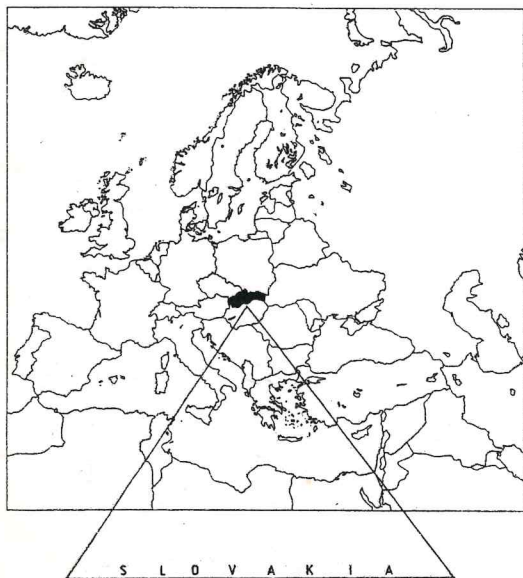


NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM SLOVENSKEJ REPUBLIKY
NATIONAL CLIMATE PROGRAMME OF THE SLOVAK REPUBLIC



NKP
1/94

- **ÚVODNÉ INFORMÁCIE**
(Introductory Information)
- **KLIMATICKÉ ZMENY A ZMENY CHEMIZMU ATMOSFÉRY**
(Climate Change and Change of Atmospheric Chemistry)
- **PREDPOKLADANÉ DÔSLEDKY KLIMATICKÝCH ZMIEN
NA LESNÉ EKOSYSTÉMY**
(Supposed Impacts of Climate Change upon Forest Ecosystems)
- **PRÍSPEVOK K HODNOTENIU SPOLAHLIVOSTI
DLHÝCH RADOV KLIMATICKÝCH POZOROVANÍ**
(Contribution to Evaluation of Climatic Observation Reliability)

BRATISLAVA 1994

*NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM
SLOVENSKEJ REPUBLIKY*

*NATIONAL CLIMATE PROGRAMME
OF THE SLOVAK REPUBLIC*

**NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM
SLOVENSKEJ REPUBLIKY**

Zväzok 1

BRATISLAVA 1994

OBSAH

ŽIAK, L.

PREDHOVOR
ZÁSTUPCU MINISTERSTVA ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA 7

ŠKULEC, Š.

PREDSLOV
RIADITEĽA SHMÚ 9

LAPIN, M.

NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM SR
CIELE A PRVÉ VÝSLEDKY 11

ZÁVODSKÝ, D. - PUKANČÍKOVÁ, K. - ZÁVODSKÁ, E. - BILČÍK, D.

DÔSLEDKY ZMIEN TEPLoty VZDUCHU
A UVB SLNEČNÉHO ŽIARENIA
NA ZMENY CHEMIZMU HRANIČNEJ VRSTVY ATMOSFÉRY
NA SLOVENSKU 17

MINĎÁŠ, J. - ŠKVARENINA, J.

PREDPOKLADANÉ DÔSLEDKY KLIMATICKÝCH ZMIEN
NA LESNÉ EKOSYSTÉMY 55

TIHLÁRIK, R.

SPOĽAHLIVOSŤ
DLHODOBÝCH KLIMATICKÝCH ZÁZNAMOV
Z HĽADISKA VPLYVU ĽUDSKÉHO FAKTORA
V POZOROVACOM PROCESE
A HISTÓRIA POZOROVANÍ
NA VYBRANÝCH KLIMATICKÝCH STANICIACH
SLOVENSKA 83

CONTENTS

ŽIAK, Ľ.

FOREWORD
OF NCP PROJECT MANAGER 7

ŠKULEC, Š.

FOREWORD
OF SHMI DIRECTOR 9

LAPIN, M.

NATIONAL CLIMATE PROGRAMME
OF THE SLOVAK REPUBLIC
OBJECTIVES AND THE FIRST RESULTS 11

ZÁVODSKÝ, D. - PUKANČÍKOVÁ, K. - ZÁVODSKÁ, E. - BILČÍK, D.

THE EFFECT OF GLOBAL WARMING
AND UVB SOLAR RADIATION
INCREASE ON THE BOUNDARY LAYER CHEMISTRY
IN SLOVAKIA 17

MINĐÁŠ, J. - ŠKVARENINA, J.

POSSIBLE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE
ON FOREST ECOSYSTEMS 55

TIHLÁRIK, R.

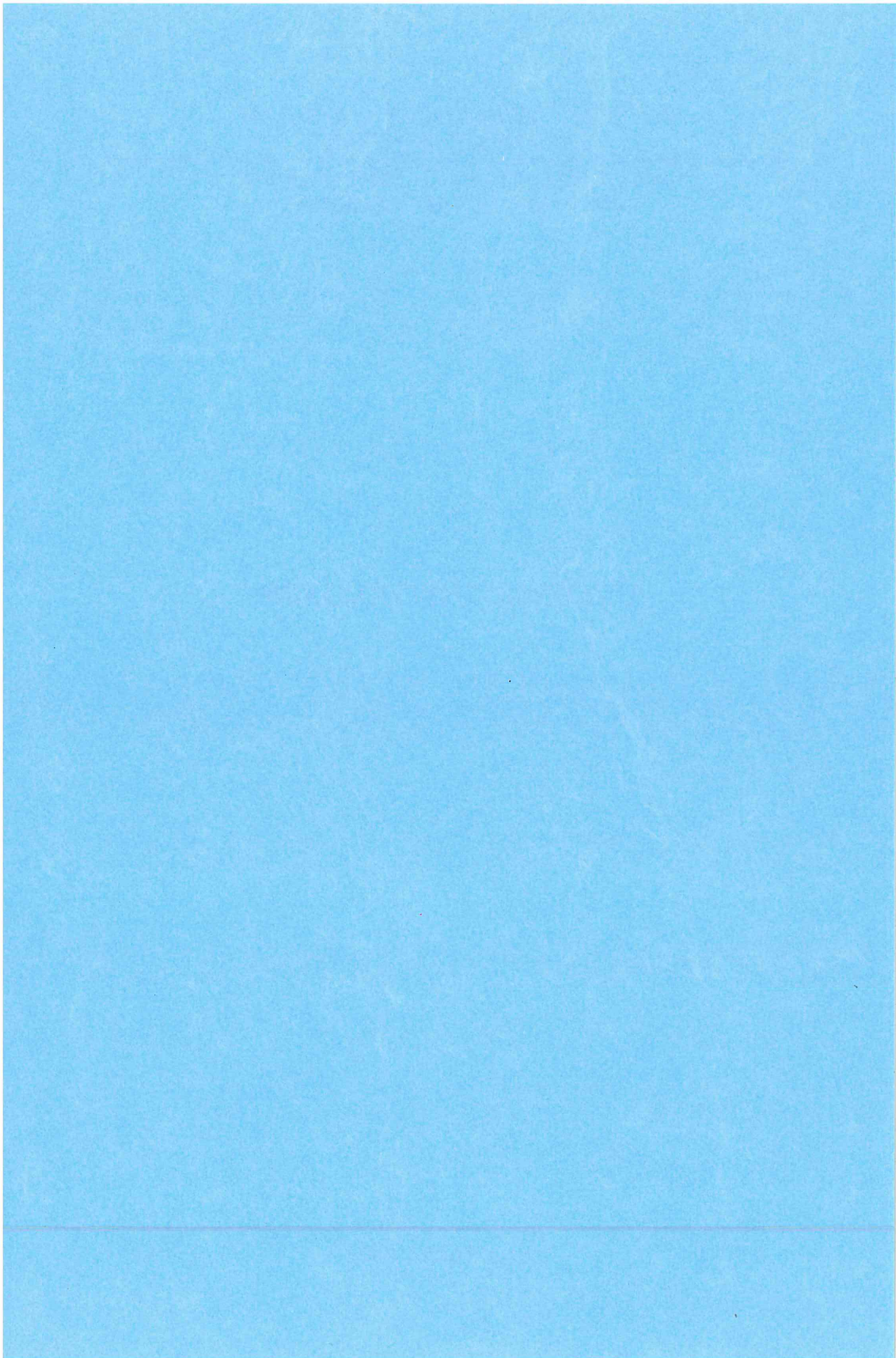
RELIABILITY OF LONG-TERM CLIMATOLOGICAL
OBSERVATIONS FROM THE POINT OF VIEW
OF HUMAN INFLUENCE UPON THE PROCESS
OF OBSERVATION;
HISTORY OF OBSERVATIONS
AT THE SELECTED CLIMATIC STATIONS
IN SLOVAKIA 83

*NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM
SLOVENSKEJ REPUBLIKY*

*NATIONAL CLIMATE PROGRAMME
OF THE SLOVAK REPUBLIC*

ÚVODNÉ INFORMÁCIE

BRATISLAVA 1994



PREDHOVOR

ZÁSTUPCU MINISTERSTVA ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SR

Problematika súvisiaca s globálnym otepľovaním, zmenou klímy a vzrastom koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére je pravdepodobne najväčším problémom, pred ktorým stojí naša planéta. V priebehu 80. rokov začal po získaní vedeckých dôkazov vzrastať aj záujem svetovej verejnosti o tieto otázky. Viaceré medzinárodné konferencie naliehavo volali po celosvetovej dohode, ktorá by riešila tento problém. Výrazný pokrok bol dosiahnutý najmä zásluhou *Medzivládneho panelu o zmene klímy (Intergovernmental Panel on Climate Change)*, ako aj takých stretnutí, ako bola *2. Svetová klimatická konferencia v roku 1990*. Odozvou na túto činnosť bolo zriadenie *Medzivládneho dohodovacieho výboru pre Rámcový dohovor o zmene klímy (Intergovernmental Negotiating Committee) Valným zhromaždením OSN*. Nasledujúce jeden a polročné rokovania (od februára 1991 do mája 1992) viac ako 150 štátov sveta viedli k schváleniu textu Rámcového dohovoru 9. mája 1992 v sídle OSN v New Yorku. Na nasledujúcej júnovej *Konferencii OSN o životnom prostredí a rozvoji v Rio de Janeiro* podpísalo Rámcový dohovor 155 štátov. Vtedajšia delegácia ČSFR nemala mandát na jeho podpis. V čase trvania bývalej ČSFR celú problematiku globálnej klímy koordinoval *Federálny výbor pre životné prostredie*. Takto bol zriadený aj *Národný klimatický program ČSFR*, ktorý mal dve zložky: NKP ČR a NKP SR. *Ministerstvo životného prostredia* vstúpilo aktívne do tejto problematiky vznikom samostatnej *Slovenskej republiky*. Dosiahli sme, aby SR podpísala Rámcový dohovor v čase, keď bol vystavený ešte na podpis v sídle OSN. Tiež sme zabezpečili finančné prostriedky, aby sa mohli od roku 1993 riešiť dva dlhodobé projekty: *Národný klimatický program a Národný program znižovania emisií skleníkových plynov*. Uvedomujúc si svoj diel zodpovednosti (SR patrí medzi 15 najväčších emitentov skleníkových plynov na obyvateľa), ako aj možné ovplyvnenie nášho územia zmenou klímy, *súhlasila NR SR 18. augusta 1994 s ratifikáciou Rámcového dohovoru. Uložením ratifikačných listín 25. augusta 1994 sa SR stala jeho 89. zmluvnou stranou.*

Úlohy vyplývajúce z Rámcového dohovoru si vyžadujú medzirezortný prístup. Z tohto dôvodu MŽP SR iniciovalo vznik riadiaceho výboru, v ktorom sú zastúpené rezorty životného prostredia, hospodárstva, pôdohospodárstva, dopravy, financií a zahraničných vecí.

Jedným zo záväzkov Rámcového dohovoru je aj podporovať informovanosť a výchovu verejnosti ohľadom príčin a dôsledkov možnej zmeny klímy. Vydávanie publikácií v edícii NKP je jedným z príspevkov k splneniu tejto úlohy. Som presvedčený, že bude úspešné. Ministerstvo životného prostredia SR sa bude snažiť o vytváranie vhodných a primeraných podmienok.

Ing. Ľubomír Ž I A K
vecný garant Projektu
Národný klimatický program SR
Odbor ochrany ovzdušia MŽP SR

Foreword

of NCP Project Manager

Problems concerning the global warming, climate change and increasing of greenhouse gases concentration in the atmosphere seems to be the most serious problem, to which our planet has to stand up to. During 80-ties people all over the world started to be interested in this problem in consequence with the scientific results. Many international conferences took an effort for the world-wide treaty establishment to solve this problem. Considerable advance was reached thanks to the Intergovernmental Panel on Climate Change as well as to the meetings and conferences, e.g. the Second World Climate Conference in 1990. As a response to these activities UNO established the Intergovernmental Negotiating Committee for the Framework Convention on Climate Change (FCCC). Next one and half year's negotiations (since February 1991 to May 1992) among more than 150 countries led to the approval of FCCC on 9th May 1992 in the seat of UNO in New York. The FCCC was signed by representatives of 155 countries at the UNO Conference on Environment and Development in Rio de Janeiro in June 1992. That time the CSFR delegation had no mandate to sign it. In CSFR the whole global climate problems were co-ordinated by the Federal Committee of Environment. That way also the National Climate Programme of CSFR was established. It had two parts: NCP of the Czech Republic and NCP of the Slovak Republic. Since the Slovak Republic inception the Ministry of the Environment has taken an active part in these problems. The Slovak Republic signed the Framework Convention in time, when it was prepared for the sign at UNO in New York. The financial means were made safe to solve two long-term projects: the National Climate Programme and the National Programme on Reduction of Greenhouse Gases Emission with the beginning in 1993. Being realized our responsibility (SR belongs to 15 countries with the highest greenhouse gases emission per capita) as well as possible impacts upon Slovak area due to climate change the Slovak National Council ratified FCCC on 18th August 1994. The Slovak Republic became the 89th party of filed ratification documents on 25th August 1994.

