

TEMPERATURA POLJA V ADIABATNIH TOKOVIH ČEZ GORSKE GREBENE
TEMPERATURE FIELDS IN ADIABATIC FLOW OVER MOUNTAIN RIDGES

551.558.21

ZDRAVKO PETKOVŠEK

Katedra za meteorologijo FNT, Ljubljana

ABSTRACT:

The graphically obtained temperature fields that originate in the simplified adiabatic airflow over the mountain ridges are presented and used as a base for the study of changed stratifications, baroclinic fields and some ideas about the development of lee-waves and rotors. Examples of temperature fields are given for different initial air mass stratification as for different flow characteristics, namely: parallel /1/ or confluent /11/, uniform /A/ or vertical sheared /B/, and steady /1'/ flow or displacement at the beginning of the flow /2'/.

Temperature fields in the steady flow for different stratifications are presented in Figs. 1 and 2. Characteristic and near the natural conditions are the patterns in Figs. 1b and 2b. Stratification above the ridge is in the last case a little more stable, the circulation due to baroclinity however converges the streamlines.

The temperature field patterns at the beginning of the flow are significant and changeable. The region of the strongest cooling is spreading toward the ridge on the windward slope, the strongest warming however towards the base on the lee side /Fig. 3/. Created baroclinic field and circulation can arouse a development of lee-waves /Fig. 5b/. The predominant natural conditions

are believed to be similar to the pattern in Fig. 4c. There is a significant initial labilisation of the atmosphere on the lee side and sink of the circulation cell to the foothill /Fig. 5c/. That can give a new explanation for creation a well known rotor, without preconditioned wind shear.

Taking in account the vertical wind shear, the corresponding deformation of temperature fields are presented in Figs. 6 and 7. Now on both, the changes of stratification are to be found although the general characteristics are like those in Fig. 4c. Explanation of the lee waves and rotor phenomena could also start out from the changes in baroclinic fields and not just merely from stable displacements in gravity field and wind shear.

UVOD

Splošno horizontalno gibanje zračnih mas dobi v območju orografskih pregrad tudi vertikalno komponento. Pri tem nastopijo znane adiabatne temperaturne spremembe pretakajočih se zračnih delcev.

Posledica teh temperaturnih sprememb so nastanek in spremembe temperaturnih polj v samem območju gorskih pregrad in tudi v področjih na njihovi zavetrni strani. Karakteristike teh temperaturnih polj so odvisne od karakteristik toka pa tudi od prvotne stratifikacije zračne mase, to je, od prvotnega geometričnega vertikalnega temperaturnega gradienta v zračni masi. Nastala temperaturna polja pa preko spremenjene stabilnosti in solenoidnih polj, ki ustvarjajo cirkulacijo, tudi vplivajo na tok zračne mase čez pregrado in preko sprememb njegovih karakteristik spet nazaj na spremembo temperaturnih polj. Zaradi teh in še mnogih drugih vzporedno nastopajočih vplivov /diabatne temperaturne spremembe, trenje in turbulenca, fazne spremembe vodne pare v zraku itd./ nam tokovno polje v območju pregrad ni natančno znano in se tudi stalno spreminja. Z različnimi približki in poenostavitvami dobljene teoretične rešitve, in še to le za stacionarne tokove /1, 3, 4, 5/, nam kažejo veliko raznolikost in potrjujejo

močno občutljivost tokovnih vzorcev od postavljenih začetnih in robnih pogojev in drugih predpostavk.

Kompleksna in eksaktna rešitev je očitno še daleč /5/. Naša naloga v tem delu pa je pokazati vzorce temperaturnih polj, njihove spremembe ter nastale efekte v vertikalnih presekih. Temperaturna polja so dobljena grafično in so predstavljena za različne karakteristike osnovnega toka in za različne stratifikacije zračne mase, ki se pretoka, oziroma se prične pretakati čez gorski greben. Videli bomo namreč, da so prav ob začetku pretakanja temperaturna polja močna, spremenljiva in zanimiva in zato odločujoča glede na karakteristike kasnejšega, trajnejšega, kvazistacionarnega temperaturnega polja in tokovnega vzorca nad gorsko pregrado in za njo. Glede na to moremo tudi smatrati, da so karakteristike toka in valov za pregrado v veliki meri pogojene z nastalo, zlasti začetno baroklinostjo in ne le z neposredno topografsko vzbujenimi gravitacijsko-inercijskimi oscilacijami.

OSNOVNE POSTAVKE IN VZORCI.

Glede osnovnega toka zračne mase čez pregrado ločimo in predpostavimo trikrat po dve karakteristiki, ki nam definirajo preproste slike gibanja zračnih delcev oz. tokovnic v območju pregrade. Pri tem je lahko tok:

- I paralelen ali II konfluenten
- A enoten ali B z vertikalnim striženjem
- 1' stalen ali 2' začetni

Glede stratifikacije prvotne zračne mase pa smo izbrali tri značilne vertikalne temperaturne gradiente $-\partial T/\partial z = \gamma_0$, in sicer

- $\gamma_0 = 0$ izotermna atmosfera, zelo stabilna
- $\gamma_0 = 5^\circ/\text{km}$ stabilna stratifikacija
- $\gamma_0 = 10$ " indifirentna atmosfera

Seveda za prikaz glavnih značilnosti in efektov ni potrebno obravnavati

vseh možnih njihovih kombinacij, ampak si bomo ogledali samo najznačilnejše med njimi.

