

Modelovanie koncentrácie prízemného ozónu pomocou modelu MetPhoMod v oblasti Vysokých Tatier

Modeling of ground level ozone concentration in the High Tatras region using model MetPhoMod

S. BIČÁROVÁ ⁽¹⁾ and P. FLEISCHER ⁽²⁾

⁽¹⁾ Meteorologické observatórium GFÚ SAV Stará Lesná, Slovenská republika (e-mail: bicarova@ta3.sk)

⁽²⁾ Výskumná stanica ŠL TANAP T. Lomnica, Slovenská republika (e-mail: fleischer@post.sk)

Abstract Special situation of high O₃ concentrations (~ 190 µg.m⁻³) occurred during 12 - 14 August 2003 in the High Tatras Mountain region was studied by model MetPhoMod (Perego, 1999). Meteorological data and O₃ concentration measured at fixed ground based stations: Poprad-Gánovce, Stará Lesná, T. Lomnica-Štart, Skalnaté Pleso and Lomnický štít in vertical profile from 706 to 2634 m a.s.l. were used. Emissions and land cover type of model domain (20 x 18 km) were obtained from EMEP database and regional land use maps, respectively. Two applications of MetPhoMod were performed: (1) interpolation - measured O₃ concentrations were involved into the border conditions; (2) simulation - measured O₃ data were excluded from border section. Vertical profile of interpolated O₃ concentrations documents ozone transport from ozone enriched high troposphere to surface layer of atmosphere in the night from 13 to 14 August 2003. Results of model simulation showed differences between simulated and measured O₃ concentrations. Measured values were higher than simulated about: 53% at Poprad-Gánovce, 39% at Stará Lesná, 65% at Štart, 60% at Skalnaté Pleso and 74% at Lomnický štít during peak phase of O₃ episode. Long-range and descent transfer of air pollution supported by high pressure system apparently played more significant role in O₃ concentration increase than its local formation during investigated period in the High Tatras Mountain region.

Key words: *ground level ozone, episode, temporal and spatial variation, complex topography, emissions, meteorological factors, photochemistry, model MetPhoMod*

1. Úvod

Modelovanie koncentrácie prízemného ozónu (O₃) simuluje priebeh tvorby O₃ a zároveň umožňuje podrobnejšie analyzovať vplyv a vzájomné pôsobenie významných faktorov, akými sú napr. antropogénne a biogénne emisie (Fiore a kol., 2005), regionálna klimatická zmena (Steiner a kol., 2006; Forkel a Knoche, 2006), diaľkový prenos znečistenia (Auvray a Bey, 2005).

Pre celoplošné hodnotenie kvality ovzdušia na Slovensku sa využívajú matematické a interpolačné modely CEMOD (modelovanie základných znečisťujúcich látok SO₂, NO_x, NO₂, benzén a CO) a IDW-A (priestorová interpolačia koncentrácií pre PM₁₀, PM_{2,5}, ťažké kovy a O₃), (Szabó, 2005). Aplikáciou modelu LOTOS - EUROS boli vypočítané sekvenčné hodinové koncentrácie O₃ pre roky 1999 a 2003, ktoré potvrdili veľmi malý vplyv slovenských emisií na priemerné ročné koncentrácie O₃ na území SR (Kremler, 2006). Podľa projektu VaV/740/04/03 (vypracovaný na Katedre meteorologie a ochrany prostredia MFF UK Praha), na analýzu vzniku, transportu a šírenia fotochemického smogu v strednej Európe je vhodné použiť model CAMx (Comprehensive Air Quality Model with extensions), a to v kombinácii s niektorým meteorologickým prognostickým modelom, ako napr. ALADIN (ČHMÚ, SHMÚ), resp. MM5 (Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model). Cezhraničný prenos acidifikačných a eutrofizačných látok ako aj O₃ v Európe rieši unifikovaný EMEP model (Simpson, 2003).

Doteraz nebola urobená analýza interakcií meteorologicko-fotochemických procesov v oblasti Vysokých Tatier metódou numerického modelovania. Modelové výpočty, viazané na určitú topografickú doménu, v ktorých sú aplikované rôzne algoritmy (matematicko-fyzikálne vzťahy, rovnice, teoretické mechanizmy a schémy), charakterizujú danú doménu všeobecnejšie v porovnaní so štatistickými metódami. Modelovanie situácií s vysokými koncentraciami je osobitne dôležité vo Vysokých Tatrách, pretože táto oblasť patrí spolu s bratislavským regiónom k oblastiam s najväčšou ozónovou záťažou na Slovensku.

Na simuláciu ozónových epizód v členitom teréne je vhodný model MetPhoMod - Meteorological and Photochemistry Model (Perego, 1999), ktorý bol pôvodne vyvinutý pre vysokohorské regióny Álp. Štruktúra tohto modelu s možnosťami flexibilnej parametrizácie poskytuje dobrú východiskovú pozíciu pre štúdium ozónových epizód v oblasti Vysokých Tatier.

Cielom použitia modelu MetPhoMod je modelovať koncentrácie O₃, ktoré detailnejšie popisujú reálny priebeh ozónovej epizódy a špecifikujú tvorbu O₃ z lokálnych zdrojov emisií v oblasti Vysokých Tatier v dňoch od 12. do 14. 8. 2003.

2. Materiály a metódy

2.1. MetPhoMod model

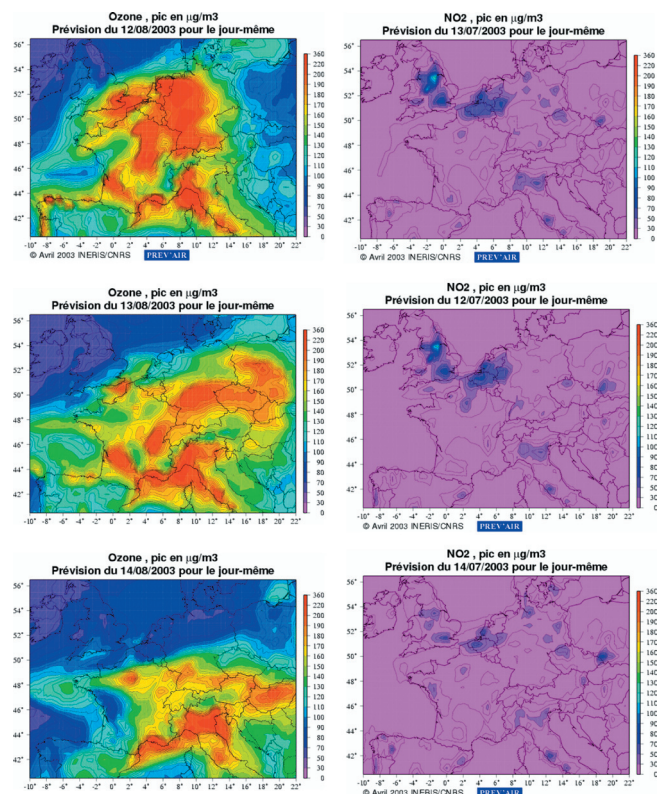
MetPhoMod (Perego, 1999) je eulerovský, prognostický, 3D, mezoškálový model na simuláciu ozónových epizód

