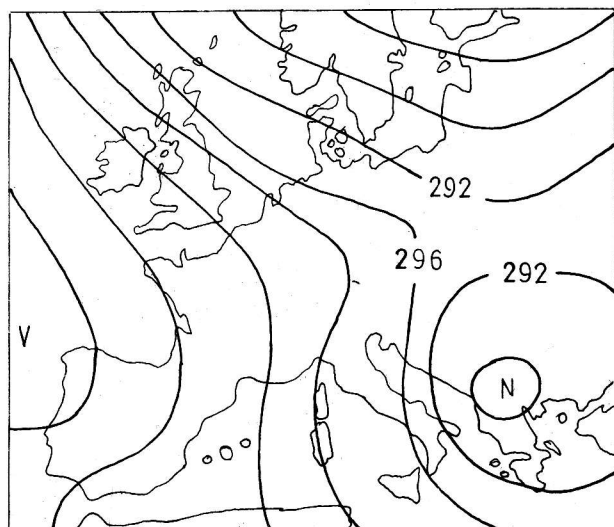
Ovakva vremenska situacija se često odlikuje nepovoljnim vertikalnim profilom vjetra, stoga su valovi obično kratkotrajni.



Sl. 14. Satelitska fotografija 28.04.1982. u 13 UTC (NOAA 7)  
Fig. 14. Satellite photograph, 28.04.1982 at 13 UTC (NOAA 7)



Sl. 15. Prizemna sinoptička situacija, 28.04.1982. u 12 UTC  
Fig. 15. Surface synoptic situation, 28.04.1982. at 12 UTC



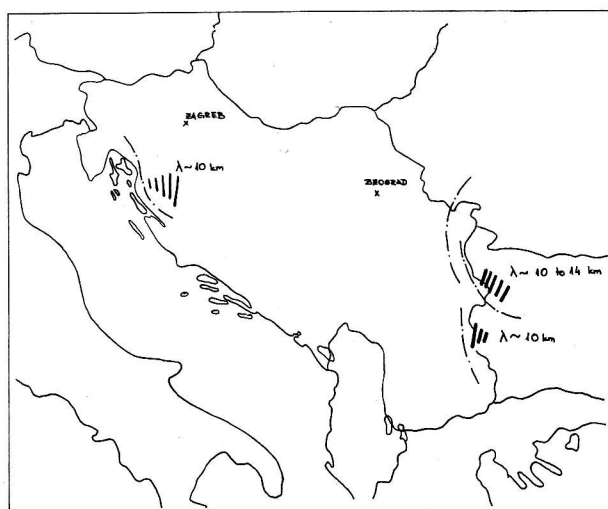
Sl. 16. AT 700 hPa, 29.04.1982. u 00 UTC  
Fig. 16. AT 700 hPa, 29.04.1982. at 00 UTC

### 3.4.3. Situacija 22.10.1986.

Na sl. 17 debelim je crtama označen položaj i raspored karakterističnih oblačnih pruga u zavjetrini Velebita i Karpata, a isprekidanim crtama označen je smjer pružanja glavnih planinskih lanaca. Valna duljina valova bila je od 10 do 14 km. Zbog dnevnog hoda meteoroloških elemenata valovi su bili najbolje razvijeni ujutro, a prema lokalnom podnevu su polako nestajali, povećavajući svoju valnu duljinu.

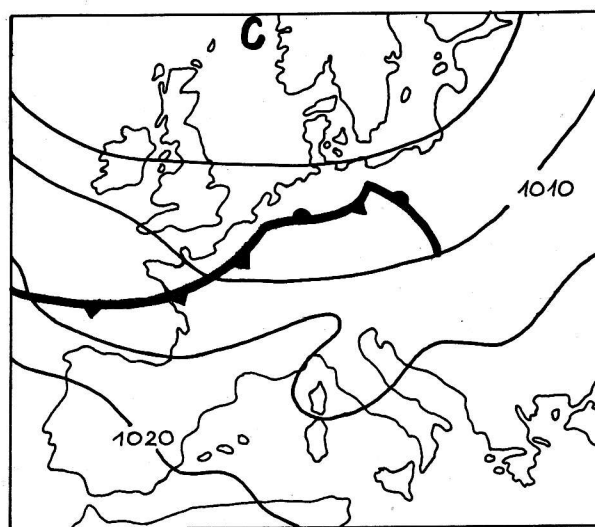
Sinoptička situacija u 12 UTC najviše odgovara zapadnom vremenskom stanju (sl. 18), dok je po visni sve do tropopauze jaka zapadna – sjeverozapadna struja. (sl. 19).

