

# ZMENY KONCENTRÁCIE PRÍZEMNÉHO OZÓNU PO VETERNEJ KALAMITE Z NOVEMBRA 2004 VO VYSOKÝCH TATRÁCH

Svetlana Bičárová<sup>1</sup>, Peter Fleischer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Meteorologické observatórium GFÚ SAV Stará Lesná, Tatranská Lomnica,  
Slovenská republika, [bicarova@ta3.sk](mailto:bicarova@ta3.sk)

<sup>2</sup>Výskumná stanica ŠL TANAP, Tatranská Lomnica, Slovenská republika, [fleischer@vstanap.sk](mailto:fleischer@vstanap.sk)

**Abstract:** The 19 November 2004 windstorm caused significant forest damage in the High Tatras. Windstorm effect on forest sources of biogenic volatile organic compounds (BVOC) has been studied using BEIS2 series of GLOBEIS model for domain of square 16 km x 16 km with 1 km grid and periods from July to September in 2004 and 2005, respectively. Mean hourly ozone concentrations measured by the UV absorption method at stations situated at different position of forest belt - Stará Lesná, Štart, and Skalnaté Pleso were used. Decrease of average daily emission flux for native species (isoprene, total monoterpenes and other VOCs) from 26 to 12 mg m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> (-54%) emitted by vegetation of model domain reflects land use due to windstorm disturbance. Relationship between O<sub>3</sub> concentration values for considered periods in 2005 and 2004 shows at larger decrease (-20%) in central part than at higher forest border (-8%) and increase (8%) at lower border of forest belt. Relatively relevant correlation (R<sup>2</sup> = 0.538) between BVOC and ozone for station Štart indicates that effect of BVOC on ozone formation in central part of forest belt is not negligible. On the other hand, natural emissions are probably less dominant at lower part (Stará Lesná, R<sup>2</sup> = 0.056) of forest belt.

**Key words:** BVOC emissions, windstorm, forest vegetation, the High Tatras domain, BEIS model

## Úvod

Mimoriadne silný nárazový vietor s rýchlosťou nad 160 km.h<sup>-1</sup> sa vyskytol na južných, záveterných svahoch Vysokých Tatier v nadmorskej výške 800-1200 m n.m. 19. novembra 2004 (*Simon a Vivoda, 2005*). Veterná víchrica spôsobila vážne poškodenie lesného porastu. Postihnuté územie tvorilo súvislý pás od Tatranskej Kotliny po Štrbské Pleso vo výške od 700 do 1350 m n.m. a malo výmeru približne 12 600 ha, čo je takmer tretina z celkovej výmery lesov Tatranského národného parku.

Z hľadiska troposférickej fotochémie je lesná vegetácia dôležitým zdrojom biogénnych prchavých organických látok (BVOC), hlavne izoprénu a monoterpénov. BVOC sú látky vysoko reaktívne (*Kleinman a kol., 2002; Paulson a kol., 1997*) a emitované vo výrazne vyššom množstve (*Fowler a Erisman, 2003*) ako antropogénne emisie. Meranie a modelovanie BVOC v globálnom a regionálnom rozsahu je dôležité pre pochopenie priebehu chemických procesov v atmosfére. Pri výpočte odhadu množstva biogénnych emisií väčšina modelových systémov (GLOBEIS, ENVIRON, GEOS-CHEM) vychádza z algoritmu podľa *Guenthera a kol. (1993)*.

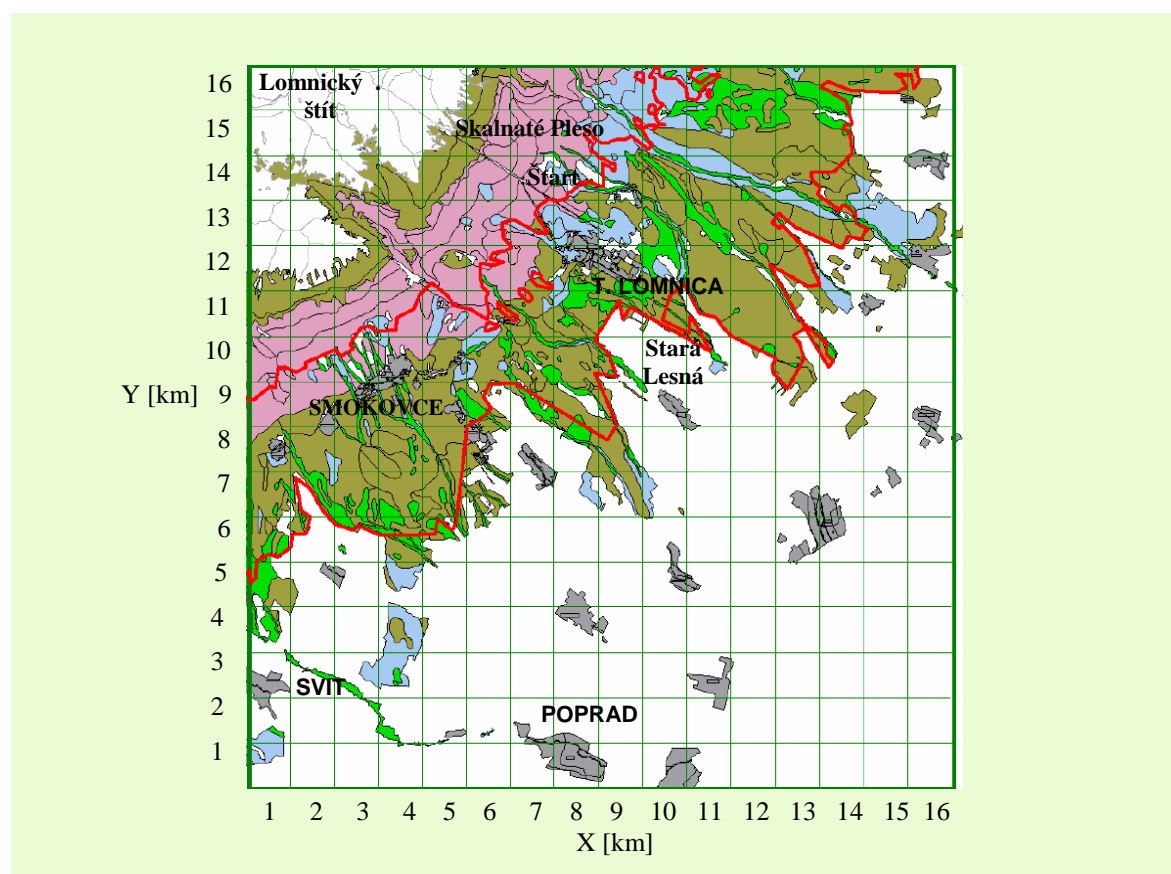
Cieľom tejto práce je analyzovať zmeny koncentrácie prízemného ozónu (O<sub>3</sub>) po veternej kalamite, ktorá spôsobila výraznú redukciu zdrojov biogénnych prchavých organických látok v oblasti Vysokých Tatier.

