

## Klimatické zmeny a ich možné dôsledky v mestách

*M. Lapin: Climate Changes and Possible Impacts in Urban Areas. Život. Prostr., Vol. 41, No. 5, p. 240 – 244, 2007.*

The paper is devoted to brief analysis of possible climate change impacts in rural and urban areas. Climate change due to enhanced greenhouse effect can result in about 2.5 °C mean global temperature increase until 2100. In Slovakia it is assumed as a range of 2 to 4 °C annually. On the other hand the additional warming of urban areas is caused mainly by changed heat balance of Earth's surfaces in urbanized agglomerations (concrete, asphalt, buildings, cobblestones, etc.) and partly also by the thermal pollution (release of energy at heating and other human activities). In smaller cities the urban effect causes warming by about 0.5 °C, in the largest ones up to 2 °C annually in long-term average. Possible melioration options to improve urban microclimate are listed in the paper.

Človek ovplyvňoval klimatické pomery vo svojom okolí odjakživa, rozdiel je iba v tom, že pred 10 tisíc rokmi žilo na Zemi iba o čosi viac ako 5 miliónov ľudí a teraz už vyše 6 200 miliónov (6,2 miliardy). Navyše, dnešní ľudia majú oveľa väčšiu spotrebu energie a tovarov v priemere na osobu a majú aj účinnejšie technické prostriedky na ovplyvňovanie životného a prírodného prostredia. Preto svojimi aktivitami ľudské spoločenstvo už veľmi pravdepodobne mení klimatické pomery na celej Zemi. Teraz je to predovšetkým emisiou oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) zo spaľovania a využívania fosílného uhlíka, uloženého pod zemský povrch pred desiatkami miliónov rokov. Modifikácia klímy mestských aglomerácií má svoje špecifiká najmä kvôli veľkej hustote vplyvov a tiež značne zmenenej energetickej bilancii zemského povrchu. Predmetom tohto príspevku je pokus o prepojenie lokálnych a globálnych vplyvov na klímu urbanizovaných priestorov v súčasnosti a v budúcnosti.

### Počasia v širšej súčasnosti je ale naozaj nezvyčajné

V minulosti sa občas vyskytovali prípady náhleho oteplenia, keď i na Slovensku vystúpila teplota vzdu-

chu na pár dní aj o vyše 10 °C nad dlhodobý priemer. Išlo väčšinou o krátkodobé udalosti s ojedinelým výskytom, ktoré boli po určitom čase vykompenzované opačnými extrémami. Teraz majú rozsiahle územia v Európe, severnej Ázii a severnej Amerike už viac ako 2 roky teplotu vzduchu vysoko nad dlhodobým priemerom. Napríklad 12 mesiacov (od septembra 2006 do augusta 2007) bolo v Hurbanove o 3,1 °C teplejšie ako je dlhodobý priemer. To je úplne výnimočný rekord, doteraz najvyššia hodnota bola prekonaná takmer o 1 °C. Treba tiež pripomenúť, že uplynulé desaťročie bolo asi najteplejšou dekadou na Zemi za posledných tisíc rokov, hoci to nemusí platiť vo všetkých menších regiónoch. V r. 2005 a 2006 sa zaznamenal najmenší rozsah plávajúceho morského ľadu v Arktíde od začiatku systematických pozorovaní a výrazne sa zmenšili aj horské ľadovce. V polovici septembra 2007 bol dokonca prekonaný rekord najmensej plochy plávajúceho ľadu v Arktíde z r. 2005 asi o 1,3 mil. km<sup>2</sup>. Vyskytli sa aj iné anomálie, predovšetkým intenzívne lejaky, dlhotrvajúce sucha a ničivé víchrice.

Mnohí sa pýtajú, či ide o nejaký prechodný výkyv, alebo o trvalú tendenciu. Klimatické zmeny tu boli vždy, niektoré dokonca väčšie ako tie súčasné. Hlavný rozdiel