The tasks resulting from the FCCC have to be solved within a rank of inter-branch attitude. With respect to this fact the Ministry of Environment of SR initiated the inception of the Committee in which there are the representatives of Ministries of Environment, Economy, Agriculture, Transport, Finances and Foreign Affairs.

One of the commitments of FCCC involves to support information and education of the general public in the field of the reasons and impacts of possible climate change. Publications issue in edition of the NCP is one of the contributions to perform these tasks. I am sure, that the Ministry of Environment of SR will succeed in its effort and create appropriate conditions.

Eng. Ľubomír ŽIAK

NCP Project Manager
Air Protection Department
Ministry of Environment of SR

PREDSLOV RIADITEĽA SHMÚ

Slovenská republika sa snaží aktívne zapojiť do riešenia jedného z najzložitejších problémov, ktorému musí čeliť ľudstvo, do prípravy celosvetových opatrení na zamedzenie alebo na zmiernenie hroziacej globálnej klimatickej zmeny zapríčinennej rastom skleníkového efektu atmosféry. Prvým krokom bola príprava dlhých radov klimatických a hydrologických pozorovaní už v osemdesiatych rokoch v súlade so zámermi Svetového klimatického programu, potom nasledovalo zriadenie Národného klimatického programu ČSFR v roku 1991 pod záštitou Federálneho výboru pre životné prostredie. Dňa 18.5.1993 podpísalo Slovensko Rámcový dohovor OSN o klimatickej zmene a 18.8.1994 tento dohovor ratifikovala Národná rada SR. Tým sa vytvorili aj legislatívne predpoklady na pripojenie sa Slovenska ku Konferencii zmluvných strán pre plnenie záväzkov vyplývajúcich z Rámcového dohovoru OSN o klimatickej zmene.

Od roku 1993 sa rieši Národný klimatický program a Národný program redukcie emisie skleníkových plynov do atmosféry prostredníctvom projektov financovaných zo Štátneho fondu životného prostredia SR a pod gesciou Ministerstva životného prostredia SR. Hlavným riešiteľským pracoviskom oboch projektov je Slovenský hydrometeorologický ústav a na riešení úloh zaradených do týchto projektov sa podieľa viac ako 20 inštitúcií na celom Slovensku. Vzhľadom na to, že riešenie tejto problematiky je mimoriadne náročné, požiadalo Slovensko úspešne o podporu v rámci druhého kola pomoci USA pri príprave Národných štúdií na plnenie záväzkov vyplývajúcich z Rámcového dohovoru OSN o klimatickej zmene. Pri riešení uvedených úloh sa získalo, a predpokladáme, že sa ešte získa, veľa odborných a vedeckých výsledkov, cenných pri príprave strategických zámerov a praktických opatrení nielen v úzkej vedeckej sfére, ale aj v rozvoji slovenskej spoločnosti.

V záujme širšieho prístupnenia a popularizácie výsledkov riešenia uvedených úloh v širšej verejnosti začína Slovenský hydrometeorologický ústav vydávať novú edíciu publikácií venovanú problematike, ktorá sa týka predmetu riešenia Národného klimatického programu Slovenskej republiky, teda hlavne analýzy zmien a kolísania klímy, scenárov zmien klímy, možných príčin a dôsledkov zmien klímy, monitoringu zmien klímy, prípravy dlhých radov klimatických a hydrologických pozorovaní, ako aj prípravy adaptačných opatrení na zmiernenie negatívnych dôsledkov zmien klímy. Okrem toho tu budú publikované aj príspevky s analýzou klimatických pomerov Slovenska, s výsledkami riešenia Národného programu redukcie emisie skleníkových plynov do atmosféry a príspevky, ktoré môžu byť podkladom pre riešiteľov problematiky klimatických zmien a ich dôsledkov v socio-ekonomickej sfére. Predpokladáme vydanie 2 publikácií tejto edície ročne v rozsahu okolo 100 strán a v náklade 400 výtlačkov, z ktorých sa 150 použije na výmenu podobných publikácií s Českou Republikou. V každom čísle edície NKP bude publikovaných 3 až 5 pôvodných odborných a vedeckých prác s anglickým resumé, prípadne celých v angličtine so slovenským resumé.

Slovenský hydrometeorologický ústav, výbor Národného klimatického programu, ako aj odborná verejnosť zaujímajúca sa o problematiku zmien klímy, ich príčin a dôsledkov oceňujú úsilie všetkých, ktorým sa podarilo získať potrebné finančné, personálne a odborné zdroje na vydávanie novej edície publikácií.

Ing. Štefan ŠKULEC, CSc., riaditeľ SHMÚ

Foreword

of SHMI Director

The Slovak Republic is keen to join to active solving one of the most difficult problems the human society has to face, to preparation of the world-wide precautions for prevention or moderation of dangerous global climate change caused by increase of atmospheric greenhouse effect. In 80-ies the preparation of long-term series of climatological and hydrological data was the first step in accordance with the intention of the **World Climate Programme**, then the establishment of the **National Climate Programme of the CSFR** followed in 1991 under the aegis of the **Federal Committee of Environment**. On 18th May 1993 Slovakia signed the **UNO Framework Convention on Climate Change (FCCC)** and on 18th August 1994 it was ratified by the **Slovak National Council**. This legislative assurance enabled Slovakia to join Contracting Members (parties) of FCCC Conference of Parties.

The **National Climate Programme** and the **National Programme for the Greenhouse Gases Emission Reduction** funded by the **Ministry of Environment (the State Environmental Fund)** have been solved in Slovakia since 1993. The **Slovak Hydrometeorological Institute** has been put in charge of NCP SR co-ordinator, but there are more than 20 institutions in Slovakia participating in NCP tasks solving. Because the solving of those programmes is extraordinary exacting and the funding is in the present situation of Slovakia far from satisfactory, the **Slovak Government** submitted successfully their statement of intent to participate in the second round of **U.S. Government Support for Country Study to Address Climate Change**. Many scientific results have been gained at the NCP tasks solving and we hope for continuation. All these results will be valuable at preparing strategies and practicable measures not only in the limited scientific sphere but also for the Slovak society development.

The **Slovak Hydrometeorological Institute** has started issuing the new edition of publications to provide wider popularization of **National Climate Programme** results to general public. The topics to be published are mainly analyses of climate change and variability, climate change scenarios, possible reasons and impacts of climate change, monitoring of climate change, preparing of climatological and hydrological long time series of observations as well as preparing of adaptation and strategies for climate change negative impacts reducing. Besides this, there will be published contributions aimed to Slovakian climate conditions evaluation, results of the **National Programme of Greenhouse Gases Emission Reduction** solving and also to the other ones valuable as a source of information for solvers of climate change problems in socio-economic sphere. We plan to issue two NCP publications per year with extent of about 100 pages and 400 pieces each. For exchange of similar edition in the Czech Republic we plan to use 150 NCP publications of each issue. Three to five scientific papers, including extended English summary, are planned to be published in each issue.

The **Slovak Hydrometeorological Institute**, the **Committee of NCP** and also the professional community involved in climate change appreciate the effort of all who were successful at gaining necessary financial, personal and professional sources to issue new edition of publications.

Dr.Eng. Štefan ŠKULEC

Director
Slovak Hydrometeorological Institute

NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM SR, CIELE A PRVÉ VÝSLEDKY

Milan LAPIN

Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava

National Climate Programme of the Slovak Republic, Objectives and the first Results

Milan Lapin, chairman of the NCP SR, Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia

Abstract

Activities concerning the World Climate Programme and problems of climate change and variability have been provided by the Slovak Hydrometeorological Institute in Bratislava as well as by several other institutions in Slovakia as early as in the first half of the 80s. Predominantly they consisted of preparation of long-term series of climatological and hydrological data in Slovakia. The National Climate Programme (NCP) of the former Czecho-Slovakia (CSFR) was established on the basis of the Federal Minister of Environment decision by January 1, 1991. At the beginning of 1993, in accordance with the split of CSFR into two independent countries, the NCP of CSFR was also divided to the NCP of the Czech Republic and the NCP of the Slovak Republic (SR). Intentions and objectives of NCP are nearly identical in both countries and solution of the NCP tasks should be achieved in close co-operation.

Primary objectives of NCP SR are as follows:

- * Development of activities in accordance with the World Climate Programme
- * Preparation of basic materials for governmental bodies to fulfil international commitments concerning the climate change
- * Co-ordination of activities regarding the climate change within the Slovak Republic

In the course of 1991 and 1992, NCP CSFR was being solved as a NCP Project financed by funds of the Federal Ministry of Environment in Prague and since 1993 by the Ministry of Environment of Slovak Republic. Slovak Hydrometeorological Institute in Bratislava (SHMI) has been put in charge of NCP SR co-ordination. The Framework Convention on Climate Change was signed by SR in May 1993 and ratified in August 1994.

In November 1992, the first phase of NCP CSFR tasks solution was completed by elaboration of 23 analytical reports under participation 25 experts from 9 institutions in CSFR (including 10 experts from 4 institutions representing Slovakia, who elaborated 8 reports). The second phase of NCP SR solving was finished in December 1993 (14 analytical reports under participation of 20 experts and 8 institutions from the Slovak Republic). The NCP SR Project is being solved in 1994 in the similar way.

The objectives of the NCP CSFR and SR Projects were as follows: to analyse and adapt existing scenarios of climate change, to verify scenarios analysing past climate and hydrological data series, to prepare project of climate change monitoring by representative climatological and hydrological station network, to prepare homogeneous climatological and hydrological long-term data series and to provide the first assessments of possible climate change impacts upon water management, agriculture and forestry in SR. Problematic of greenhouse gas emissions (preliminary inventory and strategies of reduction) is being solved in the Project "National Programme of GHGs Emission Reduction" funded also by the Ministry of Environment of SR since 1993 and co-ordinated by SHMI. Within the framework of NCP SR the problematic of possible climate change impact upon change of the atmospheric chemistry and changes of complex climatic conditions and hydrological balance in Slovakia is solved. Result of NCP SR tasks solution is published in NCP edition as well as in the other journals, proceedings and publications.

Keywords: climate change, National Climate Programme, impacts of possible climate change

ÚVOD

Národný klimatický program (NKP) bývalej ČSFR bol zriadený rozhodnutím Federálneho ministra životného prostredia k 1.1.1991. Začiatkom roka 1993 sa NKP ČSFR rozdelil v dôsledku rozdelenia ČSFR na NKP SR a NKP ČR. Zámery a ciele NKP sú v oboch republikách veľmi podobné.

Základnými cieľmi NKP SR sú:

- * Rozvoj aktivít v súlade s cieľmi Svetového klimatického programu koordinovaného OSN (prostredníctvom WMO a UNEP)
- * Príprava podkladov pre štátne orgány a iné inštitúcie ohľadom plnenia medzinárodných záväzkov dotýkajúcich sa problematiky zmien klímy (Rámcový dohovor OSN o zmene klímy, Agenda 21. storočia)
- * Koordinácia aktivít a úloh s podielom analýz zmien klímy, ich príčin a dôsledkov v rámci celého štátu

Národný klimatický program SR je riadený výborom zloženým zo zástupcov participujúcich inštitúcií v SR a MŽP SR ako hlavného garanta aktivít v rámci NKP SR. Výkonne riadi činnosti NKP SR užší výbor v zložení: Dr. M. Lapin, predseda, Dr. O. Majerčáková a Dr. D. Závodský (všetci z SHMÚ) a Ing. L. Žiak (MŽP SR). V priebehu roka 1993 a 1994 sa na aktivitách NKP SR zúčastňovali nasledujúce inštitúcie: MŽP SR, MPô SR, MH SR, MFF UK, PríF UK, SF STU, GFÚ SAV, GÚ SAV, ÚH SAV, VÚVH, VÚZH, VÚHB, VŠP Nitra, LTU a LVÚ Zvolen, VÚRP Piešťany a SHMÚ.

Svetový klimatický program (WCP)

Príprave Rámcového dohovoru OSN o zmene klímy predchádzali dlhodobé aktivity WMO, UNEP, UNESCO, FAO a ďalších medzinárodných organizácií v oblasti monitoringu a prognózy klimatických zmien, monitoringu a prognózy zmien skleníkového efektu atmosféry a v oblasti prípravy globálnych stratégií na zmiernenie dôsledkov globálneho rastu teploty vzduchu a súvisiacich zmien. Významným krokom pri koordinácii týchto aktivít bolo ustanovenie Svetového klimatického programu (WCP) na VIII. zasadnutí Kongresu Svetovej meteorologickej organizácie (WMO) v roku 1979.

Svetový klimatický program je koordinovaný program činností zaoberajúcich sa fyzikálnymi a chemickými aspektmi klimatického systému, ktorého zložkami sú atmosféra, hydrosféra, kryosféra a litosféra. WCP študuje najmä interakcie medzi zložkami klimatického systému prebiehajúcimi v dlhodobých klimatických a biochemických cykloch a tiež interakcie klimatického systému s činnosťami človeka. WCP je koordinovaný WMO a ďalšími medzinárodnými organizáciami a zahŕňa aj aktivity súvisiace s konvenciami prijatými na Svetovej konferencii UNCED. (Rámcový dohovor OSN o zmene klímy a Agenda 21). V pláne činnosti WCP sa na poprednom mieste počítalo s podporou zriadenia Národných klimatických programov vo všetkých členských krajinách WMO.

Rámcový dohovor OSN o zmene klímy (FCCC)

Konferencia OSN o životnom prostredí a rozvoji (UNCED), ktorá sa konala v Rio de Janeiro v júni 1992, bola vyvrcholením úsilia viacerých autorít a medzinárodných organizácií v oblasti globálnych environmentálnych problémov. Na konferencii bolo predložených 5 rámcových dohôd, resp. konvencií OSN na podpis vyše 160 prítomným vládnych delegáciám. Z týchto konvencií sa problematiky bezprostredne zaujímajúcej hydrometeorologické a meteorologické ústavy dotýkajú Rámcový dohovor OSN o klimatickej zmene a Agenda 21. storočia.