## Materiály a metódy

Vyhodnotenie koncentrácií prízemného ozónu (*Montgomery a Runger, 1999*) vychádza z meraní priemerných hodinových koncentrácií O<sub>3</sub> od 1. júla do 30. septembra v roku 2004, t.j. pred veternou kalamitou (ďalej ako A) a v rovnakom časovom období v roku 2005, t.j. po veternej kalamite (ďalej ako B) na stanicích situovaných na odlišných miestach lesného pásma modelového územia (obr. 1): Stará Lesná – dolná hranica lesa, T. Lomnica - Štart (ďalej ako Štart) – lesné pásmo, Skalnaté Pleso –

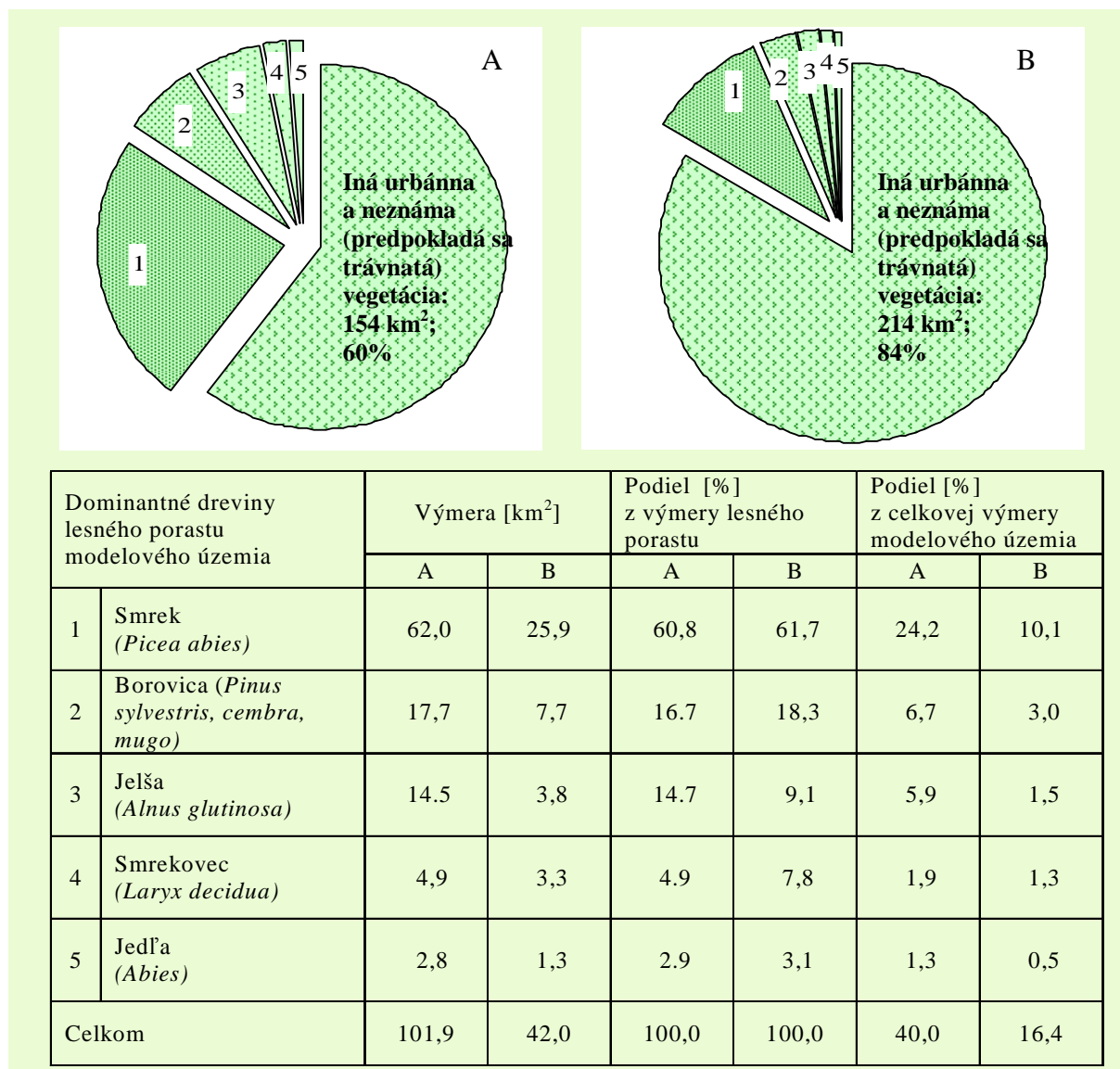
horná hranica lesa. Všetky stanice sú vybavené automatickými ozónovými analyzátorami, ktoré pracujú na princípe UV absorpcie. Prístroje sú pravidelne kalibrované podľa sekundárneho ozónového kalibračného štandardu SHMÚ, ktorý je porovnávaný s českým primárnym štandardom. Na výpočet odhadu biogénnych emisií bol použitý model GloBEIS (Global Biosphere Emissions and Interactions System) - BEIS2 verzia ([www.globeis.com](http://www.globeis.com)), ktorý zohľadňuje vlastnosti zemského povrchu (podiel a typ vegetačného pokrytia), príslušné emisné charakteristiky (Guenther a kol., 1993, 1999, 2000) a vplyv meteorologických faktorov, ako je teplota vzduchu a fotosynteticky aktívne slnečné žiarenie (ďalej ako PAR). BEIS2 umožňuje priradiť na vstupe vhodné hodnoty parametrom ako izoprénový adjustačný koeficient (1); počet vrstiev v korune pre Gausovskú integráciu (5); časové pásmo (-1) pre synchronizáciu slnečného času s časom ďalších vstupných údajov. Ďalej rozsah uvažovaného časového obdobia v hodinách (0 – 23), v juliánskych dňoch (183 – 274, resp. 182-273) a rokoch (2004, resp. 2005). Pri výpočte PAR je možné zvoliť si priamy alebo nepriamy (import údajov oblačnosti) spôsob vstupu. Vstupné moduly importujú súbory, ktoré definujú modelové územie (pozíciu, rozmery, grid a vlastnosti povrchu) a environmentálne podmienky (oblačnosť a teplota vzduchu). Výstupné moduly generujú súbory, v ktorých sú emisie uvedené v tonách pre každú hodinu alebo pre každú gridovú bunku modelového územia. Okrem toho sú naturálne emisie izoprénu, celkových monoterpénov a ďalších prchavých organických látok počítané ako hmotnostný tok v jednotkách  $[mgC.m^{-2}.h^{-1}]$ .