Paralelni tok /I/ pomeni, da so tokovnice v njem paralelne tudi nad pregrado, in zato sega motnja od pregrade neomejeno navzgor izven območja našega interesa. To pa je le v spodnjih nekaj kilometrih v okolici, predpostavljeno, 2 km visoke pregrade, idealizirano izgajene oblike - slika 1.

Konfluentni tok /II/ pa pomeni postavko, da sega motnja v toku zaradi pregrade le do višine 4 km nad ravnino, oziroma 2 km nad vrh pregrade, kjer so tokovnice enakomerno zblížane. Nad postavljeno zgornjo mejo pa je tok nemoten in vseskozi horizontalen - slika 2.

Karakteristika "enoten" /A/ pomeni, da je horizontalna hitrost delcev na vseh višinah enaka; /B/ pa pove, da je predpostavljeno linearno vertikalno vetrovno striženje, ki je definirano z enačbo

$$U_z = U_0 + k z$$

pri čemer je v teh primerih vzet $k = dU/dz = 30 \text{ h}^{-1}$, kar pomeni, da je hitrost na vsak km višine za 30 km/h večja. To je precej močno striženje, vendar pa z njim nazorno predstavimo njegove učinke na deformacijo temperaturnih polj in temu sledečih sprememb v stratifikaciji in baroklinosti.

Stalni /stacionarni/ tok /1'/', kot bomo videli, ustvarja v obravnavanih okoliščinah stacionarna temperaturna polja, medtem ko se temperaturna polja ob začetku pretakanja /2'/' prvotno mirujoče in povsod enako stratificirane zračne mase hitro in značilno spreminjajo.

V nadaljnjem si bomo torej ogledali in diskutirali o temperaturnih poljih v vertikalnih presekih ob različnih karakteristikah toka. Pri tem bomo zanemarili vse ostale vplive, kot je n.pr. ogrevanje od tal, dnevne spremembe raznih elementov, vlaga v zraku in njene fazne spremembe, spremembe pritiskovega polja itd. Smatrali bomo, da zrak z vlago ni nasičen, niti do nasičenosti ne pride ter je stopnja ohlajanja ali ogrevanja vseskozi po suhoadiabatnem individualnem

temperaturnem gradientu $\gamma_a = g/c_p = 10^\circ/\text{km}$. Razen tega velja vseskozi predpostavka, da v prvotni zračni masi na obravnavanem področju ni horizontalnega temperaturnega gradienta. S tem so nastala temperaturna polja in njihove spremembe res samo posledica pretakanja zraka čez pregrado. Prav te in iz njih sledeče efekte pa želimo prikazati v tem delu.

