

DOPRINOS K POZNAVANJU RAZMER V JEZERU HLADNEGA ZRAKA
V LJUBLJANSKI KOTLINI

A CONTRIBUTION TO THE KNOWLEDGE OF COLD AIR LAKE
CHARACTERISTICS OF THE LJUBLJANA BASIN

551.524.77

ANDREJ HOČEVAR in ZDRAVKO PETKOVŠEK

Univerza v Ljubljani

SUMMARY:

In the present paper temperature and relative humidity profiles of the boundary layer are studied in the Ljubljana basin up to the height of 130 meters, viz. 360 meters. The basis for this study were measurements with thermohygrographs mounted on antenna tower at the bottom of the Ljubljana basin. Measurements were made during the winter time - 25 November and 23 December 1970. For comparison temperature measurements made on a summit of a lonely hill - 10 kilometers away - were taken into consideration. This hill with the name "Šmarna gora" is steeply rising above the bottom of the basin.

Comparison of temperature curves from different heights is based on the assumption that the considered boundary layer is isothermal at stable conditions. For the comparison of relative humidity curves the following assumption is utilised: At the moments when maximal values are obtained they are equal in spite of being measured at different heights. Curves of relative humidity then overlap.

In the period treated anticyclonic weather regime prevailed with short interruptions connected with cold and warm air intrusions. Therefore we have in spite of the short period treated three examples of creation of cold air lake in the basin. Starting days were: 26 November, 4 and 19 December (Figs. 1, 2 and 4). On the first day after the intrusion, when the weather is clear and quiet, the most warmed up is the air layer at the surface or on the top of the tower. The station on the hill is usually colder or at the most it has the same temperature as the air layer at the surface. In the afternoon the air at the surface starts to cool from the surface which cools

off by radiation. Soon the air at the surface is colder from the one at the top of the tower and from the one at the top of the hill as well. At the bottom of the basin fog is created. The next day fog lasts the whole day. The daily temperature rise and the fall of the relative humidity at the surface are hardly seen but at the top of the tower they are still quite noticeable; Fog is relatively shallow. The station on the hill is considerably warmer than the air at the bottom of the basin. A day later the daily temperature rise and the fall of the relative humidity are also hardly noticeable at the top of the tower. The lake of fog and of cold air is considerably higher than the tower.

In winter time the cause of collapse of such cold air lake is always a strong advection. The process of collapse starts at the top and moves slowly downwards. Temperature and relative humidity profiles at the time of collapse differ from example to example.

UVOD

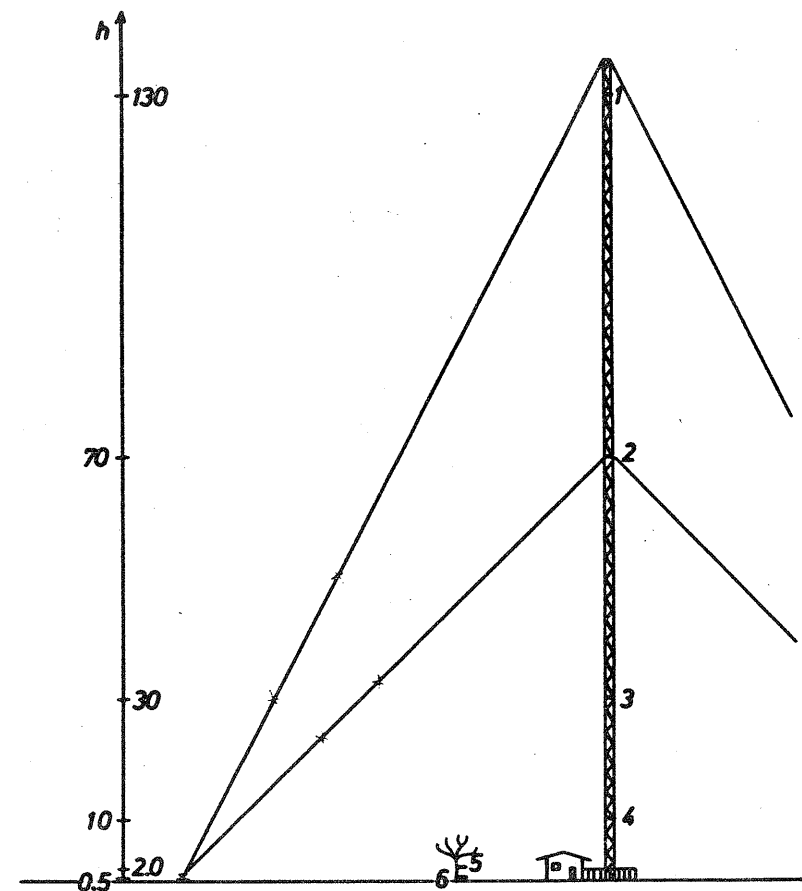
Poznavanje temperaturne stratifikacije in razporeditve vlage v prizemni zračni plasti je ena izmed osnovnih zahtev pri teoretičnih obravnavah številnih procesov v atmosferi. Tako nam je ta podatek potreben med drugim pri študiju megle /1, 2/, študiju pobočnih vetrov /3/, študiju širjenja onesnaženja v atmosferi /4/ itd.

V Sloveniji direktnih meritev temperaturne stratifikacije in razporeditve vlage v prizemnih plasteh atmosfere, razen nekaj podatkov do višine 25 m /5/, še nismo imeli, kljub temu da so ti podatki tako pomembni. O teh vrednostih lahko sklepamo le na osnovi meritev na bližnjih radiosondažnih postajah in na višinskih postajah. Podatki radiosondažnih postaj Zagreba, Vidma in Dunaja zaradi razgibanosti reliefa, zlasti v kotlinah, kljub majhni oddaljenosti ne morejo biti brez dodatnih meritev dobra osnova za interpolacijo. Na višinskih postajah pa vrednosti meteoroloških elementov niso enake onim v prosti atmosferi. Če hočemo torej razporeditve temperature in vlage v prizemnih plasteh poznati, so na vsak način potrebne meritve.

S skromnimi sredstvi, ki so na voljo in z razpoložljivimi instrumenti smo se takih meritev lotili. Merili smo temperaturo in relativno vlago na različnih višinah ob stolpu radijske antene pri Domžalah - do višine 130 m. Analiza trakov in njihova primerjava med seboj in z drugimi podatki je dala nekaj zanimivih rezultatov, ki jih bomo spoznali v tem članku.

