

ENERGETIKA DOGAJANJ V OZRAČJU¹

II. DEL: ENERGIJSKE PRETVORBE

JOŽE RAKOVEC

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

PACS: 92.60.Vb, 92.60.Bh

V drugem delu pa s pomočjo energijskih enačb podrobneje prikažemo, katere pretvorbe energije uravnavajo vremenska dogajanja: iz diferencialnega dovoda in odvoda toplote s sončnim obsevom in infrardečim zemeljskim izsevom prek razpoložljive skupne potencialne energije v kinetično energijo ozračja in iz te prek viskoznega trenja v notranjo energijo.

ENERGETICS OF ATMOSPHERIC PROCESSES PART II.: ENERGY TRANSFORMS

In Part II is explained, with a help of the energy equations, which are the energy transforms that govern the weather processes: from the differential heating/cooling by the solar irradiance and the infrared terrestrial radiant exitance through the available potential energy into the kinetic energy of the atmosphere, and from it by the viscous friction into the internal energy.

4. Notranja in potencialna energija

Ker je sončno ogrevanje vir praktično vse energije za procese na Zemlji, torej tako kinetična kot tudi potencialna in notranja energija ozračja izvirajo iz dovoda toplote, ki jo zrak dobiva pretežno prek tal; le manjši del, okrog 20 % od povprečnega sončnega obseva se namreč neposredno absorbira v ozračju. Od tal dobiva toploto prevsem spodnja plast ozračja: z infrardečim sevanjem, s tokom zaznavne in s tokom latentne toplote. Za sedaj začasno zanemarimo „latentno“ in obravnavajmo samo zaznavno notranjo energijo. Zraku dovedena toplota delno povečuje zaznavno notranjo energijo $dW_{nz} = mc_v dT$, delno pa se porablja za to, da ob razpenjanju – povečevanju volumna dV zrak odriva svojo okolico in opravlja delo: $dA = p dV$. Energijski zakon (brez upoštevanja latentne notranje energije) lahko zapišemo na dva načina:

$$dQ = mc_v dT + p dV = mc_p dT - V dp.$$

Ker pa je zračni tlak pri tleh hidrostatični tlak – torej odvisen samo od mase zraka v celotnem stolpcu nad obravnavano površino – se tlak ob dodajanju

¹Predavanje 20. marca 2007 na Institutu Jožef Stefan v okviru Stefanovih dni

toplote praktično nič ne spremeni. Zato je zadnji člen na desni strani enačbe $Vdp \approx 0$:

$$dQ \approx mc_p dT.$$

Torej se ob segrevanju zračnega stolpca vsa dovedena toplota porabi za spremembo entalpije $mc_p dT$, in zato je $dQ = c_v/c_p dQ + p dV$, od koder izračunamo delež, porabljen za delo ob razpenjanju:

$$dA = p dV = \left(1 - \frac{c_v}{c_p}\right) dQ = 0,29 dQ,$$

(pri čemer smo upoštevali, da je za zrak $c_v = 717 \text{ J/kgK}$ in $c_p = 1004 \text{ J/kgK}$) in tistega za povečevanje notranje energije

$$dW_{nz} = 0,71 dQ.$$

Če torej za zdaj ne obravnavamo energije, potrebne za izhlapevanje (in s tem povečevanje latentne notranje energije), gre torej približno 29 % zraku dovedene toplote za raztezanje zraka, približno 71 % pa za povečevanje zaznavne notranje energije. Kam pa se zrak razteza? Na vse strani? Ne, ker je obdan z drugimi deli zraka, ki se tudi segrevajo in raztezajo, se lahko raztegne samo navzgor. Ob tem pa se mu dvigne težišče in s tem poveča potencialna energija. Za koliko? Oglejmo si potencialno energijo celotnega stolpca zraka nad površino S :

$$\frac{W_p}{S} = \frac{1}{S} \int_m g z dm = \int_0^\infty \rho g z dz = - \int_{p_0}^0 z dp = -zp \Big|_{\infty,0}^{0,p_0} + \int_0^\infty p dz = \int_0^\infty \rho RT dz.$$