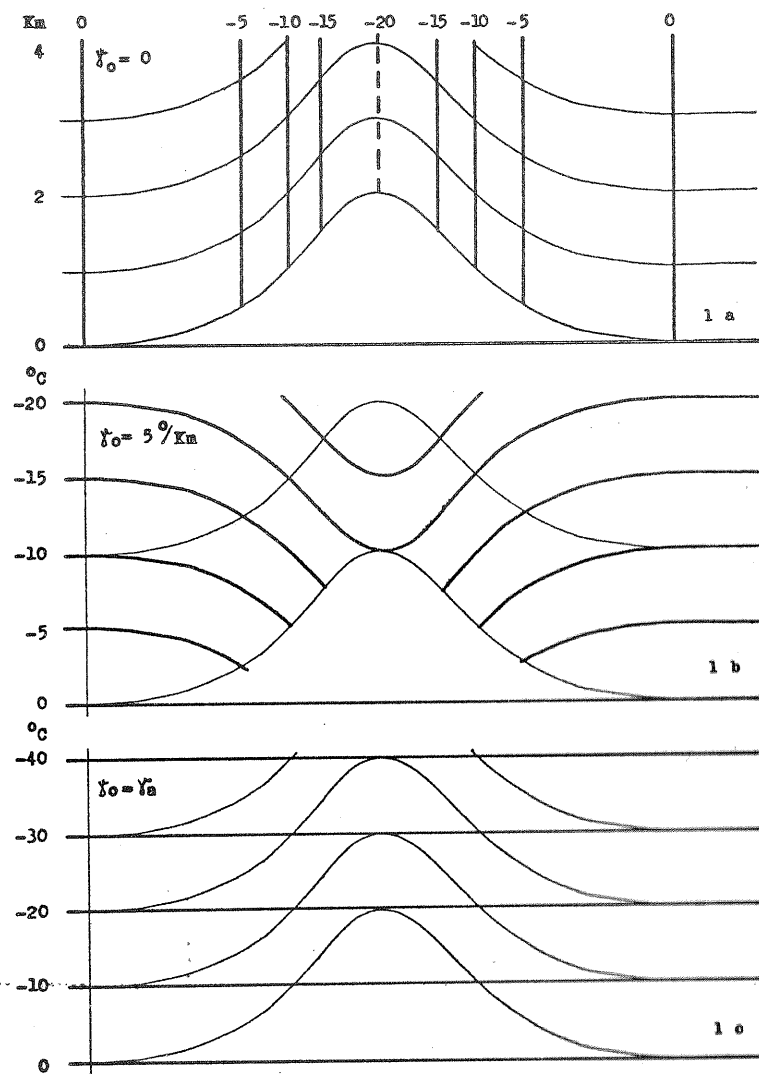
TEMPERATurna POLJA V STALNEM TOKU

Paralelni, enotni in stalni tok /IA1'/' - slika 1-da zgoraj neomenjena, navzgor enaka in glede na simetrijo preseka pregrade simetrična temperaturna polja, ki pa so močno odvisna od prvotne stratifikacije zračne mase, ki se pretaka čez greben. Adiabatsna temperaturna sprememba je odvisna le od spremembe višine, in ker se delci gibljejo paralelno, nastopa tu zanje istočasno enaka ohladitev oziroma otoplitev. V prvotno izotermni atmosferi so zato izoterme navpične /slika 1a/, kar bi bil v naravi le izjemen primer. Dejanska temperatura delca v neki točki pa je odvisna tudi od njegove začetne vrednosti. Za $\gamma_0 \neq 0$ ta ni povsod enaka in temperaturna polje je drugačno. Pri prvotni stratifikaciji $\gamma_0 = 5^\circ/\text{km}$ /slika 1b/ je temperaturna polje značilno za prevladujoče okoliščine v takem toku. Če je pa geometrični temperaturni gradient v masi pred pregrado večji, so izoterme nad pregrado vse manj strme in so ob $\gamma_0 = \gamma_a$ povsod horizontalne - slika 1c.

Bistvene poteze prevladujočega temperaturnega polja v takem toku so torej prikazane na sliki 1b. Glede na praktično horizontalno lego izobar je nad pregrado očitna baroklinost. Sprememba cirkulacije /cirkulacijski pospešek/, ki je v skladu s cirkulacijskim teoremom za baroklino polje podana z

$$\frac{dC}{dt} = \oint \alpha \delta p = N/T, -R \cdot \ln p,$$

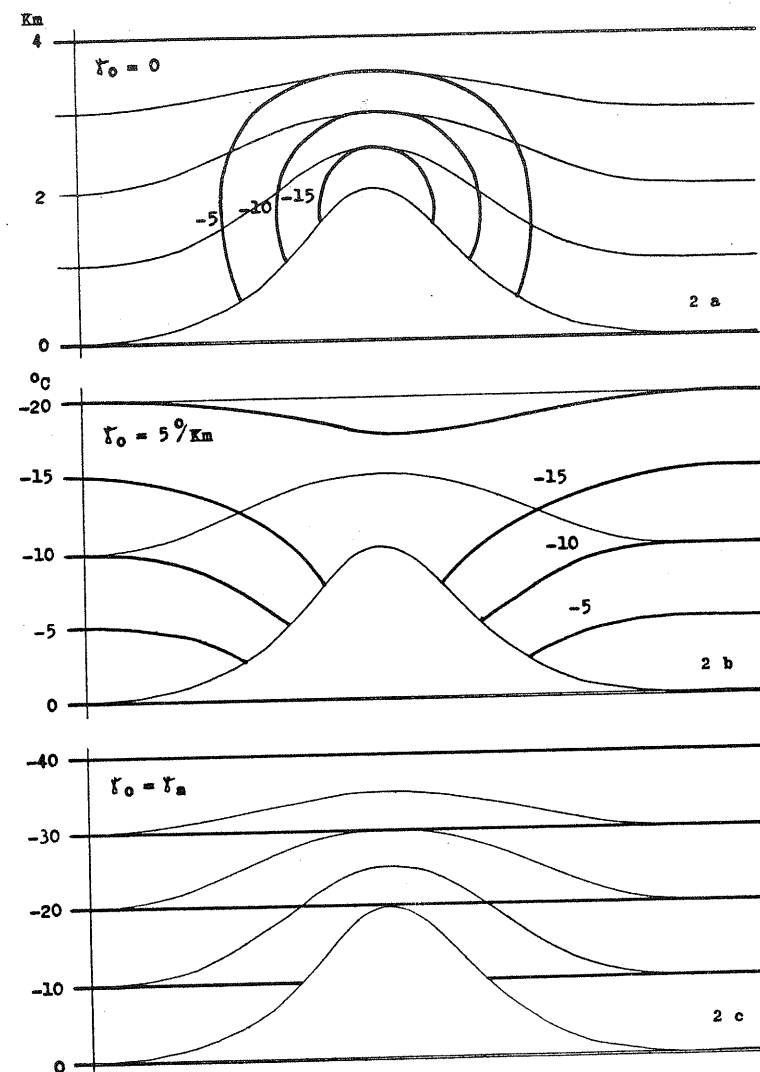
deluje od ∇T proti $-\nabla p$. S tem poljem pogojena cirkulacija je sorazmerna gostoti enotnih solenoidov, ki je očitno najmočnejša nad pobočjema in simetrična glede na vrh pregrade /slika 5a/. Nad privetrnim pobočjem deluje v negativnem smislu vrtenja, na zavetrnem v pozitivnem. Tako se pojavijo nad vrhom



Slika 1 Temperaturna polja nad pregrado v paralelnem, enotnem in stalnem toku /IA1'/ za tri različne začetne stratifikacije zračne mase.