Modelové územie - štvorec 16 km x 16 km, 1 km grid – reprezentuje centrálnu časť Vysokých Tatier s príslušnými osídlenými oblasťami, meteorologickými observatóriami a stanicami (obr. 1). Vstupný súbor definuje modelové územie vlastnosťami gridových buniek: I - (X = 1 až 16 km), J - (Y = 1 až 16 km), plocha (1 km<sup>2</sup>), zemepisná šírka (49° 20' N), zemepisná dĺžka (19° 20' E).



Obr. 1. Modelové územie: 16 km x 16 km, grid 1 km; farebné plochy – lesné porasty pred víchricou; červená čiara – ohraničenie kalamitnej plochy; biela plocha – iná vegetácia; šedá farba – mestá a iné osídlené oblasti; meteorologické observatória GfÚ SAV – Stará Lesná, Skalnaté Pleso a meteorologická stanica ILTER – Štart.

Povrch modelového územia podľa typu vegetácie možno rozdeliť do dvoch hlavných kategórií, a to lesný porast s dominantnými drevinami: smrek (*Picea abies*), borovica (*Pinus sylvestris, cembra, mugo*), jelša (*Alnus glutinosa*), smrekovec (*Laryx decidua*), jedľa (*Abies*) a potom iná vegetácia najmä mestského a vidieckeho osídlenia – predpokladá sa určitý podiel trávnatých porastov a kríkov. Po veternej kalamite došlo k výraznej redukcii plochy lesných porastov (zo 102 km<sup>2</sup> na 42 km<sup>2</sup>, t.j. o 56 %) a v dôsledku toho k približne 24%-nému nárastu v kategórii iná vegetácia vzhľadom k celkovej ploche modelového územia, pričom zmeny v percentuálnom zastúpení jednotlivých drevín nie sú také evidentné (obr. 2). Hlavné emisné charakteristiky, ktoré špecifikujú emisný potenciál dominantných druhov vegetácie po kvalitatívnej (emisný faktor) a kvantitatívnej (index listovej plochy – LAI a hustota istovej hmoty - LMD) stránke sú podľa BEIS2 kódov (vegib2 ) uvedené v tab. 1.