Vidimo, da je potencialna energija odvisna od temperature v zračnem stolpcu – tako kot seveda zaznavna notranja energija:

$$\frac{W_n}{S} = \frac{1}{S} \int_m c_v T dm = \int_0^\infty \rho c_v T dz.$$

Izraza za obe obliki energije sta si do konstante podobna:

$$\frac{W_p}{S} = \frac{R}{c_v} \frac{W_{nz}}{S}.$$

V ozračju sta torej potencialna in zaznavna notranja energija celotnega stolpca zraka od tal do vrha ozračja med seboj tesno povezani in obe odvisni

od temperature. Zato je smiselno definirati *polno potencialno energijo* PE celotnega zračnega stebra:

$$PE \equiv \frac{W_p}{S} + \frac{W_{nz}}{S} = \int_0^{\infty} \rho c_p T dz.$$

Polna oziroma skupna potencialna energija zračnega stolpca je torej zaznavna entalpija tega stolpca – to je količina, za katero smo že ugotovili, da se zanjo porablja en del dovoda toplote; drugi del pa se porabi za izhlapevanje in s tem skoraj izključno za povečevanje latentne notranje energije, kar smo dosedaj pustili ob strani.

5. Energijske pretvorbe

Ugotovili smo, da sončno obsevanje povečuje totalno potencialno energijo in latentno notranjo energijo ozračja. Ker se morajo energijska neravnovesja na Zemlji izravnati s prenosi energije z zračnimi in morskimi tokovi, nas seveda zanima, kako iz sončne energije dobimo kinetično energijo gibanj v ozračju. Zato zapišemo enačbe za vse tri vrste energije: kinetično, potencialno in notranjo energijo. Izhajamo iz sistema meteoroloških enačb in začnemo z gibalno enačbo:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\nabla \cdot \mathbf{P} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{g},$$

ki pove, da se zrak pospešuje ali zavira zaradi (specifičnih) sil, ki nanj delujejo: sile gradienta tlaka $-\frac{1}{\rho}\nabla p$, viskoznostnih sil $\frac{1}{\rho}\nabla \cdot \mathbf{P}$ ($\mathbf{P}$ je viskoznostni del napetostnega tenzorja), zaradi (sistemske) Coriolisove sile na vrteči se Zemlji $-2\vec{\Omega} \times \vec{v}$ in zaradi teže, ki je vsota gravitacijske sile in radialnega pospeška na vrteči se Zemlji, $\vec{g} = -\nabla\Phi^* - \Omega^2\vec{R}$. To enačbo skalarno pomnožimo z $\rho\vec{v}$ in dobimo enačbo za kinetično energijo na enoto volumna:

$$\rho \frac{1}{2} \frac{dv^2}{dt} = \frac{m}{V} \frac{dw_k}{dt} = -\vec{v} \cdot \nabla p + \vec{v} \cdot (\nabla \cdot \mathbf{P}) - 0 + \rho \vec{v} \cdot \vec{g}.$$

Zapišemo jo v *bilančni obliki*, kar pomeni, da lokalno spremembo, ki jo izraža parcialni odvod po času, zapišemo skupaj s konvergenco vseh različnih pretokov energije na eni strani enačbe, morebitne vire in ponore kinetične energije pa na desni strani:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w_k) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} w_k + p \vec{v} - \mathbf{P} \cdot \vec{v}) = \frac{p}{V} \frac{dV}{dt} - \varepsilon + \rho \vec{v} \cdot \vec{g}.$$

Viri kinetične energije so torej opravljeno delo ob razpenjanju zraka ($\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} = -\nabla \cdot \vec{v}$), disipacija zaradi dela viskoznih sil $\varepsilon \equiv \mathbf{P} : \nabla \otimes \vec{v}$ je vedno ponor kinetične energije ($\mathbf{P} : \nabla \otimes \vec{v}$ je vedno pozitivna količina, saj je $\mathbf{P}$ enolično definiran s poljem hitrosti), delo zoper težo pri dviganju zraka pa je ponor kinetične energije (ali pa – pri spuščanju – vir zanjo). Obenem je to seveda edini vir za težnostno potencialno energijo – le-to pridobimo lahko izključno z delom proti sili teže:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w_p) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} w_p) = -\rho \vec{v} \cdot \vec{g}.$$