Fig. 1 Temperature fields above the mountain in a parallel, uniform and steady airflow /IA1'/ for three different initial air mass stratifications.

grebena pospeški navzdol, tokovnice se zblížajo in morda prav zaradi tega preide paralelni tok nad pregrado v vzorec toka /II/, to je tok nad pregrado stisnjenih tokovnic, kakor ga kaže naslednja slika.



Slika 2 Temperaturna polja nad pregrado v konfluentnem, enotnem in stalnem toku /IIA1'/ za tri različne začetne stratifikacije zračne mase.

Fig. 2 Temperature fields above the mountain in confluent, uniform and steady airflow /IIA1'/ for three different initial air mass stratifications.

Slika 2 kaže temperaturna polja pri konfluentnem, enotnem in stalnem toku / ΔA^2 / za različne začetne stratifikacije. Očitno je glede na sliko 1 večja razlika le pri prvotno izotermni atmosferi /sliki a/, medtem ko sta si temperaturna polja slik 1c in 2c čisto, sliki 1b in 2b pa močno podobni. Solenoidno polje pa je v zadnjem navedenem primeru šibkejše in z njim tudi prej navedeni efekt nadaljnjega stiskanja tokovnic. Glede na ta kratki pregled teh šestih primerov lahko ugotovimo, da so najbolj bistvene poteze temperaturnega polja, ki se zgradi zaradi adiabatnih sprememb v stalnem toku, približno take, kot so prikazane na slikah 1b oziroma 2b. Stratifikacija nad pregrado je torej enaka prvotni ali pa je nekoliko stabilnejša.

Relativna ohladitev delca je torej v vsakem primeru le funkcija relativne spremembe njegove višine, absolutna temperaturna vrednost pa je poleg tega odvisna še od prvotne vrednosti oziroma stratifikacije. Obe količini pa sta neodvisni od horizontalne hitrosti vetra oz. toka, ki je lahko zato različna v posameznih plasteh, ne da bi se vzorec temperaturnega polja /v stalnem, a čeprav neenakomernem toku/ kaj spremenil. Na obeh slikah prikazana temperaturna polja veljajo torej tudi pri poljubnih vertikalnih vetrovnih striženjih. To pa ne velja na začetku pretakanja.

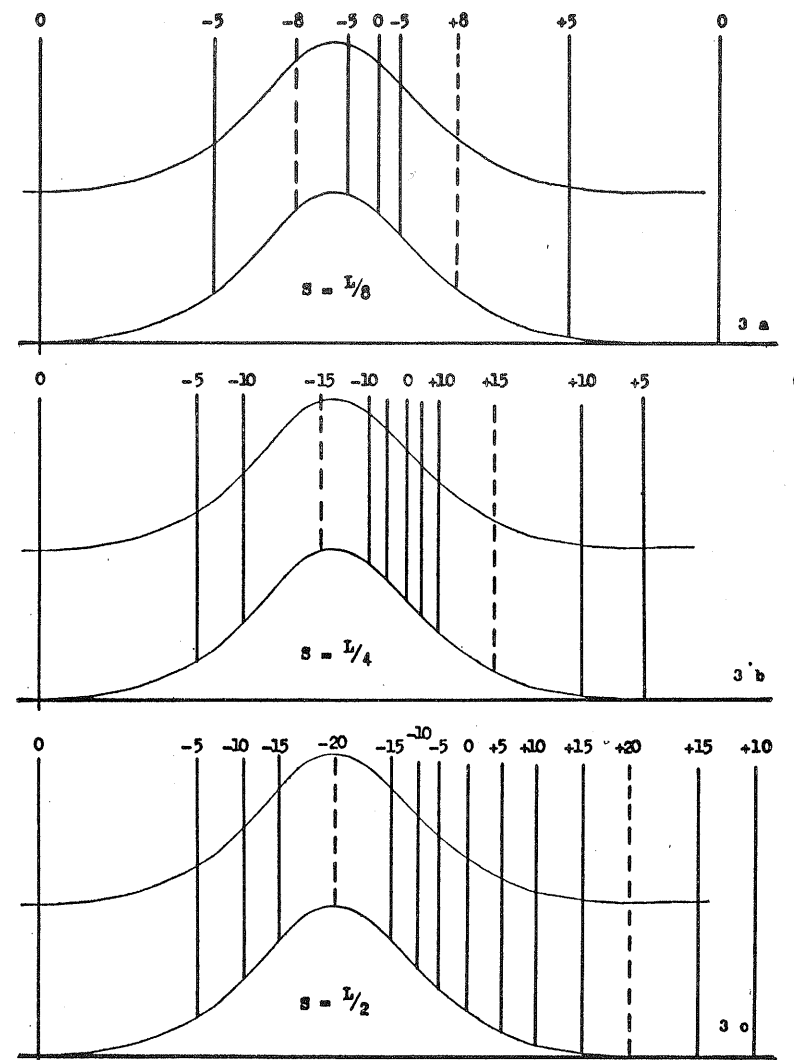
POLJA OB ZAČETKU PRETAKANJA.