Slovenská republika podpísala FCCC v New Yorku 19. mája 1993. Príprava ratifikácie FCCC začala v SR už v roku 1992; Národná rada SR ratifikovala FCCC dňa 18.8.1994 a uložením ratifikačných listín v príslušnej inštitúcii OSN sa Slovenská republika stala 89. právoplatným členom Konferencie zmluvných strán FCCC, ktoré pripravujú celosvetové opatrenia v zmysle záväzkov obsiahnutých v FCCC. Predpokladá sa, že implementácia FCCC bude na Slovensku koordinovaná medziministerskou komisiou.

CIELE RÁMCOVÉHO DOHOVORU OSN O ZMENE KLÍMY

Konečným cieľom FCCC je stabilizovať koncentráciu skleníkových plynov v atmosfére na takej úrovni, ktorá by umožnila predísť nebezpečným dôsledkom interakcie ľudstva a klimatického systému Zeme. Táto úroveň by sa mala dosiahnuť v prijateľnom časovom horizonte tak, aby sa mohli ekosystémy prispôbiť prirodzenou cestou zmene klímy, pričom by nebol ohrozený ekonomický rozvoj a produkcia potravín. Pod pojmom zmena klímy rozumieme na tomto mieste komplex zmien klímy vyvolaných rastom skleníkového efektu atmosféry a súvisiacimi antropogénnymi vplyvmi, nezahrňujeme sem prirodzené zmeny a premenlivosť klímy (pokiaľ ich je možné vzájomne odlíšiť).

FCCC je po ratifikovaní aj morálnym záväzkom štátov sveta pred verejnosťou k napomáhaniu takých aktivít, ktoré prispievajú k zníženiu možných rizík vyplývajúcich z klimatickej zmeny.

Všetky štáty sveta, teda aj Slovenská republika, by mali podľa svojich možností plniť záväzky článku 4 (1a - 1j) FCCC, najmä:

- robiť inventarizáciu emisie skleníkových plynov
- zabráňovať zbytočným únikom skleníkovým plynov z absorbéro
- redukovať spotrebu skleníkových plynov
- pripravovať sa na adaptáciu proti dôsledkom zmeny klímy
- v strategických zámeroch prihliadať na možné zmeny klímy
- podporovať výskum zameraný na zmiernenie rizika zmeny klímy
- podporovať informovanosť o príčinách a možných dôsledkoch pravdepodobnej zmeny klímy
- informovať príslušné medzinárodné inštitúcie o realizácii opatrení

Priemyselne vyspelé krajiny sveta, ktoré sú zaradené do Prílohy 1 k FCCC, teda aj SR, nesú hlavný podiel viny na raste koncentrácie skleníkových plynov v atmosfére, preto by mali v súlade s článkom 4 (2a - 2g) FCCC najmä:

- prijať postupy a opatrenia na zmiernenie antropogénne podmienenej zmeny klímy
- do 6 mesiacov od nadobudnutia účinnosti FCCC a potom pravidelne poskytovať informácie o prijatých opatreniach a ich výsledkoch formou národných správ

PROJEKTY MŽP SR NA PODPORU PLNENIA ZÁVAZKOV FCCC A ÚLOH WCP

V januári 1993 začalo riešenie dvoch dlhodobých výskumných programov, ktoré majú vzťah k implementácii FCCC:

- * Národný klimatický program SR (NKP)
- * Národný program redukcie emisie skleníkových plynov (NPRESP)

Základnými cieľmi riešenia prvého programu (NKP) sú: návrh siete staníc na monitoring zmien klímy a ich dôsledkov, rekonštrukcia dlhodobých radov klimatických a hydrologických pozorovaní, analýza regionálnych zmien (trendov) a premenlivosti klímy a hydrologických prvkov, regionálna interpretácia globálnych scenárov zmien klímy v súvislosti s rastom skleníkového efektu atmosféry, odhad možných dôsledkov zmien klímy na socio-ekonomickú sféru, príprava adaptačných opatrení na zmiernenie možných dôsledkov zmien klímy.

Základnými cieľmi druhého projektu (NPRESP) sú: inventarizácia emisie skleníkových plynov a ich zachytu v biosfére, príprava technických opatrení na zníženie celkovej emisie skleníkových plynov, analýza vhodnosti, nákladovosti a efektívnosti alternatívnych riešení, programov a opatrení.

Pretože súčasné finančné zabezpečenie týchto programov nie je dostatočné, rozhodla sa vláda SR požiadať o účasť na druhom kole pomoci USA v rámci Národných štúdií týkajúcich sa zmien klímy (U.S. Government Support for Country Studies to Address Climate Change).

V októbri 1993 zorganizoval SHMÚ v spolupráci s IPCC a OECD v Bratislave regionálny Workshop pre krajiny východnej a strednej Európy k problematike inventarizácie antropogénne podmienenej emisie skleníkových plynov do atmosféry. Na základe prvej metodiky IPCC urobil SHMÚ koncom roka 1993 predbežný hrubý odhad emisie skleníkových plynov na Slovensku v roku 1990 [K.Marečková, priebežná správa z riešenia projektu, SHMÚ, 1993].

PREHLAD PRIEBEŽNÝCH SPRÁV PROJEKTU NKP SR V ROKU 1993

Projekt "Národný klimatický program" sa rieši ako medzirezortná úloha pod gesciou Ministerstva životného prostredia SR. Pri jeho riešení sa vychádza z cieľov NKP SR, z výsledkov dosiahnutých v projekte NKP ČSFR v rokoch 1991 a 1992, z prijatých záverov medzinárodných inštitúcií k danému problému, hlavne Svetového klimatického programu a Medzivládneho panelu pre zmeny klímy (IPCC).

Názvy priebežných správ Projektu NKP z roku 1993

1. Návrh siete klimatologických a zrážkomerných staníc na monitorovanie zmien klímy v SR
Zodp. riešiteľ: Dr. Nieplová (SHMÚ), spoluriešitelia: Dr. Faško, Dr. Horecká
2. Návrh siete hydrologických staníc na monitoring zmien klímy v SR
Zodp. riešitelia: Dr. Škoda, Ing. Turbek (SHMÚ)
- 3.a) Výber mesačných radov hydrologických prvkov a analýza ich spoľahlivosti.
b) Analýza zmien a variability hydrologických prvkov z vybraných staníc v SR
Zodp. riešiteľ: Dr. Majerčáková (SHMÚ), spoluriešitelia: Ing. Kullman, P. Šedík, Ž. Cagardová
4. Upresnenie alternatívnych scenárov zmien teploty vzduchu a zrážok na Slovensku do roku 2035
Zodp. riešiteľ: Dr. Lapin (SHMÚ)
- 5.a) Dôsledky zmien teploty vzduchu a zrážok na zmeny iných klimatických prvkov v zmysle alternatívnych scenárov zmien klímy do roku 2035 na Slovensku
Zodp. riešiteľ: Dr. Lapin (SHMÚ), spoluriešitelia: Dr. Faško, Dr. Zeman
- 5.b) Dôsledky zmien potenciálnej a skutočnej evapotranspirácie na zmeny obsahu vlhky v pôde na vybraných staniciach Slovenska
Zodp. riešiteľ: Prof. Tomlain (MFF UK), spoluriešiteľ: Dr. Hrvol'
- 5.c) Dlhodobé zmeny globálneho žiarenia a celkovej radiačnej bilancie zemského povrchu na vybraných staniciach SR
Zodp. riešiteľ: Dr. Hrvol' (MFF UK Bratislava), spoluriešiteľ: Prof. Tomlain
6. Dôsledky zmien teploty vzduchu, oblačnosti, UVB slnečnej radiácie (zoslabovanie ozonoféry) a zrážok na zmeny parametrov chemizmu atmosféry do roku 2035 na Slovensku
Zodp. riešitelia: Dr. Závodský (SHMÚ), Dr. Závodská (GFÚ SAV Bratislava)
Spoluriešitelia: Dr. Bilčík, Dr. Pukančíková
7. Možné dôsledky zmien klímy na rastlinnú poľnohospodársku výrobu do roku 2035 na Slovensku
Zodp. riešiteľ: Prof. Špánik (VŠP Nitra), spoluriešitelia: Dr. Šiška, Ing. Repa
8. Možné dôsledky zmien klímy na lesné ekosystémy
Zodp. riešiteľ: Dr. Ing. Mind'áš (LVÚ Zvolen), spoluriešiteľ: Ing. Škvarčina
9. Analýza zmien a variability bioklimatickej komplexnej veličiny - Ekvivalentnej teploty v období 1961-90
Zodp. riešiteľ: Dr. Čabajová (VÚHB Bratislava), spoluriešiteľ: Dr. Zeman
10. Možné dôsledky zmien klímy na evapotranspiráciu ozimnej pšenice na Podunajskej nížine.
Zodp. riešiteľ: Dr. Huzulák (VÚRP Piešťany), spoluriešiteľ: Dr. Matejka
11. Inventarizácia a analýza lokálnych antropogénnych zásahov do prírodného prostredia na území Žitného ostrova a na Východoslovenskej nížine s podobnými dôsledkami na zmeny hydrologického režimu ako má rastúci skleníkový efekt atmosféry a súvisiace zmeny klímy
Zodp. riešiteľ: Dr. Šútor (ÚH SAV Bratislava), spoluriešiteľ: Ing. Svoboda

ZÁVER

Okrem uvedených úloh, ktorých riešenie pokračuje aj v roku 1994, sa od roku 1994 začalo riešenie úloh zameraných na rekonštrukciu a prípravu homogenizovaných dlhých radov mesačných hodnôt klimatických charakteristík, na analýzu dôsledkov zmien klímy na hydrologické prvky a na predbežný návrh adaptačných opatrení na zmiernenie možných negatívnych dôsledkov v lesnom a vodnom hospodárstve, v poľnohospodárstve a v iných socio-ekonomických sektoroch.

Projekt je finančne zabezpečený z prostriedkov Štátneho fondu životného prostredia SR prostredníctvom MŽP SR a SHMÚ a čiastočne aj riešiteľskými inštitúciami. Garantom MŽP SR za projekt NKP SR je Ing. L. Žiak a zodpovedným riešiteľom projektu je Dr. M. Lapin z SHMÚ, na riešení projektu v roku 1994 sa podieľajú aj ďalší odborníci okrem uvedených pri zozname úloh. Priebežné správy z riešenia projektu NKP SR sú uložené na MŽP SR a na SHMÚ (podobne budú prístupné aj záverečné správy začiatkom roka 1995). Predpokladá sa, že podobným spôsobom bude pokračovať riešenie danej problematiky aj v rokoch 1995 a ďalších. Výsledky riešenia úloh NKP SR sa budú postupne publikovať v edícii Národného klimatického programu SR (asi 2 čísla ročne v rozsahu okolo 100 strán a v náklade 400 ks, z toho 150 ks na výmenu s NKP ČR).

Literatúra:

Edícia NKP ČSFR a ČR (12 čísel do VII.1994), ČHMÚ Praha; Záverečné správy z riešenia úloh NKP ČSFR a SR, SHMÚ a MŽP SR; Publikované príspevky v časopise Meteorologické zprávy, ČHMÚ a SHMÚ a v Bulletin Slovenskej meteorologickej spoločnosti, SHMÚ; Publikované príspevky prednesené na domácich a medzinárodných konferenciách a sympóziách v rokoch 1991-1994; Slovenský preklad Rámcovej dohody OSN o zmene klímy; Závery II. Svetovej klimatickej konferencie v Ženeve v roku 1990; IPCC správy a stanoviská, všetko je k dispozícii v SHMÚ a na MŽP SR.

Zoznam skratiek:

NKP - Národný klimatický program
WMO - Svetová meteorologická organizácia so sídlom v Ženeve
NPRES - Národný program redukcie emisie skleníkových plynov
IPCC - Medzivládny panel pre klimatické zmeny
WCP - Svetový klimatický program
FCCC - Rámcový dohovor OSN o klimatickej zmene (Framework Convention on Climate Change)
MŽP SR - Ministerstvo životného prostredia SR
Mpô SR - Ministerstvo pôdohospodárstva SR
MH SR - Ministerstvo hospodárstva SR
MFF UK - Matematicko-fyzikálna fakulta Univerzity Komenského
PríF UK - Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského
SF STU - Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity
GFÚ SAV - Geofyzikálny ústav Slovenskej akadémie vied
GÚ SAV - Geografický ústav Slovenskej akadémie vied
ÚH SAV - Ústav hydrológie Slovenskej akadémie vied
VÚVH - Výskumný ústav vodného hospodárstva
VÚZH - Výskumný ústav závlahového hospodárstva
VÚHB - Výskumný ústav humánnej bioklimatológie
VŠP - Vysoká škola poľnohospodárska
LTU - Lesnícka technická univerzita
LVÚ - Lesnícky výskumný ústav
VÚRP - Výskumný ústav rastlinnej produkcie
SHMÚ - Slovenský hydrometeorologický ústav

**NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM
SLOVENSKEJ REPUBLIKY**

**NATIONAL CLIMATE PROGRAMME
OF THE SLOVAK REPUBLIC**

**DÔSLEDKY ZMIEN TEPLoty VZDUCHU
A UVB SLNEČNÉHO ŽIARENIA
NA ZMENY CHEMIZMU
HRANIČNEJ VRSTVY ATMOSFÉRY
NA SLOVENSKU**

Riešitelia:

Doc. RNDr. Dušan Závodský, CSc.,
Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava
RNDr. Katarína Pukančíková,
Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava
RNDr. Eva Závodská, CSc.,
Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava
RNDr. Dušan Bilčík,
Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava

Projekt:

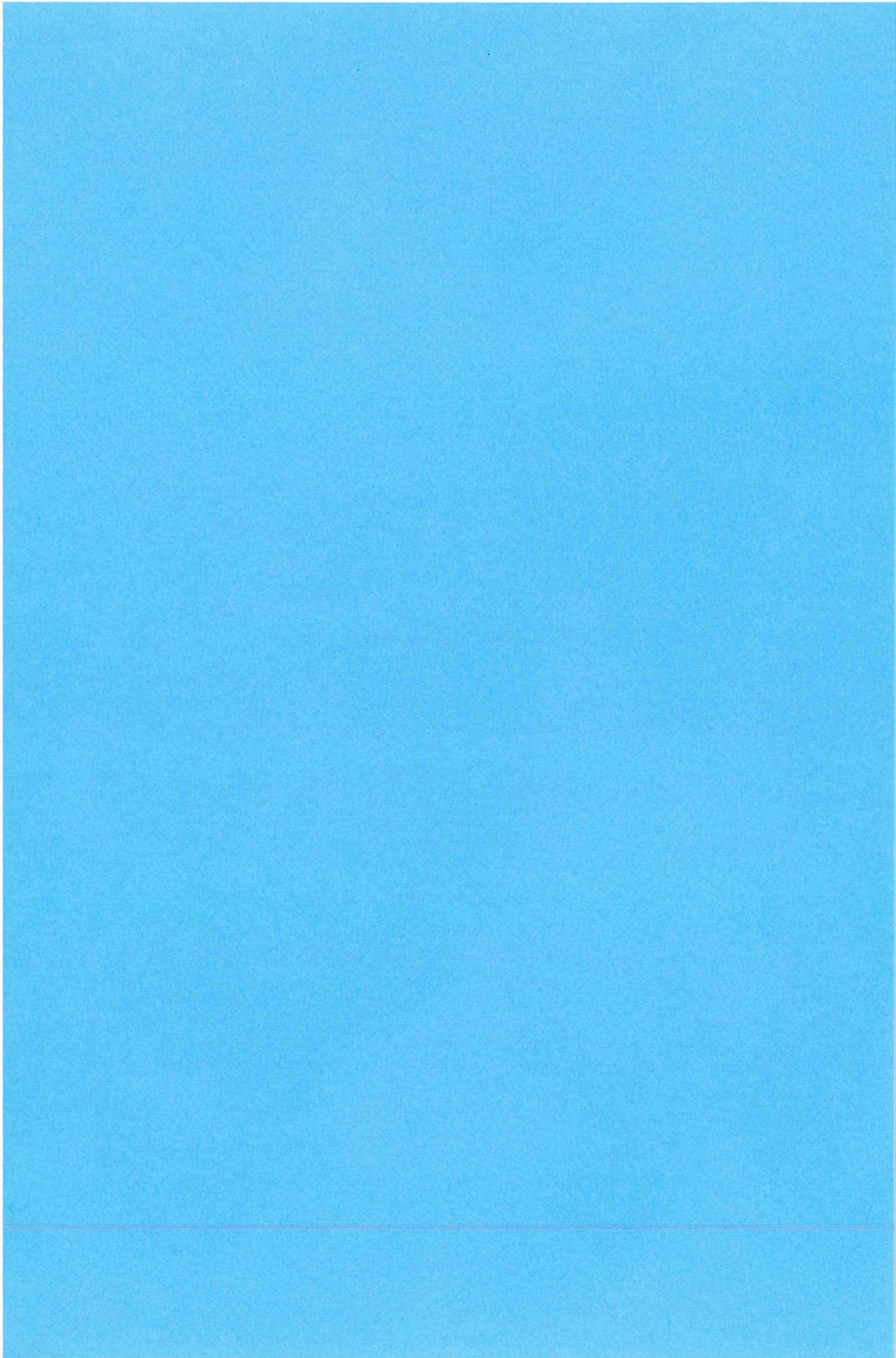
MŽP SR Výskum zmien kvality ovzdušia, klimatické zmeny
a narušovanie ochranných vlastností atmosféry - NKP SR

Zadávatel:

MŽP SR

Lektor:

Ing. Lubomír Žiak,
Ministerstvo životného prostredia SR, Bratislava



THE EFFECT OF GLOBAL WARMING AND UVB SOLAR RADIATION INCREASE ON THE BOUNDARY LAYER CHEMISTRY

SUMMARY

Boundary layer chemistry represents a complex non-linear chemical mechanism involving hundreds of species and their photochemical and thermal reactions. The present increase of oxidants concentration level, observed over the entire northern hemisphere, is mainly result of influence of two factors:

- non-controlled anthropogenic emission increase
- global climate change.

This paper examines possible influences of both precursors emission reduction and global climate change (warming, ozone layer depletion) on oxidants production. The boundary layer chemical model was developed. 48 species and 120 chemical reactions (EMEP chemical scheme) were considered. System of mass balance equations was integrated over time, taking emission inputs, chemical reactions, dry deposition and variable exchange with the free troposphere into account. Photodissociation rates was calculated as a function of the total ozone amount. To calculate actinic flux the computer code LOWTRAN 7 was used. The first model calculations allow to formulate the following very preliminary conclusions:

- NO_x and VOC emissions reduction by 30 % from 1990 levels would decrease maximum summer rural O_3 concentrations only by several percents
- the present regional O_3 concentration level in Central Europe is strongly NO_x - limited
- preindustrial rural O_3 concentration level needs more than 98 % nitrogen oxides emission reduction
- onesided NO_x emission reduction would increase peroxides production, mainly H_2O_2
- the oxidant concentrations are stimulated by increasing air temperature as well as UVB solar radiation
- if total ozone amount is below 300 DU the effect of temperature on O_3 concentrations is not so pronounced
- taking into account model assumptions, 2°C increase of boundary layer temperature and 10 % ozone layer depletion could enhance maximum summer rural ozone concentrations by about 5 %. But more pronounced effect on average concentration level could be expected
- the future trend of surface O_3 concentrations in Central Europe will depend on precursors emission trend in the whole middle latitude belt, climate change as well as free troposphere O_3 trend. Increase of average ozone level up to 0.5 % per year and summer ozone episodes with maximum concentrations between 200-300 $\mu\text{g.m}^{-3}$ or even more during the ninetieth could be expected.

List of figures and tables

- Figure 1. The most important processes of tropospheric photochemistry.
- Figure 2a. Comparison of downward radiance values calculated for θ_r and ϕ_r (1 rad) with azimuthally averaged values; solar zenith angle $\theta_0 = 30^\circ$.
- Figure 2b. As Figure 2a, but for solar zenith angle $\theta_0 = 75^\circ$.
- Figure 3. The calculated photolysis rate $J(O_3 \rightarrow O(^1D))$ as a function of solar zenith angle and total ozone amount. Clear sky, 0.5 km above surface, 0.10 surface albedo. Hough: clear sky, 0.5 km above land, 350 DU total ozone.
- Figure 4. As Figure 3, but for $J(O_3 \rightarrow O(^3P))$.
- Figure 5. As Figure 3, but for $J(NO_2)$.
- Figure 6. As Figure 3, but for $J(NO_3 \rightarrow NO + O_2)$.
- Figure 7. As Figure 3, but for $J(NO_3 \rightarrow NO_2 + O(^3P))$.
- Figure 8. As Figure 3, but for $J(N_2O_5)$.
- Figure 9. As Figure 3, but for $J(HNO_3)$.
- Figure 10. As Figure 3, but for $J(HCHO \rightarrow HCO + H)$.
- Figure 11. As Figure 3, but for $J(HCHO \rightarrow H_2 + CO)$.
- Figure 12. As Figure 3, but for $J(H_2O_2)$.
- Figure 13. As Figure 3, but for $J(CH_3OOH)$.
- Figure 14. As Figure 3, but for $J(CH_3CHO)$.
- Figure 15. As Figure 3, but for $J(HCOCHO)$.
- Figure 16. As Figure 3, but for $J(CH_3COCHO)$.
- Figure 17. As Figure 3, but for $J(CH_3COCOCH_3)$.
- Figure 18. The calculated photolysis rate $J(C_2H_5COCH_3)$ as a function of solar zenith angle and total ozone amount. Clear sky, 0.5 km above surface, 0.10 albedo.
- Figure 19. Daily maximum ozone concentrations in ppb as a function of nitrogen oxides and volatile nonmethan hydrocarbons (NMHC) emissions. SHMI photochemical model was used. Clear sky, total ozone 350 DU and daily course of air temperature 23-33°C were assumed. Emission value 1, for NO_x as well as NMHC, corresponds to territory average Slovak republic emission in 1990.
- Figure 20. Daily maximum ozone concentrations in ppb as a function of daily maximum air temperature and total ozone amount. SHMI photochemical model was applied. Territory average Slovak republic NO_x and NMHC emissions (yr. 1990), clear sky, maximum solar declination and a typical summer daily course of air temperature (amplitude 10°C), relative humidity and mixing height were assumed.
- Figure 21. Hourly ozone concentrations and air temperature (>20°C) relation from EMEP regional air pollution station Stará Lesná (800 m a.s.l.) in 1992.
- Figure 22. Daily maximum H_2O_2 concentrations as a function of daily maximum air temperature and total ozone amount according SHMI model estimation. The other assumptions see Figure 20.
- Figure 23. Daily maximum OH radical concentrations as a function of daily maximum air temperature and total ozone amount according SHMI model estimation. The other assumptions see Figure 20.
- Table 1. SHMI model chemistry.
- Table 2. Photochemical reactions of the EMEP model.
- Table 3. Regression coefficient values in relations (18).

1. ÚVOD

Koncentrácia ľubovoľnej atmosférickej zložky je výsledkom pohyblivej rovnováhy medzi jej produkciou a úbytkom v ovzduší. Primárne prímеси unikajú do atmosféry z povrchu, sekundárne zložky vznikajú priamo v ovzduší ako produkty často zložitých fotochemických mechanizmov. Popri zdrojovom člene strednú dobu zotrvania molekúl príslušnej prímеси v ovzduší určujú jej vlastnosti (rýchlosť fotodisociácie, reaktivita, rozpustnosť vo vode, ...), vonkajšie podmienky (slnečné žiarenie, teplota a vlhkosť vzduchu, oblačnosť, zrážky, ...), prítomnosť iných látok (reaktanty, katalyzátory, sorbenty) a vlastnosti povrchu (suchá depozícia). Podľa strednej doby zotrvania τ sa atmosférické zložky rozdeľujú do 3 skupín:

- Kvázistále, $\tau > 1000$ rokov (N_2 , O_2 , vzácne plyny)
- Variabilné, $\tau = 1-300$ rokov (CO_2 , CH_4 , N_2O , chlórfluórokarbóny,...)
- Vysoko variabilné, $\tau < 3$ mesiace (H_2O , CO , nemetánové uhľovodíky, SO_2 , NO , NO_2 , H_2S , ...)

Koncentrácie prvej skupiny látok zatiaľ ľudská činnosť merateľne neovplyvnila. Všetky variabilné atmosférické prímеси sú radiačne aktívne, patria medzi tzv. skleníkové plyny. Ľudskou činnosťou došlo k porušeniu rovnováh globálnych kolobehov týchto látok. Rast ich koncentrácií na jednej strane vyvoláva globálne otepľovanie, na druhej strane produkty ich fotolýzy v stratosfére sú príčinou zoslabovania ozónovej vrstvy. S výnimkou metánu sú všetky variabilné prímеси v troposfére chemicky inertné. Rast ich koncentrácií ovplyvňuje troposférickú fotochémiu nepriamo, nakoľko prispievajú k zoslabovaniu ozónovej vrstvy, a tým k rastu ultrafialovej slnečnej radiácie prenikajúcej do troposféry.

Vysoko variabilné prímеси majú vo väčšine prípadov $\tau < 2$ dni. S ohľadom na charakteristický čas vertikálnej výmeny medzi hraničnou vrstvou a voľnou troposférou (asi 5 dní) je zjavné, že atmosférický kolobeh väčšiny týchto látok sa prevažne odohráva v hraničnej vrstve. Výnimku tvorí oxid uhoľnatý ($\tau = 3$ mesiace) a niektoré uhľovodíky - etán, acetylén, acetón, metanol, benzén, ... ($\tau = 10-80$ dní), ktoré sa dostávajú do voľnej troposféry a spolu s metánom ovplyvňujú jej chemizmus. Voda má v našich zemepisných šírkach $\tau = 9$ dní.

Osobitné postavenie má ozón. Jeho stredná doba zotrvania v stratosfére je vyše roka, vo voľnej troposfére 2-3 mesiace a pri povrchu niekoľko dní. Ozón, spolu s oxidmi dusíka (NO , NO_2) majú kľúčové postavenie v troposférickej fotochémi. Regulujú úroveň radikálov aj oxidantov, čím riadia celý proces transformácie primárnych atmosférických prímесí.

Všeobecne platí, čím kratšia je doba zotrvania prímесí v ovzduší, tým väčšia je priestorová a časová premenlivosť jej koncentrácií. Variabilné atmosférické prímеси sú viacmenej homogénne rozptýlené v celej troposfére. Prízemné pole koncentrácie vysoko variabilných prímесí je veľmi nehomogénne, pozorujú sa výrazné vertikálne gradienty (v závislosti od τ), aj významné denné a sezónne zmeny koncentrácií.

