



Univerzita Komenského v Bratislave, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Juraj Bartok

Autoreferát dizertačnej práce

Lagrangian Stochastic Dispersion Model IMS Model Suite and its Validation against Experimental Data

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:
Meteorológia a klimatológia

Miesto a dátum:

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia.

na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky; Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie; Oddelenie meteorológie a klimatológie

Predkladateľ: **Juraj Bartok**
MicroStep-MIS
Čavojského 1
841 04 Bratislava

Školiteľ: **Doc. RNDr. Dušan Závodský, CSc**

Oponenti: Prof. RNDr. Jan Bednář, CSc., Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy
RNDr. Gabriel Szabó, CSc., SHMÚ
RNDr. Martin Gera, PhD., Fakulte matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského

Obhajoba dizertačnej práce sa koná o h
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou predsedom
odborovej komisie

11-55-9 Meteorológia a klimatológia

na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Predseda odborovej komisie:
Prof. RNDr. Milan Lapin, CSc.
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského v Bratislave
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Autoreferát

Novodobjšie štúdie a teórie atmosférickej disperzie pochádzajú z prvej polovice dvadsiateho storočia [70]. Modelovanie atmosféry a simulácia disperzie znečisťujúcich látok v atmosfére ako výskumná metóda sa stala viac realizovateľnou v sedemdesiatych rokoch vďaka rozvoju v počítačovej oblasti. Dôležitosť tejto témy významne vzrástla od nešťastia v Černobyle v r. 1986. Modely rádioaktívneho zamorenia a odhadovanie následkov havárií sa stali nevyhnutnými pre civilnú ochranu, plánovanie a krízový manažment. Rozvoj priemyslu a rozširovanie mestských aglomerácií si časom vynútili hodnotenie rozptylu a vplyvu znečisťujúcich látok na komunity. V r. 1991 bola odštartovaná Európska iniciatíva HARMO („Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes“) za cieľom zvýšenia spolupráce a štandardizácie disperzných modelov. Objavila sa „nová generácia“ disperzných modelov ktoré využívajú presnejšie fyzikálne parametrizácie [33]. IMS Lagranžovský disperzný model, vyvinutý spoločnosťou MicroStep-MIS, je slovenským lagranžovským modelom pre transport v regionálnej až kontinentálnej mierke („long-range“) so spomenutými fyzikálnymi parametrizáciami novej generácie.

Model pracuje na princípe virtuálnych častíc, ktoré si medzi sebou rozdelia celkovú hmotnosť uniknutej látky. Častice sa pohybujú v poli atmosférického prúdenia, pričom ich pohyb rieši rovnica trajektórie a stochastická rovnica vnášajúca do trajektórie vplyv turbulencie. Model obsahuje simuláciu rádioaktívneho rozpadu (rozpadové rady pre viac ako 300 nuklidov) a depozíciu rozptýleného materiálu (suchú a vlhkú).

Ciele

V súčasnosti je možné dobre simulovať disperziu na základe doterajších fyzikálnych poznatkov o veľkorozmerovom prúdení, turbulencii a ďalších dejoch v atmosfére. Čo sa týka praxe, nevyhnutnou podmienkou života modelu v praxi sú verifikačné štúdie. Verifikácia je nutná pre akýkoľvek model, ktorý je používaný či v operatívnej prevádzke, alebo na vedeckovýskumné účely. Jej výsledky sú potrebné ako spätná väzba pri vývoji modelu, pre modelárov používajúcich model ako nástroj práce aj pre konečných používateľov modelových výstupov. Ba čo viac, verifikácia je nikdy nekončiaci proces, pretože model je nutné verifikovať priebežne ako sa vyvíjajú jeho vylepšenia a ako vznikajú nové možnosti verifikácie (nové porovnávacie dáta z nových experimentov). Aby bolo možné opakovane model verifikovať, je žiaduce vyvinúť spôsob verifikácie, ktorý bude do veľkej miery automatizovaný.