MERITVE

Na stolpu radijske antene pri Domžalah smo na raznih višinah obesili termografe in termohigrografe. Termohigrografa na višinah 2 m in 0,5 m pa sta bila na bližnjem osamljenem drevesu (slika 1). Vsak instrument smo zaščitili pred direktnim sončnim obsevanjem z belim plastičnim zaklonom, ki je bil narejen tako, da je omogočal izdatno prevetravanje. Trakove smo menjavali v nočnih urah enkrat tedensko, pač tedaj, ko oddajnik ne oddaja. Zato, da smo si olajšali delo, smo termohigrograf in termograf na višinah 130 m in 70 m spuščali na tla po škripcu. Po termohigrograf in termograf na višinah 30 m in 10 m pa smo splezali po stolpu. Tako smo dobili zapise temperatur in relativne vlage za čas od 25. XI. 1970 do 23. XII. 1970.



Slika 1 Položaj merilnih točk na in ob antenskem stolpu pri Domžalah.
Fig. 1 Observation points on and at the antenna tower at Domžale.

Tabela 1 Naši kraji glede na sinoptično situacijo, podatki 500 mb ploskve za Udine in vremenski tip, zračni pritisk ob 7^h ter maksimalna hitrost vetra v Ljubljani

Table 1 Region of Slovenia according to synoptic situation, data of 500 mb level at station Udine, and weather type, atmospheric pressure at 7 a. m. and maximal wind velocity at Ljubljana

Dan	Naši kraji glede na sinoptične karakteristike ob 1h		Udine na 500 mb		Ljubljana pri tleh		
	pri tleh	500 mb	(km/h)	(°C)	vremenski tip	pritisk (mb)	veter (m/s)
25. XI.	SW del A	E od osi G	N 20	-19	AC4	1027,4	1,0
26.	"	"	NNE 30	-17	W4-AW4	10320	3,5
27.	S del A	"	NNE 30	-21	1Ax	10334	1,5
28.	A	NE rob G	NW 50	-22	1Ax-AC4	10290	1,0
29.	NW del A	NE rob G	WNW 40	-19	1Ax-S7	10230	4,8
30.	Topli sektor C	NW rob G	SW 120	-19	S4	10158	5,0
1. XII.	slaboten G	E od osi D	WSW 80	-19	1Ax-S4	10178	2,0
2.	slaboten G	E od osi D	W 90	-29	AN7	10195	1,6
3.	NE del A	W od osi D	NW 40	-26	1Ax-S6	10215	4,0
4.	po NW prodoru	W od osi D	NW 160	-17	A3	10215	3,0
5.	A greben	E od osi G	NW 80	-20	E7	10262	1,0
6.	A greben	W od osi D	NNW 40	-27	1Ax	10324	0,9
7.	A greben	na osi G	W 50	-24	1Ax-S5	10280	1,0
8.	topli sektor Gen. C	E od osi D	SW 60	-25	C6	10314	1,5
9.	SE del A	W od osi D	NE 40	-21	N4	10387	1,6
10.	SE del A	SE del A	NE 40	-19	W4	10370	5,8
11.	SE del A	SE del A	NNE 30	-21	N4	10386	2,5
12.	jedro A	jedro A	ESE 10	-21	AC4	10359	1,6
13.	jedro A	jedro A	SW 40	-22	1A4	10335	1,0
14.	A greben	E od osi D	SW 40	-25	1Ax	10320	0,8
15.	A greben	na osi D	WSW 50	-27	AC6	10295	1,1
16.	SE del A	na osi D	NW 20	-29	A5	10342	2,0
17.	jedro A	SE del A	NE 40	-25	AC4	10347	1,0
18.	A greben	E del A	NE 50	-25	E4	10275	1,0
19.	A greben	W od osi D	NE 30	-31	AC6-Ao	10300	1,0
20.	jedro A	SE del A	E 40	-23	1Ax	10323	1,0
21.	A greben	A greben	SW 10	-22	1A7	10246	0,7
22.	Gen. C	na osi D	WSW 70	-30	SC7	10188	5,0
23.	Gen. C	na osi D	SW 80	-33	N6	10154	9,8

Simboli: A-anticiklon, C-ciklon, G-greben, D-dolina

Kot je znano so termohigrografi predvsem relativni instrumenti in jih zato navadno kontroliramo z absolutnimi instrumenti. Na žalost to v naših opazovalnih točkah na stolpu ni bilo mogoče. Prav zato smo pri vrednotenju podatkov naleteli na številne težave. Instrumente smo sicer pred in po name-

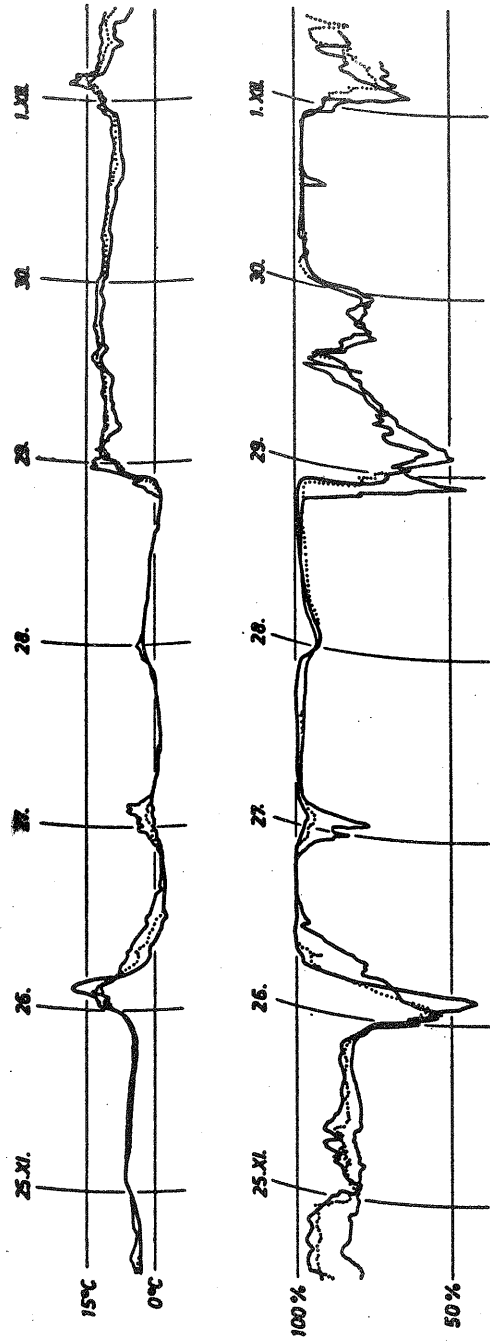
stitvi kontrolirali z Assmanovim psihrometrom, vendar so se tako dobljene korekcije izkazale nezanesljive, ker so bile pred in po enotedenski registraciji močno različne. Vzrok za to je bil najbrže v transportiranju instrumentov na opazovalno točko. Kot neuporabna se je izkazala tudi korekcija, ki smo jo dobili tako, da smo pri močnem vetru (23. XII. 1970 v Ljubljani 9,8 m/s) predpostavili suhoadiabatno temperaturno stratifikacijo in tako dobljene temperature primerjali z izmerjenimi vrednostmi.