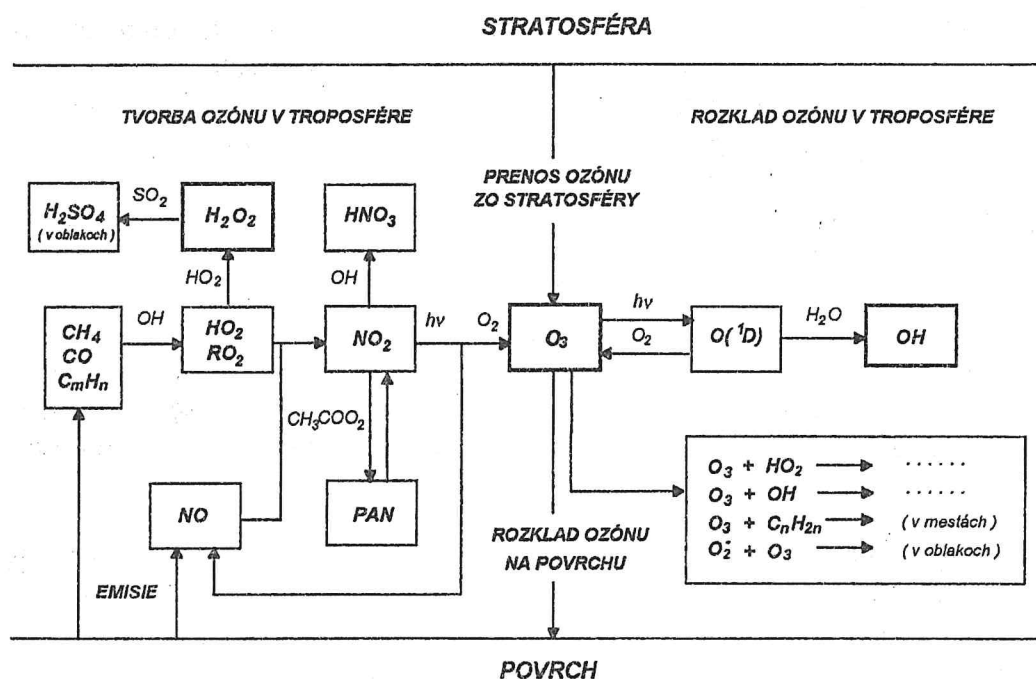
Troposférická chémia je komplexný nelineárny proces, zahŕňajúci stovky látok a chemických reakcií. Súčasné zmeny troposférického chemizmu sú spôsobené dvoma skupinami faktorov:

- rastom antropogénnych emisií atmosférických prímiesí,
- globálnymi zmenami klímy (oteplovanie, zmeny vlhkosti vzduchu, oblačnosti, rast ultrafialového slnečného žiarenia, zmeny zrážkových pomerov, ...).

Cieľom subprojektu č. 6 NKP SR je pomocou modelu chemizmu hraničnej vrstvy zhodnotiť dôsledky očakávaných zmien klímy na oxidačnú kapacitu spodnej troposféry, najmä na prízemný ozón, a to s prihliadnutím na predpokladané zmeny emisií rozhodujúcich prekursorov (NO_x , VOC). V predchádzajúcich etapách riešenia subprojektu bol vypracovaný matematický model chemizmu hraničnej vrstvy (Závodský, Pukančíková, 1993) a vypočítané závislosti fotodisociačných rýchlostí od hrúbky ozónovej vrstvy pre všetky fotochemické reakcie modelu (Bilčík et al., 1994). Predložená práca zhŕňa prvé výsledky modelových výpočtov zameraných na analýzu rozsahu vplyvu očakávaných zmien teploty vzduchu a ultrafialového slnečného žiarenia na maximálne prízemné koncentrácie O_3 v podmienkach Slovenska.

2. FOTOCHÉMIA TROPOSFÉRY A JEJ CITLIVOSŤ NA KLIMATICKÉ ZMENY

Obr. 1 znázorňuje najvýznamnejšie procesy troposférickej fotochémie. Troposféra je oxidačným prostredím. Hlavné oxidanty reprezentujú ozón, hydroxylový radikál (OH) a peroxid vodíka (H_2O_2). Ich celkový obsah determinuje "oxidačnú kapacitu" troposféry.



Obr. 1 Najvýznamnejšie procesy troposférickej fotochémie.

Väčšina atmosférického ozónu (90-95 %) sa nachádza v stratosfére, z ktorej O_3 preniká do troposféry a rozkladá sa na povrchu. Tento mechanizmus prevládal v preindustriálnom období, kedy priemerné prízemné koncentrácie O_3 na našom území boli 20 -25 $\mu\text{g.m}^{-3}$. V súčasnosti sú prízemné koncentrácie 2 až 3-krát vyššie a stále narastajú. Podčiarkuje to význam rastúcej troposférickej produkcie.

Disociáciou ozónu slnečným žiarením s vlnovými dĺžkami blízkymi 300 nm vzniká atomárny kyslík v ^1D energetickom stave. Časť $O(^1\text{D})$ atómov reaguje s vodnou parou za produkcie OH radikálu



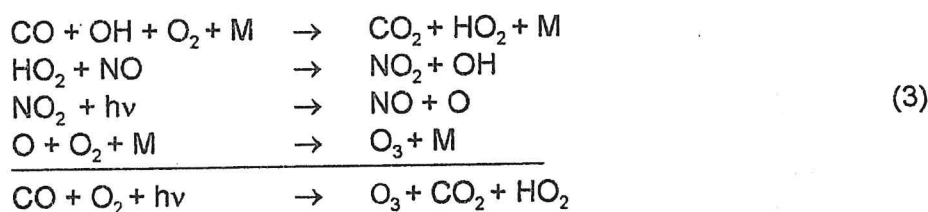
Primárna produkcia OH radikálu závisí od koncentrácie O_3 , absolútnej vlhkosti vzduchu a intenzity ultrafialového slnečného žiarenia.

Ozón sa v troposfére rozkladá reakciami s alkénmi, radikálmi a v oblačnej vode. S výnimkou záchytu v oblakoch však tieto reakcie vedú k regenerácii, resp. k zosilneniu produkcie radikálov (OH, HO_2 , organické peroxylové radikály RO_2 , kde R je napr. metylová skupina).

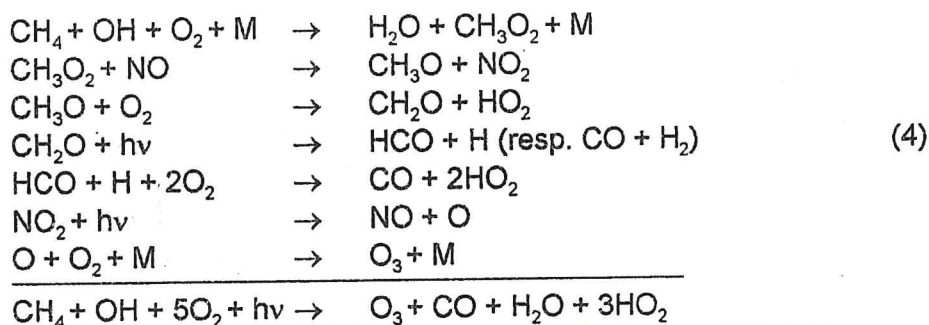
Kľúčové postavenie v troposférickej tvorbe oxidantov majú oxidy dusíka ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$). Samotná prítomnosť NO_x však nevedie k produkcii O_3 (nulová reakčná sekvencia):



V prítomnosti CO, CH_4 a NMHC (nemetánových uhľovodíkov) pri koncentráciách $\text{NO}_x > 20$ ppt prevládne tvorba ozónu nad jeho rozkladom:



(M - nezávislá molekula odvádzajúca reakčné teplo)



V tomto cykle, popri produkcii O_3 , regeneruje NO_x , vzniká CO a za jeden spotrebovaný radikál OH sa vyprodukuje až 3 HO_2 radikály. Hydroperoxylový radikál najčastejšie reaguje s NO, pričom regeneruje OH radikál, resp. reakcia dvoch HO_2 radikálov je zdrojom H_2O_2 v plynnej fáze:



Podobne oxidujú vyššie uhľovodíky za vzniku O_3 , radikálov a organických peroxidov (napr. CH_3O_2H). Produkcia ozónu a peroxidov závisí od pomeru koncentrácií NO_x a uhľovodíkov. V spodnej troposfére priemyselných kontinentov, vzhľadom na rast emisií NO_x a reaktívnych uhľovodíkov (alkény, aromáty), sa pozoruje rast koncentrácií O_3 (1-2 % ročne). Vo voľnej troposfére sa na produkcii O_3 podieľajú látky s dlhšou dobou zotrvania v ovzduší, najmä CH_4 a CO. Tvorba peroxidov je relatívne významnejšia v prostredí s nižšími koncentraciami oxidov dusíka. Peroxid vodíka je veľmi dobre rozpustný vo vode, je rozhodujúcim oxidantom SO_2 v oblakoch a má preto najväčší podiel na generovaní acidity zrážok.

Ako vyplýva z reakčných sekvencií (3) a (4) v znečistenom prostredí oxidáciu NO na NO_2 namiesto ozónu sprostredkovávajú radikály HO_2 a RO_2 (existujúci O_3 sa ušetrí), pričom fotodisociáciou NO_2 dochádza k ďalšej produkcii O_3 .

Časť NO_2 molekúl reaguje s OH a RO_2 radikálmi. V prvom prípade vzniká plynná kyselina dusičná, v druhom prípade je najvýznamnejšia tvorba peroxyacetylnitrátu (PAN-u):



PAN je pri nízkych teplotách stabilný a predstavuje rezervoár radikálov. Pri vysokých teplotách dochádza k jeho termickému rozkladu a uvoľňovaniu prekursorov ozónu.

Veľmi významný vplyv na troposférickú chémiu má oblačnosť. V našich zemepisných šírkach oblačnosť v priemere vyplňa asi 15 % troposférického objemu. Oblačnosť priamo ovplyvňuje radiačné procesy nad aj pod oblačnou vrstvou. Oxidácia plynných prímies v oblačnej vode je najúčinnnejší mechanizmus transformácie škodlivín v ovzduší. Modelové výpočty ukazujú, že v našich podmienkach oblačnosť redukuje priemerné koncentrácie O_3 asi o 30 %. Podrobnejšiu analýzu troposférického chemizmu, vrátane odkazov na literatúru, možno nájsť v prehľadových prácach riešiteľov subprojektu (Závodský, Závodská, 1991, 1992, 1993).

Zmeny klímy vplyvajú na fotochemické procesy v troposfére mnohostranným spôsobom:

- rast ultrafialovej slnečnej radiácie v B-oblasti (v dôsledku zoslabovania stratosférickej ozónovej vrstvy) zosilňuje fotolýzu O_3 , NO_2 a ďalších látok, čím sa intenzifikuje celý troposférický chemizmus,
- rast absolútnej vlhkosti zosilňuje primárnu produkciu OH radikálu,
- na zmeny teploty je veľmi citlivá kinetika termálnych reakcií v ovzduší,

- zmenšovanie oblačnosti zoslabuje zápornú spätnú väzbu na produkciu oxidantov pod oblačnou vrstvou a spomaľuje transformáciu vo vode rozpustných atmosférických prímiesí,
- znižovanie zrážok spomaľuje vymývanie prímiesí z troposféry,
- rast teploty vzduchu zosilňuje emisiu viacerých látok z povrchu (zvýšená mikrobiálna činnosť - vyššie emisie CH_4 , N_2O , NO , ...; rastúce emisie prirodzených uhľovodíkov - izoprénu z listnatých a terpénov z ihličnatých lesov; rastúci výpar antropogénnych uhľovodíkov atď.).

3. MODEL CHEMIZMU HRANIČNEJ VRSTVY ATMOSFÉRY

Hraničná vrstva atmosféry (vrstva trenia, vrstva premiešavania) siaha od povrchu až do výšky, v ktorej všetky vertikálne turbulentné toky podmienené vplyvom povrchu zaniknú. Hrúbka hraničnej vrstvy má výrazný denný aj sezónny chod. Priemerná hrúbka je asi 1 000 m, skutočná kolíše od niekoľko sto až do vyše 2 kilometrov. Hraničnú vrstvu charakterizuje intenzívne vertikálne premiešavanie. V modeloch regionálnych dimenzií je preto možné akceptovať predpoklad okamžitého premiešavania emisií vo vertikálnom stĺpci cez celú hraničnú vrstvu.

Pre štúdium chemizmu hraničnej vrstvy bol v SHMÚ vyvinutý jednohladinový box model (Závodský, Pukančíková, 1993). Chemická schéma tohto modelu je obdobou nórskeho modelu EMEP (Simpson, 1990, 1991, 1992, 1993). Model predpokladá dokonalé premiešavanie vo vertikálnom stĺpci ovzdušia cez celú hraničnú vrstvu. Rovnica hmotnostnej bilancie sa integruje podľa času individuálne pre každú uvažovanú atmosférickú prímies, pričom sa zohľadňujú emisné vstupy, chemická transformácia, suchá depozícia, vymývanie pod oblakom a vertikálna výmena s voľnou troposférou. Rovnicu možno písať v nasledujúcom tvare:

$$\frac{dC_i}{dt} = P_i - L_i C_i + \frac{E_i}{h} - \frac{v_{di}}{h} - \frac{\Lambda_i I}{h} C_i - K \frac{C_i - C_{bi}}{h}, \quad (7)$$

kde C_i znamená koncentráciu v boxe, C_{bi} koncentráciu vo voľnej troposfére, P_i produkciu v jednotke objemu za jednotku času, L_i rýchlosť rozkladu za jednotku času, E_i emisiu z jednotky plochy za jednotku času, v_{di} rýchlosť suchej depozície, Λ_i vymývací pomer, všetko pre prímies i ; I intenzitu zrážok, K koeficient výmeny s voľnou troposférou a h hrúbku vrstvy premiešavania.

Model zahŕňa 48 atmosférických prímiesí a vyše 120 chemických reakcií, z toho 16 fotochemických. Chemická schéma modelu sa nachádza v tab. 1. Rýchlostné konštanty uvedených reakcií sú vo všeobecnosti exponenciálnou funkciou teploty (Arrheniova rovnica). Zoznam fotochemických reakcií (tab. 2), popis metódy aj výsledky výpočtov fotodisociačných rýchlostí pre rôzne hrúbky ozónovej vrstvy sa nachádzajú v nasledujúcej kapitole.

Tabuľka 1 Chemická schéma modelu SHMÚ.

