

MODELIRANJE RAZKROJA JEZERA HLADNEGA ZRAKA

MODELLING OF COOL POOL DISSIPATION

Zdravko PETKOVŠEK in Jože RAKOVEC
VTOZD Fizika, FNT, Ljubljana

551.553.1
551.511.3
551.584.3

SUMMARY

Lowlands and basins of uneven relief in wintertime are often filled with cool pools that usually soon change into fog-lakes. Climatic conditions in them are rather uncomfortable: high humidity, low visibility, lack of sunshine, high air pollution etc. A model of the development and dissipation of such air lakes could promote an objective forecast of its time of dissipation.

In the construction of such a model, the main energy fluxes (Fig. 1) and energy requirements for the dissipation should be known. An assessment shows that in typical conditions of a 200 m deep cool pool, the energy needs are as follows: for air warming 0.7, for droplet and dew evaporation 0.6, and for autoconvective mixing with upper air layers 0.1 kWh/m² – together 1.4 kWh/m². This is twice the solar energy at the bottom of a basin in Slovenia on an average December day. It is obvious, therefore, that the energy from the Sun cannot dissipate the cool pool. It persists for days until a wind with speeds over 7 m/s appears above the pool. Comparisons with observed temperature changes were made as well (Fig. 3).

A numerical model taking in to account the main energy fluxes, simplified and adjusted motion and other factors was constructed and is briefly presented in the second part. The results are the calculated air motion (and temperature – not shown here) distributions that are presented separately for appropriate day- and night-time in Figs. 4 and 5. The distributions obtained are in a good agreement with most observations and our previous knowledge. Further improvement of the model is also foreseen.

UVOD

Nižine in kotline razgibanega reliefa pogosto zapolnjujejo jezera hladnega zraka (JHZ), ki se navadno spremene v meglena jezera. V njih so pozimi sorazmerno nizke temperature,

vлага je visoka, majhna vidljivost, malo sonca, veliko onesnaženje zraka i.dr. V Sloveniji živi v takih razmerah velik del prebivalstva in v njih je tudi velik del industrije ter drugih gospodarskih dejavnosti.

Preprečiti nastanka JHZ ne moremo in tudi ne bistveno izboljšati razmer v njih, v veliko pomoč gospodarstvu pa bi bila bolj zanesljiva napoved nastanka in razkroja JHZ. Kot osnovo za sestavo matematično-fizikalnega modela za objektivno napoved, je bilo treba presoditi energijske potrebe in možne tokove ter ugotoviti posebnosti termičnega in dinamičnega razkroja z vključitvijo vlage. Gibanje v JHZ smo preučevali tudi z modelom, ki je prikazan v drugem delu, in ki kaže spodbudne rezultate, a tudi potrebo po nadaljnji izpopolnitvi.

ENERGIJSKE OSNOVE MODELA

Kotlinsko jezero hladnega zraka je masno dokaj zaprt sistem, sestavljen iz treh osnovnih plasti, ki jih ločujeta dve mejni površini. Plasti so: prosta atmosfera, h kateri štejemo vesolje s Soncem vred, kotlinski zrak in tla.

Skozi zgornjo in spodnjo mejo JHZ tečejo razni energijski tokovi. Razkroj je možen tedaj, ko je neto energijski tok v JHZ tolikšen, da se zrak v jezeru dovolj ogreje. Razkroj pa nastopi tedaj, ko se ta zrak premeša z višjimi plastmi atmosfere.

Med energijskimi tokovi skozi mejni površini JHZ so pomembni naslednji:

- RS — sončno sevanje (kratkovalovno)
- RL — terestično sevanje (dolgovalovno)
- H — tok zaznavne toplote (turbulentna difuzija)
- G — kondukcija (prevajanje in molekularna difuzija)
- LE — tok latentne toplote (za vodno paro in z njo)

Vsak izmed teh energijskih tokov je možen v obeh smereh, kar da za dve mejni površini torej 20 posameznih energijskih tokov, poleg tega pa je možnih še šest tokov direktno med tlemi in prosto atmosfero. Tako imamo v našem sistemu skupno 24 posameznih energijskih tokov, ki nekateri vplivajo na energijsko bilanco JHZ (slika 1), nekateri pa so zanemarljivi.