Ugotavljanje temperaturne stratifikacije na osnovi tako korigiranih vrednosti torej ni bilo mogoče. Izdelati je bilo potrebno metodo, s katero bi se dalo najbolj pravilno ovrednotiti izmerjene vrednosti, pri tem pa upoštevati natančnost instrumentov. To je bila težavna naloga, ki jo je bilo praktično nemogoče rešiti brez uporabe predpostavk.

Predpostavke so lahko bolj ali manj utemeljene. Nam se je zdela najbolj utemeljena naslednja. V zimskem času je atmosfera v splošnem stabilna. Na osnovi tega dejstva in pa vremena v času merjenj, opisano je z vremenskimi tipi, katerih kratke definicije najdemo v /6/ (tabela 1) lahko z veliko verjetnostjo sklepamo, da je bila atmosfera v tem času, vsaj v delih dneva, recimo v nočnih in zgodnjih jutranjih urah (slika 2-5), v celotnem stoju do višine 130 m približno izotermna. To se v bistvu ujema z meritvami Kolenkove /1/. Ta predpostavka nam omogoča (na kopirni mizi prekrijemo ustrezne odseke temperaturnih krivulj eno z drugo), da lahko ugotovljamo kakšni so medsebojni odnosi temperaturnih krivulj v širšem časovnem intervalu temperaturnih ekstremov.

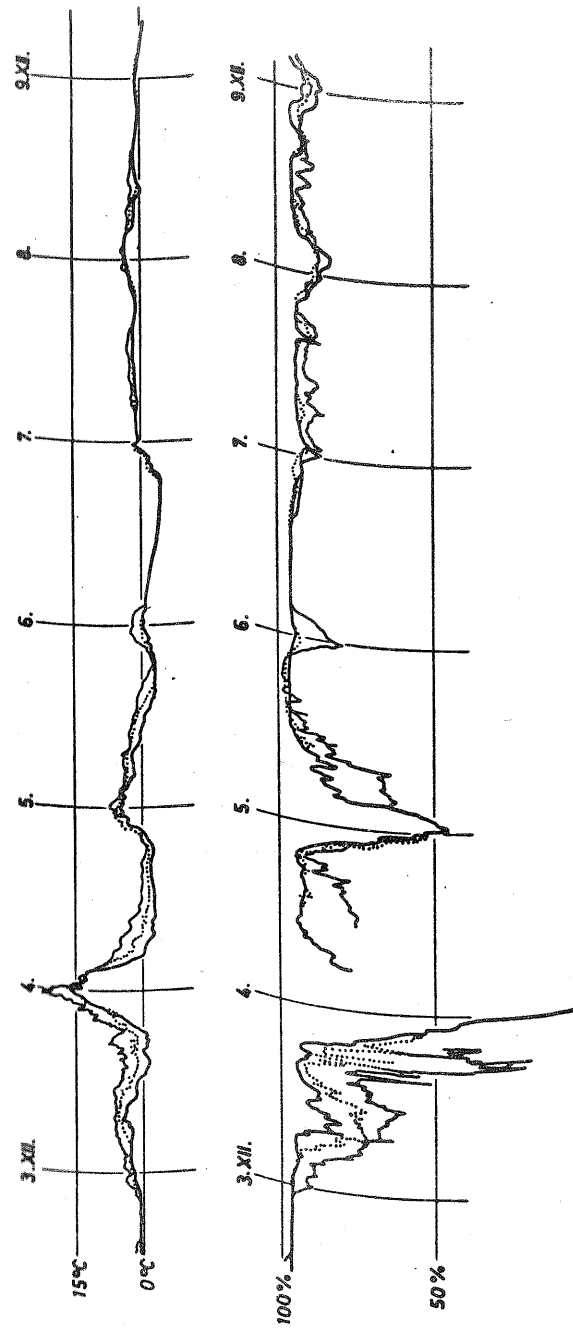
Temperaturne krivulje potekajo na različnih višinah v nekaterih večurnih intervalih pa tudi po nekaj dni skupaj praktično enako (slika 4). Iz tega sklepamo, da smo z našim predvidevanjem o izotermiji pravim vrednostim zelo blizu. Naše vrednosti se lahko razlikujejo od pravih le za majhne aditivne konstante, ki so za različne višine različne in odvisne od resnične temperaturne stratifikacije. Če predpostavimo za obdobje 10. XII. 1970 do 15. XII. 1970 adiabatno atmosfero, kar predstavlja ekstrem, ki je povsem nerealen, znaša ta aditivna konstanta za najvišjo merilno točko na vrhu stolpa komaj nekaj nad 1° C, za točko na višini 30 m pa le nekaj desetink stopinje, kar je v območju merilne in določitvene napake, ki izvira iz debeline krivulje. Če pa predpostavimo inverzijo, ki je še izrazitejša od izotermije, so iz meritev ugotovljene inverzije - in te nas najbolj zanemajo - v resnici še izrazitejše in dalj časa trajajoče. Razlike med "pravimi" vrednostmi in vrednostmi, ki smo jih ugotovili z našo predpostavko, so torej praviloma majhne in ne pokvarijo bistveno ugotovljene temperaturne stratifikacije.

Primerjava krivulj relativne vlage na različnih višinah je bila znatno lažja. Ker je v zimskem času relativna vlaga v prizemni plasti zraka pogosto velika, je v enem tednu večkrat narasla na vrednost blizu 100 % na vseh višinah. Tedaj smo krivulje prekrivali in spet naredili napako kvečjemu nekaj procentov, kar je natančnost instrumenta. To je bila potem osnova za ugotavljanje razlik v času, ko te najvišje vrednosti niso bile dosežene.