Reakcia	Rýchlostná konštanta
Anorganická chémia	
1. $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	$5,8 \times 10^{-34} (T/300)^{-2,6}$
5. $O + NO + M \rightarrow NO_2 + M$	$9,6 \times 10^{-32} (T/300)^{-1,6}$
7. $O^1D + M \rightarrow O + M$	$2,0 \times 10^{-11} \exp(+100/T)$
8. $H_2O + O^1D \rightarrow 2 OH$	$2,3 \times 10^{-10}$
11. $O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$	$2,0 \times 10^{-12} \exp(-1400/T)$
12. $O_3 + NO_2 \rightarrow NO_3 + O_2$	$1,2 \times 10^{-13} \exp(-2450/T)$
13. $O_3 + OH \rightarrow HO_2 + O_2$	$1,9 \times 10^{-12} \exp(-1000/T)$
14. $O_3 + HO_2 \rightarrow OH + O_2 + O_2$	$1,4 \times 10^{-14} \exp(-600/T)$
15. $NO + NO_3 \rightarrow 2 NO_2$	$1,6 \times 10^{-11} \exp(+150/T)$
17. $NO + HO_2 \rightarrow NO_2 + OH$	$3,7 \times 10^{-12} \exp(+240/T)$
19. $NO_2 + NO_3 \rightarrow NO + NO_2 + O_2$	$2,3 \times 10^{-12} \exp(-1000/T)$
20. $NO_2 + NO_3 \rightarrow N_2O_5$	$1,4 \times 10^{-12}$
21. $NO_2 + OH \rightarrow HNO_3$	$1,5 \times 10^{-11}$
26. $NO_3 + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + HNO_3$	$4,1 \times 10^{-16}$
27. $NO_3 + NO_3 \rightarrow NO_2 + NO_2 + O_2$	$8,5 \times 10^{-13} \exp(-2450/T)$
28. $N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2 HNO_3$	$1,3 \times 10^{-21}$
29. $N_2O_5 \rightarrow NO_2 + NO_3$	$8,5 \times 10^{-14} \exp(-11080/T)$
30. $OH + HO_2 \rightarrow H_2O + O_2$	$4,8 \times 10^{-11} \exp(+250/T)$
31. $OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2O$	$2,9 \times 10^{-12} \exp(-160/T)$
33. $OH + H_2 \rightarrow H + H_2O$	$7,7 \times 10^{-12} \exp(-2100/T)$
35. $OH + HNO_3 \rightarrow NO_3 + H_2O$	$9,4 \times 10^{-15} \exp(+778/T)$
36. $HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$	$2,2 \times 10^{-13} \exp(+600/T)$
37. $HO_2 + HO_2 + N_2 \rightarrow H_2O_2 + N_2$	$1,9 \times 10^{-33} \exp(+980/T)$
38. $HO_2 + HO_2 + O_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$	$4,5 \times 10^{-32}$
Oxidácia SO₂	
39. $OH + SO_2 \rightarrow HSO_3$	$1,35 \times 10^{-12}$
40. $CH_3O_2 + SO_2 \rightarrow SO_3 + CH_3O$	$4,0 \times 10^{-17}$
$HSO_3 + O_2 \rightarrow HO_2 + SO_3$	veľmi rýchla
$SO_3 + H_2O \rightarrow SA$	veľmi rýchla
Tvorba aerosólu	
42. $CH_3O_2H \rightarrow \text{aerosól}$	
43. $H_2O_2 \rightarrow \text{aerosól}$	ak RH < 90 % $k = 5,0 \times 10^{-6}$
44. $N_2O_5 \rightarrow \text{aerosól}$	ak RH > 90 % $k = 1,0 \times 10^{-4}$
45. $HNO_3 \rightarrow \text{aerosól}$	(RH - relatívna vlhkosť vzduchu)
Suchá depozícia	
46. HNO_3	3,0
47. SO_2	0,8
48. NO_2	0,4
49. O_3	0,5
50. PAN	0,2

Oxidácia metánu		
59.	$\text{OH} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_3 + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O}_2 + \text{N}_2$	$3,7 \times 10^{-12} \exp(-1820/T)$ veľmi rýchla
60.	$\text{CH}_2\text{O}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{NO}_2$ $\text{CH}_3\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCHO} + \text{HO}_2$	$4,2 \times 10^{-12} \exp(+180/T)$ veľmi rýchla
61.	$\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{CH}_3\text{O} + \text{O}_2$	$6,5 \times 10^{-14} \exp(+220/T)$
62.	$\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{HCHO}$	$1,1 \times 10^{-13} \exp(+220/T)$
65.	$\text{HO}_2 + \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O}_2\text{H} + \text{O}_2$	$1,7 \times 10^{-13} \exp(+1000/T)$
66.	$\text{OH} + \text{HCHO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HCO}$	$1,6 \times 10^{-11} \exp(-110/T)$
69.	$\text{NO}_3 + \text{HCHO} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{HCO}$ $\text{HCO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO}$	$6,0 \times 10^{-18}$ veľmi rýchla
70.	$\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{H} + \text{CO}_2$	$2,4 \times 10^{-13}$
Oxidácia etánu		
71.	$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{OH} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5$ $\text{C}_2\text{H}_5 + \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2$	$7,14 \times 10^{-12} \exp(-990/T)$ veľmi rýchla
72.	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{O} + \text{NO}_2$ $\text{C}_2\text{H}_5\text{O} \rightarrow \text{HCHO} + \text{CH}_3$ $\text{C}_2\text{H}_5\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_3\text{CHO}$	$8,8 \times 10^{-12}$ 33,0 $3,7 \times 10^{-17}$
73.	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2 + \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{O} + \text{CH}_3\text{O}$	$2,5 \times 10^{-14}$
75.	$\text{OH} + \text{CH}_3\text{CHO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_3\text{CO}$ $\text{CH}_3\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}_2$	$5,6 \times 10^{-12} \exp(+310/T)$ veľmi rýchla
76.	$\text{NO}_3 + \text{CH}_3\text{CHO} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{CH}_3\text{COO}_2$	$1,4 \times 10^{-15}$
77.	$\text{CH}_3\text{CO}(\text{O}_2) + \text{NO}_2 \rightarrow \text{PAN}$	$7,9 \times 10^{-12}$
78.	$\text{PAN} \rightarrow \text{CH}_3\text{CO}(\text{O}_2) + \text{NO}_2$	$1,12 \times 10^{+16} \exp(-13330/T)$
79.	$\text{CH}_3\text{CO}(\text{O}_2) + \text{NO} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CO}_2 + \text{NO}_2$	$1,47 \times 10^{-11}$
80.	$\text{CH}_3\text{O}_2 + \text{CH}_3\text{CO}(\text{O}_2) \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{CH}_3 + \text{CO}_2$	$2,2 \times 10^{-12} \exp(+490/T)$
[93]	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2 + \text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{O} + \text{C}_2\text{H}_5\text{O} + \text{O}_2$	$1,2 \times 10^{-13} \exp(-110/T)$
[94]	$\text{CH}_3\text{CO}(\text{O}_2) + \text{CH}_3\text{CO}(\text{O}_2) \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CH}_3 + \text{O}_2$	$2,8 \times 10^{-12} \exp(+530/T)$
Oxidácia eténu		
109.	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{OH} \rightarrow \text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{O}_2\text{CH}_2\text{OH}$	$1,66 \times 10^{-12} \exp(+474/T)$ veľmi rýchla
110.	$\text{CH}_2\text{O}_2\text{CH}_2\text{OH} + \text{NO} \rightarrow \text{CH}_2\text{OCH}_2\text{OH} + \text{NO}_2$ $\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCHO} + \text{HCHO} + \text{HO}_2$	$3,1 \times 10^{-13}$ veľmi rýchla
111.	$\text{CH}_2\text{O}_2\text{CH}_2\text{OH} + \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{OCH}_2\text{OH} + \text{CH}_3\text{O}$	$2,5 \times 10^{-14}$
112.	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{O}_3 \rightarrow \text{HCHO} + \text{CH}_2\text{O}_2$ $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 0,42\text{xCO} + 0,12\text{xHO}_2 + 0,12\text{xH}_2$	$1,2 \times 10^{-14} \exp(-2633/T)$ veľmi rýchla
Oxidácia propénu		
123.	$\text{C}_3\text{H}_6 + \text{O}_3 \rightarrow \text{HCHO} + 0,12\text{xCH}_4 + 0,24\text{xCO} + 0,29\text{xHO}_2 +$ $+ 0,19\text{xOH} + 0,05\text{xCH}_3\text{O} + 0,43\text{xCH}_3\text{O}_2$	$6,5 \times 10^{-15} \exp(-2105/T)$
124.	$\text{C}_3\text{H}_6 + \text{O}_3 \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO} + 0,42\text{xCO} + 0,12\text{xHO}_2 + 0,12\text{xH}_2$	$6,5 \times 10^{-15} \exp(-2105/T)$
125.	$\text{C}_3\text{H}_6 + \text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{OH}$ $\text{CH}_3\text{CHCH}_2\text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CHOCH}_2\text{OH}$	$4,1 \times 10^{-12} \exp(+545/T)$ veľmi rýchla
126.	$\text{CH}_3\text{CHOCH}_2\text{OH} + \text{NO} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHOCH}_2\text{OH} + \text{NO}_2$ $\text{CH}_3\text{CHOCH}_2\text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO} + \text{HCHO} + \text{HO}_2$	$3,1 \times 10^{-13}$ veľmi rýchla
127.	$\text{CH}_3\text{CHOCH}_2\text{OH} + \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{CHOCH}_2\text{OH} + \text{CH}_3\text{O}$	

Oxidácia n-butánu

81.	$n\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{OH} \rightarrow \text{secC}_4\text{H}_9 + \text{H}_2\text{O}$	$1,4 \times 10^{-11} \exp(-559/T)$
	$\text{secC}_4\text{H}_9 + \text{O}_2 \rightarrow \text{secC}_4\text{H}_9\text{O}_2$	
83.	$\text{secC}_4\text{H}_9\text{O}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{secC}_4\text{H}_9\text{O} + \text{NO}_2$	$3,0 \times 10^{-12}$
	$\text{secC}_4\text{H}_9\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5$	$2,1 \times 10^{-16}$
	$\text{secC}_4\text{H}_9\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO} + \text{C}_2\text{H}_5$	$1,2 \times 10^{-13}$
84.	$\text{secC}_4\text{H}_9\text{O}_2 + \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{secC}_4\text{H}_9\text{O} + \text{HCHO} + \text{HO}_2$	$2,5 \times 10^{-14}$
86.	$\text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5 + \text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{COCHCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$8,8 \times 10^{-13}$
	$\text{CH}_3\text{COCHCH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COCHO}_2\text{CH}_3$	
105.	$\text{CH}_3\text{COCHO}_2\text{CH}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{CH}_3\text{COCHOCH}_3 + \text{NO}_2$	$3,1 \times 10^{-13}$
	$\text{CH}_3\text{COCHOCH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COCOCH}_3 + \text{HO}_2$	
106.	$\text{CH}_3\text{COCHO}_2\text{CH}_3 + \text{CH}_3\text{O}_2 \rightarrow \text{HCHO} + \text{HO}_2 + \text{CH}_3\text{COCOCH}_3$	$2,5 \times 10^{-14}$

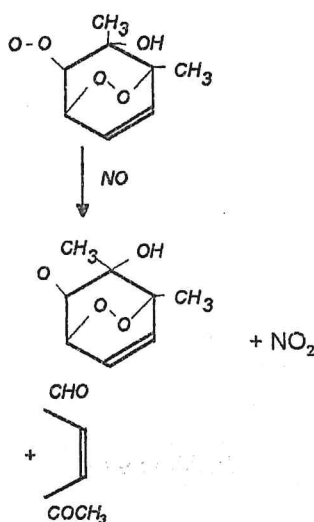
Oxidácia o-xylénu

234. $\text{OH} + \text{o-xylén} \rightarrow$

$1,1 \times 10^{-11}$

236.

$3,1 \times 10^{-13}$



219.	$\text{CH}_3\text{COCH}=\text{CHCHO} + \text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{COCHOH} - \text{CH}(\text{O}_2)\text{CHO}$	$2,0 \times 10^{-11}$
220.	$\text{CH}_3\text{COCHOH} - \text{CH}(\text{O}_2)\text{CHO} + \text{NO} \rightarrow \text{CH}_3\text{COCH}(\text{OH}) - \text{CH}(\text{O})\text{CHO} + \text{NO}_2$	$3,1 \times 10^{-13}$
	$\text{CH}_3\text{COCH}(\text{OH}) - \text{CH}(\text{O})\text{CHO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CH}_3\text{COCHO} + (\text{HCO})_2$	veľmi rýchla
221.	$\text{OH} + (\text{HCO})_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO} + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	$1,15 \times 10^{-11}$
222.	$\text{OH} + \text{CH}_3\text{COCHO} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	$1,7 \times 10^{-11}$

Prirodzené uhľovodíky

251.	$\text{OH} + \text{C}_5\text{H}_8 \rightarrow \text{OHC}_5\text{H}_7\text{O}_2$	$2,54 \times 10^{-11} \exp(+410/T)$
252.	$\text{OHC}_5\text{H}_7\text{O}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{CH}_3\text{COCH}=\text{CH}_2 + \text{HCHO}$	$3,0 \times 10^{-13}$
253.	$\text{OH} + \text{CH}_3\text{COCH}=\text{CH}_2 \rightarrow \text{OHCH}_2\text{COCHCH}_2\text{O}_2$	$2,0 \times 10^{-11}$
254.	$\text{OHCH}_2\text{COCHCH}_2\text{O}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{CH}_3\text{COCHO} + \text{NO}_2 + \text{HCHO} + \text{HO}_2$	$3,1 \times 10^{-13}$
255.	$\text{O}_3 + \text{terpény} \rightarrow \text{produkty}$	$9,9 \times 10^{-16} \exp(-731/T)$

Rýchlostné konštanty sú v s^{-1} , $\text{cm}^3 \cdot \text{molekula}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ alebo $\text{cm}^6 \cdot \text{molekula}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ pre reakcie prvého, druhého a tretieho poriadku.

Systém rovníc (7) sa numericky rieši použitím metódy QSSA (quasi steady state approximation), navrhutej Hesstvedtom et al. (1978). Pri integrácii sa používa konštantný časový krok 15 minút. Pre atmosférické prímеси so strednou dobou zotrvania v ovzduší kratšou ako 15 minút (O , OH , HO_2 , RO_2 , ...) sa iteračným algoritmom počíta rovnovážna koncentrácia pre príslušný časový krok. QSSA metóda významne šetrí strojový čas a umožňuje prevádzku modelu na výkonnom PC.