Če upoštevamo, da je vsak izmed teh energijskih tokov odvisen od mnogih dejavnikov, je očitno, da zahteva rešitev problema reševanje sistema številnih med seboj povezanih enačb, od katerih mnoge vsebujejo količine, ki v splošnem niso poznane ali določljive. Od tega so najtežje določljivi energijski tokovi s konvekcijo in turbulenco (H in LE). Zato je treba sistem ustrezno poenostaviti.

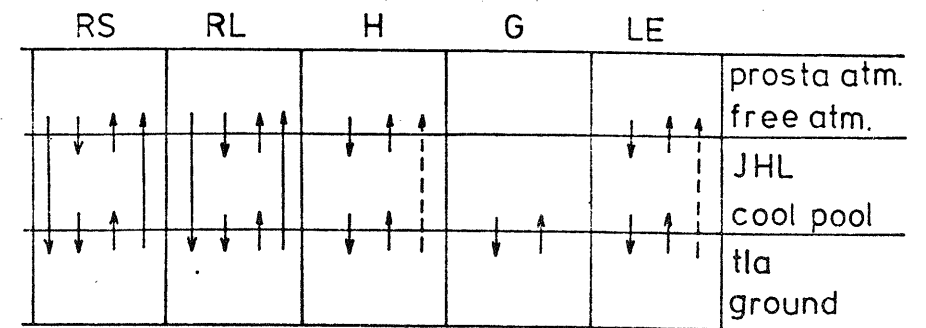
Pri oceni energijskih potreb lahko zadevo še poenostavimo ter ugotovimo le velikost glavnih potreb; oceni posameznih tokov, ki se delno ali v celoti kompenzirajo, pa se izognemo. Odločilna člena dotoka energije v JHZ in na tla skozi zgornjo mejo JHZ sta

tedaj: sončno obsevanje (RS), ki omogoča termični razkroj in osušitev, in prisilna konvekcija oziroma turbulenca (H), ki omogoča dinamični razkroj in tudi izhlapičev kondenzirane vode (LE).

Termično pogojeni procesi razkroja JHZ prevladujejo v mirnem anticiklonalnem vremenu, to je ob pretežno jasnem nebu in ob šibkih vetrovih tudi v višinah. Zaradi večinoma močne absorpcije v tleh, so navadno procesi na spodnji meji intenzivnejši, predvsem na račun energijskega toka, ki pride skozi zgornjo mejo. Procesni razkroja na spodnji meji pa vplivajo tudi na zgornjo mejo, ki se lahko ob razkroju JHZ znižuje. Ko se procesi z obeh strani spojijo, se jezero razkroji. Tak je v bistvu Whitemanov model (1980), ki je kvazidvodimenzionalni termični, a je zgornja meja skoraj pasivna. Toda Whitemanov model je suh, naša JHZ pa so navadno meglena in je za razkroj potrebna še energija za izhlapevanje, ki ni majhna. Natančna presoja posameznih členov je podana drugje (Petkovšek in Rakovec, 1983), tu pa prikažimo le oceno energijskih komponent za vlažen termični razkroj tipične 200 m globoke kotline pozimi:

ogretje kotlinskega zraka na začetno vrednost (za 10 K):	0,7 kWh/m ²
ponovna izparitev kondenzirane vode (kapljic in rose):	0,6 kWh/m ²
avtokonvektivno premešanje z enako debelo višjo plastjo:	0,1 kWh/m ²