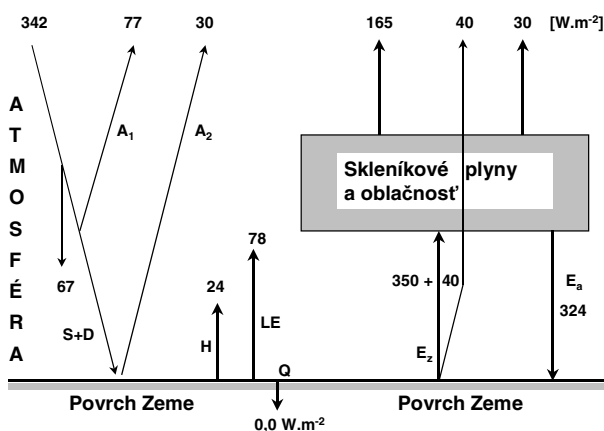
je v tom, že v minulosti trvali oveľa dlhšie ako teraz. Za uplynulých 100 rokov sa oteplilo na Zemi v priemere o  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (na Sibíri a okolo Špicbergov aj o viac ako  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a do r. 2100 sa očakáva ďalšie globálne oteplenie asi o  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (na severe Ázie až o  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Niekomu sa to možno nezdá veľa, no rozdiel dlhodobého priemeru teploty vzduchu medzi Komárnom a Trenčínom, alebo medzi Lučencom a Banskou Bystricou je iba  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Globálne oteplenia o viac ako  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  prebiehali v minulosti zvyčajne aj niekoľko miliónov rokov. Dokonca ani počas „rýchlych“ oteplení na konci ľadových dôb sa pravdepodobne za 1 000 rokov globálne neoteplilo o viac ako  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hoci regionálne to bolo aj o vyše  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pokiaľ ide o mestá alebo urbanizované priestory, už pred 200 rokmi sa jednoznačne zistilo, že majú odlišné mezo- a mikroklimatické pomery. Predovšetkým sa pozorovala vyššia teplota vzduchu od večera do rána a nižšia relatívna vlhkosť vzduchu. Vo viacerých prípadoch sa pozoroval aj vplyv miest na úhrny zrážok, vývoj búrkových oblakov a režim vetra. Tiež sa zistilo, že čím je mesto väčšie, tým je otepľujúci vplyv výraznejší, dokonca niektoré veľké mestá mali v centrálnej časti o viac ako  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  v priemere vyššiu teplotu ako ich neurbanizované okolie. Oprávnené sa predpokladalo, že hlavnou príčinou sú ľudia, vykurovanie a teplo produkované už samotnou prítomnosťou človeka. Neskôr sa ukázalo, že ešte dôležitejšia je zmena energetickej bilancie zemského povrchu v dôsledku existencie kamenných, betónových a asfaltových plôch. Uvedme preto stručný prehľad najdôležitejších procesov a vplyvov.

### Skleníkový efekt atmosféry

Pri hodnotení zmien klímy v urbanizovaných priestoroch nemôžeme obísť ani regionálne zmeny v širšom okolí miest. Začnime faktormi, ktoré sú v súčasnosti stredobodom pozornosti. Prírodný skleníkový efekt atmosféry tu bol od začiatku existencie Zeme. Funguje v zjednodušenej interpretácii tak, že atmosféra prepúšťa prichádzajúce, prevažne viditeľné slnečné žiarenie s vlnovou dĺžkou okolo 460 nanometrov (nm) na zemský povrch iba s malou absorpciou atmosférou, aerosólmi a oblačnosťou (obr. 1). Podstatná časť slnečného žiarenia preto dopadá na zemský povrch, ten sa zohrieva a vyžaruje smerom nahor tepelné žiarenie s väčšou vlnovou dĺžkou (s maximom hustoty toku okolo vlnovej dĺžky 12 000 nm v závislosti od teploty vyžarujúceho povrchu v súlade so Stefan-Boltzmannovým zákonom). Toto odchádzajúce dlhovlnné žiarenie pohlcujú skleníkové plyny v atmosfére takmer úplne, ohrievajú sa a vyžarujú tiež tepelné žiarenie smerom k Zemi aj do kozmického priestoru. Tento proces pokračuje až po