Vstupné údaje pre výpočet tvoria emisie 15 primárnych prímесí (NO , NO_2 , SO_2 , CO , CH_4 , C_2H_6 , nC_4H_{10} , C_2H_4 , C_3H_6 , o-xylén, CH_2O , $CH_3COC_2H_5$, izoprén a terpény). Emisie izoprénu z listnatých lesov a terpénov z ihličnatých lesov sa stanovujú podľa vzťahov (Lubkert-Schopp, 1989):

$$\begin{aligned} \log_{10}E_d &= 0,10T - 2,1500 \text{ (deň)} \\ \log_{10}E_d &= 0,10T - 2,5556 \text{ (noc)} \\ \log_{10}E_c &= 0,05T - 0,6815 \text{ (deň)} \\ \log_{10}E_c &= 0,05T - 0,7593 \text{ (noc)}, \end{aligned} \quad (8)$$

kde E_d a E_c sú emisie izoprénu a terpénov v $kg \cdot km^{-2} \cdot h^{-1}$ a T je teplota v $^{\circ}C$.

Model zohľadňuje suchú depozíciu HNO_3 , SO_2 , NO_2 , O_3 a PAN. Maximálne rýchlosti suchej depozície sú uvedené v tab. 1. Produkcia aerosólov sa uvažuje ako funkcia relatívnej vlhkosti (tab. 1) a významne narastie pri vlhkostiach nad 90 %. Ako počiatočné koncentrácie pre numerickú integráciu sa použili typické hodnoty zo stredoeurópskych regionálnych staníc na meranie znečistenia ovzdušia.

Vertikálna výmena s voľnou troposférou je funkciou dynamiky hraničnej vrstvy. Najväčší prenos z voľnej troposféry do vrstvy premiešavania nastáva v čase nárastu jej hrúbky od východu Slnka až po dobu maximálnej prízemnej teploty vzduchu. V neskorších odpoľudňajších hodinách je výmena malá. Po západe Slnka sa hrúbka vrstvy premiešavania rýchlo znižuje a stále väčšia časť pôvodne hraničnej vrstvy sa stáva súčasťou voľnej troposféry. Táto schéma neplatí pri vývoji konvektívnej oblačnosti, kedy vzostupné pohyby v oblakoch sú kompenzované zostupnými pohybmi medzi oblakmi. V predloženej práci sa vplyv oblačnosti neuvažoval. Koncentrácie ozónu vo voľnej troposfére sa obdobne ako v modeli EMEP prevzali z globálnych modelov (Simpson, 1992).

Často je diskutovaná otázka vierohodnosti chemických modelov (neúplnosť chemických mechanizmov, neurčitosti rýchlostných parametrov chemických reakcií, chyby numerických metód, neúplnosť a nepresnosť vstupných údajov). Derwent (1993) porovnal chemický mechanizmus EMEP s 25 mechanizmami podobných modelov. Maximálne koncentrácie O_3 , H_2O_2 a PAN podľa modelu EMEP boli blízko k priemerným maximám zo všetkých modelov. Neistoty stanovenia kinetických parametrov reakcií môžu podľa numerických testov spôsobiť chyby až do 20 % (Thompson, Stewart, 1991). Otvoreným problémom stále zostávajú nedostatky emisných inventarizácií, najmä v prípade uhľovodíkov. Merania prchavých uhľovodíkov sa na staniciach EMEP ešte len začali zavádzať (Solberg et al., 1994). Napriek uvedeným nedostatkom zostávajú chemické modely vlastne jediným exaktným nástrojom analýzy príčin vysokého sekundárneho znečistenia ovzdušia a zdôvodnenia stratégií jeho znižovania.

4. VÝPOČET FOTODISOCIAČNÝCH RÝCHLOSTÍ

4.1 Teoretické predpoklady

Pre každú fotoaktívnu látku je fotodisociačná rýchlosť daná vzťahom (Madronich, 1987):

$$J = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \sigma(\lambda) \varphi(\lambda) F_A(\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

kde λ_1 a λ_2 vymedzujú fotochemicky účinnú oblasť žiarenia, $\sigma(\lambda)$ je absorpčný účinný prierez, $\varphi(\lambda)$ je kvantový výťažok fotodisociácie (udáva časť molekúl, ktoré sú disociované po absorpcii fotónu). Účinný prierez aj kvantový výťažok závisia od teploty vzduchu, pre zjednodušenie zápisu vzťahu (9) nie je táto závislosť vyznačená. $F_A(\lambda)$ (actinic flux), účinný tok fotónov, je definovaný ako sféricky integrovaný tok fotónov dopadajúcich na nekonečne malý objemový element v atmosfére. $F_A(\lambda)$ je vyjadrený vo fotónoch na jednotkovú plochu za jednotku času a pre jednotkový interval vlnových dĺžok. Okrem polohy Slnka závisí $F_A(\lambda)$ od mnohých činiteľov: od absorpcie ozónom a molekulárnym kyslíkom, od absorpcie atmosférickým aerosólom, od molekulárneho (Rayleigh) a aerosólového (Mie) rozptylu, od odrazu na zemskom povrchu.

Sféricky integrovaný tok fotónov môže byť rozložený na priamu a difúznú časť:

$$F_A(\lambda) = F_0(\lambda) + F\downarrow(\lambda) + F\uparrow(\lambda) \quad (10)$$

Prvá zložka predstavuje priamo prepustené slnečné žiarenie, druhú tvoria dole a hore smerujúce difúzne príspevky. Priamu zložku možno vypočítať jednoducho pomocou známeho exponenciálneho vzťahu. Zložitejší je výpočet difúzných príspevkov. Vyžaduje integráciu cez zenitový uhol aj cez azimut:

$$F\downarrow(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^1 L\downarrow(\lambda, \mu, \phi) d\mu d\phi, \quad (11)$$

$$F\uparrow(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^0 L\uparrow(\lambda, \mu, \phi) d\mu d\phi, \quad (12)$$

kde μ je kosínus zenitového uhla, ϕ je azimut. Aj keby sme poznali uhlovú distribúciu intenzity difúzneho žiarenia smerujúceho dole a hore ($L\downarrow$ a $L\uparrow$), je výpočet príliš časovo náročný pre praktickú aplikáciu. Z tohoto dôvodu sa využívajú pre výpočet integrálov vo vzťahoch (11) a (12) vhodné aproximácie.

Najbežnejšia aproximácia v modelových radiačných výpočtoch pre intenzitu difúzneho žiarenia smerujúceho hore vyplýva z predpokladu izotrópného odrazu na zemskom povrchu (Lambertovský povrch): $L\uparrow(\mu, \phi) = \text{konštanta}$. V tomto prípade môže byť hore smerujúca difúzna zložka účinného toku fotónov vypočítaná nasledovne (Madronich, 1987):

$$F\uparrow(\lambda) = A(2\mu_0 F_0(\lambda) + F\downarrow(\lambda)), \quad (13)$$

kde A značí albedo zemského povrchu a μ_0 kosínus zenitového uhla Slnka.

Intenzita dole smerujúceho difúzneho žiarenia v atmosfére s aerosólovými časticami je výrazne anizotropná. Avšak podľa práce Ruggaber et al. (1993) je možné aproximovať jej závislosť od azimutu strednou hodnotou alebo hodnotou pre vhodne zvolený azimut ϕ_r , v našom prípade 1 radián. Podobná aproximácia ako pre azimut sa používa aj pre integráciu cez zenitový uhol (Madronich, 1987). Potom môžeme pre nadol smerujúcu difúznu časť účinného toku fotónov použiť vzťah:

$$F_{\downarrow}(\lambda) = 2\pi L_{\downarrow}(\lambda, \theta_r, \phi_r), \quad (14)$$

kde θ_r je zenitový uhol referenčného bodu a ϕ_r je relatívny azimut (vzhľadom na polohu Slnka). V našom prípade sme zvolili pre referenčný zenitový uhol θ_r opäť 1 radián, podobne ako Hough (1988). Obrázky 2a, 2b porovnávajú intenzitu dolu smerujúceho difúzneho žiarenia $L_{\downarrow}$ vypočítanú pre referenčný bod ($\phi_r = 1$ rad, $\theta_r = 1$ rad) a jej strednú hodnotu, vypočítanú integráciou cez azimut využitím 20 bodovej Gaussovej kvadratúry.

Vidíme, že v ultrafialovej (UV) oblasti sú rozdiely zanedbateľné. Aj pre väčšie vlnové dĺžky ($\lambda > 400$ nm) sú rozdiely malé a závisia od polohy Slnka.

Ak použijeme hore uvedené aproximácie a kombináciu rovníc (10) a (13), môžeme určiť sférický integrovaný tok fotónov nasledovne:

$$F_A(\lambda) = F_0(\lambda) (1 + 2A\mu_0) + F_{\downarrow}(\lambda) (1 + A) \quad (15)$$

4.2 Radiačný model a vstupné údaje

K výpočtu hustoty toku priameho slnečného žiarenia a intenzity difúzneho žiarenia smerujúceho nadol ($L_{\downarrow}$ vo vzťahoch (11) a (14)) sme použili radiačný model LOWTRAN 7 (ONCORE, 1991). Výpočty boli urobené so spektrálnym rozlíšením 50 cm^{-1} . Vzťahujú sa na model bezoblačnej nehomogénnej aerosólovej atmosféry. Modelová atmosféra sa skladá z 31 homogénnych planparalelných vrstiev s nerovnakou hrúbkou. Horná hranica atmosféry je situovaná vo výške 50 km. Radiačný model zahŕňa procesy molekulárneho rozptylu, molekulárnej absorpcie, extinkcie atmosférickým aerosólom a reflexie zemským povrchom. Počítaný je aj príspevok viacnásobného rozptylu fotónov k intenzite difúzneho žiarenia. Molekulárny a aerosólový rozptyl sú počítané osobitne s použitím rozdielnych fázových funkcií. Pre jednotlivé modely aerosólu sú použité zodpovedajúce Mie-ho fázové funkcie.

Tabuľka 2 obsahuje zoznam 16 fotochemických reakcií, pre ktoré boli urobené výpočty fotodisociačných rýchlostí. Pri každej reakcii je uvedený účinný interval vlnových dĺžok.

K výpočtu fotodisociačných rýchlostí reakcie i možno integrál vo vzťahu (9) nahradiť sumou cez konečné intervaly vlnových dĺžok:

$$J_i = \sum_{n=1}^{N_i} \varphi_{i,n} \sigma_{i,n} F_{A,n}, \quad (16)$$

kde N_i je celkový počet 5 nm intervalov pokrývajúcich účinnú oblasť vlnových dĺžok (pozri tab. 2). Hodnoty φ_n a σ_n pre každú uvažovanú fotochemickú reakciu boli

prevzaté z práce Hough (1988). Hodnoty $F_{A,n}$ predstavujú účinný tok fotónov integrovaný cez jednotlivé 5 nm intervaly.

Tabuľka 2 Fotochemické reakcie - EMEP model.

Číslo reakcie	Proces	Účinný interval vlnových dĺžok
1	$O_3 \rightarrow O_2 + O(^1D)$	290-320 nm
2	$O_3 \rightarrow O_2 + O(^3P)$	290-660 nm
3	$NO_2 \rightarrow NO + O(^3P)$	290-420 nm
4	$NO_3 \rightarrow NO + O_2$	585-635 nm
5	$NO_3 \rightarrow NO_2 + O(^3P)$	400-635 nm
6	$N_2O_5 \rightarrow NO_2 + NO_3$	290-360 nm
7	$HNO_3 \rightarrow NO_2 + OH$	290-330 nm
8	$HCHO \rightarrow HCO + H$	290-335 nm
9	$HCHO \rightarrow H_2 + CO$	290-360 nm
10	$H_2O_2 \rightarrow 2 OH$	290-370 nm
11	$CH_3OOH \rightarrow CH_3O + OH$	290-350 nm
12	$CH_3CHO \rightarrow CH_3 + CO + H$	290-340 nm
13	$HCOCHO \rightarrow HCHO + H_2 + CO$	290-470 nm
14	$CH_3COCHO \rightarrow CH_3CO + CO + H$	290-470 nm
15	$CH_3COCOCH_3 \rightarrow CH_3CO + CH_3CO$	290-470 nm
16	$C_2H_5COCH_3 \rightarrow C_2H_5 + CH_3CO$	290-335 nm

Sféricky integrovaný tok fotónov bol vypočítaný pre hladinu 0,5 km pre 5 hodnôt celkového množstva ozónu (200, 250, 300, 350 a 400 DU) a pre 5 polôh Slnka. Vzťah (13) je platný pre hladinu blízku zemskému povrchu. Jeho použitie pre hladinu 0,5 km umožňuje skutočnosť, že príspevok vrstvy pod 0,5 km k hore smerujúcemu difúznemu žiareniu je malý v porovnaní s celkovým dole smerujúcim žiarením.

Použitie verikálne profily ozónu sledujú MLS profil (Mid-Latitude Summer profil, Ellingson et al., 1991). Pri výpočtoch sme predpokladali Lambertovský povrch s albedom 0,10. Charakteristiky atmosférického aerosólu boli uvažované v zhode s radiačným modelom LOWTRAN 7. V prízemnej vrstve atmosféry (0-2 km) sme zvolili vidiecky model aerosólu s dohľadnosťou 23 km, vo voľnej troposfére a stratosfére pozadový model.

4.3 Výsledky

Obrázky 3 až 18 znázorňujú vypočítané fotodisociačné rýchlosti v závislosti od polohy Slnka a celkového ozónu, a to pre každú z 16 uvažovaných fotochemických reakcií. Súčasne sú porovnané s výsledkami Hougha (1988) pre 350 DU celkového ozónu. Vidíme dobrý súlad medzi porovnanými výpočtami. Rozdiely sa zväčšujú s rozširovaním účinného intervalu vlnových dĺžok smerom do viditeľnej oblasti slnečného spektra. Vo väčšine prípadov sa rozdiely menia z kladných na záporné s rastom zenitového uhla Slnka. Závislosť J_i na zenitovom uhle Slnka je v našej práci výraznejšia ako v práci Hough (1988). Môže to byť vysvetlené rozdielnymi metódami výpočtu intenzity difúzneho žiarenia. Závislosť na polohe Slnka môže byť zvýšená anizotropným rozptylom na atmosférickom aerosóle. Závislosť J_i na polohe Slnka klesá so zužovaním intervalu účinných vlnových dĺžok smerom do UV oblasti, a to v dôsledku efektu viacnásobného rozptylu.