v zložitom horskom teréne. Je to samostatný program, ktorý obsahuje moduly pre atmosférickú dynamiku, žiarenie, interaktívne zmeny medzi atmosférou a zemským povrchom, chemizmus v plynej fáze a depozíciu. Transport sa počíta podľa metódy PPM (Piecewise Parabolic Methods), výpočet turbulencie vychádza z $k-\varepsilon$ turbulentnej schémy s implicitným riešením a nehydrostatický tlak je vyjadrený výpočtom eliptickej rovnice odvodenéj z rovnice kontinuity. Program zahŕňa chemickú interpretáciu a preddefinovaný vstupný súbor s chemickými rovnicami chemického mechanizmu RACM - Regional Atmospheric Chemistry Mechanism (Stockwell a kol., 1997). MetPhoMod neobsahuje moduly pre oblaky, aerósole a chemizmus v heterogénnej fáze. Topografický popis domény počíta s dvomi kategóriami sieťových buniek, a to bunky nad a pod povrchom zeme. V prípade buniek pod zemským povrchom, všetky toky na bočných a spodných okrajoch majú nulovú hodnotu. Pomocné sieťové body kopírujú terén vo vrstve tesne nad zemským povrchom a sú určené pre výpočet charakteristík prízemnej vrstvy atmosféry. Model používa karteziánsku mriežku. Modelovú doménu reprezentuje mriežka stĺpcov so štvorcovou základňou a výškou, ktorá zodpovedá výške príslušnej vrstvy vertikálneho rozdelenia. Všetky hodnoty sú sústredené v strede stĺpca a dynamické charakteristiky sú vyhodnotené metódou Rhie a Chow (1983), formou navrhnutou Clappierom (1998). Systém spracovania chemických rovníc využíva metódu založenú na rozdelení reagujúcich látok na rýchle a pomalé (Gong a Cho, 1993). Najrýchlejšie zložky sú riešené implicitne, pomalšie explicitným integračným krokom. Programový softvér pracuje pod operačným systémom UNIX a je prístupný na internetovej stránke <http://www.giub.unibe.ch/klimet/metphomod/>. Údaje vstupných a výstupných súborov majú štandardný binárny dátový formát: CDF (Common Data Format). Konverziu CDF do ASCII CDL (Common Data form Language) formátu zabezpečujú programy ncdump: CDF>CDL, resp. ncgen: CDL>CDF (<http://www.unidata.ucar.edu/>).

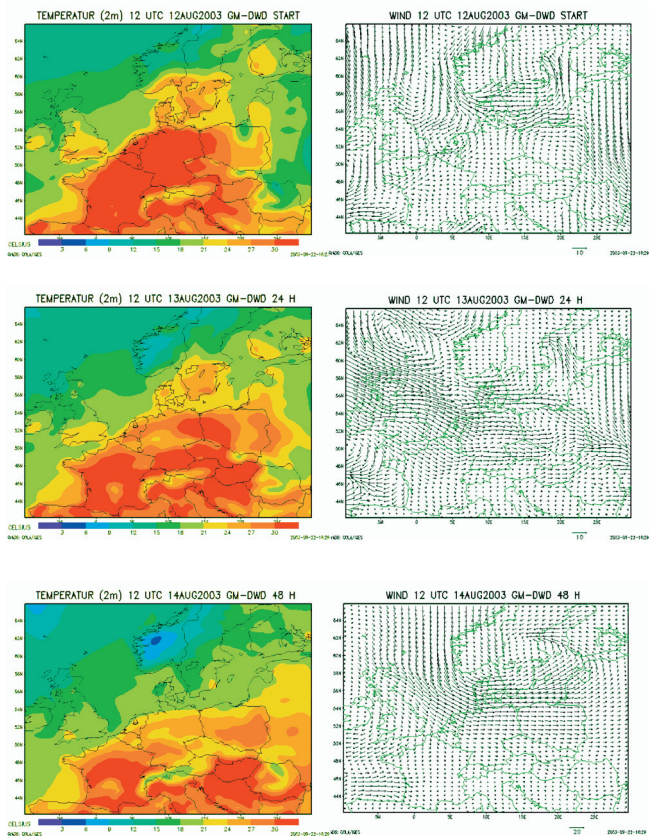
2.2. Ozónová epizóda - august 2003

Neobvykle vysoké koncentrácie O_3 boli zaznamenané v Európe a na Slovensku ($301 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v Bratislave a $195 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ na Lomnickom štíte) v auguste 2003 (Bičárová a kol., 2005). Vývoj ozónovej epizódy v súvislosti s meteorologickými podmienkami pre obdobie od 1. do 12. 8. 2003 analyzovali Vautard a kol. (2005). Výsledky simulácie chemicko-transportného modelu CHIMERE poukázali na výskyt vysokých koncentrácií O_3 ($180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) v blízkosti hraníc medzi Francúzskom a Nemeckom už 2. - 3. 8. 2003. V ďalších dňoch sa táto oblasť rozšírila z južného Nemecka do severozápadnej a do západnej časti Francúzska a nad severnú Európu, kde zotrvala do 12. 8. 2003. Potom sa znečistený vzduch, v dôsledku prechodu studeného frontu od Atlantického oceánu, začal presúvať smerom na východ a významnou mierou prispel k výraznému zvýšeniu koncentrácie prízemného ozónu aj nad našim územím v dňoch 12. až 14. 8. 2003. Potvrdili to merania prízemného

ozónu na Slovensku a ukazujú to aj mapové zobrazenia predpovedných informačných systémov: francúzsky - PREV'AIR - <http://www.prevaair.org/en/index.php>, (obr. 1) a nemecký TRUMF - Troposphärische UmweltForschung <http://trumf.met.fu-berlin.de/trumf/analyzer/index.htm>, (obr. 2). Podľa týchto prognóz, vzduchová hmota s extrémnymi koncentraciami O_3 od 160 do $360 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ktorá sa sformovala pri vysokých teplotách vzduchu ($27 - 30^\circ\text{C}$) v znečistených oblastiach západnej Európy (koncentrácie NO_2 od 80 do $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) sa 13. 8. 2003 začala presúvať na východ a ovplyvnila tak aj koncentrácie prízemného ozónu na Slovensku. 14. 8. 2003 sa prehriaty vzduch začal premiešavať s chladnejším vzduchom prúdiacim od severozápadu a ozónové koncentrácie v zemepisných šírkach $48 - 54^\circ\text{N}$ poklesli.



Obr. 1 Predpoveď maximálnych koncentrácií prízemného ozónu a NO_2 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] v dňoch od 12. do 14. 8. 2003 podľa francúzskeho informačného systému PREV'AIR (http://www.prevaair.org/en/prevision_o3.php). Na tvorbu predpovede sa používa model CHIMERE, ktorý je výsledkom spolupráce IPSL/CNRS (Pierre-Simon Laplace Institute/Centre National de Recherche Scientifique) a environmentálnej agentúry INERIS.

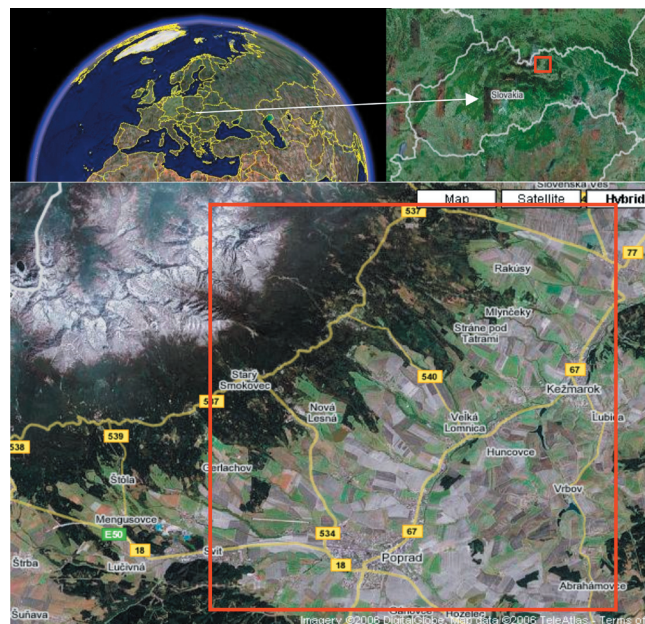


Obr. 2 Predpoveď teploty vzduchu [°C], rýchlosti [m.s⁻¹] a smeru vetra [°] o 12 h UTC, v dňoch od 12. do 14. 8. 2003 podľa nemeckého predpovedného systému TRUMF - Troposphärische UmweltForschung, ktorý na svojej internetovej stránke <http://trumf.met.fu-berlin.de/trumf/analyzer/index.htm> uvádza okrem predpovede počasia aj prognózu vývoja koncentrácie prízemného ozónu a znečistenia ovzdušia.