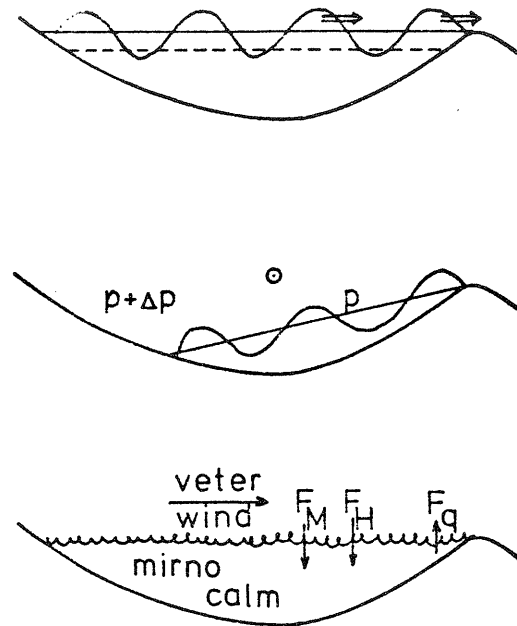
Skupna potrebna energija je torej pozimi okrog 1,4 kWh/m². Izračuni dovedene energije sončnega obsevanja oziroma ustreznih kumulativni diagrami za dno take kotline (Hočevar in sod., 1982) pa kažejo, da pozimi čisti termični razkroj JHZ ni mogoč in se JHZ lahko razkroji šele ob pomoči dinamičnih vplivov ob dovolj močnih višinskih vetrovih.



Slika 1: Glavni energijski tokovi skozi obe meji kotlinskega JHZ: sončnega in dolgovalovnega sevanja RS in RL, konvekcijskega in turbulentnega prenosa H, kondukcije G in zaznavne toplote LE

Fig. 1: Main energy fluxes through both boundaries of the cool pool, e.g. short and long wave radiation RS and RL, convection and turbulent transport H, conduction G and latent heat LE

Vetrovna striženja, temperaturni gradienti in turbulentni parametri ob inverzijah, ki zapirajo JHZ, so nam še premalo poznani, da bi lahko računali tokove gibalne količine, toplote in vlage v JHZ v raznih turbulentnih pogojih. Prek kritičnega Richardsonovega števila pa smo ocenili (Petkovšek in Rakovec, 1983), da je najmanjša hitrost vetra nad JHZ, ki lahko privede do njegovega razkroja, v opisanem primeru okrog 7 m/s, kar se ujema z našimi opazovanji. Gotovo pa imajo pri takem razkroju pomembno vlogo tudi gravitacijski valovi in nagib zgornje meje JHZ, ki je pri močnih vetrovih že znaten (slika 2). Tudi te vplive bo pozneje treba zajeti v model razkroja.

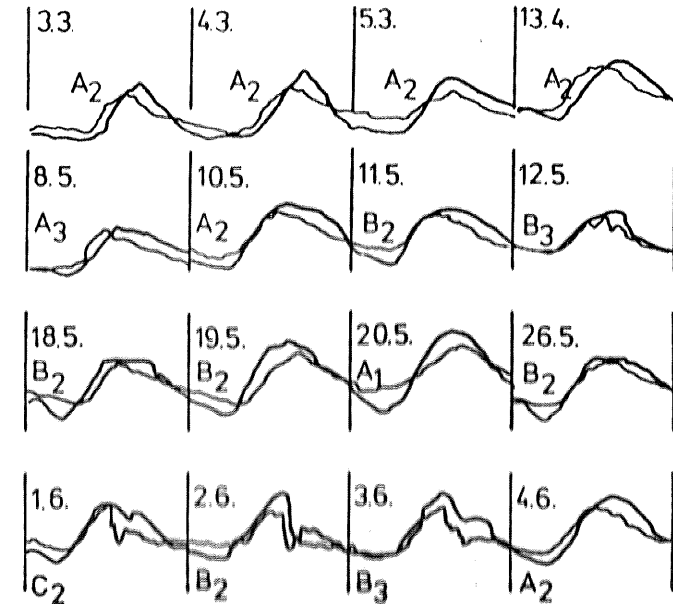


Slika 2: Shematični prikaz vpliva gravitacijskih valov, nagiba zgornje meje JHZ in turbulentnih tokov gibalne količine F_M , toplote F_H in vlage F_q pri močnem vetru v višinah
 Fig. 2: Schematic presentation of gravity waves, inclination of the upper boundary of the cool pool and turbulent fluxes of momentum F_M , heat F_H and humidity F_q produced by strong upper winds