Hlavnými cieľmi dizertačnej práce boli:

- Validácia IMS Lagranžovského disperzného modelu a vývoj automatizovaného validačného nástroja
- Integrácia IMS Model Suite – systému v ktorom môžu pracovať a kooperovať rôzne modely a prídavné moduly
- Vývoj rozšírení modelu, ktoré si vyžiadala prax a ich validácia

Prvým a základným cieľom práce bola validácia IMS Lagranžovského disperzného modelu na dátach z medzinárodných experimentov, pri ktorých bola do atmosféry vypúšťaná značkovacia látka následne meraná v širokej sieti pre tento účel prispôbených staníc.

Európsky ETEX experiment sa podarilo uskutočniť vďaka spoločnému úsiliu veľkého množstva európskych a amerických inštitúcií (koordinačné centrum bolo JRC Ispra, Taliansko; SHMÚ bolo jedným z účastníkov). Účelom bolo získať dáta pre validáciu disperzných modelov. Experiment pozostával z 2 plánovaných vypustení perfluorokarbónov neďaleko Rennes, Francúzsko a následných meraní koncentrácie perfluorokarbónov na území celej Európy počas októbra-novembra 1994 [32]. Súčasťou experimentu bol test operatívnych schopností modelovacích centier jednotlivých štátov reagovať na výnimočnú udalosť a predikovať koncentrácie operatívne. Samostatné americké experimenty sa konali pod spoločným názvom CAPTEX [16]: 5 vypustení perfluorokarbónov z Daytonu, Ohio, a 2 zo Sudbury, Ontario. Ďalšie experimentálne merania rozptylu boli zosumarizované Olesenom (Kincaid, Copenhagen, Lillestrøm, Indianapolis) do tzv. Model Validation Kit [52]. Tieto dáta z experimentov sú neoceniteľnou pomôckou pri reálnej verifikácii modelov. K verifikácii je potrebné mať analyzované meteorologické dáta z času konania experimentu pre celú oblasť konania experimentu. Ďalej, samozrejme, je potrebné mať výsledky meraní z uvedených experimentov.

Druhým cieľom bola integrácia IMS Model Suite – fyzikálne zmysluplného systému v ktorom môžu pracovať a kooperovať rôzne modely a prídavné moduly. Systém mal zahŕňať aj predpovedný model počasia na obmedzenej oblasti, ktorý by bol schopný zjemňovať vstupné meteorologické dáta pre disperziu. Ďalej mal zahŕňať rozširujúce moduly na disperziu prachových častíc a počítanie efektívnych dávok z rádioaktívneho ožiarenia, ktorých vývoj bol tretím cieľom.

Zhrnutie dosiahnutých výsledkov

Hlavnými dosiahnutými výsledkami práce sú: verifikovaný IMS Lagranžovský disperzný model, vyvinutý modul pre transport piesku a modul pre počítanie rádioaktívnych dávok z koncentrácií daných disperziou rádioaktívneho materiálu. Autor v rámci práce významne prispel k integrácii komplexného modelovacieho systému IMS Model Suite do operatívnej prevádzky zahŕňajúcej aj výpočet predpovedí počasia LAM modelom WRF s rutinnými automatickými verifikáciami.

Pri práci na verifikácii bolo nutné vysporiadať sa s chýbajúcimi dátami a s bežným verifikačným problémom – ako porovnať predpovede a merania, ktoré sa typicky líšia v priestorovom rozložení aj časovej štruktúre.

Ďalej tu bol zásadný konceptuálny problém validácie modelov voči pozorovaniam, pretože disperzia je stochastický proces a modely predpovedajú priemery ansámblov, zatiaľ čo meraním pozorujeme jednu špecifickú realizáciu. Tento problém je výraznejší pri verifikačných experimentoch malého priestorového rozsahu, kde sa pracuje so vzorkami počas niekoľkých minút (Olesenov „Model Validation Kit“). Pri validácii regionálnych až kontinentálnych rozmerov, kam spadá táto práca, sa pracuje s meraniami 3 a 6 hodinovými priemernými hodnotami. Autor pre tento prípad usúdil, že takéto priemery sú dostatočne vyššie od časovej škály turbulencie, stochastickosť disperzie je spriemerovaná a priame porovnanie s modelovými výstupmi je oprávnené.