SCHÉMA ENERGETICKEJ BILANCIE ZEME AKO CELKU



Zdroj: IPCC, 2007

1. Schéma energetickej bilancie Zeme ako celku v dlhodobom priemere (všetko vo  $\text{W.m}^{-2}$ ):  $342\text{ W.m}^{-2}$  je prichádzajúce žiarenie od Slnka k hornej hranici atmosféry, albedo ( $A_1 + A_2$ ) predstavuje odraz prichádzajúceho žiarenia od atmosféry, oblakov a aerosólov ( $A_1$ ) a zemského povrchu ( $A_2$ ),  $67\text{ W.m}^{-2}$  je absorpcia prichádzajúceho žiarenia v atmosfére,  $H$  je turbulentný tok tepla zo zemského povrchu do atmosféry,  $LE$  je energia spotrebovaná na výpar zo zemského povrchu a transpiráciu rastlín,  $E_z$  je tepelné vyžarovanie zemského povrchu,  $E_a$  je spätné žiarenie atmosféry a oblakov,  $165\text{ W.m}^{-2}$  vyžaruje atmosféra a  $30\text{ W.m}^{-2}$  oblačnosť do kozmického priestoru,  $40\text{ W.m}^{-2}$  vyžaruje zemský povrch priamo do kozmického priestoru cez tzv. okno absorpcie vodnej pary, tok tepla do pôdy ( $Q$ ) je v ročnom priemere zanedbateľný.

hornú časť atmosféry so zmenšujúcou sa intenzitou, pretože tam jednak klesá hustota atmosféry a koncentrácia skleníkových plynov, jednak klesá teplota. Je zaujímavé, že jednotlivé skleníkové plyny sa vzájomne dopĺňajú tak, že cez atmosférické okno vodnej pary (vlnová dĺžka  $8\ 500 - 12\ 000\text{ nm}$ ) uniká priamo do kozmického priestoru iba malé množstvo vyžarovania zemského povrchu (asi  $40\text{ W.m}^{-2}$  z celkového toku  $390\text{ W.m}^{-2}$ ). Tak sa udržuje pri zemskom povrchu charakteristická priemerná teplota vzduchu. Čím je v atmosfére skleníkových plynov viac, tým je pri zemskom povrchu vyššia teplota vzduchu. Prírodný skleníkový efekt predstavuje oteplenie o  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ak by vzrástlo iba množstvo oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) na dvojnásobok, zosilnel by skleníkový efekt atmosféry asi na  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , teda asi o  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dôležité je teda zosilňovanie skleníkového efektu atmosféry vplyvom emisie skleníkových (radiačne aktívnych) plynov (podrobnejšie IPCC, 2001, 2007; Peixoto, Oort,

1992). V r. 2007 pravdepodobne prekročí antropogénne podmienená emisia fosílného uhlíka do atmosféry 9,2 mld. t.r<sup>-1</sup>, z čoho najmenej 40 % zostane v atmosfére v priemere 120 rokov. Zvyšok pohltia oceány alebo sa prechodne uloží v biosfére a pôde. Dlhodobou sa definitívne ukladá naspäť do fosílií pod zemský povrch a na morské dno v priemere iba okolo 0,5 mld. t uhlíka za rok.

### Ako je to v mestách?

Klimatické a mikroklimatické pomery miest sú tesne prepojené s klímou ich okolia, no majú aj svoje špecifiká, ktoré sa medzi jednotlivými mestami dosť podstatne odlišujú. Východiskom môže byť analýza odchýlok energetickej a celkovej radiačnej bilancie. Energetická bilancia zemského povrchu je vlastne výslednicou transformácie energie slnečného žiarenia, ktorú získa aktívna vrstva Zeme na tok tepla do pôdy (Q), na ohrievanie atmosféry (H) a na výpar z aktívnej vrstvy (z rôznych povrchov) Zeme (LE).

Rovnicu energetickej bilancie zemského povrchu môžeme pre jednorozmerný systém napísať v tvare

$$B = H + LE + Q,$$

kde je B celková radiačná bilancia daného povrchu alebo aktívnej vrstvy. Úloha advekcie, molekulárneho vedenia, difúzie a turbulentných tokov energie, hybnosti a vody je dôležitá hlavne pri priestorovom a globálnom chápaní energetickej bilancie, najmä pri veľkých horizontálnych gradientoch uvedených parametrov. V urbanizovaných priestoroch je zmenená jednak energetická bilancia, samotná celková bilancia prichádzajúceho a odchádzajúceho žiarenia B.

Bilancia krátkovlnného a dlhovlnného žiarenia v atmosfére a na zemskom povrchu je v konečnom dôsledku rozhodujúcim zdrojom energie na všetky klimatotvorné procesy. Rovnicu celkovej bilancie žiarenia na zemskom povrchu môžeme napísať v tvare

$$B = (S + D)(1 - A) - (E_z - (1 - A_L)E_a),$$

kde S je priame a D difúzne žiarenie smerom k zemskému povrchu, A je albedo krátkovlnného a A<sub>L</sub> albedo dlhovlnného žiarenia (pomer medzi odrazeným a prichádzajúcim žiarením), E<sub>z</sub> je vyžarovanie zemského povrchu a E<sub>a</sub> je spätné dlhovlnné vyžarovanie atmosféry.