Kaj pa notranja energija na enoto volumna? Spet izhajamo iz termodinamske energijske enačbe, pri čemer pa delo malo bolj natančno opredelimo: delo navzven zrak opravlja z raztezanjem in s tem „odrivanjem“ okolišnjih zračnih mas – v našem primeru navzgor, pa tudi z delom notranjih viskoznih sil v volumnu V ; to je ravno tisto delo, ki pomeni disipacijo kinetične energije v zaznavno notranjo energijo: $dA = p dV - \varepsilon V$. Zato je:

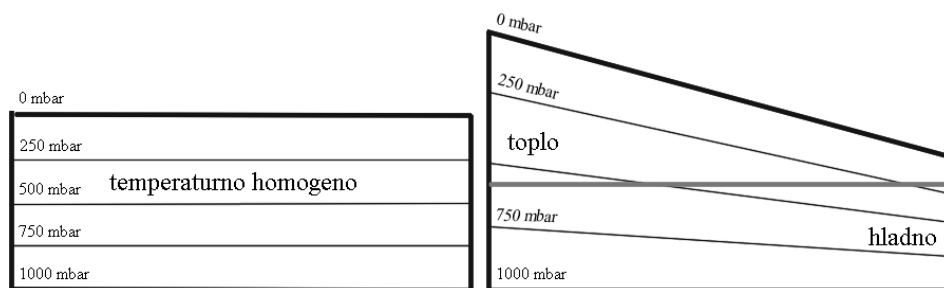
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w_{nz}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} w_{nz} - \vec{j}_Q) = -\frac{p}{V} \frac{dV}{dt} + \varepsilon.$$

Tako vidimo, da so viri in ponori za kinetično energijo ravno ponori in viri polne potencialne energije $\rho(w_p + w_{nz})$. Kinetična energija ozračja nastaja iz polne potencialne energije ozračja – točneje: samo iz t. i. **razpoložljive** polne potencialne energije APE (*available potential energy*).

6. Razpoložljiva potencialna energija

Zrak miruje samo, če so sile, ki nanj delujejo, v ravnovesju. Po vertikali je to ravnovesje med vzgonom (vertikalno komponento gradientne sile zaradi tlačnih razlik) in težo. Za to, da se zrak pospešuje v gibanje, je potrebno neravnovesje: po vertikali se pojavi konvekcija navzgor, kadar je specifična sila vzgona $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ večja od specifične sile teže g . Po horizontali pa je edina sila, ki lahko spravi zrak v gibanje, horizontalni del specifične gradientne sile $-\frac{1}{\rho} \nabla_h p$. Horizontalni gradient tlaka se med ekvatorjem in poloma (torej na planetarnih razsežnostih) pojavi zaradi diferencialnega ogrevanja, ko imajo različno ogrete zračne plasti različno visoko težišče (slika 8), pri tem pa se masa zraka v zračnih stolpcih nič ne spremeni in zato tudi zračni tlak pri tleh ne. Spremembe skupne mase v celotnem stolpcu zraka in s tem tudi zračnega tlaka pri tleh (ter s tem nastanke npr. ciklonov in anticiklonov), pa

lahko povzročijo izključno konvergence in divergence v zračnih tokovih (ko se zrak torej že premika), s katerimi se nekje nakopiči večja masa zraka ali pa se zrak iz nekega območja razteče naokrog.

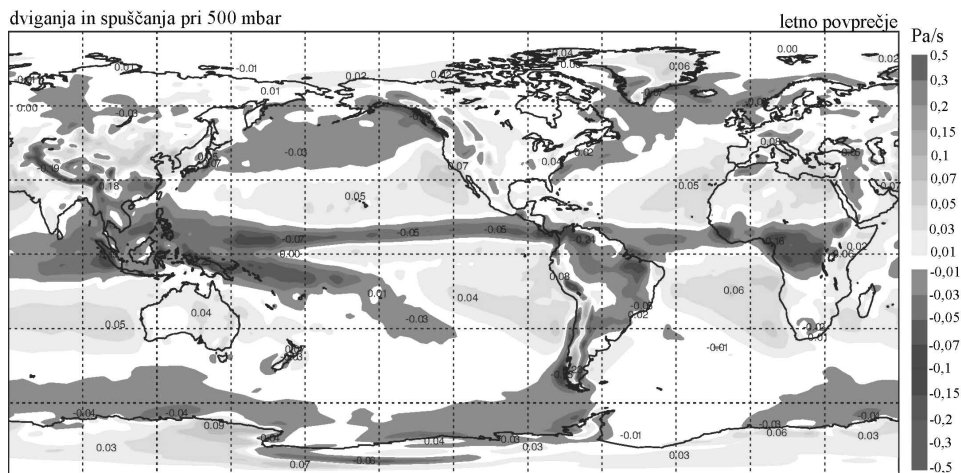


Slika 8. Diferencialno ogrevanje povzroči nagib posameznih ploskev zračnega tlaka in s tem horizontalni gradient tlaka v višinah (na desni sliki vzdolž debele sive črte), pri čemer pa se zračni tlak pri tleh nič ne spremeni.