Disperzný model bol nakonfigurovaný podľa dostupnej dokumentácie popisujúcej experimenty s vypúšťaním značkovacej látky. ECMWF dáta boli použité ako meteorologické vstupy. Vplyv kvality vstupných dát na kvalitu simulácie bol demonštrovaný a diskutovaný.

Kľúčovými výsledkami verifikácie sú prezentované štatistické skóre pre všetky použité experimenty s vypúšťaním značkovacej látky. Najlepšie výsledky model dosiahol pre celoeurópsky experiment ETEX I, štandardné výsledky boli dosiahnuté pre sériu CAPTEX experimentov a najhoršie výsledky sú pre ETEX II, známe v komunite modelárov pre meteorologické podmienky ťažko riešiteľné modelmi (prechod studeného frontu so subgridovými javmi priamo cez sieť meracích staníc). IMS Lagranžovský disperzný model bol na základe výsledkov identifikovaný ako schopný model pre simuláciu disperzie regionálnej mierky, ktorým možno simulovať rozptyl pomaly reagujúcich chemikálií a rádioaktívnych látok.

Prezentovali sme aj prácu modelu v prostredí GRID, čo môže byť technologický spôsob ako povýšiť disperzné aplikácie na súčasť systémov krízového manažmentu.

Pri integrovaní disperzného modelu s predpovedným LAM modelom a ďalšími modulmi bolo dôležité prekonať rôznorodosť vymieňaných dátových formátov, mapových projekcií a vertikálnych súradníc. Výzvou bolo naladenie konfigurácie dynamiky a fyziky modelu WRF.

Počas práce pripravený nástroj na validáciu ostáva nachystaný pre ďalšie porovnávanie typu bod voči bodu.

Celkovo bola teda vykonaná validácia voči údajom z dvoch veľkých experimentálnych kampaní. Modul pre výpočet dávok bol pridaný a obsahuje tri najviac posudzované cesty v krátkodobom horizonte po radiačnej nehode: ožiarenie z oblaku rozptýlenej rádioaktívnej látky, inhalácia a ožiarenie z depozitu. Možnosť rozptylu prachu a piesku bola pridaná do disperzného modelu a kvalitatívne verifikovaná na jednotlivom prípade voči satelitným pozorovaniam (meteorologické dáta vo vysokom rozlíšení boli pripravené pomocou WRF).

V ďalšej práci by chcel autor pokračovať pridaním viacerých prípadov rozptylu prachu, so snahou o objektivizáciu verifikácie použitím nameraných dohľadností na staniciach, prípadne nameraných koncentrácií prachových častíc.

Keďže v práci bola zdôraznená dôležitosť vstupov pre disperzné modelovanie, bude rozumnejšie sústrediť sa na ďalšie vylepšovanie vstupov – konkrétne asimiláciou pozorovaní do predpovedného LAM modelu, ale aj na hlbší postprocessing výstupov – konkrétne metódami dolovania dát (neurónové siete, pravdepodobnostné modely, rozhodovacie stromy).

Summary

The dissertation presents IMS Lagrangian Dispersion Model, which is a “new generation” Slovak dispersion model of long-range transport, developed by MicroStep-MIS. It solves trajectory equation for a vast number of Lagrangian “particles” and stochastic equation that simulates the effects of turbulence. Model contains simulation of radioactive decay (full decay chains of more than 300 nuclides), and dry and wet deposition. Model was integrated into IMS Model Suite, a system in which several models and modules can run and cooperate, e.g. LAM model WRF preparing fine resolution meteorological data for dispersion.