ANALIZA DEJANSKIH RAZKROJEV JHZ

Ugotoviti želimo, kakšni so v resnici razkroji jezer hladnega zraka v naših kotlinah, predvsem ob mirnem vremenu, ko prevladujejo termični vplivi. Zato smo uporabili analizo istočasnih temperaturnih potekov na dveh parih postaj – v kotlini in zunaj nje, in sicer: za par Ljubljana–Šmarna gora za pet let (1975–79) pri višinski razliki 363 m med postajama, ter za par Celje–Miklavški hrib za leto 1979 pri višinski razliki 145 m (Bernot, 1982). Glede na reliefne pogoje sta obe zgornji postaji malo nad zaporno plastjo temperaturne inverzije v veliki večini primerov.

Izbrani so primeri razkroja v pretežno jasnem vremenu v anticiklonu, z jutranjo meglo v kotlini in s pogojem, da so padavine pod 1 mm/dan (pršenje iz megle). Natančneje je bil obdelan predvsem čas od sončnega vzhoda, ko so bile temperature v kotlini nižje kot zgoraj nad njo, pa do 14. ure – če je do tedaj nastopila izenačitev temperatur oziroma se je temperatura v kotlinski postaji dvignila nad temperaturo zgornje postaje (slika 3).



Slika 3: Primer temperaturnih potekov v JHZ (debela črta – Ljubljana) in nad njim (tanka črta – Šmarna gora) za dni z razkrojem spomladi (po Bernot-Ivančič, 1982)
 Fig 3: Example of temperature changes in cool pool (thick curve) and above it (thin curve) for days in spring when dissipation occurs (from Bernot-Ivančič 1982)

Vsega skupaj je bilo v zajeti dobi za par Ljubljana – Šmarna gora 310 takih primerov, za par Celje – Miklavški hrib v enem letu pa 30 primerov. Istega leta je bilo v Ljubljanski kotlini 67 primerov; to je več kot dvakrat toliko in je verjetno posledica precej globjega jezera hladnega zraka v Ljubljanski kotlini kot v Celjski.

Za vpogled v primerjane temperaturne poteke smo jih grupirali v tipe po dveh kriterijih: glede na velikost temperaturne razlike med postajama v paru ob sončnem vzhodu, in sicer: velika (5–10 K), srednja (2–5 K) in majhna ($\Delta T < 2$ K); ter glede na čas razkroja, to je čas od sončnega vzhoda do izenačitve temperatur (križanja obeh temperaturnih potočkov) po razredih: dolg ($\Delta t > 4$ ure), srednje dolg (2–4 ure) in kratek ($\Delta t < 2$ uri). Definicije tipov in relativne pogostnosti njihovega pojavljanja kaže tabela 1. V tabeli 2 pa smo prikazali tudi ekstremne pogostnosti pojavljanja v posameznih letnih časih, saj je čas razkroja JHZ pri termičnem razkroju seveda močno odvisen od navidezne poti Sonca nad obzorjem.