Ob začetku pretakanja prvotno enotno stratificirane zračne mase, ki je mirno ležala v območju pregrade, se temperaturno polje šele vzpostavlja in zato relativno hitro spreminja. Najhitrejše adiabatne spremembe nastopajo ob največji strmini pobočij, saj je vertikalna hitrost w odvisna od naklonskega kota pobočij do horizontalne ravnine / β /, in sicer

$$w = U_0 \cdot \operatorname{tg} \beta$$

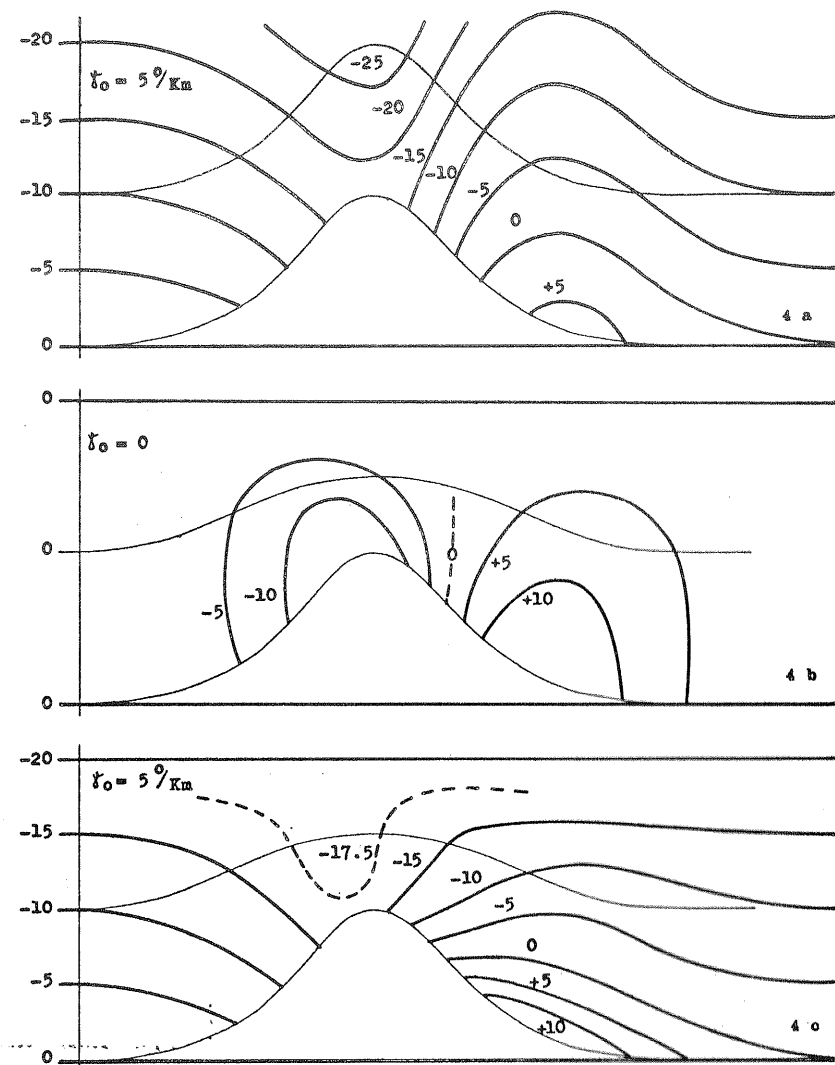
Na najpreprostejšem primeru paralelnega, enotnega toka / ΔA^2 / prvotno izotermne zračne mase / $\gamma_0 = 0$ / si bomo ob sliki 3 ogledali temperaturna

polja, ki nastanejo po premiku zračne mase na desno za pot S , ki je a / osmina, b / četrtina in c / polovica širine pregrade /označene z L /.



Slika 3 Temperaturna polja ob začetku pretakanja prvotno izotermne zračne mase po paralelnem in enotnem tokovnem vzorcu / ΔA^2 / . Premiki mase so za: a/ osmino, b/ četrtino in c/ polovico širine pregrade.

Fig. 3 Temperature fields at the beginning of airflow of the initially isothermal air mass by parallel and uniform flow pattern / ΔA^2 / . Displacements of airmass are for: a/ an eighth, b/ a quarter and c/ a half of the mountain broadness.



Slika 4 Temperaturna polja ob začetku pretakanja v enotnem toku po premiku mase za $S = L/4$. Druge značilnosti so: a/ paralelen tok, $\gamma_0 = 5 \text{ }^\circ/\text{km}$; b/ konfluenten tok, $\gamma_0 = 0$; c/ konfluenten tok, $\gamma_0 = 5 \text{ }^\circ/\text{km}$.