2.3. Modelové územie

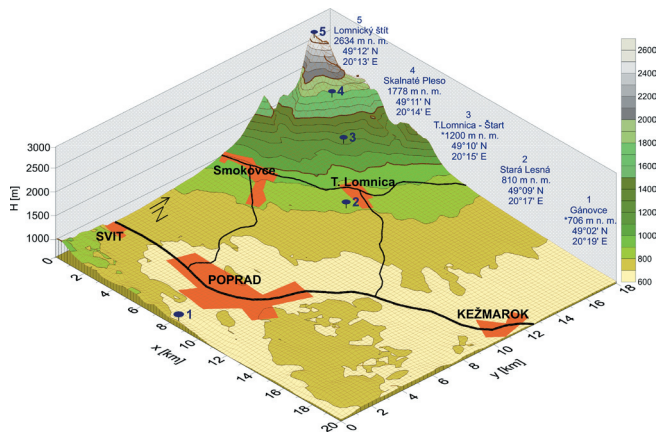
Pri výbere modelového územia bolo snahou vybrať takú oblasť, v ktorej sa nachádzajú meteorologické observatóriá a monitorovacie stanice prízemného ozónu usporiadané vo vertikálnom profile: Poprad-Gánovce (H = 706 m n.m., $\varphi = 49^\circ 02' N$, $\lambda = 20^\circ 19' E$); Stará Lesná (H = 810 m n.m., $\varphi = 49^\circ 09' N$, $\lambda = 20^\circ 17' E$); T. Lomnica-Štart (H = 1200 m n.m., $\varphi = 49^\circ 10' N$, $\lambda = 20^\circ 15' E$); Skalnaté Pleso (H = 1778 m n.m., $\varphi = 49^\circ 11' N$, $\lambda = 20^\circ 14' E$); Lomnický štít (H = 2634 m n.m., $\varphi = 49^\circ 12' N$, $\lambda = 20^\circ 13' E$), ako aj mestá a osídlené miesta s tvorbou lokálnych emisií z inventarizovaných zdrojov okresu Poprad a Kežmarok. Koncentrácie O₃ sa merajú 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. Monitoring znečistenia ovzdušia a meranie štandardných meteorologických prvkov (Ostrožlík, 2004) zabezpečuje SHMÚ, GFÚ SAV a VS ŠL TANAP. Juhovýchodnú časť modelového územia tvorí Popradská kotlina, kde sa nachádzajú mestá Svit,

Poprad a Kežmarok s významnými stacionárnymi a mobilnými zdrojmi emisií v tejto oblasti. Na druhej strane, pásmo lesného porastu predstavuje dôležitý zdroj biogénnych prekursorov O₃ (BVOC). Lokalizácia modelového územia je znázornená na satelitných snímkach (obr. 3).



Obr. 3 Zobrazenie modelovej domény pre simuláciu ozónovej epizódy z augusta 2003 na satelitných snímkach, <http://geology.com/europe-satellite-images.shtml>.

Modelové územie je rozdelené na plošné jednotky s rozlíšením 1 x 1 km² a 22 vertikálnych vrstiev v rozsahu nadmorských výšok od 600 do 2700 m n.m. Topografické údaje boli získané digitalizáciou vrstevníc z mapy Vysokých Tatier mierky 1:50 000 pomocou softvéru Didger a na zobrazenie bol použitý softvér Surfer (<http://www.goldensoftware.com>). Takto vytvorený digitálny výškový model reliéfu DEM (Digital Elevation Model) topografickej domény v trojrozmernom zobrazení zároveň predstavuje meteorologickú doménu (airsheed) rozmerov 20 km x 18 km x 3 km (obr. 4).



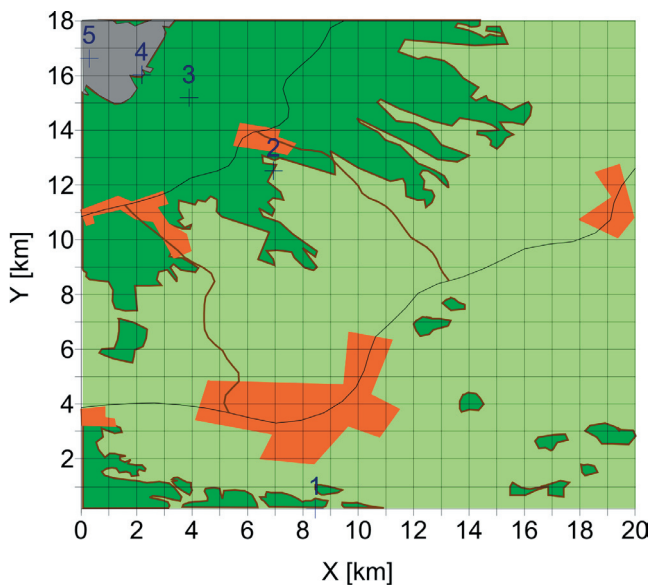
Obr. 4. Digitálny výškový model reliéfu - DEM modelovej domény 20 km x 18 km x 3 km.

2.4. Vstupné údaje a ich verifikácia

Vstupné súbory obsahujú údaje, ktoré možno rozdeliť do troch skupín, a to: statické údaje, dynamické údaje a emisie.

a) Statické údaje

Statické údaje charakterizujú vlastnosti zemského povrchu. Údaje pôdnych charakteristík, ako napr. tepelná kapacita pôdy, rozptyl tepla v pôde, index listovej plochy, drsnosť povrchu, evaporačná rezistencia pôdy, nie sú často k dispozícii. Ich pravdepodobné hodnoty sa dajú odhadnúť na základe typu pôdneho povrchu - klasifikácia podľa Andersona a kol. (1976). Povrch nášho modelového územia tvorí najmä lesná a trávnatá vegetácia. Menšiu plochu zaberajú osídlené oblasti a najmenej je zastúpené skalnaté územie (obr. 5). Odhadované parametre pre tieto typy povrchov sú uvedené v tab. 1.



Obr. 5. Pokrytie povrchu modelového územia podľa klasifikačných tried: a) - osídlené oblasti (hnedá), b) - zatravněný povrch (svetlejšia zelená), c) - plocha lesných porastov (tmavšia zelená), d) - skaly bez rozsiahlej vegetácie (šedá), 1 až 5 - meteorologické observatória a stanice.

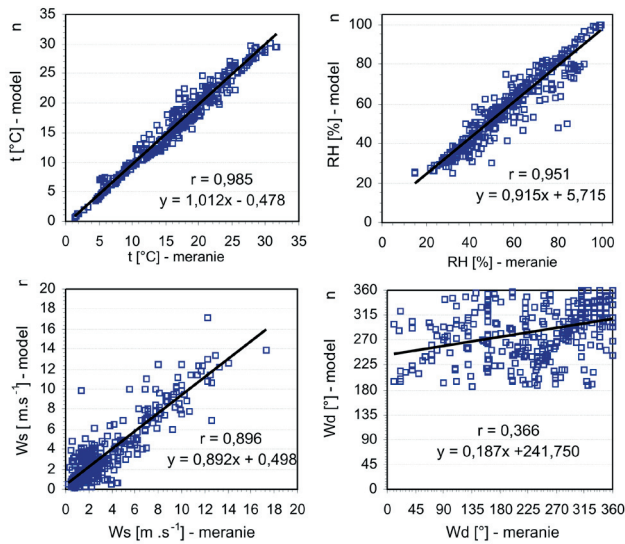
Tab. 1 Parametre statických údajov pre typické pokrytie povrchu modelového územia (prevzaté zo štúdie The POLLUMET, 93 study, <http://www.giub.unibe.ch/klimet/metphomod/>)