Tabela 1 Značilnosti „tipa razkroja JHZ“ in njihove relativne pogostnosti v Ljubljani za dobo 1975–79 (v %)

Table 1 Significances of „types of dissipation“ and their relative frequencies in Ljubljana for period 1975–79 (in %)

temperat. razlika Šm. g.–Lj.	čas razkroja: Δt	dolg > 4 ure	sred. dolg 2–4 ure	kratek < 2 uri
velika (5–10 K)		A ₁ 15	B ₁ –	C ₁ –
srednja (2–5 K)		A ₂ 20	B ₂ 14	C ₂ 4
majhna ($\Delta T < 2$ K)		A ₃ 12	B ₃ 17	C ₃ 18

Tabela 2 Relativna pogostnost za tipe, ki so nastopali v posameznem letnem času najpogosteje ali najredkeje (v %)

Table 2 Relative frequencies for the most or the least frequent types of separate seasons (in %)

	najpogosteje	najredkeje
spomladi	B ₂ (49)	A ₁ (13)
poleti	C ₂ (46)	A ₁ (3)
jeseni	A ₁ (54)	B ₂ (14)
pozimi	A ₁ (30)	C ₂ (–)

Iz tabele 2 vidimo, da je pri teh pogojih razkroj JHZ z veliko temperaturno razliko lahko le dolgotrajen (tipa B₁ in C₁ se sploh ne pojavljata); sicer pa je pozimi in v jeseni največ tipov A₁, spomladi in poleti pa B₂ in C₂. Najredkejši tipi so isti, a imajo v letni dobi diametralno razporeditev.

POENOSTAVLJEN NUMERIČNI MODEL

Kot smo že povedali, se jezero hladnega zraka (JHZ) ustvari v kotlinah in ozkih dolinah zaradi tega, ker se na dnu teh reliefnih tvorb ponoči nabira hladnen zrak, ki se zaradi svoje relativno večje gostote spušča po pobočjih. To jezero se lahko razkroji zaradi močnega dotoka toplote vanj ali pa zaradi mešanja z zrakom, ki je nad njim.

Model, kakršnega smo sestavili, upošteva razloge za nastanek JHZ in oba bistvena razloga za njegov razkroj. Podrobnejši opis in rezultati bodo prikazani drugje (Rakovec, 1984), tu pa dajemo le glavne rezultate. Dotekanje hladnega zraka v kotlino je modelirano na osnovi spoznanj Petkovška in Hočevarja (1971), da se ob pobočjih ohlajeni zrak spušča zaradi neuravnoteženega vzgona: ko je doseženo stacionarno stanje, komponenti sile vzgona drži ravnotežje sila trenja:

$$k_t V = g \sin \beta (T - T') / T' \quad (1)$$

kjer je V hitrost navzdol po pobočju z nagibom β , k_t koeficient trenja, T in T' temperaturi spuščajočega se zraka in zraka dlje od pobočja, g pa težnostni pospešek. Ker se zrak ob spuščanju adiabatno segreva, je hitrost spuščanja večja ob bolj položnih pobočjih, kot ob strmejših (Petkovšek, 1978). Kako se zrak pri tleh ohlaja ali ogreva, povzamemo po modelu za napoved temperature pri tleh (Rakovec, 1979).

Ko čez dan vpliv sončnega obsevanja pobočij prevlada, se začno tla in zrak ob tleh segregirati. Tedaj je vzgon spet neuravnotežen, tokrat v drugo smer; navzgor kaže sila neuravnoteženega vzgona. Zrak se začne ob ogrelih pobočjih gibati in v stacionarnem stanju premagujeta trenje: neuravnoteženi del vzgona in sila gradienta pritiska v horizontalni smeri (Petkovšek, 1982). Enačba za neuravnoteženo stanje s stacionarno hitrostjo je tedaj-

$$k_t V = 2g \sin \beta \frac{p' T - p T'}{p' T + p T'} \quad (2)$$

kjer kaže sedaj hitrost V navzgor po pobočju z nagibom β , p' in T' sta pritisk in temperatura dlje od pobočja, p in T pa pritisk in temperatura ogretega, dvigajočega se zraka ob pobočju.

Enačbi (1) in (2) sta osnova modela razvoja in razkroja JHZ, ki je v podrobnostih razložen v navedeni literaturi.