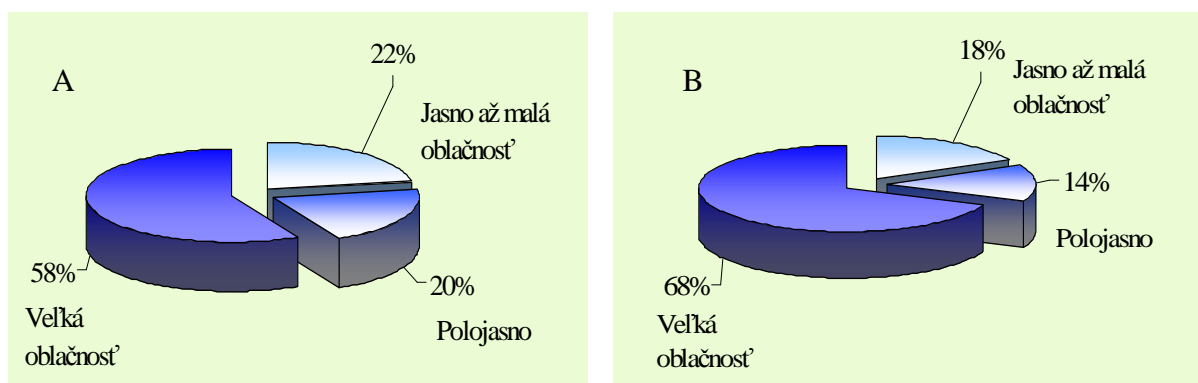
Obr. 2. Štruktúra a percentuálne zastúpenie jednotlivých druhov vegetácie modelového územia: A – pred veternou kalamitou; B – po veternej kalamite.

Pre výpočet PAR a charakteristík závislých od teploty boli použité údaje hodinových pozorovaní oblačnosti a hodinové hodnoty teploty vzduchu [°C] z databázy údajov meteorologických observatórií GfÚ SAV v Starej Lesnej a Skalnatom Plese (Ostrožlík, 2005; Ostrožlík, 2006) a zo stanice ILTER na Štarte. Z hľadiska tvorby naturálnych emisií, ale aj prízemného ozónu, boli meteorologické podmienky

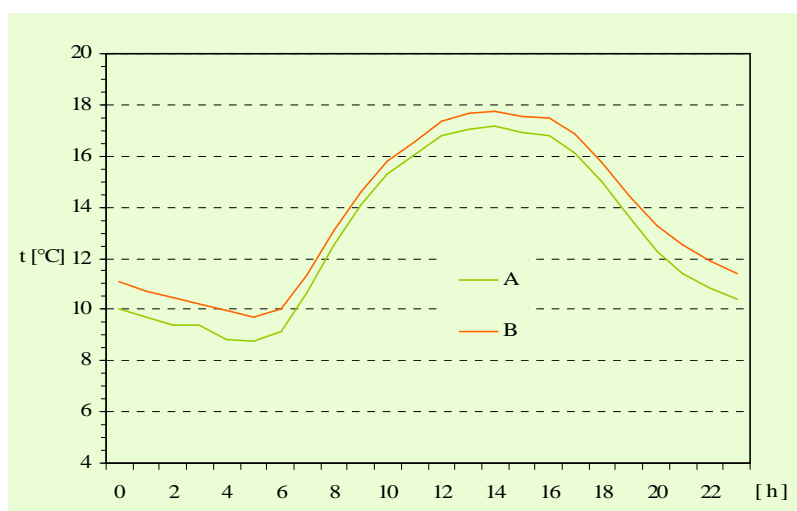
menej priaznivé v prípade oblačnosti, resp. PAR (obr. 3) a mierne zvýhodnené v prípade teploty vzduchu (obr. 4) počas uvažovaného obdobia v roku 2005 v porovnaní s rokom 2004.

Tab. 1. Emisné charakteristiky dominantných druhov vegetácie modelového územia podľa BEIS2 (Guenther a kol., 1993)

BEIS2 vegb2 kód	Názov	Emisný faktor [ $\mu\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ]			Index listovej plochy LAI [ $\text{m}^{-2}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	Hustota listovej hmoty LMD [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
		ISO	TMT	OVC		
Lesná vegetácia						
98001 - Abie	Jedľa ( <i>Abies</i> )	170	5 100	2 775	7	1 500
98008 - Alnu	Jelša ( <i>Alnus glutinosa</i> )	43	42	694	5	375
98052 - Lari	Smrekovec ( <i>Larix decidua</i> )	43	42	694	5	375
98077 - Pice	Smrek ( <i>Picea abies</i> )	23 800	5 100	2 775	7	1 500
98078 - Pimu	Borovica ( <i>Pinus sylvestris</i> , centra, mugo)	79	2 380	1 295	3	700
Iná						
98117- urba	Urbárna (trávnaté a lesné plochy – približne 20%)	409	161	201	4	108
980070- othe	Iná (neznáma, predpokladá sa trávnaté plochy)	56	140	84	4	150