V začetku 18. stoletja je Hadley² ugotovil, da konvekcija ob najtoplejših predelih ekvatorja povzroča tam dviganje zraka, zato pri tleh tlak nekoliko pade, v višinah pa se poveča, kar povzroča tok zraka pri tleh proti ekvatorju, v višinah pa proti poloma. Hadley si je tedaj zamišljal, da ta cirkulacija sega prav do obeh polov; že tedaj pa ga je begalo vprašanje, zakaj v zmernih in visokih širinah prevladujejo zahodniki. Danes vemo, da Hadleyjeva celica z dviganjem ob ekvatorju in spuščanjem v subtropih (slika 9) in s pasati in antipasati sega le prek tropov. Bolj proč od ekvatorja Coriolisov pospešek oziroma Coriolisova sistemska sila bistveno vpliva na gibanje zraka (zahodniki zmernih in visokih zračnih širin) in zato Hadleyjeva cirkulacije nikakor ne more segati do obeh polov. No vseeno: že Hadley je v bistvu prav razložil sistem meridionalne cirkulacije ozračja – vsaj za trope in subtrope.

Danes seveda tudi vemo, da je za kinetično energijo razpoložljiv samo tisti del skupne potencialne energije ozračja, ki ima krajevne razlike: potrebni so horizontalni gradienti tlaka, če naj horizontalni del gradientne sile povzroči horizontalne tokove. Prvo idejo o razpoložljivi potencialni energiji APE je

²George Hadley (1685–1768), angleški pravnik in amaterski meteorolog, ki je razložil sistem pasatov. Po njem se poleg Hadleyjevih celic meridionalne cirkulacije ozračja imenujeta tudi Hadley Centre for Climate Prediction and Research v okviru angleške meteorološke službe in krater na Marsu [13].



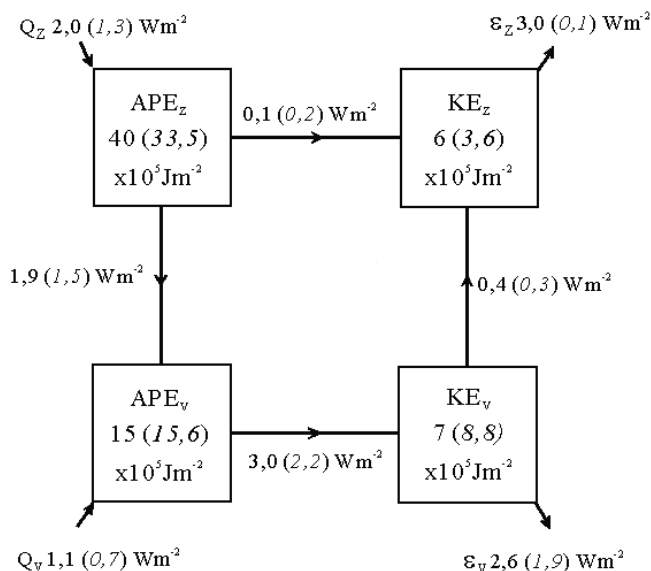
Slika 9. Letno povprečje dviganja predvsem ob termičnem ekvatorju (najbolj ogretem pasu okrog Zemlje) in spuščanja predvsem v subtropih na ploskvi 500 mbar – v enotah sprememb tlaka s časom v dvigajočem se zraku (zmanjševanje tlaka) oz. v spuščajočem se zraku (povečevanje tlaka). Vrednost $-0,1$ Pa/s ustreza pri temperaturi okrog -20 °C, ki je za 500 mbar nekako običajna, vertikalnemu dviganju s hitrostjo okrog $1,5$ cm/s. Skupaj s pasati pri tleh in antipasati v višinah ta dviganja in spuščanja oblikujejo Hadleyjevo celico meridionalne cirkulacije (po re-analizah ECMWF [4], barvna slika je na naslovnici).

imel Margules³ [14]; sodobno in popolno razlago pa je podal Lorenz⁴ (poleg v originalnem Lorenzovem članku [15], je koncept APE opisan tudi v npr. v [16]).