Celková bilancia žiarenia na zemskom povrchu (v aktívnej vrstve Zeme) je teda súčet bilancie krátkovlnnej a dlhovlnnej zložky. Planetárne albedo je pre celú Zem dlhodobou stabilné (0,30, čiže 30 %), na jednotlivých miestach sa môže značne odlišovať, pričom má u nás aj výrazný ročný a menej výrazný denný chod.

Krajina v okolí miest má albedo počas vegetačného obdobia okolo 0,22 (vlhký trávnik) až okolo 0,33

(suchý trávnik), listnatý les má albedo 0,16 – 0,27, ihličnatý 0,06 – 0,19, holá pôda (ornica) 0,07 – 0,20 (v závislosti od farby a vlhkosti) a snehová pokrývka 0,18 – 0,85 (v závislosti od čistoty a čerstvosti snehu). V mestách sa nachádzajú rôzne plochy s veľmi rozdielnou farbou, teda aj ich albedo sa môže značne líšiť. Navyše, mestá môžu mať znečistené ovzdušie, čo pri pohľade zhora obvykle zvyšuje albedo. Mestá v teplých oblastiach majú v lete obvykle oveľa väčšie albedo ako ich okolie (javia sa ako svetlejšie) a mestá v chladnejších oblastiach majú v zime oveľa menšie albedo ako ich okolie. Pri väčšine povrchov má albedo rozdielne hodnoty pre rôzne vlnové dĺžky spektra žiarenia a niekedy aj pre rôzne uhly dopadu žiarenia na daný povrch.

Z rovnice energetickej bilancie vyplýva, že rozhodujúce je rozdelenie spotreby energie z celkovej radiačnej bilancie na výpar, priame ohrievanie atmosféry turbulentným tokom tepla a ohrievanie zemského povrchu. Na obr. 1 je distribúcia energetickej tokov v klimatickom systéme celej Zeme. V porovnaní s tým sú v mestách značné odchýlky predovšetkým v spotrebe energie na výpar. Vo väčšine miest je snaha o čo najrýchlejšie odstránenie zrážkovej vody a zavlažujú sa iba malé plochy. Kým v okolí mesta sa na výpar spotrebuje aj viac ako polovica z energie bilancie žiarenia (B), v mestách to môže byť aj menej ako 10 %. Preto môže byť mesto v priemere teplejšie ako jeho okolie, najmä v slnečných a vlhších oblastiach.

Dalším dôležitým rozdielom je režim ohrievania a ochladzovania zemského povrchu. V okolí miest je povrch obvykle pokrytý vegetáciou, ktorá zabezpečuje iba nepatrný denný chod toku tepla do pôdy a z pôdy, čím je pôda na povrchu suchšia, tým je priama výmena energie medzi pôdou a atmosférou menšia. Mestá majú väčšinou povrch charakteru betónu, asfaltu a kameňa s veľmi dobrou tepelnou vodivosťou, preto sa značná časť energie z radiačnej bilancie použije v denných hodinách na ohrievanie týchto plôch, pričom v noci, naopak, nastáva významný tok tepla zo zemského povrchu, povrchu budov a komunikácií do atmosféry. Preto je denný chod teploty vzduchu v centre mesta oveľa menší ako v jeho okolí. Najväčší rozdiel medzi teplotou v meste a okolí je niekoľko hodín po západe slnka v lete, kým sú uvedené povrchy v meste ešte prehriate, a vlastne sálajú teplo do okolia.