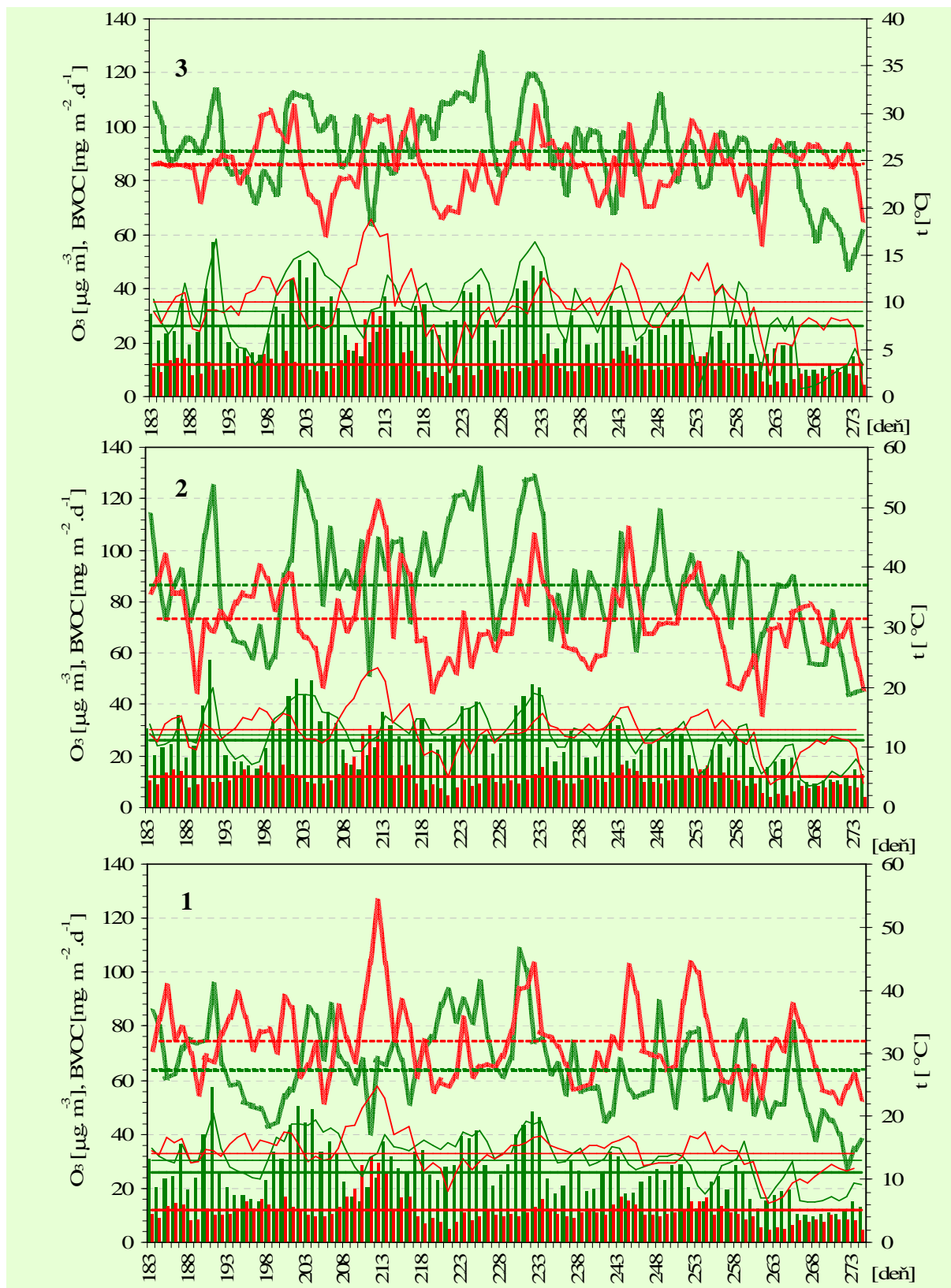
Obr. 3. Podiel počtu dní s oblačnosťou [%] podľa stupňa pokrytia oblohy: jasná obloha ( $N < 2/10$ ), oblačná ( $2/10 \leq N \leq 8/10$ ) a zamračená obloha ( $N > 8/10$ ) v študovanom období: A – pred veternou kalamitou, B – po veternej kalamite.



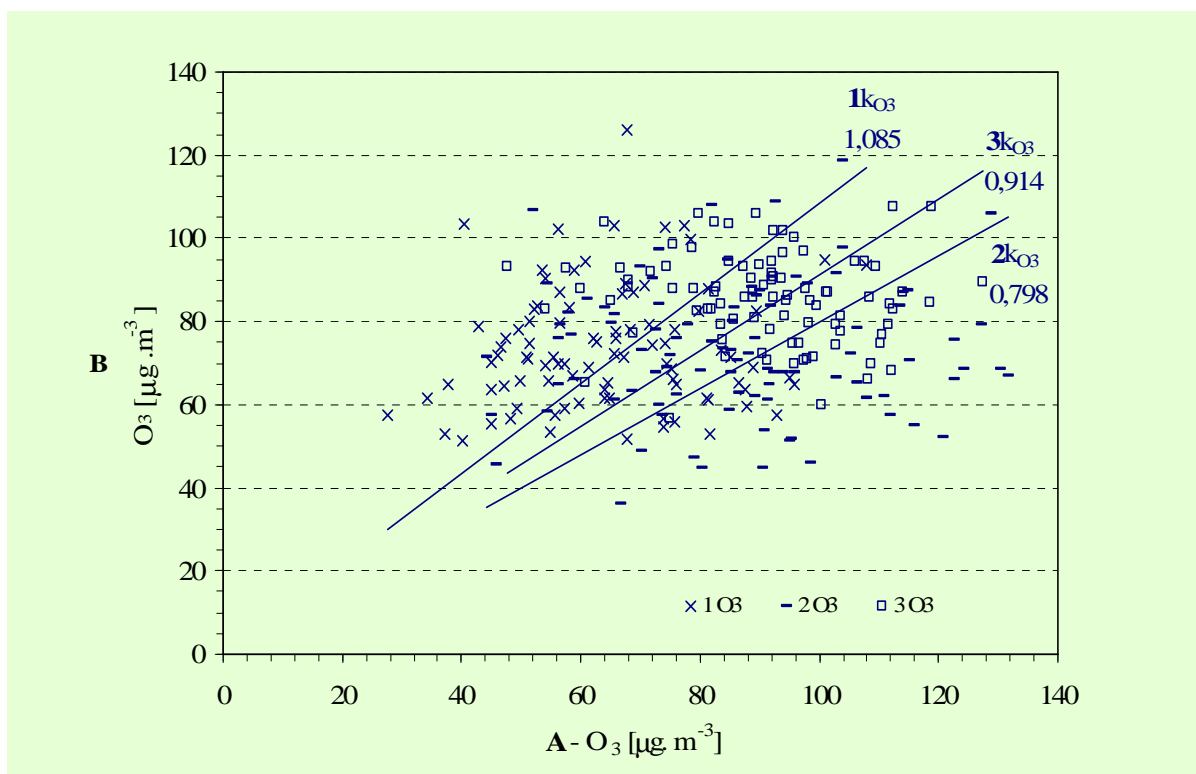
Obr. 4. Denný chod teploty vzduchu [°C] pre modelové územie v študovanom období: A – pred veternou kalamitou, B – po veternej kalamite.