Na sliki 10 je jasno razvidno, da je največji rezervoar razpoložljive potencialne energije za povprečni zonalni tok APE_Z – to je tisti za zahodnike, okrog $40 \cdot 10^5$ Jm⁻². Je pa na prvi pogled nekoliko nepričakovano dejstvo, da ni glavna energijska pretvorba neposredno iz tega rezervoarja v kinetično energijo zonalnega toka KE_Z , temveč potekajo pretvorbe prek motenj – meridionalnih vrtincev, in sicer prek potencialne energije za gibanje vrtincev APE_V v kinetično energijo vrtincev KE_V , ki potem „poganjajo“ tudi zonalni tok s kinetično energijo KE_Z . Razlog za to smo že omenili: veliki gradienti med ekvatorjem in poloma (ki pomenijo velik APE_Z) težijo k izravnavam. Ker pa so meridionalne izmenjave učinkovite le v tropih in subtropih (v Hadleyjevi celici), v višjih geografskih širinah pa ne, ker tam Coriolisov efekt

³Max Margules (1856–1920), avstrijski meteorolog, po njem se imenuje enačba, ki opisuje nagib fronte [13].

⁴Edward Norton Lorenz (roj. 1917), ameriški matematik in meteorolog, pionir teorije determinističnega kaosa, pri študiju konvekcije v ozračju je odkril t. i. „čudni atraktor“ [13].

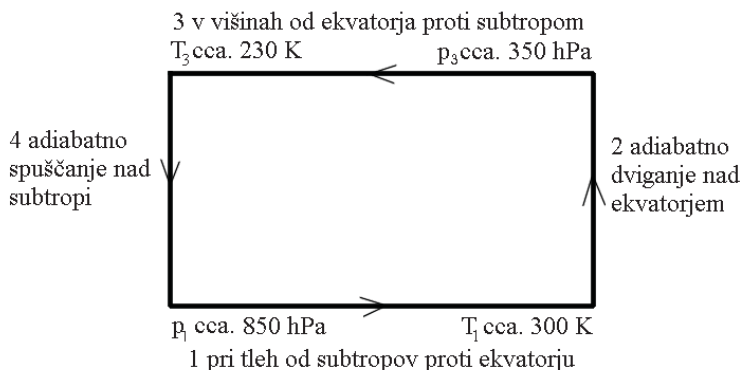


Slika 10. Pretvorbe in zaloge energije (po Lorenzu) v zonalnem načinu gibanja in v gibanju vrtincev na severni polobli; povzeto po modelskih rezultatih re-analiz NCEP/NCAR ([8], vrednosti v pokončnem tisku) in po starejših ocenah Oorta in Peixota ([17], vrednosti v oklepajih in s kurzivno pisavo).

„preobrne“ proti poloma usmerjene tokove v zahodnike, takega „povprečnega“ meridionalnega prenosa tam niti ni. To povzroči, da se gradienti še naprej povečujejo, kar privede do barokline nestabilnosti (prek čezmerne povečevanja APE_V) in s tem do močnih perturbacijskih prodorov toplih in hladnih zračnih mas proti polu oziroma proti subtropom – KE_V . No, to pri nas dobro poznamo – to je naše spremenljivo vreme.

7. Učinkovitost energijskih pretvorb

Že iz slike 10 vidimo, da se zaloga obeh oblik razpoložljive potencialne energije APE_Z in APE_V skupaj polni s sorazmerno majhno gostoto moči okrog 3 Wm^{-2} . To je zelo malo v primerjavi s povprečno gostoto moči na Zemlji absorbirane sončne energije, ki je, kot smo povedali v drugem poglavju, 236 Wm^{-2} . Torej je učinkovitost „atmosferskega toplotnega stroja“ zelo majhna – okrog enega odstotka. Posebej za trope in subtroje, kjer pa imamo zaključeno cirkulacijo v Hadleyjevi celici, pa lahko naredimo tudi oceno učinkovitosti s pomočjo modela Carnotovega toplotnega stroja.