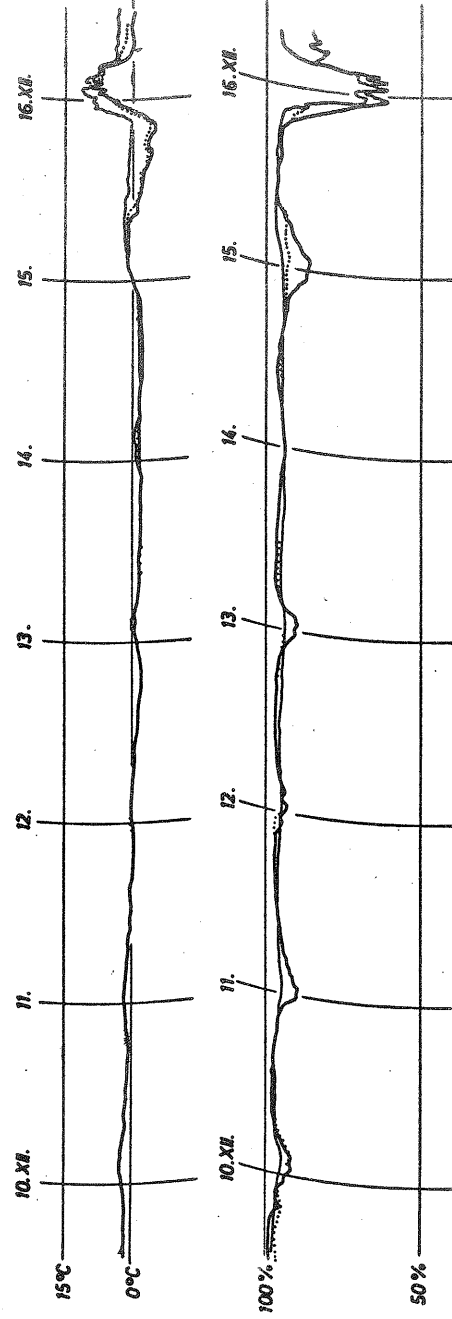
Slika 2 Potek temperature in relative vlage na raznih višinah v času od 25.XI. do 1.XII.1970 (debela črta - višina 2 m nad tlemi, tanka črta - višina 130 m, pikčasta črta - višina 30 m)

Fig. 2 Variation of temperature and relative humidity at various heights during the period 25.XI. and 1.XII.1970 (heavy line - height 2 meters above the surface, thin line - height 130 meters and dotted line - height 30 meters)



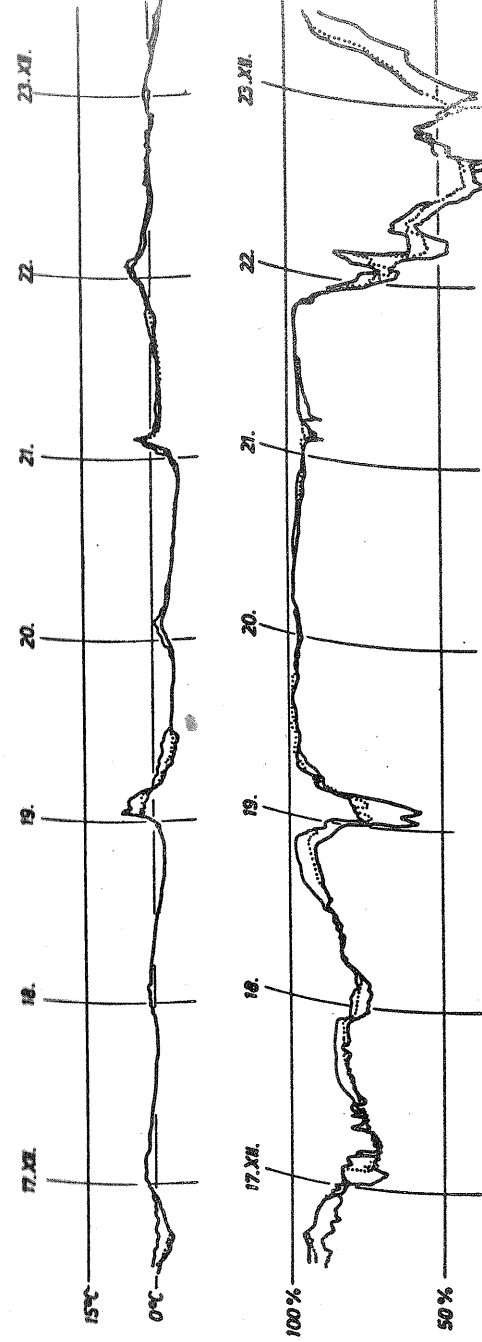
Slika 3 Potek temperature in relative vlage na raznih višinah v času od 3.XII. do 9.XII.1970 (debela črta - višina 2 m nad tlemi, tanka črta - višina 130 m, pikčasta črta - višina 30 m)

Fig 3 Variation of temperature and relative humidity at various heights during the period 3.XII. and 9.XII.1970 (heavy line - height 2 meters above the surface, thin line - height 130 meters and dotted line - height 30 meters)



Slika 4 Potek temperature in relativne vlage na raznih višinah v času od 10. XII. do 16. XII. 1970 (debela črta - višina 2 m nad tlemi, tanka črta - višina 130 m, pikčasta črta - višina 30 m)

Fig. 4 Variation of temperature and relative humidity at various heights during the period 10. XII. and 16. XII. 1970 (heavy line - height 2 meters above the surface, thin line - height 130 meters and dotted line - height 30 meters)



Slika 5 Potek temperature in relativne vlage na raznih višinah v času od 17. XII. do 23. XII. 1970 (debela črta - višina 2 m nad tlemi, tanka črta - višina 130 m, pikčasta črta - višina 30 m)

Fig. 5 Variation of temperature and relative humidity at various heights during the period 17. XII. and 23. XII. 1970 (heavy line - height 2 meters above the surface, thin line - height 130 meters and dotted line - height 30 meters)

Ker so bili tudi vsi instrumenti, katerih krivulje smo primerjali enaki, menimo, da je takšna primerjava krivulj relativne vlage upravičena.

Mnoge spremembe so izraziteje podane s krivuljo relativne vlage, ker je amplituda relativne vlage na termohigrogramu znatno večja od amplitude temperature. Obe količini imata sicer zrcalni potek, kar sledi iz naslednjega.