The main theme of the work is validation of dispersion model against large scale international campaigns CAPTEX and ETEX, which are two of the largest tracer experiments. Validation addressed treatment of missing data, data interpolation into comparable temporal and spatial representation. The best model results were observed for ETEX I, standard results for CAPTEXes and worst results for ETEX II, known in modelling community for its meteorological conditions that can be hardly resolved by models. The IMS Lagrangian Dispersion Model was identified as capable long range dispersion model for slowly- or non-reacting chemicals and radioactive matter. Influence of input data on simulation quality is discussed within the work.

Additional modules were prepared according to praxis requirement: a) Recalculation of concentrations of radioactive pollutant into effective doses form inhalation, immersion in the plume and deposition. b) Dispersion of mineral dust was added and tested in desert locality, where wind and soil moisture were firstly analysed and forecast by WRF. The result was qualitatively verified in case study against satellite observations.

Publikačná činnosť

1. Bartok, J., 2000: *Predpoved' zrážok numerickým predpovedným modelom a hodnotenie jej úspešnosti*. Diplomová práca. Katedra meteorológie a klimatológie MFF UK, Bratislava.
2. Vivoda, J., Bartok, J., 2000: Verification of precipitation predicted by ALADIN/LACE (12.8 km mesh) and ALADIN/SLOVAKIA (7.2 km mesh). *ALADIN Newsletter*, 19, p. 57-60.

Cited by: 2003 Čemas, D. - Rakovec, J. : In: The impact of emissions from the Šoštanj thermal powerplant on winter SO₂ pollution in Central Europe. *Geofizika*, Vol. 20, No. 1, 2003. s. 20-21.
3. Bartok, J., 2002: Verification of ALADIN/LACE and ALADIN/SLOVAKIA precipitation forecasts. *Meteorologický časopis*, 5, 2, p. 37-42.
4. Bartok, J., 2005: Skúsenosť s modernými technológiami pri zbere, archivácii a prezentácii environmentálnych dát. In: *Enviro-i-Fórum 2005, Zborník*. SAŽP, Banská Bystrica, p. 82-84.
5. Bartok, J., Mazurek, D., Poturnaj, K., 2005: *Modular Database System for Climatology, Meteorology and Environmental Sciences*. Abstract. 7th European Conference on Applications of Meteorology ECAM, 12-16.IX.2005, Utrecht, the Netherlands.
6. Bartok, J., Borovanský, P., Mačica, J., Petrovičová, M., 2005: Monitoring and Crisis System of Radiation Safety. In: *27. Days of Radiation Protection. Conference Proceedings*. AllDeco, Jaslovské Bohunice, p. 9-12. ISBN 80-88806-53-4.
7. Bartok, J., Gažák, M., 2006: Assessment of Radioactive Pollution. In: *Proc. of EADC Workshop on Environmental Applications and Distributed Computing*. VEDA, Bratislava, p. 92-98. ISBN 80-969202-4-3.
8. Bartok, J., Gažák, M., Lúčny, A., 2008: Krízový informačný systém ako tok webových a gridových služieb. In: Babič, F., Paralič, J. eds: *2nd Workshop on Intelligent and Knowledge oriented Technologies. Proceedings*. EQUILIBRIA, Košice, p. 63-66. ISBN 978-80-89284-10-8.
9. Bartok, J., Bednár, P., Gažák, M., Habala, O., Hluchý, L., Lúčny, A., Paralič, J., 2009: Prediction of Significant Meteorological Phenomena Using Data Mining. In: *5th International Workshop on Grid Computing for Complex Problems (GCCP 2009)*. Institute of Informatics SAS, Bratislava, p. 56 - 62. ISBN 978-80-970145-1-3.
10. Bartok, J., Bednár, P., Gažák, M., Habala, O., Hluchý, L., Lúčny, A., Paralič, J., 2009: Predpovedné a detekčné metódy význačných a nebezpečných javov založené na dolovaní meteorologických dát. In: Babič, F., Paralič, J. (Eds.): *Proc. of the 4th Workshop on Intelligent and Knowledge oriented Technologies (WIKT 2009)*. Equilibria, Košice, p.76-82. ISBN 978-80-89284-42-9.
11. Bartok, J., Lúčny, A., Gažák, M., Tran, V., Hluchý, L., 2010: *Computational Requirement of Meteorological and Crisis Applications*. Abstract. 5th EGEE - Enabling Grids for E-science User Forum, 12-15 April 2010, Uppsala, Sweden.

