

UPORABNOST PILOTBALONSKIH OPAZOVANJ ZA DOLOČITEV
GIBANJ IN STRATIFIKACIJE ZRAKA V KOTLINAH

UTILITY OF PILOT-BALLOON OBSERVATIONS FOR DETERMINATION
OF AIR MOVEMENTS AND AIR STRATIFICATION IN BASINS

551.507.321

551.524.4

ZDRAVKO PETKOVŠEK

Katedra za meteorologijo FNT, Ljubljana

SUMMARY

Vertical wind profiles, which can be used for the study of air movements in cold air lakes in basins, are very scarce and not precise enough. Useful data on inversion layer heights up to about 400 m is also scarce, because radio-sonde measurements in vertical and horizontal direction are spaced too widely.

In this paper, pilot-balloon observations and their characteristics for conditions in basins are evaluated from a critical point of view - with Ljubljana basin serving as an example. A method for analysing pilot-balloon observations is established, on the basis of which the inversion layer height can be estimated; frequency of these heights and strong wind shear at the ground is given.

From the obtained estimates it is possible to make same conclusions about air circulation in the basin below the blocking inversion layer. These air movements determine dispersion of air pollution in basins at critical weather conditions.

POVZETEK

Zelo malo je meritev vertikalnih vetrovnih profilov do take višine in s tako natančnostjo, da bi bilo mogoče določati gibanja v kotlinskih je-

zerih hladnega zraka. Prav tako je zelo malo ustreznih podatkov višin inverzij do višine okrog 400 m, ker so radiosondne meritve za te namene tako v horizontalni kot v vertikalni smeri preredke.

V tem delu je podana kritična presoja pilotbalonskih meritev in njihove značilnosti za pogoje v kotlinah - na primeru za Ljubljansko kotlino. Izdelana je metoda analize pilotbalonskih opazovanj, na osnovi katere je mogoče ocenjevati višino inverzij; podana je pogostnost višin in tudi močnega prizemnega vetrovnega striženja. Iz dobljenih ocen je mogoče dalje sklepati na nekatere karakteristike cirkulacije zraka v kotlinah pod zaporno inverzno plastjo. Ta gibanja so odločilna za širjenje onesnaženja zraka v kotlinah prav ob kritičnih vremenskih razmerah.

UVOD

Neposredne meritve gibanj zraka v mezometeorološki skali so zelo zahtevne in tudi v svetu sorazmerno redke /1/. Zato je potrebno do kraja izkoristiti vse podatke, ki so na razpolago. Svojevrstno pomoč pri ugotavljanju vetrovnih razmer in stratifikacije nam po metodi, ki smo jo tu izdelali, lahko nudijo pilotbalonska opazovanja, čeprav so v splošnem za take potrebe po vertikali preredka. Objavljenih del analiz tovrstnih podatkov s področja SFRJ ni /2/ in tudi sicer se ta vizualni sistem določanja višinskih vetrov opušča, ker v slabših vremenskih razmerah ni izvedljiv.

Razmere v Ljubljanski kotlini smo obdelali na osnovi pilotbalonskih opazovanj v Ljubljani (Bežigrad) in sicer podatke dveh zim - od oktobra do februarja v letih 1958-59 in 1959-60, to je iz časa, ko so bila pilotbalonska merjenja dokaj redna. S tem smo zajeli skupaj deset mesecev zimske dobe, ki je glede onesnaženja zraka najbolj kritična.

Koristno je pri tem upoštevati, da so bile meritve v mestu, kar šteje med zelo hrapav teren /3/. V mestih je tudi nivo turbulentne izmenjave relativno višji in jakost povečana za 20 do 30%. Pri tem je v splošnem in zlasti pri šibkih vetrovih, ki prevladujejo pri nas, termična turbulenca v zvezi s toplotnim otokom važnejša od dinamične.

Pri šibkih vetrovih se razvije tudi samostojna konvergentna cirkulacija, ki smo jo tudi za Ljubljano ugotovili z meritvami ivja /4/.