Menší výpar v meste a vyššia teplota vzduchu spôsobujú zníženie relatívnej vlhkosti vzduchu, rozdiel oproti okoliu mesta je najväčší nad ránom pred východom slnka. Keďže je v noci mesto teplejšie ako jeho okolie, vytvára sa nad ním lokálna oblasť nižšieho tlaku s charakteristickým nočným prízemným prúdením od okraja mesta do stredu so zakrivením vplyvom Co-

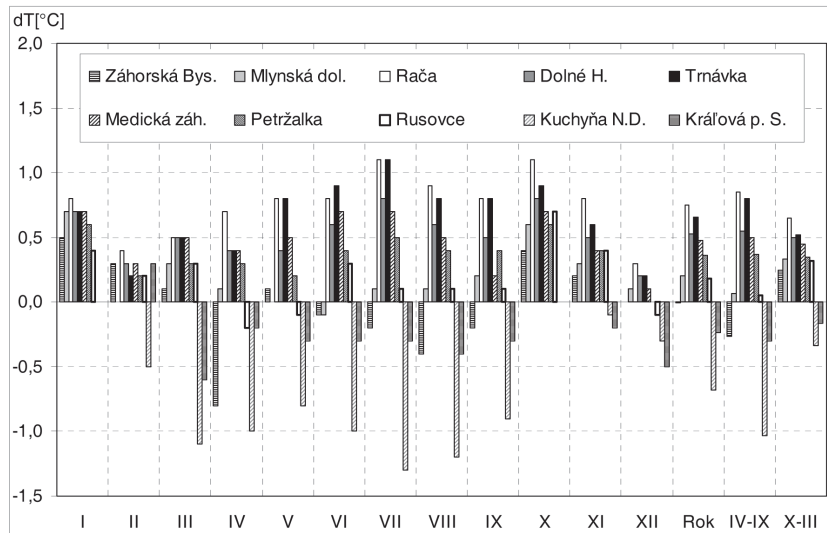
riolisovej sily. Zmenené teplotné a tlakové podmienky môžu, najmä vo večerných hodinách, zosilniť aj búrky a konvektívne zrážky. Kombinácia globálnej zmeny klímy a lokálnych efektov v urbanizovaných priestoroch prináša zaujímavé celkové dôsledky najmä v prípade vysoko nadnormálne teplého počasia. Určitú úlohu tu hrá aj horšia adaptabilita mestského obyvateľstva a nevhodné technické riešenie interiérov a dopravných prostriedkov. Známe sú smogové situácie a občas vysoká koncentrácia ozónu za horúceho a slnečného počasia.

### Čo môžeme urobiť?

Pokiaľ ide o globálnu zmenu klímy, sú iba dve možnosti ako sa s ňou vysporiadať – pokúsiť sa spomaliť proces globálneho otepľovania redukciami emisie skleníkových plynov do atmosféry, alebo sa zmene klímy prispôbiť. Obidve cesty sú náročné na technológie, financie a dohodu medzinárodného spoločenstva. Hrozba negatívnych dôsledkov zmeny klímy je však taká veľká, že sa nakoniec budú musieť najmä hlavné vinníci (priemyselne rozvinuté krajiny) dohodnúť. Tlak na prijatie opatrení silnie hlavne zo strany mladých ľudí s vyšším vzdelaním.

Aj v prípade mikro- a mezoklímy miest existuje celý rad možných opatrení na zlepšenie nepriaznivých podmienok za určitých situácií. Ide predovšetkým o farebné, tvarové, povrchové, materiálové a technologické riešenie budov, o optimálnu kombináciu trávnikov, parkov a ďalšej sídelnej vegetácie s kamennými, betónovými a asfaltovými plochami. Vo viacerých mestách sa postupne nahrádzajú asfaltové parkoviská dlažbou z tvárníc prerastených nízkym trávnikom s dobrým prienikom dažďovej vody do podlažia. Veľmi účinné je zavlažovanie mestskej zelene a iných plôch, ktoré v dôsledku výparu odčerpáva významné množstvo tepla v prostredí. Nákladná klimatizácia sa aplikuje iba vtedy, keď sa vyčerpajú iné možnosti meliorácie mikroklímy.

Mestská klíma sa na Slovensku podrobnejšie analyzovala v Bratislave v období 1981 – 1985 (Výskum mezoklímy Bratislavy, 1985) a v Košiciach v období 1986 – 1990 (Výskum mezoklímy Košíc, 1990) pričom sa použili riadne klimatické pozorovania zo staníc Bratislava-letisko, Bratislava-Koliba, Bratislava-Trnavská (Bratisla-



2. Rozdiely priemerov teploty vzduchu medzi 10 stanicami v nižších polohách v Bratislave a blízkom okolí a na referenčnej stanici Bratislava-letisko po mesiacoch roka a v teplom a chladnom polroku v období 1981 – 1984 v °C (Lapin a kol., 1987).