12. Bartok, J., Bednár, P., Gažák, M., Habala, O., 2010: *Data Mining and Integration for Predicting Significant Meteorological Phenomena*. Accepted 15-Jan-2010 for presentation and publication in proceedings: International Conference on Computational Science ICCS 2010, Amsterdam. Procedia Computer Science, Elsevier, Amsterdam.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Arnold, L., 1974: *Stochastic differential equations: theory and applications*. Wiley-Interscience, New York, xvi+228 p.
- [2] Barnes, S. L., 1973: *Mesoscale objective map analysis using weighted time series observations*. NOAA Tech. Memo. ERL-NSSL-62, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, 60 p.
- [3] Bartok, J., Gažák, M., 2006: Assessment of Radioactive Pollution. In: *Proc. of EADC Workshop on Environmental Applications and Distributed Computing*. VEDA, Bratislava, p. 27-31.
- [4] Bednář, J., Zikmunda, O., 1985: *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. Vysokošk. příručka pro stud. matematicko-fyz. a přírodověd. fakult. Academia, Praha, 245 p.
- [5] Benarie, M. M., 1987: The limits of air pollution modelling. *Atmospheric Environment*, 21, p. 1-5.
- [6] Blume, H.-P., Brümmner, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., 2010: *Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde*. 16th edition, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, p. 570. ISBN: 978-3-8274-1444-1.
- [7] Bubnová, R., 1995: *Použití souřadnice "hydrostatický tlak" pro integraci elastického modelu dynamiky atmosféry v numerickém předpovědním systému ARPEGE/ALADIN*. Dissertation. UK, Praha, 95 p.
- [8] Cressman, G. P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87, p. 367–374.
- [9] Cristy, M., Eckerman, K. F., 1987: *Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages From Internal Photon Sources. I. Methods*. ORNL/TM-8381/V1. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 100 p.
- [10] Draxler, R. R., Stunder, B. J. B., 1988: Modeling the CAPTEX vertical tracer concentration profiles. *J. Appl. Meteorol.*, 27, p. 617-625.
- [11] Ďúran, J., 2000: Validation of RTARC-DSS dispersion model based on „KIT“ field experiments. *Meteorologický časopis*, 3, 4, p. 29-34.
- [12] Eckerman, K. F., Ryman, J. C., 1993: *External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil. Federal Guidance Report No.12. EPA-402-R-93-08*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation and Indoor Air, Washington, DC, 238 p.
- [13] EMEP, 2009a: *Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe in 2007*. EMEP Status Report 1/2009. Meteorologisk Institutt (Norwegian Meteorological Institute), Norway, 169 p.
- [14] EMEP, 2009b: *EMEP Unified model performance for acidifying and eutrophying components and photo-oxidants in 2007*. Supplementary material to EMEP Status Report 1/2009. Meteorologisk Institutt (Norwegian Meteorological Institute), Norway, 91 p.
- [15] EMEP, 2009c: *Transboundary particulate matter in Europe*. Status report 4/2009. Joint CCC, MSC-W, CEIP and CIAM Report. Norway, 98 p.
- [16] Ferber, G. J., Heffter, J. L., Draxler, R. R., Lagomarsino, R. J., Thomas, F. L., Dietz, R. N., Benkovitz, C. M., 1986: *Cross-Appalachian tracer experiment (CAPTEX-83) - final report*. NOAA Tech. Memo ERL ARL-142, Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 60 p.
- [17] Ferber, G. J., Telegadas, K., Heffter, J. L., Dickson, C. R., Dietz, R.N., Krey, P.W., 1981: *Demonstration of a long-range atmospheric tracer system using*