PRESOJA OPAZOVANJ

Vizualna pilotbalonska opazovanja, pri katerih spremljamo pilotažni balon z optičnim teodolitom, so možna le, če je dovolj dobra vidnost, in so za splošne potrebe smiselna le, če je baza oblakov dovolj visoko. Zato teh opazovanj ni ob megli, ob padavinah in ob nizkih oblakih. Tako se izkaže, da so pravzaprav take meritve, ki naj bi bile štirikrat dnevno, bolj izjemne kot redne. V zajetih dveh zimah je bilo namreč od 1208 možnih pilotbalonskih terminov izvedenih le 312 pilotbalonskih merjenj, kar je slaba četrтина - natančneje 24%.

Z vidika onesnaženja zraka in njegovega širjenja je še posebej neugodno to, da ni teh opazovanj ob megli, ter moramo na vetrovne razmere v njej sklepati iz podatkov sosednjih terminov. Pregled števila pilotbalonskih opazovanj, ki so odpadla zaradi megle v zajeti dobi, nam po terminih daje tabela 1. Ta kaže, da smo ob podatke pilotbalonskih opazovanj zaradi megle največkrat v jutranjem terminu, kar je v skladu z dnevno razporeditvijo naše radiacijske megle; v celoti pa zajemajo primeri z meglo 32% vseh odpadlih pilotbalonskih opazovanj.

Gumijast pilotažni balon, napolnjen z vodikom, se dviga sprva nekoliko hitreje, nato pa z dokaj konstantno hitrostjo (okrog 180 m/s). Lega balona v prostoru se s teodolitom določa vsako minuto, nakar se vrednosti po Molčanovem krogu /5/ preračunajo tako, da dobimo podatke poprečnih hitrosti zanosa balona - hitrosti vetra, v posameznih standardnih plasteh. Razporeditev višin za najspodnejše plasti kaže slika 1.

Pri določanju gibanja zraka v kotlini bi nas zanimali predvsem podrobnejši podatki iz I. plasti. Takih podatkov pa za naše kotline ni, z izjemo nekaterih meritev v Idrijski kotlini /6/. Vendar pa bomo videli, da se ob primerni presoji da ugotoviti nekatere značilnosti gibanja zraka in stratifikacije prizemnih zračnih plasti tudi iz standardnih pilotbalonskih opazovanj.

Termin	01	07	13	19
Štev. odpadlih pilotov	87	109	23	48
Štev. vseh zajetih pilotov ($v \leq 1$ m/s)	48	34	96	62

Tabela 1 Piloti, ki so odpadle zaradi megle v posameznih terminih in število obdelanih pilotov (terminski maksimum bi bil 302).

Table 1 Pilot-balloon observations which failed because of fog at particular hours of observation and number of observations analysed (Highest number of possible observations at particular hour of observation is 302)

Plast	Meje (m)	Srednja višina (m)	Primer	
			smer (o)	hitrost (m/s)
IV	801	707	270	6,2
III	612	513	315	4,5
II	414	315	330	4,0
I	216	108	88	0,7
	0			

veter pri tleh C

Slika 1 Standardne meje srednje višine spodnjih plasti in primer podatkov pilotbalonskih opazovanj in obdelave.

Fig. 1 Standard values of mean heights of lower air layers, and example of pilot-balloon observations and its analysis