Veličina	jednotka	osídlené oblasti	zatravněný povrch	lesný porast	skaly
Albedo	-	0,15	0,20	0,20	0,35
Tepelná kapacita pôdy	[J.km ⁻³]	1000000	1000000	1000000	1000000
Rozptyl tepla v pôde	[m ⁻² .s ⁻¹]	4,00E-06	5,30E-07	5,30E-07	4,00E-06
Index listovej plochy	[m ² .m ⁻²]	0	2	4	0
Drsnosť povrchu - Z ₀	[m]	2,0	0,1	1,0	0,01
Podiel vegetácie	-	0	0-1	0-1	0
Evaporačná rezistencia pôdy minimálna	[m ² .W ⁻¹]	1000	350	250	1000
Evaporačná rezistencia pôdy maximálna	[m ² .W ⁻¹]	1000	80	90	1000
Evaporačná rezistencia pôdy v noci	[m ² .W ⁻¹]	1000	1000	650	1000
Evaporačná rezistencia pôdy pri zrážkach	[m ² .W ⁻¹]	0	0	0	0

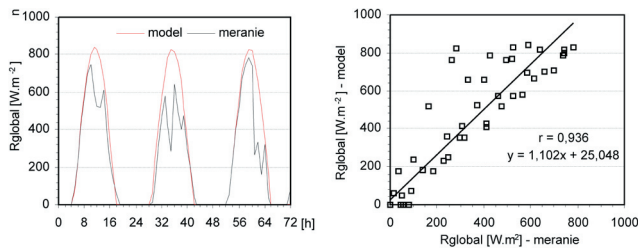
b) Dynamické údaje

Patria sem najmä meteorologické údaje: teplota vzduchu (virtuálna potenciálna teplota a absolútna teplota), tlak vzduchu, relatívna vlhkosť vzduchu, špecifická vlhkosť vzduchu, smer vetra, rýchlosť vetra, zonálna zložka smeru vetra, meridiálna zložka vetra. Priamo vo vstupnom súbore sa ako počiatočné údaje uvádzajú zonálna a meridiálna zložka vetra, virtuálna potenciálna teplota a špecifická vlhkosť vzduchu, ktoré sa vzťahujú na štartovací čas a zvolený počet vrstiev. Na parametrizáciu počiatočných a okrajových podmienok pre jednotlivé vertikálne vrstvy boli použité údaje namerané na meteorologických observatóriách a staniciach modelového územia (tab. 2).

Modelom vypočítané hodinové hodnoty teploty vzduchu, relatívnej vlhkosti vzduchu, smeru a rýchlosti vetra, ktoré zodpovedajú pozíciám (X, Y) staníc v mriežke modelovej domény boli porovnávané s nameranými hodnotami na týchto staniciach: Poprad-Gánovce (9, 1), Stará Lesná (8, 13), Štart (6, 16), Skalnaté Pleso (3, 17) a Lomnický štít (1, 18). Podľa korelačných koeficientov je medzi nimi dobrá zhoda. Väčšie odchýlky od nameraných hodnôt vykazujú rýchlosť vetra a smer vetra, ktoré sú v horskom teréne veľmi variabilné (obr. 6). Podobné výsledky validácie vstupných údajov uvádza aj *Perego (1999)* pre oblasť švačiarických Álp. Modelový algoritmus obsahuje aj výpočet globálneho žiarenia podľa *Paltridge a Platt (1976)*. Medzi vypočítanými a nameranými hodnotami globálneho žiarenia v Starej Lesnej je tesný vzťah, ktorý charakterizuje korelačný koeficient: $r = 0,936$ (obr. 7).



Obr. 6 Porovnanie hodnôt modelu MetPhoMod s experimentálnymi pre teplotu vzduchu t [°C], relatívnu vlhkosť vzduchu RH [%], rýchlosť vetra Ws [m.s⁻¹] a smer vetra Wd [°].



Obr. 7 Validácia modelových výpočtov pre globálne žiarenie R_{global} [W.m⁻²] podľa hodnôt nameraných v Starej Lesnej, v dňoch 12. až 14. 8. 2003.

Tab. 3 Ročné antropogénne emisie CO, NMVO, NO_x, SO_x [t] pre gridovú bunku 50 x 50 km, I=78, J=56 a jednotlivé sektory v skupinách hlavných zdrojov za rok 2003 podľa databázy EMEP (Vestreng a kol., 2005)

Sektory	CO [t]	NMVO [t]	NO _x [t]	SO _x [t]
S1 - spaľovanie v energetickom priemysle	13,4	4,2	111,1	212,9
S2 - energetické spaľovanie bez priemyselných zdrojov	1600,2	50,4	145,9	407,4
S3 - spaľovanie vo výrobnom procese	2127,3	9,7	346,4	350,5
S4 - výrobné procesy	0,0	17,7	13,4	31,9
S5 - ťažba a distribúcia fosílnych palív	0,0	220,9	0,0	0,0
S6 - použitie organických rozpúšťadiel	0,0	1162,7	0,0	0,0
S7 - cestná doprava	3779,5	667,8	1030,5	20,5
S8 - iné mobilné zdroje a stroje	58,2	55,4	196,9	13,2
S9 - odpadové hospodárstvo	0,0	15,7	2,0	0,8
S10 - poľnohospodárstvo	160,0	143,4	23,0	9,3
S11 - iné zdroje a spotreba	0,0	0,0	0,0	0,0
Stacionárne zdroje: S1+S2+S3+S4+S5+S6+S9	3740,8	1481,3	618,8	1003,5
Mobilné zdroje: S7+S8	3837,7	723,2	1227,4	33,7
Iné zdroje: S10+S11	160,0	143,4	23,0	9,3
Spolu (S1-S11)	7738,5	2348,0	1869,2	1046,5

c) Emisie

Získať reprezentatívne údaje pre emisie modelového územia s potrebným časovým (1 hod.) a priestorovým (1 km²) rozlíšením je problematické. Väčšina inventarizačných databáz eviduje antropogénne emisie integrované do ročných sumárnych hodnôt. Na Slovensku sú údaje o emisiách znečisťujúcich látok spracovávané v systéme NEIS (Národný emisný a inventarizačný systém), ktorý vznikol v spolupráci MŽP so SHMÚ. Inventarizované emisie sú publikované v ročenke „Správa o kvalite ovzdušia a podiele jednotlivých zdrojov na jeho znečisťovaní v Slovenskej republike“. Komplexný prehľad a operatívny prístup k databáze emisií produkovaných v Európe poskytuje stránka <http://webdab.emep.int/> v rámci projektu EMEP. Štruktúra stránky obsahuje prístup k neupraveným (Official Emissions) alebo k homogenizovaným (Expert Emissions) údajom. Odkaz na homogenizované emisie obsahuje možnosť výberu krajiny, sektorové údaje a emisie štruktúrované do gridu, ktoré sú vyhovujúce pre požiadavky modelov MSC-W a MSC-E. Presnejšiu kvantifikáciu umožňuje výstupný formát, ktorý obsahuje ročné emisie s plošným rozlíšením v sieti štvorcov 50 x 50 km. Geografickým súradnicami nášho modelového územia: zemepisná dĺžka X = 20,26° a zemepisná šírka Y = 49,16° zodpovedajú súradnice EMEP: X (i) = 78 a Y (j) = 56 s plochou gridového štvorca: 2213,17 km². Emisie z tohto územia pre rok 2003 sú uvedené v tab. 3.

Porovnanie výsledkov inventarizačných systémov WebDab a NEIS (tab. 4) ukazuje, že merné územné emisie [t.rok⁻¹.km⁻²] v roku 2003 boli v systéme WeDab väčšie ako hodnoty NEIS, v prípade CO a SO_x viac ako dvojnásobne. Je otázne, či sú hodnoty z databázy WebDab nadhodnotené

alebo údaje NEIS podhodnotené. Pre ďalšie spracovanie, t.j. pre postupnú disagregáciu na hodinové hodnoty (tab. 5), boli použité hodnoty európskej databázy, ktoré obsahujú aj emisie NMVOC ako aj ďalšie informácie o štruktúre zdrojov znečisťujúcich látok.