Definicija relativne vlage je

$$U = \frac{r}{r_w} \quad 1$$

kjer je r dejansko, r_w pa nasičenostno razmerje mešanosti. Z logaritmično diferenciacijo gornje enačbe in z upoštevanjem Clausius - Clapeyronove enačbe dobimo za relativne spremembe relativne vlage enačbo

$$\frac{dU}{U} = \frac{dr}{r} - A \frac{dT}{T} + \frac{dp_d}{p_d} \quad 2$$

Relativne spremembe zračnega pritiska (v celoti ali suhega zraka) so zelo majhne in zato lahko zadnji člen na desni gornje enačbe zanemarimo. Srednji člen kaže, da so spremembe relativne vlage po predznaku nasprotni temperaturnim; potek relativne vlage je tedaj zrcalna slika temperaturnega poteka, toda s povečano amplitudo za faktor A . Ta ima približno vrednost $A = 20$, sicer pa je določen takole

$$A = \frac{L}{R_v T - e_w \alpha_a} \quad 3$$

kjer so L latentna toplota izhlapevanja, R_v plinska konstanta vodne pare, e_w nasičenostni parni pritisk in α_a specifični volumen vode. Drugi člen v imenovalcu je v primerjavi s prvim zanemarljiv; vrednost faktorja A je torej večja pri nižjih temperaturah. Iz tega sledi, da je amplituda relativne vlage razmeroma večja pozimi kot poleti (k temu prispeva še sprememba latentne toplote, ki se spreminja s temperaturo - je pri nižjih temperaturah višja). Iz tega sledi, da je amplituda relativne vlage pri enakih temperaturnih spremembah razmeroma večja pozimi kot poleti.

Poglejmo si še vpliv prvega člena na desni strani enačbe 2, ki daje spremembo relativne vlage zaradi sprememb razmerja mešanosti (oz. absolutne vlage ali parnega pritiska). Ker je pozimi razmerje mešanosti razmeroma nizko, so tudi majhne spremembe absolutne vlage v poteku relativne vlage močno izražene in je vpliv tega člena pomemben. Res pa je, da hladen zrak v kotlinah pozimi skoraj miruje in so zato spremembe v absolutni vlagi predvsem posledica kondenzacije (v zraku v obliki meglenih kapljic in na tleh kot rosa in slana), medtem ko je advekcija absolutne vlage zaradi sta-

bilne stratifikacije večino časa neznatna. Velika je seveda advekcija pri občutnejših vremenskih spremembah, zlasti ob prodorih toplejšega zraka, kar je zato v potekih vlage močno izraženo. Vse te spremembe v absolutni vlagi, ki jih obsega prvi člen torej vplivajo na to, da krivulja relativne vlage ni pravilna zrcalna slika temperaturne krivulje, ampak je bolj ali manj izmaličena. Prav v tem izmaličenju pa se kažejo spremembe absolutne vlage.

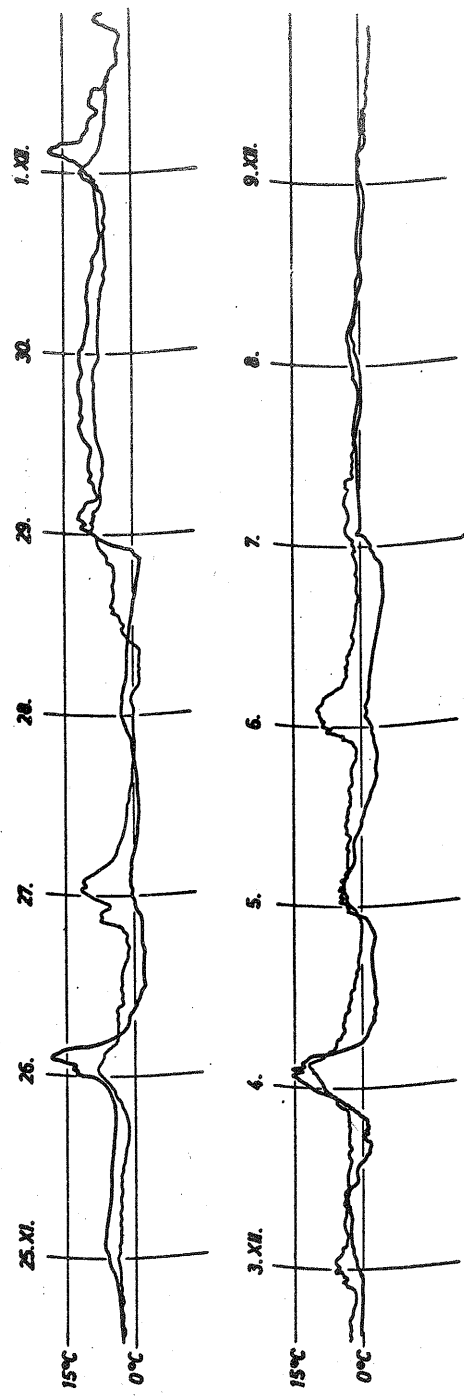
Primerjava krivulj temperature in relativne vlage nam napr. že takoj v prvem tednu meritev (slika 2) kaže v pretežnem delu krivulje pravilno zrcaljenje s povečano amplitudo pri krivuljah relativne vlage, kar je v skladu z gornjimi razmišljanji.

ANALIZA IN DISKUSIJA

Na osnovi prej omenjenih postavk, so združeno prikazane krivulje temperature in relativne vlage za višine 2 m, 30 m in 130 m na slikah 2 do 5. Za podrobnejšo analizo smo izbrali samo te višine zato, ker so bili v teh treh točkah enaki instrumenti (izdelek firme Lambrecht). Slike z več kot tremi krivuljami tudi niso pregledne. Analiza teh krivulj, primerjava s sinoptičnimi situacijami in potekom temperature in relativne vlage na okoli 360 m višji postaji - Šmarni gori - nam je dala naslednje rezultate.