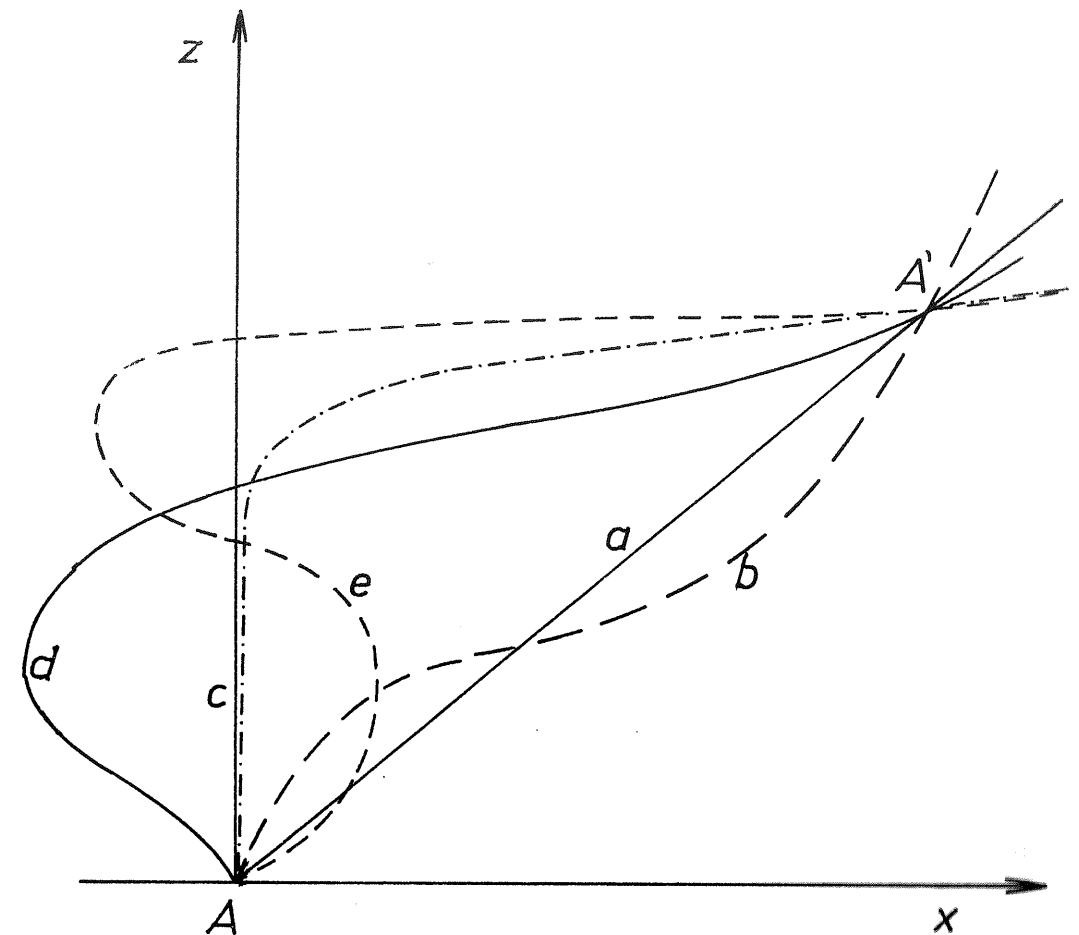
Kot je razvidno s slike 1, je pri vsaki pilotaži podan tudi veter pri tleh. To nam v primerjavi s poprečnimi vetrovi v prvi plasti lahko marsikaj pove o vetrovnih razmerah in o stabilnosti zraka pri tleh. Nas v zvezi z onesnaženjem zraka zanimajo predvsem primeri, ko so pri tleh vetrovi šibki ali ko je tam brezvetrje.

Podatek prve plasti kot popreček, ki naj bi veljal na višini 108 m, je zelo fiktiven. Slika 2 kaže za primer nekaj možnih projekcij poti balona ob enaki poprečni vrednosti hitrosti v plasti I. Iz nje vidimo, da so lahko dejanske razporeditve hitrosti zelo različne, zlasti zato, ker lahko nastopajo v stabilni atmosferi, posebno pa pri inverzijah, izredno močna vertikalna vetrovna striženja - nad $7 \text{ m s}^{-1}/100 \text{ m}$. Pilotbalon lahko z mesta spusta (točka A) pride v točko na zgornji meji plasti (A') naravnost (pot a), ali pri "normalni" vertikalni razporeditvi hitrosti po poti b; če sega jezero hladnega zraka skoraj do vrha plasti I in miruje, bi veljala pot c, če pa ima svojo posebno cirkulacijo - kar je še najverjetneje - pa pot d ali e; nad inverzijo lahko namreč pihajo zelo močni vetrovi. Zato nam šele primerjava podatkov I. plasti z vetrom pri tleh in vetrom v plasti nad njo omogoča nekaj zaključkov o vetrovnih razmerah in celo o stratifikaciji teh plasti. Pri tem je ugodno, da so višine inverzij, kot smo ugotovili na osnovi posebnih opazovanj z Golega, največkrat blizu zgornje meje plasti I in pilotažne vrednosti te plasti veljajo prav za celotno jezero hladnega zraka v kotlini, poprečne vrednosti v plasti II pa za pogoje nad njim. Prav analiza razlik med tema dvema plastema pa nam to potrjuje.