Detaljna analiza pojedinih vremenskih situacija kada su opaženi zavjetreni valovi bit će objavljena u slijedećim raspravama. Detaljna analiza situacije 22.10.1986. prikazana je u radu Tutiš, 1987.

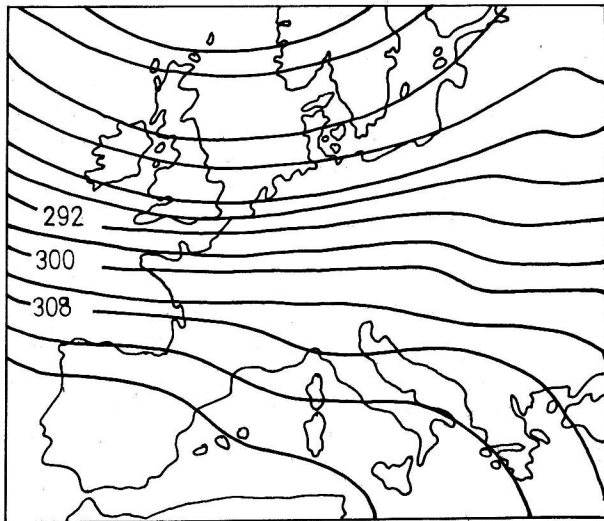


Sl. 17. Skica zavjetrenih valova 22.10.1986. u 11 UTC. Debelim crtama je označen raspored karakterističnih oblačnih pruga, a isprekidanim crtama smjer pružanja planinskih lanaca.

Fig. 17. Schematic illustration of lee waves on 22.10.1986 at 11 UTC. Thick lines represent lee-wave cloud bands, and broken thin lines represent orientation of mountain chains.



Sl. 18. Prizemna sinoptička situacija 22.10.1986. u 12 UTC  
Fig. 18. Surface synoptic situation, 22.10.1986 at 12 UTC



Sl. 19. AT 700 hPa, 22.10.1986. u 12 UTC  
Fig. 19. At 700 hPa, 22.10.1986 at 12 UTC

## ZAKLJUČAK

Rezonantni zavjetreni valovi, koji nastaju u specifičnim atmosferskim uvjetima, do sada su u našoj zemlji malo proučavani, a zbog razvijenosti orografije realno ih je očekivati kod razolikih vremenskih situacija. S obzirom na orijentaciju većine planina u našoj zemlji možemo zaključiti da su osobito povoljne vremenske situacije za razvoj rezonantnih valova onda kada je strujanje kroz veći dio troposfere iz jugozapadnog kvadranta (za područje Dinarida), te zapadno zonalno strujanje (za područje Alpa i Karpata). Valovi su primijećeni i kod ostalih tipova vremenskih situacija, ali su tada puno manjeg prostorno-vremenskog obima.

## SUMMARY

Theoretical and observational results show that resonant lee waves can rise when certain conditions are fulfilled (the favourable size of an obstacle; wind becomes stronger with height; a stable layer is between or below less stable layers).

Due to well the developed orography in Yugoslavia, lee waves are to be expected during favourable synoptic situations.

Glider-pilots have the most practical experience about this phenomenon, so most of the information about lee waves were gained through questionnaires. On the basis of pilots' descriptions of weather situations, characteristic clouds, vertical motions, localities, etc., consultations with elder colleagues and my own synoptic experience, classification of favourable synoptic situations was made according to Radinović (1981).

It shows that the most favourable synoptic situations are in the case when the airflow is from the southwest quadrant, through a majority of the atmosphere, regarding the orientation of main mountain chains in Yugoslavia. Such a weather type exists when there is a cyclone in the west Mediterranean or/and over west Europe, together with upper level trough with an axis over west Europe.