APLIKACIJE MODELA

Poskuse, ki smo jih naredili z dvodimenzionalno verzijo numeričnega modela, lahko razdelimo v dve skupini: tiste, pri katerih simuliramo dogajanje v kotlini ob nočnem ohlajevanju tal in zraka pri tleh, ter tiste, ko se čez dan zrak ogreva.

Pri obeh skupinah so začetni pogoji enaki: predpisana je stabilna stratifikacija zraka z izotermno porazdelitvijo temperature zraka, splošno gibanje pa je povsod po kotlini predpisano tako, da zrak počasi teče od levega (južnega) proti desnemu (severnemu) pobočju, in sicer tako, da z višino od tal hitrost počasi narašča, tako da pri vrhu modela, v sredini kotline znaša 0,2 m/s.

Najprej obravnavamo širše kotline z manj strmimi pobočji (kot sta npr. Ljubljanska in Celjska kotlina).

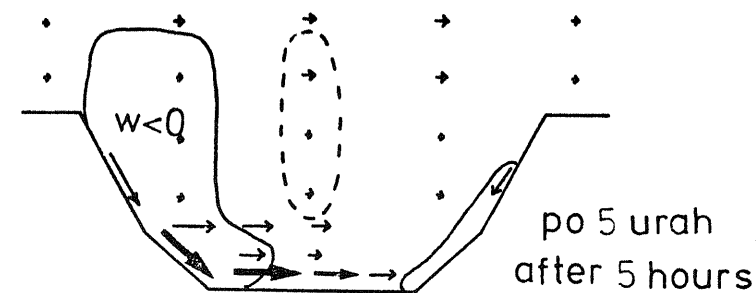
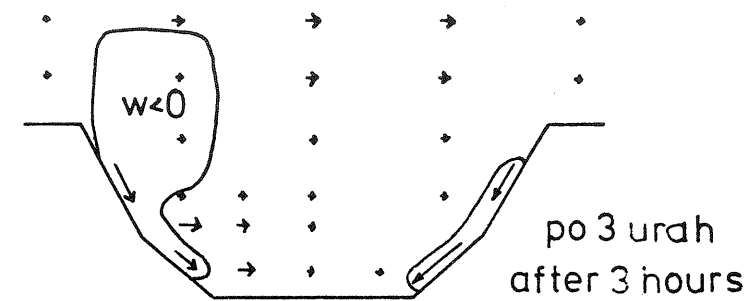
Nočna situacija – ohlajanje pobočij

Osnovni poskus predstavlja enakomerno adiabatno ohlajanje tal v kotlini, in sicer po stopnji -2 K/h. Ob tem je predpisana povsod enaka sprememba temperature zraka tik ob tleh (na 1 cm od tal). V plasti zraka od tal navzgor pa se temperatura logaritemsko prilagaja temperaturi na vrhu te – imenujemo jo – konvektivne plasti. Seveda v gibajočem se zraku to ne pomeni obenem tudi povsod enakega ohlajevanja zraka. Le ta se ob dviganju adiabatno ohlaja in pri spuščanju adiabatno ogreva. Zato je sprememba temperature v vsakem časovnem koraku rezultat skupnih diabatnih in adiabatnih vplivov.

Na sliki 4 a in b sta prikazani polji horizontalnih hitrosti (s puščicami) in vertikalnih hitrosti (za okrog 2 velikostna reda manjših) tako, da so omejena območja spuščanja zraka. Zaradi predpisanega splošnega gibanja zraka proti desni se ne ustvari povsem simetrično stanje, čeprav je geometrija terena simetrična. Dve uri po začetku ohlajevanja (ob 21^h) so hitrosti ob pobočjih od 0,5 do 1,3 m/s, njihov vpliv pa na dnu kotline še ni pomemben. Še čez tri ure (ob 24^h) so hitrosti po pobočjih med 0,6 in 3,4 m/3; te hitrosti pa tudi že poženejo gibanje zraka po dnu kotline. Zaradi stabilne temperature porazdelitve je to gibanje po dnu omejeno le na tanko plast zraka pri tleh. Vpliv na višje plasti je viden le v polju vertikalne hitrosti. Relativno močno spuščanje zraka ob pobočjih zajema širše območje spuščanja ob pobočju. Seveda pa so tudi dviganja v središču kotline intenzivnejša kot tri ure prej: 4 cm/s v primerjavi z dviganji pod 1 cm/s ob 21^h.