Fig. 4 Temperature fields at the beginning of uniform flow after a displacement of air mass for $S = L/4$. Other specifications: a/ parallel flow, $\gamma_0 = 5 \text{ }^\circ/\text{km}$; b/ confluent flow, $\gamma_0 = 0$; c/ confluent flow, $\gamma_0 = 5 \text{ }^\circ/\text{km}$.

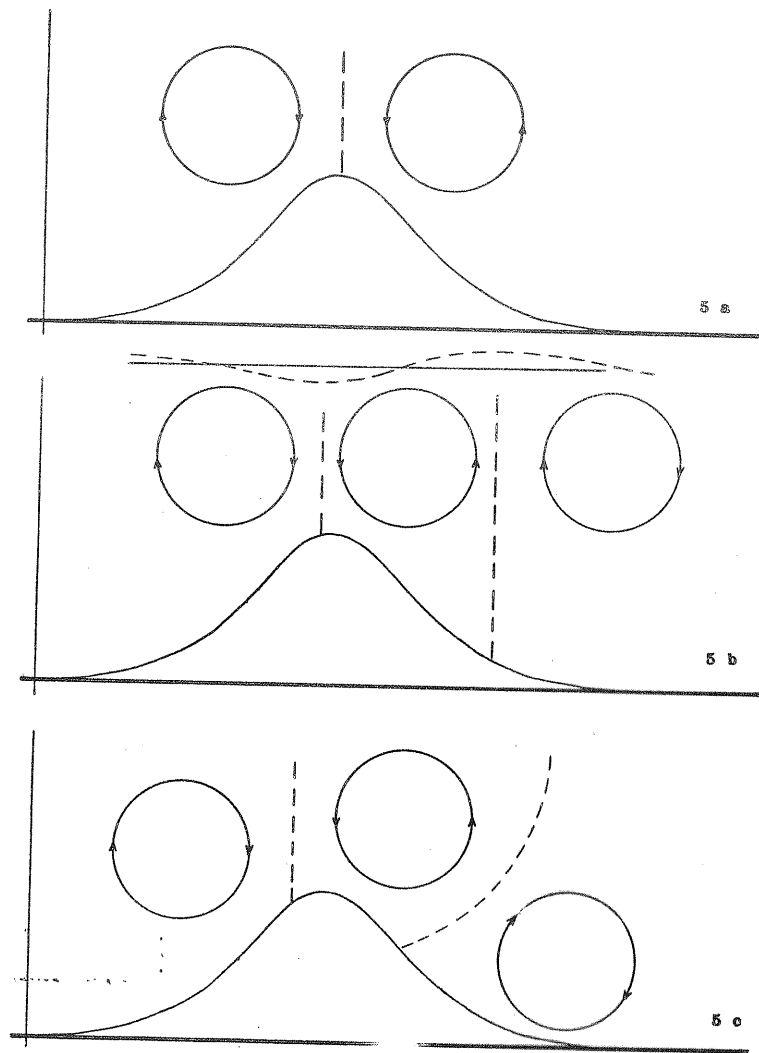
Vidimo, kako se področje najmočnejše ohlaiditve krepi in se od največje strmine na privetrni strani pobočij pomika proti vrhu. Po premiku mase za $S = L/2$ je temperaturno polje na privetrni strani pregrade že identično s poljem v stacionarnem toku /slika 1a/. Področje najmočnejše otoplitve, ki se začne pod največjo strmino na zavetrni strani, se krepi in odmika proti podnožju pregrade. Po premiku za $S = L/2$ ga ravno doseže obenem z nastopom maksimalne vrednosti. Ob premiku za $S = L$ je nad celotno pregrado že stacionarno polje, toplo področje pa se odmika od pregrade.

Pri takih okoliščinah ne pride do sprememb v stratifikaciji zračne mase nad pregrado, solenoidna polja in iz njih sledeči cirkulacijski pospeški pa so sorazmerni gostoti solenoidov. Cirkulacija spet zgoščuje tokovnice nad vrhom grebena, a jih razmika, oziroma dviga v področju največjih otoplitev /n. pr. slika 5b/. To pa je lahko odločilnega pomena za nastanek valovanja v toku za pregrado, ki je značilna poteza tokov nad gorskimi pregradami in za njimi /1 do 5/.

Isto velja glede stratifikacije in cirkulacije v primeru paralelnega toka tudi v primeru, da je prvotna zračna masa normalno stratificirana $0 < \gamma_0 < \gamma_a$, čeprav je samo temperaturno polje bistveno drugačno. Primer za stratifikacijo $\gamma_0 = 5 \text{ }^\circ/\text{km}$ in $S = L/4$ ob sicer enakih okoliščinah je za ustrezno temperaturno polje prikazano na sliki 4a.