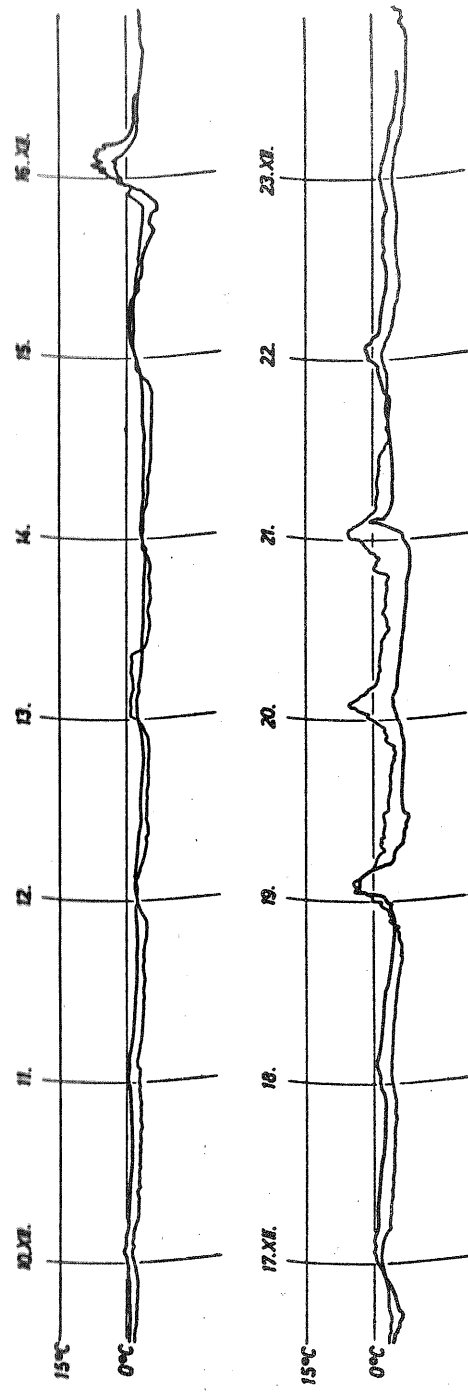
Po oblačnem vremenu 25. XI. 1970, ko smo postavili instrumente, se je 26. XI. popoldne zjasnilo. Sončno obsevanje je najbolj ogrelo plast zraka pri tleh, kar se kaže v ustreznih razporeditvi temperatur po višini. Po maksimumu, ki je bil pri tleh dosežen okrog 15^h in je bil za ca 5° C višji od temperature na vrhu stolpa ter za ca 11° C od temperature zraka na Šmarni gori, je začela temperatura padati. Okrog 17^h je temperatura pri tleh padla pod vrednost temperature na vrhu stolpa, prav kmalu za njo padla tudi temperatura na višini 30 m. Že okrog 19^h se je temperatura pri tleh znižala za okrog 6° C pod temperaturo vrha stolpa. Med 22^h in 23^h pa je temperatura vrha stolpa padla pod vrednost temperature na Šmarni gori. Razlika med vrhom stolpa in tlemi se je potem počasi zmanjševala tja do 6^h zjutraj, ko so se temperature na vrhu stolpa in pri tleh praktično izenačile. Jezero hladnega zraka je torej ob tej uri že preseгло višino stolpa.

Ponoči med 26. in 27. XI. se je pojavila megla, ki je potem trajala skoraj dva dni. 27. XI. je preprečevala ogrevanje zraka pri tleh, medtem je vrh stolpa gledal iz megle, kar se pozna na krivuljah temperature in relativne vlage. Šmarna gora je očitno nad jezerom hladnega zraka in megle in je zrak na vrhu ob času dnevnega maksimuma (ob 14^h) kar za 10,7° C toplejši od zraka pri tleh. K tako visoki temperaturi prispeva gotovo tudi od gornje meje megle odbito sončno sevanje. V teh dneh je posebno značilna tudi razlika v razporeditvi relativne vlage na različnih višinah.



Slika 6 Potek temperature na Šmarni gori in pri domžalskem stolpu na višini 2 m v času od 25. XI. do 9. XII. 1970 (brez 2. XII.) (debela črta - domžalski stolp, tanka črta - Šmarna gora)

Fig. 6 Variation of temperature at Šmarna gora and at the antenna tower at the height 2 meters during the period 25. XI. and 9. XII. 1970 (without 2. XII.) (heavy line - antenna - Tower, thin line - Šmarna gora)



Slika 7 Potek temperature na Šmarni gori in pri domžalskem stolpu na višini 2 m v času od 10. XII. do 23. XII. 1970 (debela črta - domžalski stolp, tanka črta - Šmarna gora)

Fig. 7 Variation of temperature at Šmarna gora and at the antenna tower during the period 10. XII. and 23. XII. 1970 (heavy line - antenna tower, thin line - Šmarna gora)

Zelo pravilna zrcalnost krivulj relativne vlage in temperature namreč kaže na to, da je bila v obeh dneh absolutna vlaga dokaj stalna in so bile spremembe relativne vlage posledica temperaturnih sprememb.

Po temperaturnem maksimumu 27. XI. je začela temperatura padati. Medtem ko je padla na tleh do 28. XI. zjutraj le za 2° C, je padla na Šmarni gori za več kot za 12° C. Padec temperature na Šmarni gori opazimo vse do dnevnega maksimuma, ki je nadaljnji padec temperature ustavil in jo dvignil, vendar le za 1° C. Že čez nekaj ur je začela temperatura ponovno padati. Vzrok za takšno temperaturno razporeditev iščemo lahko v debelitvi meglene jezera, ki je v noči med 27. in 28. XI. preseglo višino Šmarne gore. Zrak na Šmarni gori, ki je bil do tedaj znatno toplejši, se je ohladil pod temperaturo zraka pri tleh v Domžalah. Temperaturne krivulje spodnjih plasti (meritve na stolpu) so pri tem potekale praktično paralelno (slika 2).

Krivulje temperatur in relativne vlage v dneh 26. 27. in 28. XI. nam lepo pokažejo nastanek poznojesenske ali zimske meglene periode v kotlinskem jezeru hladnega zraka. Iz tega primera vidimo, da se jezero hladnega zraka postopno debeli, da se pri tem plasti zraka nad njim še ogrevajo, kar povečuje stabilnost. Ta pa spet preprečuje vertikalno izmenjavo zraka in s tem naravno čiščenje onesnaženega zraka pri tleh. Režim je vztrajen in se celo krepi, dokler ne nastopi bistvena sprememba vremenske situacije.

Nenadna in močna otoplitev, ki je nastopila dopoldne 29. XI. je spremenila vremenski režim. Glede na temperaturno krivuljo bi to otoplitev kaj lahko imeli že za prodor toplejšega zraka, kar pa glede na potek relativne vlage ne more biti. Pa tudi zrak, ki je polnil kotlino nekaj dni, ne more v trenutku izginiti /7/. Zrcalnost poteka temperature in vlage kaže, da ni šlo za spremembo zračne mase (ta bi kot toplejša morala biti bolj vlažna) ampak za ogrevanje zraka v prizemni plasti trenja s turbulentnim mešanjem in delno sončnim obsevanjem oziroma konvekcijo. Isto nam potrjuje tudi analiza časovnega poteka. Razkroj megle je šel od zgoraj navzdol in je nastopil na vrhu stolpa tri ure prej kot pri tleh, na Šmarni gori pa celo pol dneva prej. To daje zanimive vpogled v razkroj inverzij v ljubljanski kotlini.