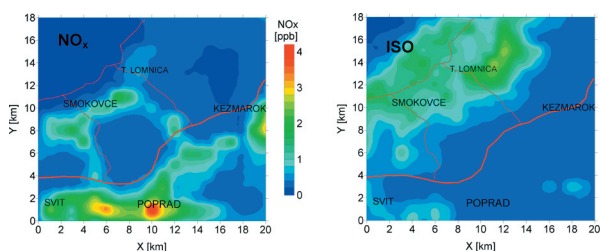
Tab. 4 Porovnanie merných územných emisií [t.rok⁻¹.km⁻²] v r. 2003 z inventarizačných systémov WebDab a NEIS

Zdroje znečisťujúcich látok	Merné územné emisie [t.rok ⁻¹ .km ⁻²] pre hlavné zdroje znečistenia ovzdušia v r. 2003							
	WebDab pre územnú jednotku I=78 J=56 (Vestreng a kol., 2005)				NEIS pre okresy Poprad a Kežmarok (Sajtáková, 2004)			
	CO	NMVOC	NO _x	SO _x	CO	NMVOC	NO _x	SO _x
Stacionárne	1,69	0,67	0,28	0,45	1,06	-	0,36	0,210
Mobilné	1,73	0,33	0,55	0,02	0,65	-	0,24	0,002
Iné	0,07	0,06	0,01	0,00	-	-	-	-
Spolu	3,50	1,06	0,84	0,47	1,71	-	0,60	0,212

Tab. 5 Postupná disagregácia ročných emisií CO, NMVOC, NO_x, SO_x podľa EMEP inventarizačnej databázy pre bunku I=78, J=56 (50 x 50 km) na hodinové hodnoty zodpovedajúce ploche modelového územia 20 x 18 km pre hlavné zdroje znečisťujúcich látok

WebDab - ročné emisie [t.r ⁻¹] pre plochu 50 x 50 km prilúchajúce bunke I=78, J=56					
Zdroje	CO	NMVOC	NO _x	SO _x	Spolu
Stacionárne	3740,83	1481,28	618,77	1003,48	6844,36
Mobilné	3837,67	723,24	1227,42	33,72	5822,05
Iné	159,99	143,44	22,97	9,32	335,72
Spolu	7738,49	2347,96	1869,16	1046,52	13002,13
Emisie modelového územia 20 x 18 km - Vysoké Tatry					
Ročné emisie [t.r ⁻¹]; *prepočítavací koeficient: 360/2500 *pomer plôch gridovej bunky modelového územia a štvorca EMEP					
Stacionárne	538,68	213,30	89,10	144,50	985,59
Mobilné	552,62	104,15	176,75	4,86	838,38
Iné	23,04	20,66	3,31	1,34	48,34
Spolu	1114,34	338,11	269,16	150,70	1872,31
Priemerné mesačné emisie [t.m ⁻¹]; prepočítavací koeficient: 1/12					
Stacionárne	44,89	17,78	7,43	12,04	82,13
Mobilné	46,05	8,68	14,73	0,40	69,86
Iné	1,92	1,72	0,28	0,11	4,03
Spolu	92,86	28,18	22,43	12,56	156,03
Priemerné mesačné emisie v auguste [t.m ⁻¹]; prepočítavací koeficient k podľa Parra a kol., 2006					
	kCO:1,25	kNMVOC:1,58	kNO _x :1,12	kSO _x :0,92	
Stacionárne	56,11	28,09	8,32	11,08	103,59
Mobilné	57,57	13,71	16,50	0,37	88,15
Iné	2,40	2,72	0,31	0,10	5,53
Spolu	116,08	44,52	25,12	11,55	197,27
Priemerné denné emisie v auguste [t.d ⁻¹]; prepočítavací koeficient: 1/31					
Stacionárne	1,81	0,91	0,27	0,36	3,34
Mobilné	1,86	0,44	0,53	0,01	2,84
Iné	0,08	0,09	0,01	0,00	0,18
Spolu	3,74	1,44	0,81	0,37	6,36
Priemerné hodinové emisie v auguste [kg.h ⁻¹]; prepočítavací koeficient: 1000/24					
Stacionárne	75,43	37,75	11,18	14,89	139,25
Mobilné	77,38	18,43	22,17	0,50	118,49
Iné	3,23	3,66	0,41	0,14	7,43
Spolu	156,03	59,84	33,77	15,53	265,17

Z priemerných hodinových emisií [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$] modelového územia boli vypočítané merné územné emisie v jednotkách [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], ktoré spĺňajú požiadavky vstupného súboru pre parametrizáciu emisií. Najskôr bolo urobené zaradenie buniek podľa typu zdroja emisií: stacionárne (mestá a väčšie sídla), mobilné (cesty) a iné zdroje. Počet buniek v jednotlivých skupinách tak predstavuje plochu [km^2] emisného zaťaženia pre jednotlivé zdroje: stacionárne – 37 km^2 , mobilné – 58 km^2 , iné – 265 km^2 . Merné územné emisie boli vypočítané pre každú skupinu samostatne, z podielu množstva emisií celého modelového územia [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$] a príslušnej plochy zaťaženej emisiami. Potrebné odlišenie medzi exponovanými (Poprad, Svit, Kežmarok) a menej zaťaženými lokalitami (S. Smokovec, T. Lomnica), ako aj rozdiely vyplývajúce z rôznej intenzity aktivít v priebehu dňa (zvyšená pracovná aktivita, najmä v čase od 6 do 18 hod.) boli zohľadnené približnými váhovými koeficientami. Zloženie zmesi NMVOC bolo špecifikované podľa charakteristického zastúpenia zložiek nemetanových uhľovodíkov, ktoré uvádza Stockwell a kol. (1990). Na odhad biogénnych emisií modelového územia (Bičárová a Fleischer, 2006) bol použitý model GLOBEIS-BEIS2 (Guenther a kol., 1993). Pre spracovanie veľkého počtu emisných údajov do požadovaného formátu bolo v prostredí Excel vytvorené špeciálne makro. Súbor so vstupnými emisiami obsahuje údaje pre látky: SO_2 , NO , NO_2 , CO , CH_4 , ETH , HC_3 , HC_5 , HC_8 , OL_2 , OLT , OLI , TOL , XYL , CSL , HCHO , ALD , KET , ORA_2 , ISO a API , ktoré sa vzťahujú k príslušnému časovému intervalu a súradniciam X, Y. Z týchto údajov boli modelom vypočítané koncentrácie látok, ktoré vstupujú alebo sú produktami fotochemickej a chemickej premeny podľa reakčnej schémy a podmienok chemického mechanizmu RACM. Na obr. 8 je možné vidieť priestorové rozloženie priemerných denných koncentrácií dôležitých prekursorov ozónu, akými sú NO_x a izoprén (ISO). Najvyššie koncentrácie NO_x korešponujú s produkciou emisií z hlavných stacionárnych a mobilných zdrojov územia. Na druhej strane, najvyššie koncentrácie ISO z biogénnych zdrojov zodpovedajú ploche lesných porastov. Tieto výsledky zároveň poukazujú na priestorovú zhodu medzi vypočítanými emisiami podľa disagregačného výpočtu a ich reálnou distribúciou podľa lokalizácie hlavných zdrojov.



Obr. 8 Priestorové rozloženie priemerných denných koncentrácií prekursorov prízemného ozónu: NO_x , ISO [ppb] podľa modelu MetPhoMod, v dňoch od 12. do 14. 8. 2003.