Na kratko opišimo še polje temperature. Razumljivo je, da imamo pri tleh ohladitve, vendar so te enake diabatnim le na ravnem dnu in na platojih nad pobočji. Drugod spuščanje zraka modificira diabatni vpliv. V splošnem se območje spuščanja ujema z območjem povečanja temperature, ki je ob 21^h največ 0,6 K, dviganje pa se ujema z ohladitvami, ki so v središčnem delu kotline ob tem času največ $-0,6$ K. Tik pri tleh imamo pri nekaterih pobočjih z močnim spuščanjem celo ogretje do 0,3 K, kjer pa spuščanje ni tako močno, nastopajo ohladitve.

Ob 24^h je opazna močna temperaturna inverzija ob dnu kotline: nad njo je v območju spuščanja zraka ogrevanje (za največ 3,1 K), sem in tja pa se pojavlja tudi v jedru kotlinske atmosfere ohladitev (do največ $-1,6$ K).



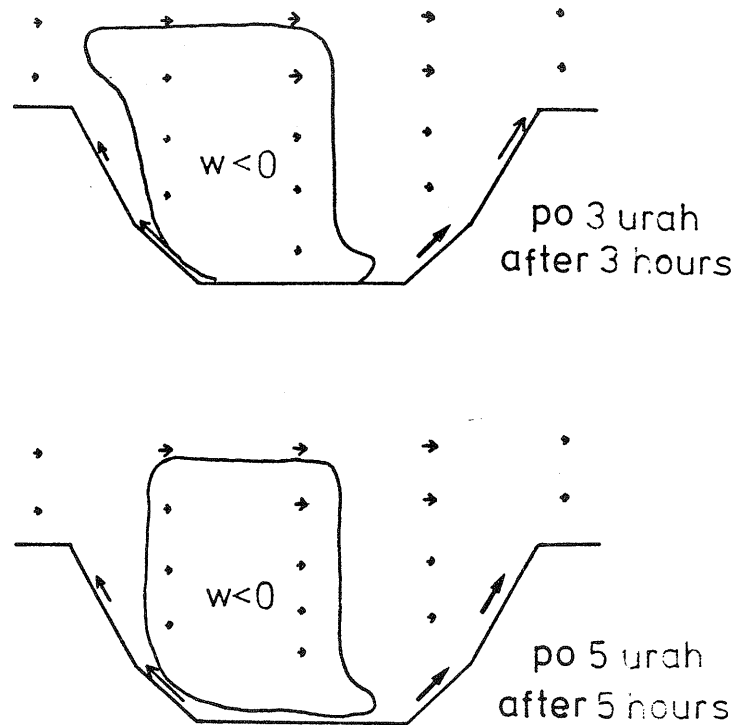
Slika 4: Polje hitrosti v kotlini po modelu ob nočnem ohlajevanju pobočij. Območja spuščanja zraka so označena z $w < 0$.

Fig. 4: Velocity field in a basin according to the model in the case of night cooling of slopes. Downward motions are designated with $w < 0$.

Dnevna situacija — ogrevanje pobočij

Osnovni poskus za dnevne situacije je analogen osnovnemu nočnemu poskusu: vsa pobočja in vodoravni deli kotline se diabatno enako ogrevajo, in sicer za +2 K/h. Spet prikazujemo stanje, ki se ustvari dve uri po začetku simulacije ter še tri ure kasneje, torej pet ur po začetku simulacije. Značilno je, da se hitrost dviganja zraka ob pobočju s časom povečuje, da je večja ob desnih pobočjih, saj k temu pripomore splošno gibanje zraka proti desni, medtem ko divergenco na dnu kotline uravnava spuščanje, ki je omejeno bolj na levi del kotline (slika 5 a in b).