- perfluorocarbons - final report*. EPA-600/7-81-006, U.S EPA Office of Research and Development, Washington, D.C., 55 p.
- [18] Fisher, B. E. A., Erbrink, J. J., Finardi, S., Jeannet, P., Joffre, S., Morselli, M. G., Pechinger, U., Seibert, P., Thomson, D. J. (editors), 1998: *Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models*. COST Action 710 – Final report. Office for Official Publications of the EC, Luxembourg, 431 p.
- [19] Girardi, F., Graziani, G., Van Velzen, D., Galmarini, S., Mosca, S., Bianconi, R., Bellasio, R., Klug, W., Fraser, G., 1998: *The European Tracer Experiment*. EUR Report 18143 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 108 p. ISBN 92-828-5007-2.
- [20] Gotway, J. H., 2008: *Version 1.1 Model Evaluation Tools User's Guide*. National Center for Atmospheric Research, Developmental Testbed Center. Boulder, CA, 168p.
- [21] Haltiner, G. J., Williams, R. T., 1980: *Numerical Prediction and Dynamic Meteorology*. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, 477 p.
- [22] Health Canada, 1999: *Recommendations on Dose Coefficients for Assessing Doses from Accidental Radionuclide Releases to the Environment*. Health Canada, Health Protection Branch, Ottawa, 45 p.
- [23] Heffter, J. L., Draxler, R. R. (editors), 1989: *Across North America Tracer Experiment (ANATEX). Volume I: Description, Ground level Sampling at Primary Sites, and Meteorology*. NOAA Tech. Memo ERL ARL-167, Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 89 p.
- [24] Heiden, T., Stadlbacher, K., 1998: *Verification of ALADIN-LACE and ECMWF areal precipitation forecasts*. ZAMG, Wien, 13 p.
- [25] Hluchý, L., Habala, O., Tran, V. D., Simo, B., Astaloš, J. and Dobrucký, M., 2004: Software Environment of a Grid-based Virtual Organization. In: *Proc. EOGEO 2004 Workshop*. London (June 2004) p. 23-25, <http://www.iemss.org/iemss2004/pdf/infotech/hlucsoft.pdf>
- [26] <http://air-climate.eionet.europa.eu/>, 13.5.2009 [online]
- [27] http://air-climate.eionet.europa.eu/databases/MDS/index_html, 11.1.2009 [online]
- [28] http://en.wikipedia.org/wiki/Richards_equation, 11.8.2009 [online]
- [29] <http://fairmode.ew.eea.europa.eu/>, 11.2.2010 [online]
- [30] <http://oiswww.eumetsat.org/IPPS/html/MSG/RGB/>, 20.3.2010 [online]
- [31] <http://rem.jrc.ec.europa.eu/atmes2/index.html>, 20.3.2009 [online]
- [32] <http://rem.jrc.ec.europa.eu/etex/>, 20.3.2009 [online]
- [33] <http://www.harmo.org>, 22.7.2009 [online]
- [34] ICRP, 1977: *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1(3). Pergamon Press, Oxford, 53 p.
- [35] ICRP, 1991: *The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60. Pergamon Press, Oxford, 201 p.
- [36] ICRP, 1994: *Human respiratory tract model for radiological protection*. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3). Pergamon Press, Oxford.
- [37] ICRP, 1995: *Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4, Inhalation dose coefficients*. ICRP Publication 71. Ann. ICRP 25 (3-4). Pergamon Press, Oxford.
- [38] ICRP, 1996: *Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 5, Compilation of ingestion and inhalation dose coefficients*. ICRP Publication 72. Ann. ICRP 26 (1). Pergamon Press, Oxford.