3. Výsledky a diskusia

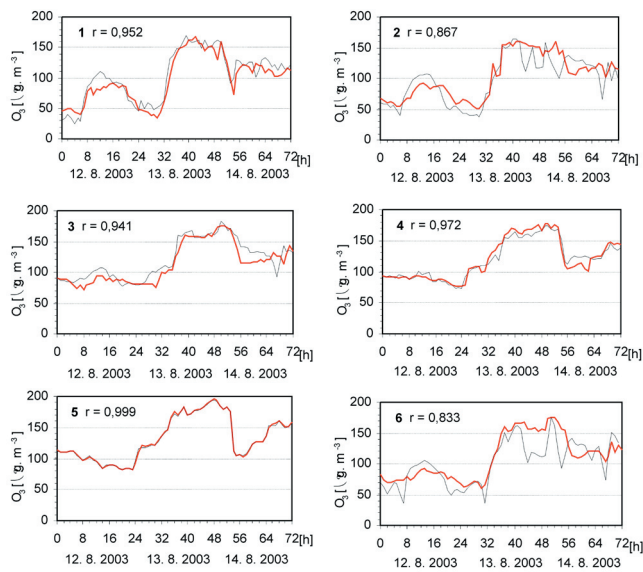
Na simuláciu ozónovej epizódy v oblasti Vysokých Tatier v dňoch od 12. do 14. augusta 2003 bol použitý model MetPhoMod v dvoch aplikáciách. V oboch prípadoch boli definované rovnaké počiatkové a okrajové meteorologické podmienky, emisné parametre, charakteristiky zemského povrchu a počiatkové koncentrácie O_3 . Jednotlivé aplikácie sa líšia špecifikáciou okrajových O_3 podmienok v iniciačnom súbore. Modelový výpočet koncentrácie O_3 , ktorý je kontrolovaný súborom údajov z meraní O_3 na modelovom území je považovaný za interpoláciu. Výsledky interpolácie v porovnaní s nameranými hodnotami môžu poukázať na presnosť interpolačného výpočtu a zároveň detailnejšie ilustrovať denný chod a vertikálnu distribúciu O_3 modelového územia počas epizódy. Druhá aplikácia je zameraná na simuláciu koncentrácií O_3 , ktoré zodpovedajú produkcii ozónu z definovaných lokálnych zdrojov emisií pri daných meteorologických podmienkach a vlastnostiach zemského povrchu modelového územia bez uvedenia nameraných hodnôt O_3 v okrajových podmienkach. V tomto prípade porovnanie simulovaných a nameraných koncentrácií O_3 môže špecifikovať podiel príspevkov lokálnych zdrojov emisií a diaľkového prenosu ozónového znečistenia na koncentrácie O_3 namerané počas epizódy.

3.1. Modelová interpolácia koncentrácie O_3

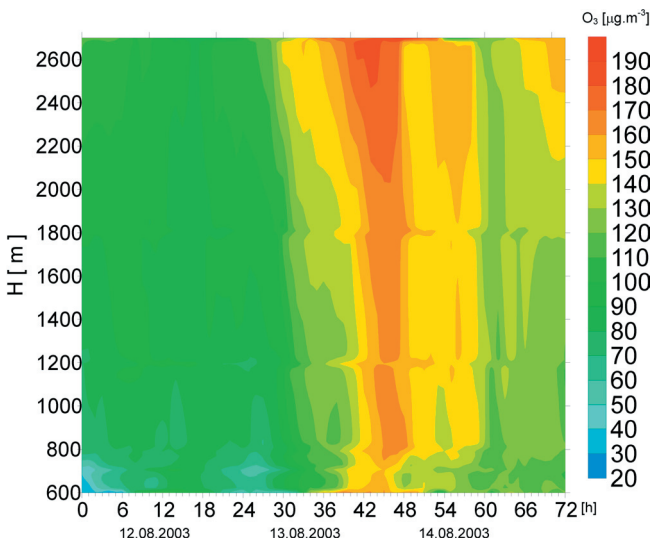
V modelovom výpočte boli použité namerané koncentrácie O_3 zo staníc: Poprad-Gánovce, Stará Lesná, Štart, Skalnaté Pleso a Lomnický štít na určenie O_3 koncentrácie v jednotlivých vertikálnych vrstvách. Podľa nameraných hodnôt boli určené aj počiatkové koncentrácie O_3 , pričom koncentrácie ďalších látok mali počiatkovú hodnotu 0. Porovnanie výsledkov modelu s nameranými koncentraciami O_3 pre jednotlivé stanice je znázornené na obr. 9. Z priebehu kriviek možno vidieť, že medzi nimi nie sú výraznejšie rozdiely. Potvrdzujú to aj vysoké hodnoty korelačných koeficientov (od 0,867 po 0,999). Pomerne dobrá zhoda ($r = 0,833$) je aj v prípade porovnania koncentrácie O_3 zo Starého Smokovca, pričom namerané údaje z tejto stanice neboli uvedené vo vstupných parametroch.

Výsledky modelovej interpolácie - hodinové hodnoty koncentrácie O_3 vo vzťahu k nadmorskej výške - boli použité na zobrazenie vertikálneho profilu prízemného ozónu (obr. 10). Hodnoty koncentrácie O_3 v jednotlivých nadmorských výškach poukazujú na prenos ozónového znečistenia z vyšších vrstiev atmosféry ($\sim 190 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) do nižších nadmorských výšok ($\sim 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) v nočných hodinách z 13. na 14. 8. 2003. Vzhľadom na útlm fotochemickej aktivity v tejto časti dňa, je veľmi pravdepodobné, že veľké množstvo O_3 sa nad naše územie dostalo prúdením znečisteného vzduchu z vyšších vrstiev troposféry a prispelo tak k zvýšeniu koncentrácií O_3 v prízemnej vrstve atmosféry modelového územia. Ak by horná troposféra nebola znečistená týmto diaľkovým prenosom, koncentrácie O_3 by mohli byť podobné ako predchádzajúci deň (12. 8. 2003), a to približne $\sim 110 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ vo výške 2600 m n.m., resp. ~ 30 až $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ vo výške

600-800 m n.m.



Obr. 9 Porovnanie hodinových koncentrácií O_3 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] podľa modelu MetPhoMod (červená čiara) s nameranými hodnotami (čierna čiara): 1 – Poprad-Gánovce, 2 – Stará Lesná, 3 – Štart, 4 – Skalnaté Pleso, 5 – Lomnický štít, 6 – Starý Smokovec, v dňoch od 12. do 14. 8. 2003.



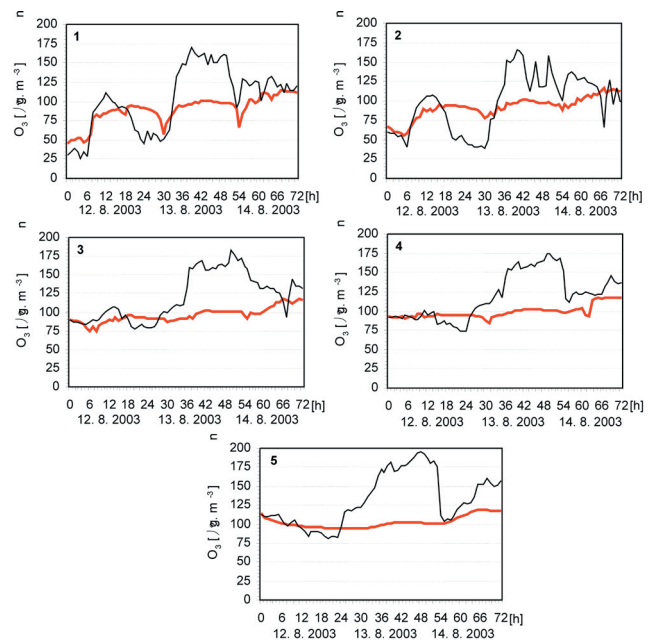
Obr. 10 Vertikálny profil koncentrácie O_3 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] podľa výsledkov modelového verifikačného výpočtu, v dňoch od 12. do 14. 8. 2003.