Ustrezni temu sta polji sprememb temperature ter je ohlajevanje omejeno le na del območja z dviganjem, saj je tu tudi splošno dnevno diabatno ogrevanje.



Slika 5: Kot slika 4, le za dnevno ogrevanje pobočij
Fig. 5: Same as Fig. 4, but for daily heating of slopes

SKLEP

Ocene glede energetskih potreb za razkroj jezera hladnega zraka ob upoštevanju tudi potrebne energije za izparevanje morebitne megle, rose ali slane ter za premeščanje do hidrostatično nevtralne razporeditve temperature z višino kažejo, da je za tipične razmere v naših kotlinah potreben dovod energije okrog 1,4 kWh/m², kar je pozimi nad vrednostjo, ki jo prejmejo naši kraji od Sonca. V zvezi z energijskimi potrebami je tudi ugotovitev, da relativno zelo hladna jezera ponavadi tudi dolgo trajajo. Tako so najpogostnejša pozimi, medtem ko so poleti najpogostnejša jezera hladnega zraka s srednjemočno ohlajenim zrakom in kratkim trajanjem.

Proučevanje dogajanj v kotlinah z numeričnim modelom kaže, da se ponoči vzpostavlja nesimetrična cirkulacija zraka, če je le na vrhu jezera vsaj šibak veter. Močnejši tok v jezeru je ob pogojih nastanka močno stabilne plasti omejen le na plitvo plast pri tleh. Rezultati modela se ujemajo s prejšnjimi ugotovitvami, da se znatnejše gibanje zraka razvije v kotlinah s položnejšimi pobočji.

Delo je del raziskovalne naloge Mezometeorološki modeli — Postavitev modela za razkroj jezera hladnega zraka, ki ga je financirala Raziskovalna skupnost Slovenije (URP C1-0106/82).

LITERATURA

- BERNOT-IVANČIČ, A., 1982: Temperatura zraka v odvisnosti od reliefa, VTOZD Fizika, FNT (dipl. delo), 43 str.
- HOČEVAR, A., in sod., 1982: Sončno obsevanje v Sloveniji. Supl. 6, Zbornik BTF UEKL — Kmetijstvo s.1, 96 str.
- MELLOR, G. L., T. YAMADA, 1974: A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. J. Atmos. Sci. 31, 1791—1806.
- PETKOVŠEK, Z., 1978— Zones of Convergence in Local Air Flow in Valleys and Basins. Schweiz. Met. Zent. 40, 92—96.
- PETKOVŠEK, Z., 1982: Ein einfaches Modell des Tages-Hangwindes. Zeitschr. f. Met. 32, 42—50.
- PETKOVŠEK, Z., A. HOČEVAR, 1971: Night Drainage Winds. Arch. Met. Geoph. Biocl. A—20, 353—360.
- PETKOVŠEK, Z., J. RAKOVEC, 1983: Izpopolnitev osnov in modela jezera kotlinske atmosfere ter aplikacije. VTOZD Fizika, poročilo za RSS C1-0106, 36 str.
- RAKOVEC, J., 1979: Numerična napoved temperature tal in zraka pri tleh. Razprave—Papers 23, 5—18.
- RAKOVEC, J., 1983: The PBL Model Based on Closure Hypothesis and with Predicted Temperature at the Ground. Arch. Met. Geoph. Biocl. A-32, 257—267.
- RAKOVEC, J., 1984: Airflow in a Basin — Experiments with a Model (v pripravi za Zeitschr. f. Met.)
- WHITEMAN, C. D., 1983: Time-Dependent Model of Pollutant Transport and Diffusion in Mountain Valleys. 6th Symp. Turbul. Diff., Boston, AMS, 1973—1976.