## Výsledky a diskusia

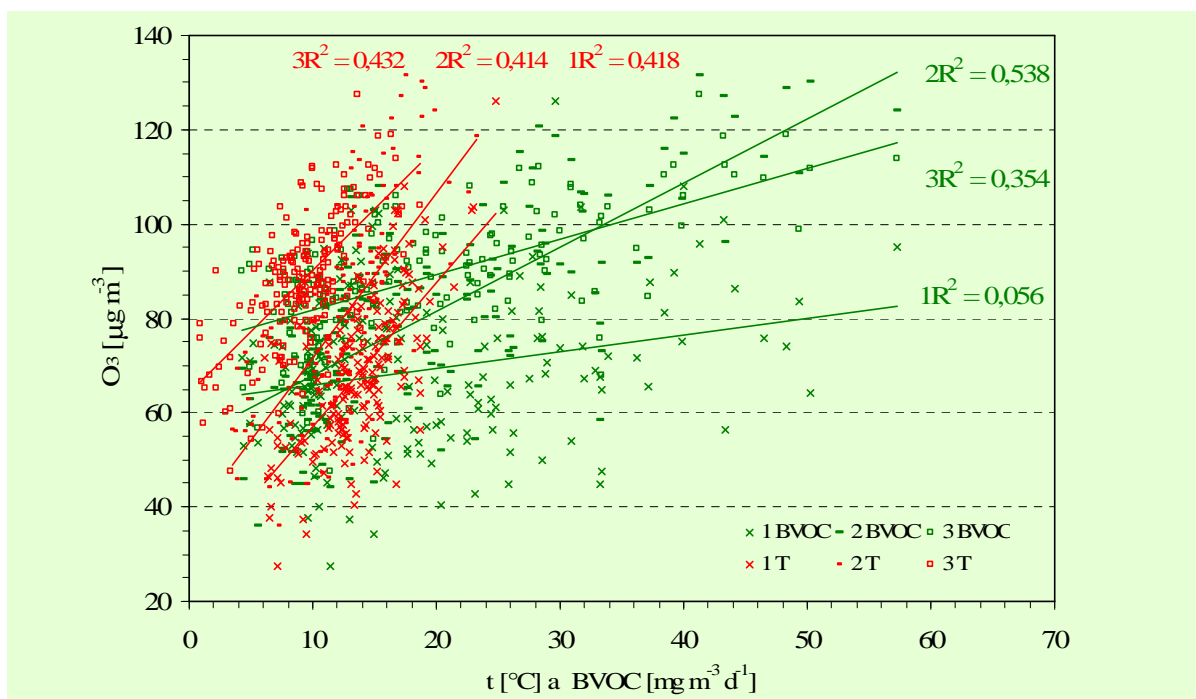
Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že koncentrácia prízemného ozónu nevykazuje výraznejšie zmeny pred a po veternej kalamite (obr. 5). Maximálne, resp. minimálne koncentrácie  $O_3$  sa vyskytujú súčasne s nárastom, resp. poklesom teploty vzduchu a potvrdzujú predpoklad dobrej korelácie podľa *Kremlera* (2001). Teplota vzduchu je však zároveň dôležitým faktorom pri tvorbe biogénnych emisií. Napr. v období dní 208 – 213 v roku 2005 sa výraznejší nárast teploty vzduchu prejavil zvýšenou produkciou biogénnych emisií, ktorá aj napriek redukcii zdrojov v dôsledku veternej kalamity dosahovala, resp. prevyšovala hodnoty na úrovni roku 2004. Súčasne počas týchto dní došlo k najväčšiemu nárastu koncentrácie  $O_3$  za celé letné obdobie roku 2005, najmä na stanicích Štart a Stará Lesná. Ak porovnáваме priemerné hodnoty za uvažované obdobie, potom teplota vzduchu bola v roku 2005 na Štarte i na Skalnatom Plese vyššia ako v roku 2004 približne o  $0,6\text{ }^\circ\text{C}$  (t.j. 5 až 6%). Mohli by sme preto očakávať o niečo vyššie hodnoty koncentrácie  $O_3$  v roku 2005 ako v roku 2004. Podľa priemernej hodnoty  $O_3$  však došlo k poklesu koncentrácie ozónu na Štarte z 86 na  $73\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , t.j. 15% i na Skalnatom Plese z 91 na  $86\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , t.j. 5%. Iba v prípade stanice Stará Lesná sa súčasne s nárastom teploty vzduchu (z  $13,4$  na  $14,3\text{ }^\circ\text{C}$ ) zvýšila aj koncentrácia  $O_3$  z 64 na  $74\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Presnejšiu kvantifikáciu zmien koncentrácie  $O_3$  dáva hodnota smernice ( $k$ ) lineárnej závislosti priemerných denných hodnôt  $O_3$  pre obdobie v roku 2005 (B – po kalamite) vo vzťahu k uvažovaným hodnotám v roku 2004 (A – pred kalamitou). Podľa výsledkov  $k$  (obr. 6) koncentrácia  $O_3$  sa najviac zmenila na stanici Štart (asi 20%-ný pokles). Približne rovnaké zmeny na úrovni 8 - 9% charakterizujú stanice okrajového pásma lesného porastu s tým rozdielom, že na dolnej hranici (Stará Lesná) došlo k nárastu a naopak na hornej hranici (Skalnaté Pleso) k poklesu koncentrácie  $O_3$  v roku 2005 oproti roku 2004. Výsledky dávajú pomerne dobrú koreláciu medzi koncentráciou prízemného ozónu a teplotou vzduchu vo všetkých oblastiach lesného porastu modelového územia – koeficienty determinácie sú zhruba na úrovni 0,4 (obr. 7). Zaujímavá je korelácia medzi BVOC a prízemným ozónom. Rozdiely medzi koeficientami determinácie naznačujú významnejší vplyv BVOC ( $R^2 = 0,538$ ), a to aj v porovnaní s teplotou vzduchu, v lesnom pásme na stanici Štart. Možno tiež predpokladať, že biogénne emisie ovplyvňujú tvorbu ozónu ale v menšej miere v oblasti hornej hranice lesa (Skalnaté Pleso,  $R^2 = 0,354$ ) a takmer vôbec v oblasti dolnej hranice lesa (Stará Lesná;  $R^2 = 0,056$ ). V tejto časti modelového územia je zrejme výraznejší vplyv iných faktorov, napr. regionálne emisie produkované dopravou alebo priemyselnou činnosťou. Napriek tomu, že pokles množstva BVOC emisií v letnom období roku 2005 oproti roku 2004 je oveľa výraznejší - priemerne za deň z 26 na  $12\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , t.j. 54% - ako zmeny koncentrácie  $O_3$ , vplyv biogénnych látok na tvorbu ozónu priamo v lesnom poraste, resp. blízko nad ním nie je celkom zanedbateľný. Pokles produkcie emisií približne zodpovedá redukcii plochy lesných porastov po veternej kalamite (59%, obr.2). Často diskutovaným problémom je presnosť vypočítaných BVOC emisií, ktorá je v porovnaní s určením antropogénnych emisií odlišná. Evidencia antropogénnych emisií v prepracovanom systéme inventarizácie zdrojov znečistenia umožňuje určiť pomerne spoľahlivé výsledky. Proces uvoľňovania prchavých organických látok z vegetácie je ovplyvnený množstvom rôznych faktorov, preto je jeho simulácia pomocou modelových algoritmov náročná. Verifikácia modelových výsledkov vyžaduje porovnávacie merania, ktoré pre modelové územie vo Vysokých Tatrách nie sú zatiaľ k dispozícii. Semiempirický BVOC model s podobným základným algoritmom ako BIES2, ktorý bol aplikovaný pre územie lesných porastov v Poľsku a testovaný štatistickou metódou Monte Carlo ukazuje na nepresnosti v rozsahu -71% až 73% (izoprén), -57% až 140% (monoterpény), -55% to 57% (iné prchavé organické látky), (*Smiatek and Bogacki, 2005*). Na vylepšení modelových algoritmov sa neustále pracuje. Najnovšie biosféricko-atmosférické modely sú doplnené o ďalšie mikroklimatické parametre a detailnejšie zohľadňujú vlastnosti vegetácie (*Guenther, 2000*).



Obr. 5. Variabilita priemerných denných koncentrácií prízemného ozónu [ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] (hrubšia čiara) a teploty vzduchu [ $^{\circ}\text{C}$ ] (tenšia čiara) podľa meraní: 1 – Stará Lesná; 2 – Štart; 3 – Skalnaté Pleso a vypočítaný odhad množstva biogénnych emisií BVOC [ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ] (zvislá čiara) pre modelové územie Vysokých Tatier a odpovedajúce priemerné hodnoty za uvažované obdobie (vodorovné čiary): A – 2004 (pred kalamitou – zelená), B – 2005 (po kalamite – červená).



Obr. 6. Priemerné denné koncentrácie  $O_3$  [ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] po kalamite (B) vo vzťahu ku priemerným denným koncentráciám  $O_3$  pred kalamitou (A) a hodnoty smernice ( $k$ ) ich lineárnej závislosti: 1 – Stará Lesná; 2 – Štart; 3 – Skalnaté Pleso.



Obr. 7. Vzájomný vzťah medzi koncentráciou  $O_3$  [ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] a odhadovaným množstvom biogénnych emisií BVOC [ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ], resp. teplotu vzduchu [ $^{\circ}\text{C}$ ] a príslušné koeficienty determinácie  $R^2$ : 1 – Stará Lesná; 2 – Štart; 3 – Skalnaté Pleso.