- [39]ICRP, 2008: *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4)*. Pergamon Press, Oxford, 303p.
- [40]Klemp, J. B., Skamarock, W. C., and Dudhia, J., 2000: *Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations*. Accessible from http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/wrf_equations_eulerian.pdf
- [41]Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Dudhia, J., 2007: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. *Mon. Wea. Rev.*, 135, p. 2897-2913.
- [42]Krajčovičová, J., 2006: *Mathematical modeling of dispersion of chemicals released by open burning of household waste and the health risks associated with their transfer through environmental media*. Dissertation. GFÚ SAV, Bratislava, 94 p.
- [43]Laprise, R., 1992: The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable, *Mon. Wea. Rev.*, 120, p. 197–207.
- [44]Marticorena, B., Bergametti, G., 1995: Modeling the atmospheric dust cycle: 1 – Design of a soil derived dust production scheme. *J. Geophys. Res.*, 100, 16 415–16 430.
- [45]Mosca, S., Bianconi, R., Bellasio, R., Graziani, G., Klug, W., 1998: *Atmes II. Evaluation of Long Range Dispersion Models using Data of the 1st ETEX Release. EUR Report 17756 EN*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 458 p. ISBN 92- 828-3655-X.
- [46]NCAR, 2008: *ARW Version 3 Modeling System User's Guide*. National Center for Atmospheric Research, Mesoscale and Microscale Meteorology Division. Boulder, CA, 264 p.
- [47]Nodop, K. (Editor), 1997: *ETEX Symposium on Long-range Atmospheric Transport Model Verification and Emergency Response*. IAEA, WMO, JRC Ispra, 250 p.
- [48]Nodop, K. (Editor), 1997: *EUR 17346 – ETEX Symposium on Long-Range Atmospheric Transport, Model Verification and Emergency Response*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 252 p. ISBN 92-828-0669-3.
- [49]Olesen, H. R., 1996: Toward the establishment of a common framework for model evaluation. In: *Air pollution modelling and its application XI*. Edited by Gryning and Schiermeier. Plenum Press, New York, p. 519-528.
- [50]Olesen, H. R., 1997: Tools for model evaluation. In: *Air Pollution Modeling and Its Application XII*. Edited by S-E. Gryning and N. Chaumerliac. Plenum Press, New York, p. 519-528.
- [51]Olesen, H. R., 1998: Local-scale regulatory dispersion models: Initiatives to improve "modelling culture" . In: *10th conference on urban pollution meteorology with AWMA*. 11-16 January 1998, Phoenix. American Meteorological Society, Boston, MA, p. 49-53.
- [52]Olesen, H. R., 2005: *User's Guide to the Model Validation Kit. – Research Notes from NERI no. 226*. National Environmental Research Institute, Denmark, 72p. <http://research-notes.dmu.dk>
- [53]Ooyama, K. V., 1990: A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 47, p. 2580–2593.
- [54]Pasquill, F., Smith, F. B., 1983: *Atmospheric Diffusion*, third edition. John Wiley and Sons, Chichester, UK, 437 p.