Frequent resonant wave development is also noticed in the lee of the Alps and the Carpathians during western airflows.

Lee waves which rise during other characteristic weather situations are usually less extended and more brief.

In the last part of this paper, three synoptic situations, when documented lee waves, are represented in few words. The first situation (17 March 1982) was characterized by southwest airflow through entire troposphere. The characteristic cloud bands extended over Slovenia and western Croatia (Fig. 11). The estimated wavelength is between 6 and 8 km.

The second situation (28. April 1982) was characterized by northerly airflow through majority of the troposphere. Cloud bands extended over most of Slovenia, Croatia and western Bosnia. The estimated wavelength is between 6 and 12 km (Fig. 14).

The third situation (22. October 1986) was characterized by WNW airflow through the entire troposphere.

Cloud bands developed in the lee of Velebit (the Dinarids) and in the lee of the Carpathians. (Fig. 17).

Estimated wavelength is between 10 and 14 km.

More detailed case studies will be represented in forthcoming papers.

## LITERATURA

- Alaka, M. A. 1960: The airflow over mountains, Technical Note No. 34, WMO
- Atkinson, B. W. 1981: Mesoscale atmospheric circulation Academic Press, London, etc., pp 495
- Bretherton, F. P. 1969: Momentum transport by gravity waves, Quart. J. R. Met. Soc., 95, 213-243
- Brown, P. R. A. 1983: Aircraft measurements of mountain waves and their associated momentum flux over the British Isles, Quart. J. R. Met. Soc., 109, 849-865
- Crouette, D. 1976: Experimental study of mountain lee waves by means of satellite photographs and aircraft measurements, Tellus, 28, 499-523
- Čadež, M. 1964: Vreme u Jugoslaviji, PMF u Beogradu, Meteorološki Zavod, Rasprave 4, pp 80
- Gjevick, B. and T. Marthinsen, 1978: Three-dimensional lee-wave pattern, Quart. J. R. Met. Soc., 104, 947-957
- Gossard, E. E. and W. H. Hooke 1975: Waves in the atmosphere, Els. Sci. Publ. Comp., Amsterdam-Oxford-New York, pp 456
- Lee, D. K. and D. D. Houghton 1984: A quantitative study of satellite winds for mesoscale meteorology, Mon. Wea. Rev., Vol. 112, 990-1004
- Lilly, D. K. and P. J. Kennedy 1973: Observations of a stationary mountain wave and its associated momentum flux and energy dissipation, J. Atm. Sci., 30, 1135-1152
- Midžić, J. 1984: Some characteristics of lee waves on the north slopes of mount Plješevica, XVIII ICAM, 112-115
- Nichols, J. M. 1973: The airflow over mountains - research 1958-72, Technical Note No. 129, WMO
- Radinović, D. 1982: Vreme i klima jugoslavije, IRO Građevinska knjiga Beograd, pp 423
- Sawyer, J. S. 1960: Numerical calculation of the displacements of a stratified airstream crossing a ridge of small height, Quart. J. R. Met. Soc., 86, 326-345
- Scorer, R. S. 1978: Environmental aerodynamics, Ellis Horwood Limited, New York, etc., pp 487
- Starr, J. R. and K. A. Browning 1972: Observations of lee waves by high power radar, Quart. J. R. Met. Soc., 98, 75-85
- Tutiš, V. 1987: Lee waves - a case study, XIII I. C. of Carpathian Meteorology (prihvaćeno)
- Wallington, C. E. 1960: Introduction to lee waves in atmosphere, Weather, 15, 269-276
- Wooldridge, G. and P. F. Lester 1969: Detailed observations of mountain lee waves and a comparison with theory, Colorado State Univ., Atm. Sci. Paper No. 138
- , 1982/ AlpeX - preliminary scientific results, GARP-ALPEX, WMO, Geneva, pp 266
- , 1969: Vazduhoplovno jedriličarstvo, Savezna uprava za civilnu vazdušnu plovību, Beograd, 575 pp.
- Tutiš, V. 1986: Valovi u zavjetrini planine, magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, 117 pp.