Turbulentno mešanje torej počasi prodira od zgoraj v hladno jezero kotlinskega zraka; megla se šele ob dosegu turbulence do tal, od tal dvigne prehodno v stratus in tam končno razkroji - podobno kot pri čistem radiacijskem razkroju /8/. Začasen dvig megle v stratus se je lepo odražal na začasnem dvigu relativne vlage na vrhu stolpa opoldne 29. XI. Popoldne (okrog 15^h) pa se je pričela relativna vlaga na vseh nivojih dvigati, kljub približno nespremenjeni temperaturi. To pa kaže na spremembo zračne mase - na pravi dotok toplejšega in vlažnejšega zraka, kar potrjuje tudi sprememba hitrosti in smeri vetrov pri tleh (od vzhodne na zahodno komponento). Nadaljnja nihanja temperature in vlage do 30. XI. opoldne so bila posledica turbulentnih fluktuacij. Rahel pad temperature in močan dvig relativne vlage

na vseh nivojih je bil očitno posledica pričetka padavin, ki so trajale v noč. Polnočna razjasnitev je nato v dveh urah dovolj ohladila zrak, da je nastala megla (razvoj vremena Brnik) in začela se je nova perioda radiacijskega vremena.

Okrepitev anticiklona in prodor ob severovzhodnih vetrovih sta 3. XII. opoldne omogočila razkroj megle, kar se kaže tudi v večji razgibanosti krivulj temperature in relativne vlage. Tudi v tem dnevu je šel razkroj megle od zgoraj navzdol, kar se lepše kot na krivuljah temperature vidi na krivuljah relativne vlage. Relativna vlaga se je izraziteje znižala na vrhu stolpa 3. XII. ob 11^h, na višini 30 m šele 6 ur pozneje in na tleh kar 8 ur pozneje kot zgoraj. Zanimivo in zelo čudno pa je, da je do naslednjega opoldneva vladala izrazita temperaturna inverzija ter so bile temperature na vrhu stolpa celo za 7° C višje kot pri tleh. To, da se lahko ob jasnem vremenu in zmernih vetrovih (razvoj vremena v Ljubljani) obdrži močna temperaturna inverzija ob paralelnem močnem ogrevanju na vseh višinah (za ca 15° C) je vsekakor nekaj, česar doslej nismo vedeli. Relativna vlaga je 4. XII. na vseh nivojih močno padla - pri tleh pod vrednost 15 %! Žal, so zaradi tega tudi peresa nehala pisati in natančnih podatkov o teh zanimivih ekstremih nimamo.

V nadaljnjih dveh dnevih se je ponovil radiacijski režim nastajanja jezera hladnega zraka, kot smo ga spoznali v dneh 26., 27. in 28. XI. Tudi ta se je končal s spremembo vremenskega režima ob prodoru toplega zraka, ki pa je bil drugačen kot tisti 29. XI.

Ko še ni bilo opaziti nobenih temperaturnih sprememb, se je ta zaradi povečane amplitude pri relativni vlagi 7. XII. vidno, čeprav malo, znižala najprej na stolpu (ob 3^h), 2 uri kasneje 30 m nad tlemi in še dobri 2 uri pozneje pri tleh. Nenaden in na vseh nivojih istočasen porast temperature ob 7^h ni povzročil znižanja relativne vlage. Očitno je pri tem moralo priti do sprememb absolutne vlage in to deloma zaradi izhlapevanja kondenzirane vode (iz megle in s tal) in pozneje zaradi dotoka vlažnejšega zraka ob spremembi smeri vetra iz E na SW in še kasnejšega pričetka padavin. Inverzija, kot vidimo iz primerjave krivulj temperature pri tleh in na Šmarni gori (slika 6) pa je izginila tudi šele po polnoči. Temperatura 7. XII. dopoldne se je torej zvišala le v nižjih plasteh v jezeru hladnega zraka, ki pa je ostalo znatno hladnejše od zraka v višini Šmarne gore. Otoplitev je torej bila bolj posledica turbulence ali premikov zračne mase, kot advekcije ali sevanja.

8. XII. so prišli naši kraji pod vpliv genovskega ciklona. Že naslednji dan pa se je zopet razširil anticiklon, vendar je nebo ostalo oblačno ali pa je bila megla. To je trajalo vse do 15. XII., ko se je ob 24^h zjasnilo (razvoj vremena Brnik). Zato sta potekali krivulji temperature in relativne vlage ves ta čas zelo enotno, kar nas je tudi navedlo na to, da smo uvedli našo domnevo o izotermiji (slika 4).

Po zjasnitvi se je 16. XII. uveljavil radiacijski režim, vendar se je

zrak pri tleh manj segrel kot zrak vrh stolpa. Inverzija med tlemi in vrhom stolpa je trajala vse do 17. XII. opoldne. Zrak na Šmarni gori, ki je bil 16. in 17. XII. v jutranjih in dopoldanskih urah toplejši od zraka pri tleh, se v dnevnem času 16. XII. ni dosti segrel in je bil v času dnevnega maksimuma za 5 do 6° C hladnejši od zraka pri tleh, v noči na 17. XII. pa se je spet pojavila inverzija.

17. XII. zjutraj se je popolnoma pooblačilo in stratifikacija se je spremenila. Zrak na Šmarni gori je bil ves čas do 19. XII. zjutraj za 2 do 3° C hladnejši od zraka pri tleh pri Domžalah. V noči na 19. XII. se je režim tega in prejšnjega dne lepo izrazil v relativni vlagi, ki je bila najvišja na stolpu in najnižja pri tleh. Zabeležena stratusna oblačnost v Ljubljani (razvoj vremena v Ljubljani) in na Brniku (razvoj vremena na Brniku) potrjuje, da je bila temu vzrok zmerna turbulenca, ki je preprečevala razvoj prizemne inverzije in omogočala prenos vlage v višje plasti.

Z zjasnitvijo 19. XII. opoldne se je začela perioda radiacijskega vremena. Potek krivulj temperature in relativne vlage je zelo podoben tistim 26., 27. in 28. XI. in 5. ter 6. XII.