3.2. Modelová simulácia koncentrácie O_3

Modelová simulácia špecifikuje tvorbu ozónu zo zdrojov emisií modelového územia. Ako už bolo spomenuté, model MetPhoMod počíta koncentrácie O_3 použitím chemickej reakčnej schémy RACM, v prípade simulácie bez zakomponovania nameraných hodnôt O_3 do okrajových podmienok. V iniciačnom súbore simulačného výpočtu sú definované:

- počiatočné koncentrácie O_3 totožné s nameranými hodnotami,
- počiatočné koncentrácie NO_2 ; NO ; H_2O_2 ; CO ; HC_3 ; HC_5 ; HC_8 ; O^1D ; PAN ; HO ; ALD ; HO_2 ; ISO ; HONO ; API ; NO_3 ; HC_3P ; OL_2P ; OLTP ; OLIP ; ACO_3 ; MO_2 ; TOL ; XYL ; HNO_3 ; SO_2 ; SULF ; HCHO ; ETH ; CH_4 vypočítané ako priemerné denné hodnoty z výsledkov modelovej intepolácie.

Porovnanie simulovaných koncentrácií O_3 s nameranými je znázornené na obr. 11. Z priebehu kriviek na tomto obrázku možno vidieť, že najväčšie rozdiely koncentrácie O_3 sú v časovom intervale od 36 do 54 hod., t.j. v popoludňajších až nočných hodinách z 13. na 14. 8. 2003. Prvý deň epizódy (12. 8. 2003) sa namerané maximálne hodinové koncentrácie O_3 od simulovaných neodlišujú tak výrazne (7 - 30%) ako nasledujúce dni (61 - 92%). Podobne aj priemerné denné koncentrácie O_3 sú v dňoch 13. a 14. 8. 2003 podstatne vyššie ako 12. 8. 2003, najmä na Lomnickom štíte (tab. 6). Z porovnania vyplýva, že v čase od 12 h (UTC) 13. 8. 2003 do 06 h (UTC) 14. 8. 2003, sú namerané hodnoty vyššie o 53% v Poprade-Gánovciach, o 39% v Starej Lesnej, o 65% na Štarte, o 60% na Skalnatom Pleso a o 74% na Lomnickom štíte ako simulované. Rozdiel medzi nameranými a simulovanými hodnotami vzťahovaný k nameraným hodnotám predstavuje v percentuálnom vyjadrení príspevok iných ako lokálnych zdrojov ($M - S/M$ v tab. 6). Podľa tohto spracovania vychádza, že v čase vyvrcholenia epizódy, t.j. v popoludňajších a nočných hodinách z 13. na 14. 8. 2003 bolo v prízemnej vrstve atmosféry modelového územia Vysokých Tatier priemerne 63% ozónu z miestnych a 37% O_3 z iných zdrojov, najmä z diaľkového prenosu.



Obr. 11 Porovnanie simulovaných (červená krivka) a nameraných (čierna krivka) hodinových koncentrácií O_3 [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]: 1 – Poprad-Gánovce, 2 – Stará Lesná, 3 – Štart, 4 – Skalnaté Pleso, 5 – Lomnický štít, v dňoch 12. až 14. 8. 2003.

Tab. 6 Maximálne, priemerné hodinové a priemerné denné koncentrácie O₃ [µg.m⁻³] v dňoch 12. 8. - 14. 8. 2003 vo Vysokých Tatrách – porovnanie nameraných (M) a simulovaných (S) hodnôt

Maximálne hodinové koncentrácie O ₃ [µg.m ⁻³]												
Deň	12. 08. 2003				13. 08. 2003				14. 08. 2003			
h UTC	h	M	S	M/S	h	M	S	M/S	h	M	S	M/S
Poprad-Gánovce	12	110,6	84,8	1,30	15	169,9	96,4	1,76	1	161,5	98,1	1,65
Stará Lesná	14	107,0	87,2	1,23	16	165,1	97,6	1,69	2	157,8	98,3	1,61
Štart	13	107,2	88,5	1,21	17	168,3	100,0	1,68	2	182,8	101,0	1,81
Skalnaté Pleso	11	100,3	92,5	1,08	23	164,6	101,7	1,62	0	165,9	101,2	1,64
Lomnický štít	10	105,6	99,0	1,07	23	193,4	101,9	1,90	0	194,8	101,7	1,92
Priemerné denné koncentrácie O ₃ [µg.m ⁻³]												
	M	S	M/S	M	S	M/S	M	S	M/S	M	S	M/S
Poprad-Gánovce	71,1	75,0	0,92	113,8	90,6	1,22	124,0	101,6	1,23			
Stará Lesná	74,3	79,4	0,94	100,5	92,2	1,07	119,7	102,6	1,18			
Štart	90,6	87,8	1,04	127,8	94,7	1,34	142,6	105,1	1,37			
Skalnaté Pleso	88,7	93,8	0,95	132,1	96,4	1,36	137,9	106,2	1,31			
Lomnický štít	96,7	99,6	0,97	153,0	98,3	1,55	145,3	109,4	1,34			
Priemerné hodinové koncentrácie O ₃ [µg.m ⁻³] v časovom intervale od 12 h 13. 8. 2003 do 06 h 14. 8. 2003												
	M	S	M/S	M - S	M - S/M [%]	S/M [%]						
Poprad-Gánovce	147,1	96,1	1,53	51,0	34,7	65,3						
Stará Lesná	135,1	97,0	1,39	38,1	28,2	71,8						
Štart	162,9	99,0	1,65	63,9	39,2	60,8						
Skalnaté Pleso	161,0	100,5	1,60	60,5	37,6	62,4						
Lomnický štít	177,0	101,5	1,74	75,6	42,7	57,3						

Dobrá zhoda výsledkov modelu MetPhoMod a koncentrácií O₃ z leteckých meraní uvádza štúdiá zameraná na analýzu ozónovej epizódy v oblasti Grenoblu v júli 1999 (Coauch a kol., 2003). Je zaujímavé, že maximálne koncentrácie O₃ (~ 190 µg.m⁻³) sa netvorili priamo v Grenobli, ale v jeho vzdialenejšom okolí vo výške 1500-2000 m n.m. Nad reziduálnou vrstvou (1300-2300 m n.m.) koncentrácie O₃ poklesli a merané hodnoty vo výške 3200 m n.m. (~ 60-80 µg.m⁻³) boli považované za referenčné pozadie. Opačná situácia nastala v oblasti Vysokých Tatier v auguste 2003. Počas vrcholnej fázy ozónovej epizódy bolo maximálne ozónové znečistenie zistené vo výške nad 2600 m n.m. a v nižších nadmorských výškach koncentrácie O₃ mierne klesali (tab. 6).

Vzhľadom na významný príspevok diaľkového prenosu znečistenia, národné opatrenia na redukcii emisií prekurzorov ozónu nepredstavujú efektívny nástroj na dosiahnutie poklesu koncentrácií O₃ na Slovensku. Potvrdzujú to aj prvé výsledky modelovej simulácie LOTOS – EUROŠ získané na základe slovensko-dánskej spolupráce, ktoré poukazujú na nevýznamný vplyv redukcie emisií zo slovenských zdrojov na koncentrácie O₃ (Kremler, 2006). Okrem vplyvu diaľkového prenosu, ďalší nárast koncentrácie O₃ sa očakáva v súvislosti so zmenami meteorologických podmienok vyplývajúcich z predpokladanej globálnej klimatickej zmeny. Podľa Steinera a kol. (2006) simulované zmeny teploty vzduchu, obsahu vodnej pary vo vzduchu a BVOC prispievajú k zvýšeniu

maximálnych denných koncentrácií O₃ (každý faktor individuálne) o 1-5% v centrálnej Kalifornii. Výsledky klimaticko-chemického modelu (Forkel a Knoche, 2006) poukazujú na možný nárast maximálnych hodnôt O₃ o 10% (pri nezmenenom množstve antropogénnych emisií) v oblasti južného Nemecka.