Slika 11. Ozračje v tropih in subtropih kot Carnotov toplotni stroj

Zrak se 1) pri tleh s pasatnimi vetrovi steka proti ekvatorju (na sliki 11 spodaj od leve proti desni): recimo, da ima ta „toplejša stran“ temperaturo okrog $T_1 \approx 300$ K. Ob ekvatorju se 2) konvekcijsko dviga in pri tem adiabatsno razpenja in seveda pri tem ohlaja – recimo do temperature $T_2 \approx 230$ K. Potem se 3) v antipasatih pomika proti subtropom (na sliki 11 zgoraj od desne proti levi). Tu se 4) spušča navzdol, se pri tem adiabatsno stiska (in ob tem segreva). Kako zapišemo ustrezni Carnotov cikel? Ker imamo v ozračju težave z ocenjevanjem volumnov, zapišemo delo drugače: $p dV = V dp - mR dT$. Opravljeno delo v enem ciklu je torej:

$$\oint \frac{p dV}{m} = \oint \frac{V dp}{m} - \oint R dT.$$

Zadnji člen je krivuljni integral totalnega diferenciala in zato enak nič. Tako ostane samo:

$$\oint \frac{p dV}{m} = \oint \frac{V dp}{m} = \oint \frac{RT}{p} dp.$$

Vzdolž poti z diabatnimi spremembami, ko zrak potuje horizontalno, se tlak skoraj nič ne spreminja in je $dp \approx 0$, kar pomeni, da se vzdolž horizontalnih odsekov poti 1) in 3) ne opravlja skoraj nič dela. Vzdolž obeh delov poti z adiabatsnimi spremembami pa se spreminja tlak za dp , in ob tem temperatura adiabatsno $T = T_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{R}{c_p}}$. Torej velja:

$$\oint \frac{p dV}{m} = \int_{p_1}^{p_3} \left(\frac{RT_1}{p_1}\right)^{\frac{R}{c_p}} p^{\frac{R}{c_p}-1} dp + \int_{p_3}^{p_1} \left(\frac{RT_3}{p_3}\right)^{\frac{R}{c_p}} p^{\frac{R}{c_p}-1} dp =$$

$$\begin{aligned}
&= -c_p T_1 \left[\left(\frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}} - 1 \right] - c_p T_3 \left[\left(\frac{p_1}{p_3} \right)^{\frac{R}{c_p}} - 1 \right] = \\
&= (67\,480 - 66\,670) \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 800 \frac{\text{J}}{\text{kg}}.
\end{aligned}$$

Ko upoštevamo (podatki po [16]), da se v pasatih giblje okrog $m \approx 10^{18}$ kg zraka, da eno zaokroženje v njih traja $t \approx 1$ mesec, kar je približno $3 \cdot 10^6$ s, in da je področje veliko $S \approx 1,5 \cdot 10^{14}$ m², dobimo za ploskovno gostoto moči $W_k/S \approx 5,4$ Wm⁻². Torej spet dober odstotek ali dva od gostote absorbirane moči sončnega sevanja v tropih in subtropih.

Ali je torej to, da je ozračje sorazmerno neučinkovit toplotni stroj, morda slabo? Ne bi mogli pritrditi: zamislite si, kako viharo bi bilo življenje na Zemlji, če bi vetrovi na njej pihali s hitrostmi 100 ms⁻¹ ali pa celo z nekaj sto metri na sekundo! Je kar prav, da se v kinetično energijo ozračja pretvarja le nekaj odstotkov absorbirane moči sončnega sevanja!