ANALIZA VETROVNIH STRIŽENJ

Kot je bilo že povedano, nas zanimajo predvsem primeri, ko je bilo pri tleh brezvetrje ali veter pod 1 m/s , kar je glede na natančnost merjenj hitrosti vetra praktično isto. Brezvetrje pri tleh je bilo zabeleženo v večini primerov izvedenih pilotbalonskih opazovanj ali točneje, v 76% vseh pilotbalonskih opazovanjih zajete dobe.

Glede na to je koristno ugotoviti jakost prizemnega vetrovnega striženja, ali pa pri kako močnem poprečnem vetru v plasti I je še možno pri tleh brezvetrje. V zajeti dobi je bilo to 24.2. 1960 ob 19. uri pri poprečnem vetru v plasti I $7,1 \text{ m/s}$; drugi primeri z nad 5 m/s v



Slika 2 Nekaj možnih projekcij poti balona v vertikalnem preseku spodnje plasti pilotaže.

Fig. 2 Few possible projections of pilot-balloon path through lower air layers on vertical plane

plastí I pa so razvidni s tabele 2. Pri tem je značilno, da so tako močna vetrovna striženja možna le ponoči, nastopajo pa predvsem zvečer, ko vemo, da se pojavljajo močne in nizke temperaturne inverzije. Tako je posredno močan veter v plasti I ob sočasnem brezvetrju pri tleh indikator zelo močne prizemne temperaturne inverzije in obenem verjetno le plitvega jezera hladnega zraka, kar je glede na genezo najpogosteje v večernih urah.

Na drugi strani nas posebej zanimajo primeri, ko je brezvetrje - točneje rečeno poprečna hitrost - tudi v plasti I enaka nič. Takih primerov je bilo v zajeti dobi 10 in kažejo, da leži tedaj inverzija skoraj gotovo višje od 216 m nad dnom kotline. To velja zlasti tedaj, če so poprečni vetrovi v plasti II sorazmerno močni.

V naslednji stopnji analize ugotavljamo vetrovne razlike med posameznimi plastmi, pri čemer je ob reševanju našega problema najzanimivejši odnos med plastmi I in II. Pri tem ugotavljamo poleg razlik v hitrosti, seveda tudi razlike v smeri poprečnih vetrov. Izsek iz posebej za analizo prirejenega materiala, je kot primer podan v tabeli 3 za čas od 16. do 18. 10. 1959. Kot vidimo, so zaradi nazornosti smeri vetra podane s puščicami, pri čemer je sever zgoraj, hitrosti pa številčno v m/s in to za srednje višine posameznih plasti v skladu s sliko 1.