## Záver

Predmetom štúdia je analýza zmien koncentrácie prízemného ozónu vo Vysokých Tatrách po víchrici z 19. novembra 2004 v súvislosti s očakávanou zmenou množstva biogénnych látok emitovaných do atmosféry. Pre výpočet odhadu množstva BVOC bol použitý model GloBEIS, verzia BEIS2, ktorý počíta s vlastnosťami zemského povrchu a s vplyvom meteorologických podmienok (teplota vzduchu a fotosynteticky aktívne slnečné žiarenie).

Koncentrácia prízemného ozónu nevykazuje výraznejšie zmeny pred a po veternej kalamite. Najväčšia zmena koncentrácie O<sub>3</sub> bola na Štarte (asi 20%-ný pokles), v strede pásma lesa, kde je zároveň medzi BVOC a prízemným ozónom o niečo lepšia korelácia ( $R^2 = 0,538$ ) ako medzi prízemným ozónom a teplotou vzduchu ( $R^2 = 0,414$ ). Po okrajoch lesného pásma boli zmeny koncentrácie O<sub>3</sub> malé (8 až 9%). Je zaujímavé, že v oblasti dolnej hranice lesa (Stará Lesná) bol zaznamenaný nárast koncentrácie O<sub>3</sub> v roku 2005 oproti roku 2004.

Z dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že vplyv biogénnych látok na tvorbu ozónu v lesnom poraste a tesne nad ním nie je celkom zanedbateľný. V oblasti dolnej hranice lesa (Stará Lesná) sú pravdepodobne významnejšie iné zdroje, napr. emisie z dopravy, z priemyslu a pod., ako biogénne zdroje z lesných porastov.

**Pod'akovanie:** Autori ďakujú grantovej agentúre VEGA (grant No. 2/5006/25, No. 1/1043/04) za čiastočné sponzorovanie tejto práce a nevládnej organizácii ILTER a SHMÚ za poskytnutie údajov.

## Literatúra

- Fowler, D., Erisman, J. W., 2003: Biosphere-Atmosphere Exchange of Pollutants. In: Towards Cleaner Air for Europe – Science, Tools and Applications. Part 2 Overviews from the Final Reports of the Eurotrac-2 Subprojects (Eds Midgley and Reuther), Margraf Verlag, Weikersheim, 35-55.
- Guenther, A., Zimmerman, P., Harley, P., Monson, R., Fall, R., 1993: Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluation and sensitivity analysis. *J. Geophys. Res.*, 98, 12609-12617.
- Guenther, A., Archer, S., Harley, P., Helmig, D., Klinger, L., Vierling, L., Wildermuth, M., Zimmerman, P., Zitzer, S., 1999: Biogenic hydrocarbon emissions and landcover/climate change merman, in a subtropical savanna. *Phys. Chem. Earth*, 24, 6, 659–667.
- Guenther, A., Geron, C., Pierce, T., Lamb, B., Harley, P., Fall, R., 2000: Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America. *Atm. Environ.*, 34, 2205-2230.
- Kleinman, L. I., Daum, P. H., Imre, D., Lee, Y.-N., Nunnermacker, L. J., Springston, S. R., Weinstein-Lloyd, J., Rudolph, J., 2002: Ozone production rate and hydrocarbon reactivity in 5 urban areas: A cause of high ozone concentration in Houston. *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), 1467, doi:10.1029/2001GL014569.
- Kremler, M., 2001: Prízemný ozón na Slovensku. In: Extrémy prostredia (počasia) - limitujúce faktory bioklimatologických procesov. CD-ROM, ISBN 80-7137-910-7.
- Montgomery, D. C., Runger, G., 1999: Applied Statistics and Probability for Engineers. John Wiley & Sons, Inc., New York, ISBN 0-471-17027-5, 817 p.
- Ostrožlík, M., 2005: Výsledky meteorologických pozorovaní na observatóriách GfÚ SAV v r. 2004. GfÚ SAV, Bratislava, SR, 33 s.
- Ostrožlík, M., 2006: Výsledky meteorologických pozorovaní na observatóriách GfÚ SAV v r. 2005. GfÚ SAV, Bratislava, SR, 33 s.



Paulson, S. E., Sen, A. D., Liu, P., Fenske, J. D., Fox, M. J., 1997: Evidence for formation of OH reaction from the radicals of O<sub>3</sub> with alkenes in the gas phase. Geophys. Res. Lett. 24: 3193-3196.

Simon A., Vivoda J., 2005: High resolution numerical study of the 19 november 2004 windstorm. In: Hydrológia pre integrovaný manažment vodných zdrojov. Hydrologické dni, Bratislava, ISBN 80-88907-53-5.

Kontaktná adresa:

Ing. Svetlana Bičárová,  
Meteorologické observatórium GfÚ SAV Stará Lesná  
059 60 Tatranská Lomnica, Slovenská republika  
Tel. č.: +421-052 78791 65  
E-mail: [bicarova@ta3.sk](mailto:bicarova@ta3.sk)

Ing. Peter Fleischer, PhD  
Výskumná stanica ŠL TANAP  
059 60 Tatranská Lomnica, Slovenská republika  
Tel. č.: +421-052 47803 93  
E-mail: [fleischer@vstanap.sk](mailto:fleischer@vstanap.sk)