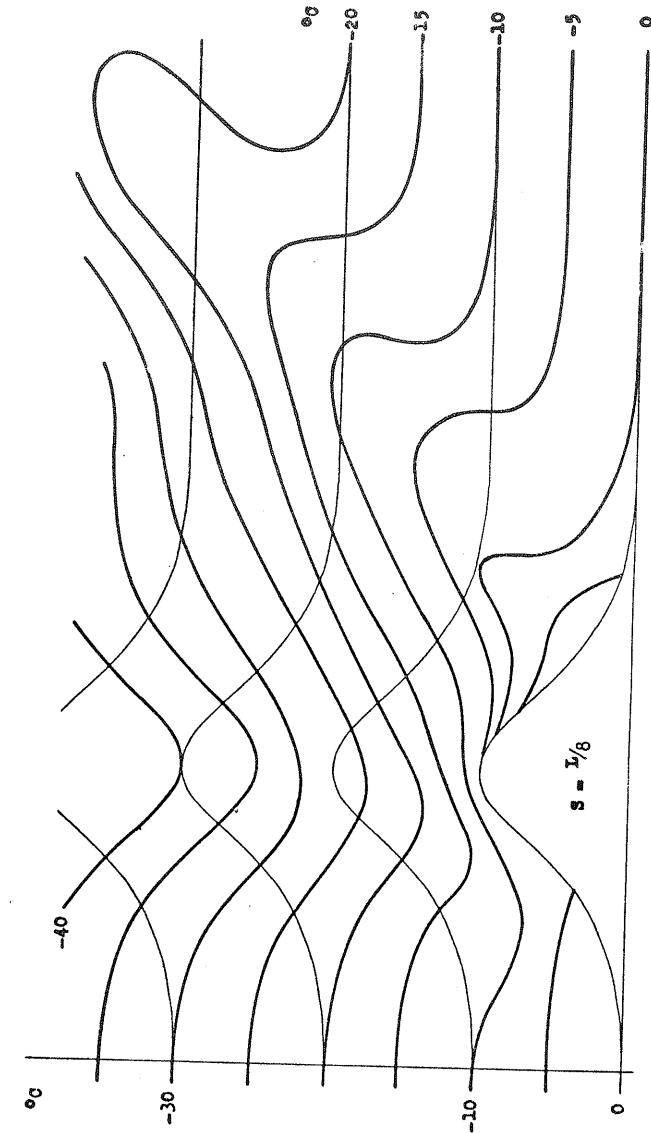
V prvem primeru konfluentnega toka pa daje temperaturno polje ob začetku pretakanja večje spremembe tudi v stratifikaciji zračne mase nad pregrado in za njo. Ustrezna temperaturna polja za $S = L/4$ in $\gamma_0 = 0$ oziroma $\gamma_0 = 5 \text{ }^\circ/\text{km}$ so prikazana na sliki 4b in 4c. Slika 4c kaže značilne poteze temperaturnega polja, kakor ga lahko v prevladujočih primerih v naravi pričakujemo ob teh okoliščinah. Zlasti v spodnjih plasteh na zavetrni strani je tu značilna močna labilizacija zračne mase. Tukaj nastali vertikalni temperaturni gradient očitno celo presega adiabatnega in je atmosfersko stanje v tem območju absolutno labilno ter zato v tako izraziti obliki malo verjetno. Pač pa je

to tipičen primer za možnost nastanka toplih jezer, ki jih je opazoval in obravnaval že Čadež /2/



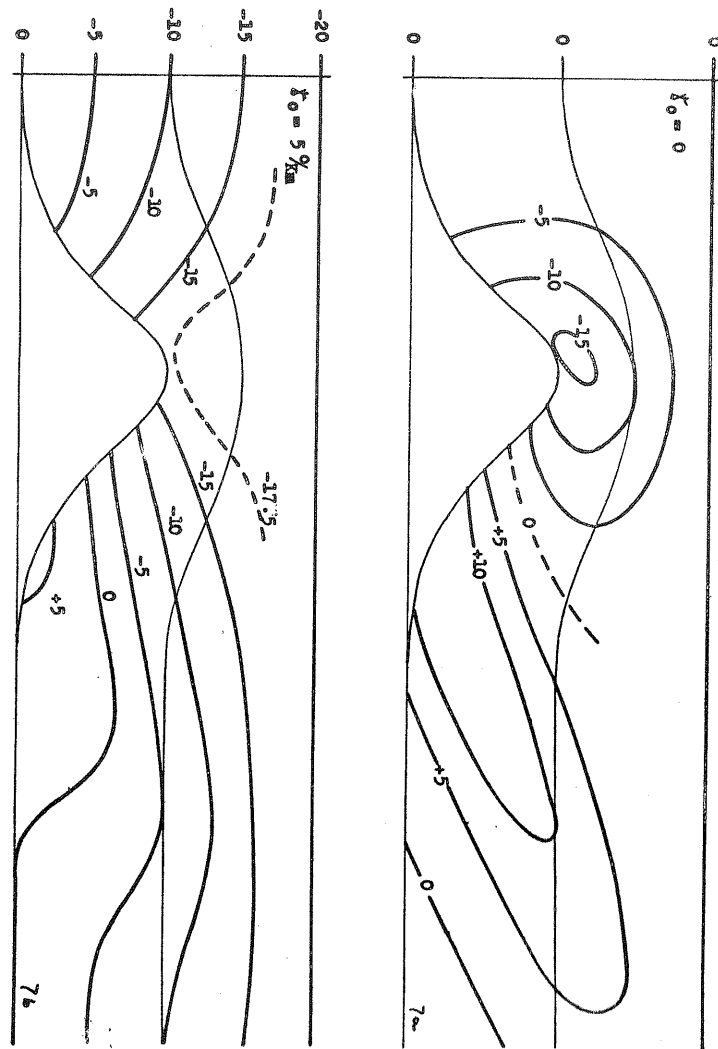
Slika 5 Polja cirkulacije glede na temperaturna polja: a/ k sliki 1b in 2b, b/ k sliki 3c, c/ k sliki 4c.