va-Mlynská dolina), Bratislava-Petržalka, Malý Javorník, Košice-letisko, Košice-Podhradová, Košice-Park gen. Petrova, Košice-Heringeš a asi 5 účelových klimatických staníc v Bratislave a 4 v Košiciach. Okrem toho sa realizovali tzv. meracie jazdy (meranie teploty vzduchu a relatívnej vlhkosti vzduchu pomocou elektrických snímačov upevnených na streche auta) a expedičné merania vetra a iných prvkov na vybraných stanovištiach (Lapin a kol., 1987). Na obr. 2 prezentujeme vybrané výsledky z porovnania priemerov teploty vzduchu s referenčnou stanicou Bratislava-letisko v období 1981 – 1984; centrum mesta a južné svahy v meste majú v lete teplotu vyššiu až o 1,1 °C v dlhodobom priemere.

Po skončení uvedených experimentov (1990) sa už nepokračovalo v takom podrobnom meraní zvláštností mestskej klímy nikde na Slovensku. Populárne meranie teploty povrchu komunikácií a priestorov v meste uvádzané na viacerých digitálnych výstupoch v našich mestách je veľmi vzdialené od metodiky i presnosti meteorologických meraní.

\* \* \*

Ovplyvňovanie makro-, mezo- a mikroklímy človekom už asi prekročilo únosné hranice a nezostáva nám nič iné, ako prijať účinné zmierňujúce opatrenia tak s celosvetovým, ako aj lokálnym dosahom. Na tom sa musia dohodnúť predovšetkým najbohatšie krajiny, pretože majú hlavný podiel viny na emisii skleníkových plynov do atmosféry a aj na iných fak-



toroch neprirodzene ovplyvňujúcich klimatický systém Zeme. Vzhľadom na to, že vodná para sa podieľa asi 65 % na globálnom skleníkovom efekte atmosféry a v tropických oblastiach je až 10-krát viac vodnej pary v ovzduší ako v najchladnejších regiónoch na Zemi, je veľmi pravdepodobné, že emisia iných skleníkových plynov (najmä  $\text{CO}_2$  a  $\text{CH}_4$ ) spôsobí najväčšie oteplenie na kontinentoch v blízkosti severného polárneho kruhu. Veľa môžu urobiť aj jednotlivci, predovšetkým zmenou zaužívaného životného štýlu orientovaného na zbytočne vysokú spotrebu. Je viacero dôkazov, že sa dá udržať rastúca životná úroveň a potravinová bezpečnosť aj v prípade prijatia účinných opatrení na spomalenie globálnej a regionálnej zmeny klímy. Viac informácií možno získať na [www.dmc.fmph.uniba.sk](http://www.dmc.fmph.uniba.sk) a [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

*V príspevku boli využité podklady z riešenia projektu VEGA č. 1/4033/07, Projektu SHMÚ H-07 a údaje z meraní v sieti staníc SHMÚ Bratislava.*

#### Literatúra

IPCC, TAR: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment

Report of the IPCC. Cambridge Univ. Press, UK 2001, 944 pp.

IPCC, AR4: Working Group I Report "The Physical Science Basis". Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>, Oct. 2007, 996 pp.

Landsberg, H. E.: The Urban Climate. New York : Academic Press, 1981, 277 pp.

Lapin, M.: Stručne o teórii klimatického systému Zeme, najmä v súvislosti so zmenou klímy. Meteor. Čas., 8, 1985, 1, s. 25 – 34.

Lapin, M., Pindják, P., Podobová, B.: Príspevok k mezoklíme Bratislavy. Meteorologické správy, 40, 1987, 5, s. 138 – 142.

Peixoto, J. P., Oort, A. H.: Physics of Climate. New York : Springer, 1992, 520 pp.

Výskum mezoklímy Bratislavy. Záverečná správa. Bratislava : SHMÚ, 1985.

Výskum mezoklímy Košíc. Záverečná správa. Bratislava : SHMÚ, 1990.

**Prof. RNDr. Milan Lapin, CSc., Oddelenie meteorológie a klimatológie Katedry astronómie, fyziky Zeme a meteorológie Fakulty matematiky, fyziky a informatiky UK, Mlynská dolina – pavilón F1, 842 48 Bratislava, [lapin@fmph.uniba.sk](mailto:lapin@fmph.uniba.sk)**

Bratislavská mestská časť Petržalka, august 2006. Foto: T. Hrnčiarová