LITERATURA

- [1] *Nuklearna Elektrarna Krško – Proizvodnja*, http://www.nek.si/sl/o_nek/proizvodnja/.
- [2] C. Fröhlich, *Solar Constant*, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center, <http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant>.
- [3] *USGS Energy Resources Program*, <http://energy.usgs.gov/>.
- [4] *ERA-40 Atlas*, ECMWF, http://www.ecmwf.int/research/era/ERA-40_Atlas/docs/index.html.
- [5] *EO Observation Deck: Net Radiation Dataset View*, NASA Earth Observatory, <http://earthobservatory.nasa.gov/Observatory/Datasets/netflux.erbe.html> ali *Outgoing Longwave Radiation::2005*, NASA Visible Earth, http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=7641.
- [6] David Stepaniak, *Vertically Integrated Mass, Moisture, Heat, and Energy Budget Products Derived from the NCEP/NCAR Reanalysis*, Climate Analysis Section, CGD, NCAR, <http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/newbudgets/>.
- [7] J. M. Wallace (diagram S. Medina) v: Holton, Curry in Pyle (ur.), *Encycl. Atmos. Sci.*, Acad. Press, 2003.
- [8] *The NCEP/NCAR Reanalysis Project at the NOAA/ESRL Physical Sciences Division*, Earth System Research Laboratory, <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml> in *NCEP/NCAR Reanalysis*, UCAR, <http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis/>.
- [9] *ARGO – part of the integrated global observation strategy*, <http://www.argo.ucsd.edu/index.html>.
- [10] T. H. Vonder Haar in A. H. Oort, *New estimate of annual poleward energy transport by Northern Hemisphere oceans*, J. Phys. Ocean. **2** (1973), str. 169–172.

- [11] K. E. Trenberth in J. M. Caron, *Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports*, J. Climate **14** (2001), str. 3433–3443.
- [12] A. Czaja in J. Marshal, *The Partitioning of Poleward Heat Transport between the Atmosphere and Ocean*, J. Atmos. Sci. **63** (2006), str. 1498–1511.
- [13] *Wikipedia, the free encyclopedia*, <http://en.wikipedia.org/wiki/>.
- [14] H. Pichler, *Dynamik der Atmosphäre*, Spektrum Akademischer Verlag, 1997.
- [15] E. N. Lorenz, *Deterministic nonperiodic flow*, J. Atmos. Sci. **20** (1963), str. 130–141.
- [16] R. Grothjahn v: Holton, Curry in Pyle (ur.), *Encycl. Atmos. Sci.*, Acad. Press, 2003.
- [17] A. H. Oort in J. P. Peixoto, *The annual cycle of the energetics of the atmosphere on a planetary scale*, J. Geophys. Res. **79** (1974), str. 2705–2719; povzeto po: Holton, *An Intr. to Dynamic Meteorology*, Elsevier Acad. Press, 2004, 4. izdaja.

NOVE KNJIGE

Pismo uredništvu o Brysonovi knjigi

Pisanje za širši krog bralcev je povezano s težavami. Čisto mogoče je, da pisec takega besedila ne ustreže vsem strokovnim zahtevam. Vendar je težko sprejeti misel, da je „trditev preprostejša, če je malo napačna“ ali če zavaja. Ali tudi takim knjigam bralci ne bodo mogli več zaupati?

Ob poročilu o Brysonovi knjigi *Kratka zgodovina skoraj vsega* v prvi številki letošnjega Obzornika se ne morem potuhniti, ker sem nad fizikalnim delom knjige javno negodoval. Naj še za bralce Obzornika navedem nekaj značilnih spodrsrljajev. Citate sem iz broširane angleške izdaje iz leta 2004 prevedel kolikor mogoče dobesedno in dodal kratke pripombe. O prevodu se strinjam s poročevalcem.

„Michelson je upošteval, da pol leta Zemlja potuje proti Soncu in pol leta od njega“ (str. 118). Interferometer na površju Zemlje z njo potuje okoli Sonca in kroži okoli zemeljske osi. Tirnica interferometra glede na zvezde je dokaj zapletena.

„Kratkoročno je [kvantna teorija] pomagala najti rešitev uganke Michelsonovih in Morleyjevih poskusov, ko je pokazala, da svetlobe sploh ni treba opisati kot valovanje“ (119, 120). V interferometru opazujemo interferenco dveh delnih curkov svetlobe in se moramo opreti na valovanje. S kvanti (fotoni) si pri opisu poskusa ni mogoče neposredno pomagati.

„Prva je odkritelju [Albertu Einsteinu] prinesla Nobelovo nagrado in je pojasnila naravo svetlobe (in je med drugim tudi omogočila televizijo)“ (120). Fotoefekt je odkril leta 1887 Heinrich Hertz in sta ga raziskala njegova asistenta Wilhelm Hallwachs in Philipp Lenard. Einsteinovo enačbo je mogoče pojasniti tudi brez kvantov. Naprave, ki izkoriščajo fotoefekt, niso neposredno povezane z enačbo.