Fig. 5 Circulation fields regarding the temperature fields: a/ to Fig. 1b and 2b, b/ to Fig 3c, c/ to Fig. 4c.



Slika 6 Temperaturno polje v paralelnem, strižnem začetnem toku / 10^2 / za $\gamma_0 = 5$ °/km - po premiku mase za $S = L/8$.

Fig. 6 Temperature field in the parallel, sheared initial flow / 10^2 / for $\gamma_0 = 5$ °/km - after displacement of the airmass for $S = L/8$.



Slika 7 Temperaturni polji v konfluentnem, strižnem začetnem toku /11B2°/ po premiku zračne mase za $S = L/4$ ob dveh različnih začetnih stratifikacijah.

Fig. 7 Temperature fields in confluent shared initial airflow /11B2°/ after the displacement of air mass for $S = L/4$ at two different initial stratifications.

Ob teh okoliščinah pa se pojavlja tudi deformacija cirkulacijskega polja. Ta je taka, da se smer jedra pozitivnih vertikalnih pospeškov nagne - slika 5c - horizontalna os oziroma središče zavetrne negativne cirkulacije pa se spusti proti podnožju in je v njem verjetno osnova znanega rotorja na zavetrni strani, ki ga često dejansko opazujejo /1, 2, 4, 5/.

Vertikalno vetrovno striženje, kot smo videli, pri stalnem toku nima vpliva na vzorec temperaturnega polja. Ob začetku pretakanja pa ni tako. Medtem ko se n.pr. delci spodaj ob pregradi premaknejo za $S = L/8$, so delci na neki višini, kjer je hitrost osemkrat večja, že čez pregrado /slika 6/. Temperaturno polje se s tem seveda deformira ter se tudi pri paralelnem toku /1B2°/ pojavijo spremembe v stratifikaciji oz. stabilnosti zračne mase nad pregrado in za njo. Taka temperaturna polja so prikazana na slikah 6 in 7.

Ob začetku pretakanja pri vertikalnem vetrovnem striženju in pri $\gamma_0 = -5$ °/km sta si vzorca temperaturnih polj za paralelni in konfluentni tok v bistvenih potezah precej podobna /slika 6b in 7b/. Značilno je povečana labilnost zračne mase nad pregrado predvsem na zavetrni strani, a deloma že tudi pred vrhom - zlasti v zgodnjem začetku pretakanja.

Ob striženju je tudi bolj deformirano solenoidno polje in s tem razporeditev cirkulacijskih pospeškov. Vendar pa se ta tu bistveno ne razlikuje od tiste, ki je podana na sliki 5c.

Okoliščine, ki nastopajo vsakokrat posamič v naravi, so precej spremenljive in odvisne, kot že rečeno, še od mnogih drugih faktorjev. Vendar pa so adiabatne temperaturne spremembe med najbolj učinkovitimi in zato imajo temperaturna polja, ki nastajajo ob pretakanju zraka čez grebene, glavne poteze vzorcev, ki so prikazani na slikah 4c, 6b in 7b. Ti pa so si med seboj tako precej podobni.

Tako smo dobili torej širšo in detajlnejšo predstavo o temperaturnih poljih, ki jih povzročajo adiabatne spremembe pri pretakanju zraka čez gorske gre-

bene v različnih okoliščinah. Iz dobljenih vzorcev sledeče spremembe v stratifikaciji oziroma stabilnosti atmosfere in razporeditev cirkulacijskih pospeškov dajejo novo oziroma dodatno možnost za razlago nastanka valovanja in rotorjev, ki jih opazujemo v zračnem roku nad orografskimi pregradami in za njimi.

LITERATURA

- Queney P in sod.: The Airflow over Mountains, WMO Tech. Note No. 34, Geneva 1960.
- Čadež M : Vreme u Jugoslaviji, Razprave 4, PMF, Beograd 1964
- Petkovšek Z in Ribarič M: On the airflow over mountains with gentle slopes, Tellus XVII, 4, 1965
- Cohen A in Doron E : Mountain Lee Waves in the Middle East, Jour, App. Met. Vol. 6, No. 4, 1967
- Reynolds R D, Lamberth R L and Wurtele M G : Investigation of a Complex Mountain Wave Situation, Jour. App. Met. Vol. 7, No. 3, 1968