S primera v tabeli 3 vidimo npr., da je 16. 10. ob 01. uri v prvi plasti sorazmerno šibek poprečen veter od NW, v plasti nad njim pa zmeren od NNE. Menimo, da na veter v plasti I lahko nekoliko vpliva veter v plasti II zaradi turbulentnega prenosa gibalne količine, ker smeri nista bistveno različni, veter zgoraj pa je precej močnejši. Ta vpliv pa je lahko izražen le, če je inverzija pod zgornjo mejo plasti I, in zato označimo njeno "višino" s P - najspodnejša vrsta. Podobno je 17. 10. ob 13. uri; precej drugače pa je npr. 18. 10. ob 01. uri, ko je veter v plasti II (tudi v III) močno različen od tistega v plasti I ter ima celo nasprotno komponento; iz tega lahko sklepamo, da je v tem primeru inverzija nad (N) zgornjo mejo plasti I. Ob 07. uri prvega dne je megla (☉) in ni podatkov, ob 13. uri pa se veter počasi spreminja in krepí navzgor in ni opaziti inverzije (O), podobno kot 17. 10. ob 19. uri, ko je veter vseskozi navzgor po smeri enak in vpliva do tal. Tudi dne 18. 10. ob 13. uri inverzije zagotovo ni, saj segajo tedaj močni vetrovi do tal in je mešanje izdatno - toda teh primerov, kot smo že rekli, ne obravnavamo. Na osnovi prikazanega sistema smo tako na grobo ocenili višino inverzij v Ljubljanski kotli-

Razred v	5. 0-5. 4	5. 5-5. 9	6. 0-6. 4	6. 5-6. 9	7. 0-7. 5
Število primerov	6	2	3	0	1
Termin	01	07	13	19	
Število primerov	3	0	0	9	

Tabela 2 Število primerov brezvetrja pri tleh tedaj, ko je bil v plasti I poprečni veter enak ali večji od 5 m/s - po razredih hitrosti in po terminih opazovanja.

Table 2 Number of cases with calm at surface, when mean wind velocity in layer I was equal to or greater than 5 m/sec according to velocity intervals and hours of observation.

Dan	16.				17.				18.			
	01	07	13	19	01	07	13	19	01	07	13	19
Plast III	↙ 3,8	↘ 1,7	↘ 6,6	↘ 6,3	↘ 7,8	↘ 6,8	↘ 9,0	m/s				
Plast II	↙ 4,0	↘ 1,4	↘ 3,0	↘ 6,3	↘ 8,4	↘ 6,3	↘ 6,0	m/s				
Plast I	↘ 0,7	↘ 1,0	↘ 1,6	↘ 1,1	↘ 7,5	↘ 1,2	↘ 1,5	m/s				
Pri tleh	C	≡	C	C	C	≡	C	↘ 0,5	C	≡	↘ 3,9	m/s
Inverzija	P	O	N	O	N	P	O	N	-			

Tabela 3 Primer - izsek iz posebej za tovrstne analize prirejenih podatkov pilotbalonskih meritev za čas od 16. do 18. X. 1959 (za simbole glej tekst).

Table 3 An example - part taken from pilot-balloon observation data prepared especially for such analysis, for time period 16th - 18th October 1959 (symbols are given in text).

ni. Poleg razloženih simbolov pomeni T talno inverzijo, kar označimo tedaj, ko je pri tleh brezvetrje (C), poprečni vetrovi v plasti I pa večji od 3 m/s ali enaki tej vrednosti. Nadalje smo s H označili primere, ko je inverzija na višinah nad plastjo II; z "z" pa smo neodvisno označili primere, ko ima plast I relativni maksimum hitrosti - veter v plasti II je šibkejši (in seveda pri tleh tudi). Pregled tako klasificiranih primerov obravnavane dobe je podan v tabeli 4.

Iz te tabele vidimo, da je med zajetimi primeri le tretjina takih, ko v razporeditvi vetrov ni indikacije za inverzijo (primeri O), kljub temu, da je zaradi megle odpadlo veliko število primerov, ko nastopa inverzija praviloma. V 30% vseh zajetih primerov je inverzija višje od plasti I to je nad 216 m, v 14% je nekje v zgornjem delu plasti I, v 15% je zelo nizka - talna in le v 8% primerov je inverzija visoko zgoraj nekje med 400 in 500 m relativne višine; višje plasti pa v tej obravnavi niso zajete. Ti podatki ali ocene višin inverzij so v dokaj dobrem soglasju z rezultati opazovanj zgornje meje megle v Ljubljanski kotlini, opazovane z Golega.