4. Záver

V oblasti Vysokých Tatier doteraz nebolo urobené komplexné zhodnotenie údajov monitorovacej databázy a analýza interakcie meteorologicko-fotochemických procesov. Vhodným nástrojom je aplikácia matematických modelov. MetPhoMod (Perego, 1999) je model určený na simuláciu ozónových epizód vo vysokohorských oblastiach s členitým terénom. Na modelovanie koncentrácie O₃ v oblasti Vysokých Tatier počas letnej ozónovej epizódy (12. - 14. 8. 2003) bol použitý model MetPhoMod v dvoch aplikáciách. Výsledky modelovej interpolácie nameraných hodnôt O₃ poukázali na prenos ozónu z vyšších vrstiev atmosféry, bohatších na ozón, do nižších nadmorských výšok počas epizódy. Modelová simulácia koncentrácie O₃ môže špecifikovať príspevok lokálnych zdrojov emisií na celkové ozónové znečistenie v extrémnych situáciách. Počas uvažovanej epizódy, maximálne koncentrácie O₃ boli v nočných hodinách z 13. na 14. 8. 2003 v oblasti Lomnického štítu, pri útlme fotochemickej aktivity. V čase vyvrcholenia

epizódy (od 12 h UTC, 13. 8. 2003 do 06 h UTC, 14. 8. 2003) boli namerané hodnoty vyššie o 53% v Poprade-Gánovciach, o 39% v Starej Lesnej, o 65% na Štarte, o 60% na Skalnatom Plese a o 74% na Lomnickom štíte ako simulované. Aj tieto výsledky poukazujú na významnú mieru vplyvu cezhraničného prenosu znečistenia na koncentrácie O_3 na Slovensku. Pokles maximálnych koncentrácií a celkového O_3 zaťaženia na Slovensku v nasledujúcom období preto nebude závisieť tak od redukcie slovenských emisií prekurzorov ozónu ako od produkcie emisií v priemyselných regiónoch Západnej Európy a sveta ako aj od zmien meteorologických faktorov vyplývajúcich z globálnej klimatickej zmeny.

Podakovanie

Autori ďakujú grantovým agentúram APVV (projekt APVV-51-030205) a VEGA (grant č. 2/5006/25) za čiastočné sponzorovanie tejto práce ako aj SHMÚ a VS TANAP za prístupnenie údajov.

Literatúra

Anderson, J. R., Hardy, E.E., Roach, J.T., Witmer, R.E., 1976: A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. Geological survey professional paper 964, 28 p.

Auvray, M., Bey, I., 2005: Long-range transport to Europe: Seasonal variations and implications for the European ozone budget. J. Geophys. Res., 110, D11303, doi:10.1029/2004JD005503.

Bičárová, S., Fleischer, P., 2006: Windstorm effect on forest sources of biogenic volatile organic compound emissions in the High Tatras. Contrib. Geophys. Geodesy, 36/3, 269-282.

Bičárová, S., Sojáková, M., Burda, C., Fleischer, P., 2005: Summer ground level ozone maximum in Slovakia in 2003. Contrib. Geophys. Geodesy, 35/3, 265-279.

Clappier, A., 1998: A correction method for use in multidimensional time-splitting advection algorithms: application to two- and three-dimensional transport. Monthly Weather Review 126, 232-242.

Couach, O., Balin, I., Jiménez, R., Ristori, P., Perege, S., Kirchner, F., Simeonov, V., Calpini, B., van den Bergh, H., 2003: An investigation of ozone and planetary boundary layer dynamics over the complex topography of Grenoble combining measurements and modeling. Atmos. Chem. Phys., 3, 549-562.

Fiore, A.M., Horowitz, L.W., Purves, D.W., Levy II, H., Evans, M.J., Wang, Y., Li, Q., Yantosca, R.M., 2005: Evaluating the contribution of changes in isoprene emissions to surface ozone trends over the eastern United States. J. Geophys. Res., 110, D12303, doi:10.1029/2004JD005485.

Forkel, R., Knoche, R., 2006: Regional climate change and its impact on photooxidant concentrations in southern Germany: Simulations with a coupled regional climate-chemistry model. J. Geophys. Res., 111, D12302, doi:10.1029/

2005JD006748.

Gong, W., Cho, H.R., 1993: A numerical scheme for the integration of the gas phase chemical rate equations in three-dimensional atmospheric models, Atmospheric Environment 27A(14), 2147-2160.

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.

Kremler, M., 2006: Modelovanie výmeny látok medzi zložkami prírodného prostredia: Prízemný ozón. Kandidátska dizertačná práca. FMFI UK Bratislava, 170 s.

Ostrožlík, M., 2004: Results of meteorological measurements at the observatories of the Geophysical Institute of the Slovak Academy of Sciences. Year-book 2003, Bratislava, 33 p.

Paltridge, G., Platt, C., 1976: Radiative Processes in Meteorology and Climatology. Number 5 in Developments in Atmospheric Science. Elsevier. Amsterdam.

Parra, R., Jiménez, P., Baldasano, J.M., 2006: Development of the high spatial resolution EMICAT2000 emission model for air pollutants from the north-eastern Iberian Peninsula (Catalonia, Spain). Environmental Pollution, 140/2, 200-219.

Perego, S., 1999: A numerical mesoscale model for simulation of regional photochemical smog in complex terrain: model description and application during POLLUMET 1993 (Switzerland), Meteor. Atmos. Phys., 70, 43-69.

Projekt VaV/740/04/03, 2004: Výzkum modelů pro šíření emisí znečišťujících látek. Výroční zpráva o plnění DP 3: Posouzení praktického využití matematických modelů vzniku, transportu a rozptylu fotochemického smogu. MFF UK Praha, <http://www.chmi.cz/>.

Rhie, C., Chow, W., 1983: Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, AIAA Journal 21(11), 1525-1532.

Sajtáková, E., 2004: Správa o kvalite ovzdušia a podiele jednotlivých zdrojov na jeho znečisťovaní v Slovenskej republike 2003 (Ed. Pukančíková), SHMÚ a MŽP SR, 4-15.

Simpson, D., Fagerli, H., Jonson, J.E., Tsyro, S., Wind, P., 2003: Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe. Unified EMEP Model Description. Norwegian Meteorological Institute, EMEP Report 1/2003, 104 p. http://www.emep.int/reports/emep_report_1_part1_2003.pdf

Steiner, A.L., Tonse, S., Cohen, R.C., Goldstein, A.H., Harley, R.A., 2006: Influence of future climate and emissions on regional air quality in California. J. Geophys. Res., 111, D18303, doi:10.1029/2005JD006935.

Stockwell, W.R., Kirchner, F., Kuhn, M., Seefeld, S., 1997: A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. J. Geophys. Res., 102 (D22), 25847-25879.

Stockwell, W.R., Middleton, P., Chang, J.S., Tang, X., 1990: The second generation Regional Acid Deposition Model chemical mechanism for regional air quality modelling. A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. *J. Geophys. Res.*, 95 (D10), 16343-16367.

Szabó, G., 2005: Celoplošné hodnotenie kvality ovzdušia na Slovensku za rok 2004. *Meteorol. čas.*, 8, 199-211.

Vautard, R., Honore, C., Beekmann, M., Rouil, L., 2005: Simulation of ozone during the August 2003 heat wave and emission control scenarios. *Atmospheric Environment* 39, 2957–2967.

Vestreng, V., Breivik, K., Adams, M., Wagner, A., Goodwin, J., Rozovskaya, O., Pacyna, J.M., 2005: “Inventory Review 2005. Emission Data report to LRTAP Convention and NEC Directive. Initial review for HMs and POPs”. EMEP Technical Report MSC-W 1/2005, 114p. ISSN 0804-2446.

CAMx

<http://www.camx.com/>

EMEP

<http://www.emep.int/>

GLOBEIS

<http://www.globeis.com/>

CHIMERE

<http://euler.lmd.polytechnique.fr/chimere/>

CHMI

<http://www.chmi.cz/>

METPHOMOD

<http://www.giub.unibe.ch/klimet/metphomod/>

PREV’AIR

<http://www.prevail.org/en/index.php>

SHMÚ

<http://www.shmu.sk/>

SURFER

<http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml>

TRUMF

<http://trumf.met.fu-berlin.de/trumf/analyzer/index.htm>

UNIDATA

<http://www.unidata.ucar.edu/>