Sprememba vremenskega režima, ki je 21. XII. prekinila periodo radiacijskega vremena in se je najbolje izrazila na 500 mb ploskvi (tabela 1), je omogočila zjasnitve in dvig temperature tudi v dnu kotline že ta dan, vendar se relativna vlaga pri tem ni znižala; verjetno zaradi zadostne količine vode v zraku in na instrumentih ter le kratkotrajnega dviga temperature. Zaradi oblačnega neba se temperatura v naslednji noči (na 22. XII.) ni več toliko znižala in ker je megla vztrajala do pričetka rahlega sneženja, se tudi relativna vlaga ta dan ni znižala. Izrazit padec relativne vlage se je začel 22. XII. zjutraj ob okrepljeni cirkulaciji in ohlaidvah na višinah in se je nadaljeval do sredine noči. Na Šmarni gori (slika 7) inverzije od 22. XII. zjutraj dalje ni bilo več, toda v prizemni plasti v območju stolpa je še bila, kar nam bolj izrazito kot potek temperature kaže potek relativne vlage. Naj dodamo, da se je vrednost relativne vlage večino tega dne zmanjševala z višino.

V zgodnjih jutranjih urah je 23. XII. začela na vseh višinah izrazito prehodno naraščati relativna vlaga (do 20 %), ki se je potem opoldne ponovno znižala na prejšnjo vrednost. Končni dvig relativne vlage 23. XII. opoldne se je začel najprej na Šmarni gori (okrog 11^h), skoraj istočasno na tleh pod stolpom in v Ljubljani (okrog 12^h), medtem ko je bil na vrhu stolpa za tri ure kasnejši. Pri tem je bila ves čas vzporednega dviganja relativna vlaga na stolpu za okrog 10 % nižja kot pri tleh.

Iz analize celotnega obdobja lahko izluščimo nekatere procese, ki se pojavljajo večkrat ter so si več ali manj podobni. Tak proces je nastanek in rast jezera hladnega zraka, za kar imamo kar tri primere: v dneh 26., 27., 28. XI., v dneh 4., 5., 6. XII. in v dneh 19. 20. XII. Nekatere skupne poteze tega procesa so naslednje.

Ob jasnem in mirnem vremenu, ki se pojavi navadno po prodoru hladnega zraka, se segreje najbolj plast zraka pri tleh ali pa tudi plasti do 130 m. Plasti na Šmarni gori so navadno hladnejše ali pa kvečjemu enako tople kot te plasti. Že v popoldanskem času se začne zrak pri tleh zaradi sevanja ohlajati in je kmalu hladnejši od višjih zračnih plasti. Zaradi visoke vlage pride pri tem do nastanka megle pri tleh. Naslednji dan megla vztraja in dnevni dvig temperature ter padec relativne vlage se pri tleh komaj poznata, na vrhu stolpa pa sta še izrazita. Zrak na Šmarni gori je pri tem znatno toplejši od zraka pri tleh. Še dan kasneje sta dnevni dvig temperature in padec relativne vlage tudi na stolpu komaj opazna. Jezero hladnega zraka je znatno presešlo višino stolpa. O višini tega hladnega zraka pa na osnovi naših meritev ne moremo povedati nič natančnejšega. Naj omenimo, da je po nekaterih meritvah na tujem /9/ ta višina v širokih kotlinah okoli 230 m in na ravnini okoli 150 m. Snemanje megle v Ljubljanski kotlini kažejo, da leži ta višina največkrat okrog 250 m nad dnem kotline.

Stratifikacija atmosfere, ki smo jo ugotovili ob prodorih, se razlikuje od primera do primera. To je razumljivo, saj pri njenem oblikovanju dominira advekcija. Naj v ilustracijo omenimo prodor toplega zraka 29. XI., ki je zelo zanimiv. Hladen zrak je vztrajal v kotlini še 12 ur po tem, ko se je začela intenzivna advekcija toplega zraka na Šmarni gori. Medtem ko je temperatura na Šmarni gori okrog poldneva že padala pod temperaturo zraka pri tleh (slika 6), je inverzija v plasti zraka od tal do višine stolpa kljub močnim vetrovom vztrajala vse do 1. XII. popoldne.

Tudi naše meritve so potrdile znane ugotovitve o nastanku in razkroju jezera hladnega zraka, ugotovili pa smo tudi nekaj specifičnosti jezera hladnega zraka v Ljubljanski kotlini. Dobili smo kvantitativno oceno nastanka jezera hladnega zraka ob jasnem in mirnem vremenu in oceno rasti njegove višine. Spoznali smo, da je vzrok razkroja jezera hladnega zraka v tem letnem času vedno močna advekcija. Tak razkroj jezera hladnega zraka se začne na vrhu in se počasi širi navzdol.

.....

Zahvaljujemo se vodstvu tehnične sekcije RTV Ljubljana za razumevanje, tehnikom pri antenskem stolpu pa za pomoč pri nameščanju instrumentov.

LITERATURA

- /1/ Kolenkova S.I. in Litvinov I.V.: Karakteristika nekotarih parametrov atmosfere v pograničnom sloje pri tumanah. Meteorologija i gidrologija. No. 7. Ijul 1971. Moskva. 20 - 27.
- /2/ Petkovšek Z.: Preprosta obravnava razkroja radiacijske megle. Razprave - Papers XII, DMS, Ljubljana 1970, 17-27.
- /3/ Petkovšek Z. and A. Hočevar: Night drainage winds. v tisku.
- /4/ Stern A. C.: Air Pollution, Volume I, Academic Press New York, London, 1968. 239-268.
- /5/ Kovač M.: Temperatura 300 metrske prizemne plasti zrak v Ljubljanski kotlini, Razprave - Papers X, DMS, Ljubljana 1968. 37 - 46.
- /6/ Hočevar A.: Lokalni vremenski tipi v Sloveniji pozimi, Razprave - Papers IV, DMS, Ljubljana 1964. 1-19.
- /7/ Čadež M.: Jezera hladnog vazduha, Hidrometeorološki glasnik, god.1, broj 1, Beograd, August 1948. 3 - 13.
- /8/ Petkovšek Z.: Auflösung der Strahlungnebel in alpinen Talbecken. Annalen der Meteorologie, Neue Folge, Nr. 5 (1971). 71 - 74.
- /9/ Schnelle F.: Frostschutz im Pflanzenbau. Band 1. BLV Verlagsgesellschaft München, Basel, Wien. 184 - 187.