SPODNJA PLAST IN SKLEP

Posebej so zanimivi primeri, ko ima hitrost vetra sorazmerno blizu tal v plasti I sekundarni maksimum (low level jet - stolpec z v tabeli 4). V takih primerih je gibanje zraka okrepljeno z vplivi, ki verjetno delujejo prek lokalnih sprememb zračnega pritiska kot posledica toplotnega otoka ali advekcije toplejšega in hladnejšega zraka v odvisnosti od reliefnih razmer. Takih primerov je sorazmerno veliko - skupaj 38, njihova razporeditev po opazovalnih terminih pa je razvidna s tabele 5. Očitno je relativno več takih primerov zvečer in ponoči, kar povezujemo z zlivanjem hladnega zraka s pobočij in stranskih kotlin ob nastajanju jezera hladnega zraka v kotlini. Morda pa gre pri tem včasih tudi za enoten usmerjen tok zraka skozi kotlino ob iztoku čez najnižje predele obrobni grebenov - tega iz teh podatkov ni mogoče trditi, ker so smeri najrazličnejše in ne prevladuje NW komponenta, kar bi bilo v skladu z reliefom; je pa tudi Yoshino /7/ ugotovil, da so vetrovi na robovih kotlin in blizu njihovega dna najbolj zamotani.

		N	P	O	H	T	z
Oktober	1958	3	8	10	5	1	7
November		1	3	2	1	1	2
December		2	3	9	1	2	5
Januar	1959	11	2	9	0	6	8
Februar		21	2	10	4	9	2
Oktober	1959	12	5	17	2	5	6
November		8	0	5	0	3	1
December		2	0	1	1	1	1
Januar	1960	6	5	6	3	2	4
Februar		6	4	8	2	6	2
Skupaj		72	32	77	19	36	38
Skupaj v %		30	14	33	8	15	

Tabela 4 Pogostnost posameznih višin inverzij po posameznih mesecih in skupno; za simbole glej tekst.

Table 4 Frequency of particular inversion heights according to months and their sum. Symbols denote: inversion height above (N) and under (P) 216 m; O - no inversion, H - high inversion, T - surface inversion; z - the wind in layer I has relative maximum.

Termin	01	07	13	19
Pogostnost	8	3	16	11
Pogost. v % glede na štev. pilotbalonskih opazovanj	17	9	17	18

Tabela 5 Pogostnost primerov z relativno najmočnejšim vetrom v plasti I (sekundarni maksimum) po posameznih terminih.

Table 5 Frequency of cases with the relatively strongest wind in layer I (secondary maximum) according to particular hours of observation

Termin	01	07	13	19
Popr. hitrost (m/s)	2,0	1,7	1,5	2,7
Štev. meritev	48	34	96	62

Tabela 6 Poprečne hitrosti vetra v plasti I po terminih in število zajetih opazovanj.

Table 6 Mean wind velocities in layer I according to hours of observations and number of observations studied.

Ker se prav v plasti I širi večina onesnaženja zraka v kotlinah, zasluži ta še nekaj pozornosti. Iz nadaljnje obravnave izločimo primere O, ko ni bilo inverzije, in T, ko je bila inverzija le nizko pri tleh. Tako dobimo grobo sliko o gibanju zraka v celotnem jezeru hladnega zraka, ko je ta zgoraj omejen z inverzijo tipa N in P - žal velja to le za skupno oziroma poprečno gibanje celotne plasti I. Te hitrosti in pogostnosti primerov po urah so razvidne s tabele 6.