- [55] Pechala, F., Bednář, J., 1991: *Příručka dynamické meteorologie*. Academia, Praha, 372 p.
- [56] Richards, L. A., 1931: "Capillary conduction of liquids through porous mediums". *Physics* 1 (5): p. 318–333. doi:10.1063/1.1745010.
- [57] Rodean, H., 1996: *Stochastic Lagrangian models of turbulent diffusion*. Meteorological Monographs 26, American Meteorological Society, Boston, USA.
- [58] Ryall, D. B., Maryon, R. H., 1998: Validation of the UK Met. Office's NAME model against the ETEX dataset. *Atmospheric Environment*, 32, p. 4265-4276.
- [59] Schaap, M., Roemer, M., Sauter, F., Boersen, G., Timmermans, R., Builtjes, P. J. H., 2005. LOTOS-EUROS Documentation, TNO report B&O-A R 205/297, Apeldoorn, the Netherlands, 105 p.
- [60] Skamarock, W. C., 2004: Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Mon. Wea. Rev.*, 132, p. 3019-3032.
- [61] Skamarock, W. C., 2006: Positive-Definite and Monotonic Limiters for Unrestricted-Timestep Transport Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, p. 2241-2250
- [62] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., 2007: A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *J. Comp. Phys.*, special issue on environmental modeling. Accepted.
- [63] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*, NCAR Technical Note.
- [64] Smirnova, T. G., Brown, J. M., Benjamin, S. G., Kim, D., 2000: Parameterization of cold season processes in the MAPS land-surface scheme. *J. Geophys. Res.*, 105 (D3), p. 4077–4086.
- [65] Stull, R., 1988: *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666 p.
- [66] Szabó, G., 2003: Air quality modelling in zones in accordance with FWD EU (in Slovak). *Meteorological Journal*, 6, 1, p. 41-46.
- [67] Szabó, G., 2004: Supplementary methods used for air quality assessment in the Slovak Republic. In: *9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, GaPa, Germany, p. 233-237.
- [68] Szabó, G., 2005: Celoplošné hodnotenie kvality ovzdušia na Slovensku za rok 2004. *Meteorological Journal* 8, 4, p. 199-211.
- [69] Szabó, G., 2009: PM_{2.5} regional background and assumed countrywide level in the Slovak Republic – model estimation. *Meteorologický časopis* 12, p. 3-9.
- [70] Taylor, G. I., 1915: Eddy Motion in the Atmosphere. *Monthly Weather Review*, 43, p. 315-316.
- [71] Tegen, I., Fung, I., 1994: Modeling of mineral dust transport in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *J. Geophys. Res.*, 99, p. 22897-22914.
- [72] Thomson, D. J., 1987: Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flow. *J. Fluid Mech.*, 180, p. 529-556.
- [73] Thunis, P., Bornstein, R., 1996: Hierarchy of mesoscale flow assumptions and equations. *J. Atmos. Sci.*, 53, p. 380-397.
- [74] van Dop, H., Nodop, K. (Guest eds.), 1998: ETEX, A European Tracer Experiment. *Atmospheric Environment*, 32(24), p. 4089-4378.
- [75] Venkatram, A., 1988: Inherent uncertainty in air quality modeling. *Atmospheric Environment*, 22, 6, p. 1221-1227.
- [76] Venkatram, A., 1999: Applying a framework for evaluating the performance of air quality models. In: *6th International Conference on Harmonisation within*

- Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 11-14 October 1999, Rouen, France, 9 p.
- [77] Vívoda, J., 1999: *ALADIN numerický predpovedný model na ohraničenej oblasti*. Stručný prehľad. Internal document of SHMÚ.
- [78] Wesely, M. L., 1989: Parametrization of Surface Resistances to Gaseous Dry Deposition in Regional-Scale Numerical Models. *Atmospheric Environment*, 23, p. 1293-1304.
- [79] White, P. W. (Editor), 2003: *IFS Documentation. Part III: Dynamical and Numerical Procedures (CY25R1)*. ECMWF Research Department, ECMWF, Reading, 40 p.
- [80] Wicker, L. J., Skamarock, W. C., 2002: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 130, p. 2088–2097.
- [81] Wilks, D., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. An Introduction*. Academic Press, San Diego, 467 p.
- [82] WMO, 1996: *WMO TD No. 778 Documentation on RMSC Support for Environmental Emergency Response*. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- [83] World Meteorological Organization, 2009: *Manual on Codes. International Codes. Volume I.1. Part A – Alphanumeric Codes. WMO-No. 306*. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 506 p.
- [84] World Meteorological Organization, 2009: *Manual on Codes. International Codes. Volume I.2. Part B – Binary Codes. Part C – Common Features to Binary and Alphanumeric Codes. WMO-No. 306*. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 740 p.
- [85] Zanetti, P., 1993: Numerical simulation modelling of air pollution: an overview. In: *Air Pollution* (Zanetti et al., editors). Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, p. 3-14.
- [86] Závodský, D. (editor), 2001: *Atmospheric Chemistry and Air Pollution Modelling*. Učebnica. Leonardo da Vinci Programme, Matej Bel University, Banská Bystrica, 127 p.
- [87] Závodský, D., 2000: Air pollution model quality assurance – some remarks. *Meteorologický časopis*, 3, 4, p. 21-27.