Iz tabele 6 vidimo, da so v zajeti zimski dobi največje hitrosti zvečer in ponoči in najmanjše opoldne. To je prav nasprotno, kot velja za izvenkotlinске pogoje zlasti nad ravninami, kjer se gibalna količina geostrofskih vetrov prenaša navzdol najboljše opoldne, ko je labilnost ozračja največja. Očitno delujeta v kotlini vsaj dva faktorja, ki postavljata zadevo na glavo. Prvi je inverzija v zgornjem delu jezera hladnega zraka, ki preprečuje kakršnikoli vpliv geostrofskih vetrov v samo jezero. Na drugi strani - čisto pri tleh - pa je zlasti ponoči zrak tudi močno stabilno stratificiran, tako da je zaviralni vpliv hrapavosti tal močno zmanjšan: nad talno - nekaj deset metrov debelo plastjo zelo ohlajenega zraka, drsi le nekoliko toplejši zrak lokalne cirkulacije kotlinskega jezera hladnega zraka - bodisi zaradi stekanja s pobočij in stranskih dolin bodisi zaradi konvergentnih gibanj ob toplotnem otoku mesta. Ker je talna inverzija najbolj izrazita zvečer in poprečna hitrost v plasti I tedaj največja, pomeni to, da je v zimskem času ta "izglajevalni učinek" talnih inverzij na hrapavost tal med najpomembnejšimi za kotlinske tokove in širjenje onesnaženja v njih. Deloma pa so maksimalne hitrosti ob 19. uri posledice tudi tega, da so tedaj stekanja zraka v kotlino, ko se jezero prične polniti, najmočnejša in jih skoraj ni zjutraj, ko je vsaj v spodnjem delu kotlina že zapolnjena.

Opoldne oziroma ob 13. uri labilizacija zraka v prizemni plasti poveča zunanje trenje, eventualna vertikalna gibanja pa tudi notranje trenje horizontalnih gibanj pod inverzno plastjo, ki pogosto vztraja ves dan. Zato so horizontalna gibanja in izmerjeni poprečni vetrovi v plasti I ob 13. uri najšibkejši in ne najmočnejši, kot so sicer nad ravninami.

Potrditvev o največji pogostnosti inverzij na višinah okrog zgornje meje plasti I nam daje primerjava smeri vetrov - vetrovni striženj smeri med to in višjo plastjo. Vzemimo, da mora biti razlika v smeri vetrov ene in druge plasti več kot 90° kar pomeni, da imata vetrova neko nasprotno komponento. Ugotovimo pogostnost takih primerov za

para plasti I in II ter za II in III - ustrezni števili sta 56 za prvi par in 17 za drugi par. Močna vetrovna striženja so vsekakor znak diskontinuitete, ki pa je le izjemoma brez vzporedne diskontinuitete v stratifikaciji atmosfere. Tudi iz tega lahko torej sklepamo, da so inverzije blizu meje med plastema I in II na višini malo nad 200 m več kot trikrat pogostnejše kot na višinah okrog 400 m.

S to obdelavo smo očitno dobili nove vpoglede v dogajanja v jezerih hladnega zraka v kotlinah in o višini njegove zgornje meje v Ljubljanski kotlini. Vidimo, da so gibanja v kotlinah zares zelo specifična in je širjenje onesnaženja zraka pogosto izrazito stratificirano, to je, omejeno na posamezne zračne plasti, kjer so zato lahko koncentracije zelo visoke.

Delo je del raziskovalne naloge "Širjenje onesnaženja zraka v kotlinah - II", Sklad Borisa Kidriča, RSS - 2-784/1395-74.

LITERATURA

- /1/ Munn R.E.: Airflow in urban areas, Urban Climates, WMO No. 254, TP 141, Geneva 1970.
- /2/ Dobrilović B.: Visinsko strujanje iznad Jugoslavije i prizemni karakteristični vetrovi, Rasprave 3, Prir. - matematički fakultet, Beograd 1960.
- /3/ Oke T.R.: Review of Urban Climatology, WMO No. 383, Geneva 1974.
- /4/ Petkovšek Z.: Širjenje onesnaženja zraka v kotlinah, Zaštita atmosfere 3, JDČV, Sarajevo 1974
- /5/ Reger J.: Aerologische Messmethoden; Technik der Gummiballone, Handbuch der Met. Instrumente, Jul. Springer Verlag, Berlin 1935.
- /6/ Petkovšek Z. in sod.: Študija o klimatskih razmerah in gibanju zraka na območju mesta Idrije, ekspertiza FNT, Ljubljana 1973 (neobjavljeno).
- /7/ Yoshino M.M.: Climate in a Small Area, University of Tokyo Press, 1975.