Absorpcia ozónom je dominujúcim procesom v oblasti vlnových dĺžok 290 až 320 DU (UVB oblasť). Z tohto dôvodu je intenzita nadol smerujúceho difúzneho žiarenia menej ovplyvňovaná časticami aerosólu ako pri ostatných vlnových dĺžkach. To vysvetľuje zhodu našich výsledkov s údajmi Hougha pre fotolýzu ($O_3 \rightarrow O_2 + O(^1D)$) a HNO_3 (obrázky 3 a 9).

Vplyv zmien celkového ozónu je najvýraznejší vo fotochemických procesoch s účinnými vlnovými dĺžkami v UVB oblasti. Výrazná absorpcia ozónu v tejto časti slnečného spektra (Hartleyho pás) spôsobuje intenzívnu závislosť sféricky integrovaného toku fotónov, a tým aj fotodisociačných rýchlostí od celkového množstva ozónu (obrázky 3, 8, 9 a 18). Vplyv absorpčného pásu ozónu okolo 600 nm (Chapiusov pás) je podstatne menší.

Pre potreby fotochemických modelov je výhodné vyjadriť závislosť fotodisociačnej rýchlosti od zenitového uhla Slnka (θ_0) aj celkového množstva ozónu nasledovne (Simpson, 1993):

$$J = \alpha \exp(-b \sec \theta_0). \quad (17)$$

Koeficienty α a b v prípade bezoblačnej atmosféry závisia len od celkového množstva ozónu. Výsledky výpočtov fotodisociačných rýchlostí sme využili k určeniu uvedenej závislosti. Pre zenitové uhly Slnka medzi 15 a 75° a pre celkové množstvo ozónu od 200 do 400 DU sme odvodili exponenciálne výrazy pre koeficienty α a b :

$$\alpha = A_a \exp(B_a x), \quad b = A_b \exp(B_b x), \quad (18)$$

kde x je celkové množstvo ozónu v DU. Regresné koeficienty A_a , B_a , A_b a B_b pre každú uvažovanú fotochemickú reakciu sú uvedené v tabuľke 3. Vidíme, že fotochemické procesy s účinnou oblasťou vlnových dĺžok vo viditeľnej časti slnečného spektra prakticky nezávisia od hodnoty celkového ozónu.

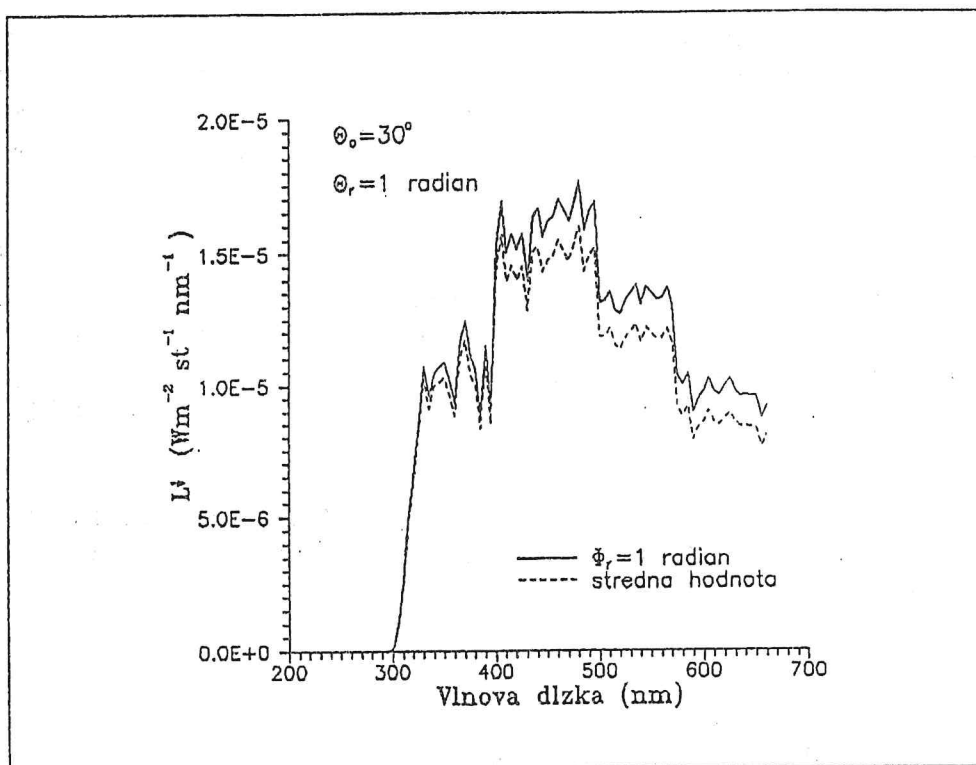
Tabuľka 3 Hodnoty regresných koeficientov vo vzťahoch (18).

Číslo reakcie	Regresné koeficienty			
	A_a	B_a	A_b	B_b
1	5,108E-4	-3,937E-3	1,129E+0	8,245E-4
2	7,182E-4	-2,184E-4	3,642E-1	1,270E-4
3	1,516E-2	-4,895E-5	5,115E-1	+
4	3,654E-2	-2,576E-5	3,086E-1	2,980E-4
5	2,717E-1	*	3,572E-1	*
6	7,791E-5	-1,059E-3	1,518E+0	2,356E-5
7	4,024E-6	-2,940E-3	9,603E-1	2,421E-4
8	9,510E-5	-1,090E-3	7,106E-1	2,636E-4
9	1,040E-4	-2,876E-4	5,885E-1	1,246E-4
10	2,307E-5	-1,063E-3	6,952E-1	+
11	2,127E-5	-1,044E-3	7,021E-1	+
12	2,500E-5	-2,603E-3	9,258E-1	5,228E-4
13	1,165E-4	*	4,427E-1	*
14	2,487E-4	*	4,461E-1	*
15	4,722E-4	*	4,538E-1	*
16	8,275E-6	-3,704E-3	1,030E+0	+

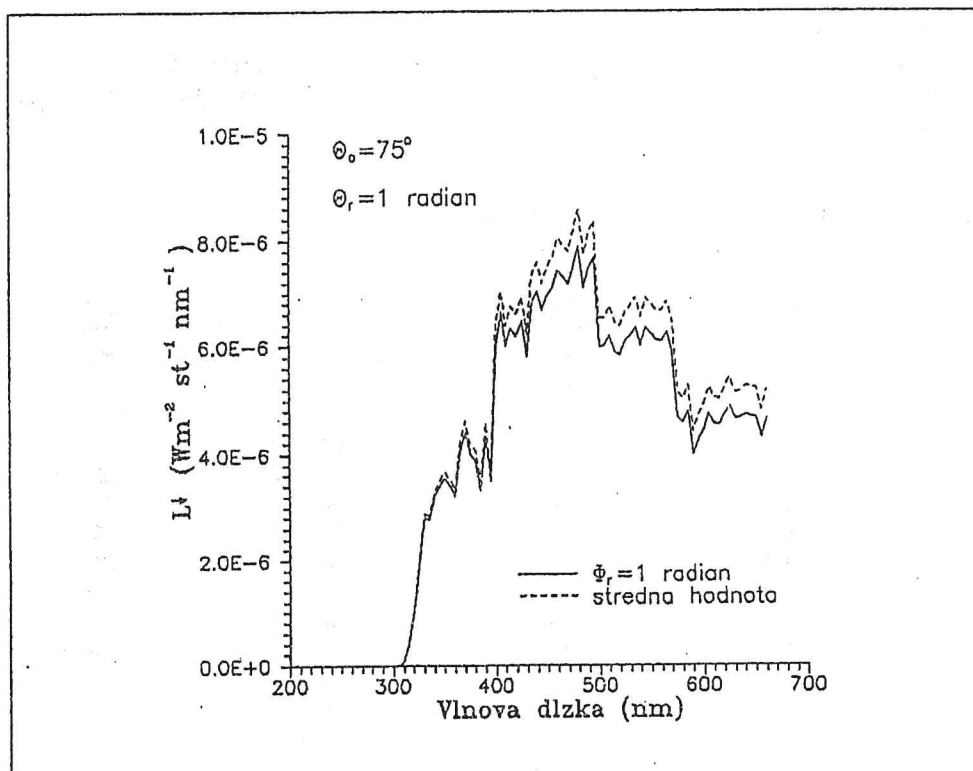
* v tomto prípade a a b nezávisia od celkového ozónu ($a = A_a$, $b = A_b$)

+ v tomto prípade b nezávisí od celkového ozónu ($b = A_b$)

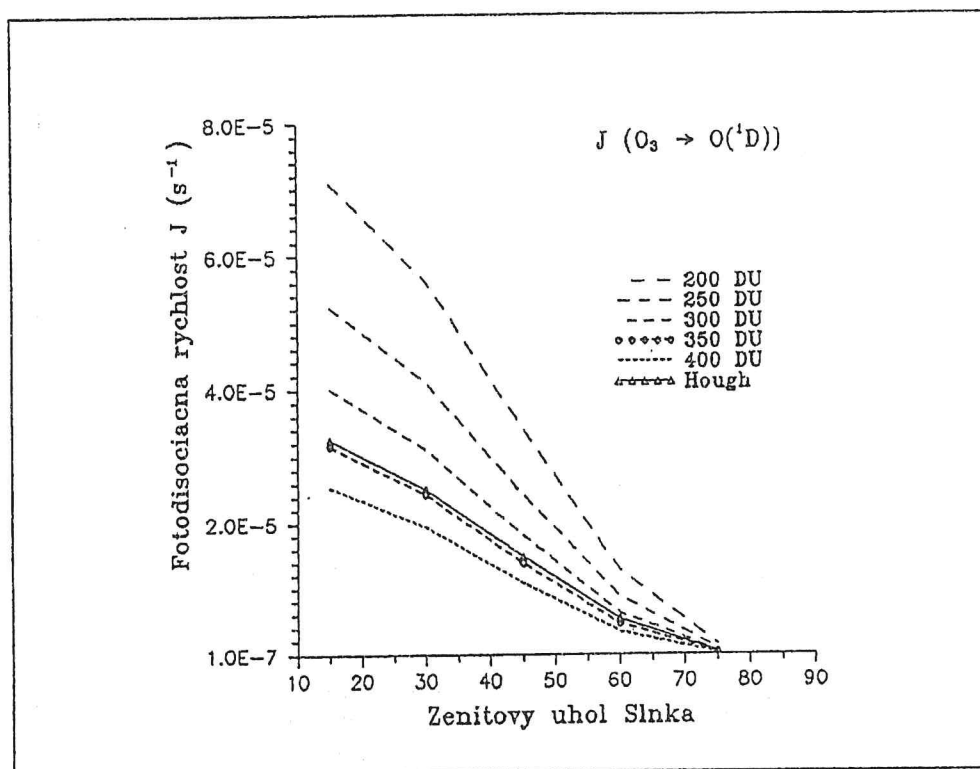
koeficienty A_a sú vyjadrené v s^{-1}



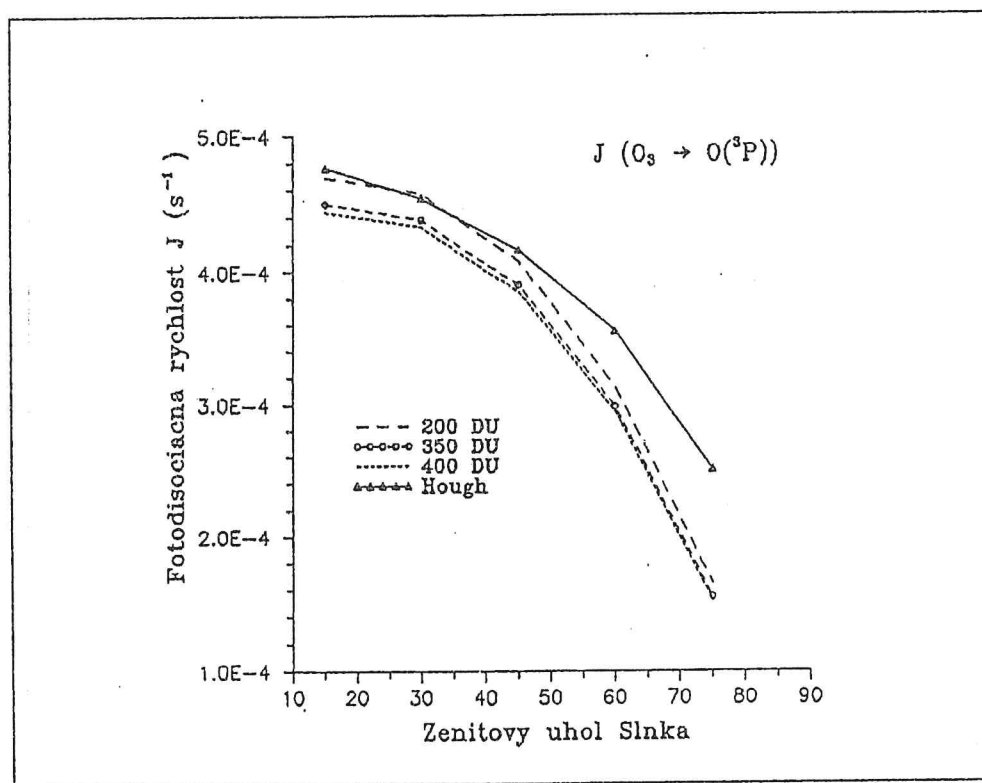
Obr. 2a Porovnanie intenzity difúzneho žiarenia smerujúceho nadol ($L_{\downarrow}$) vypočítanej pre θ_r a ϕ_r (1 rad) s azimutálne spriemerovanou hodnotu; zenitový uhol Slnka $\theta_0 = 30^\circ$.



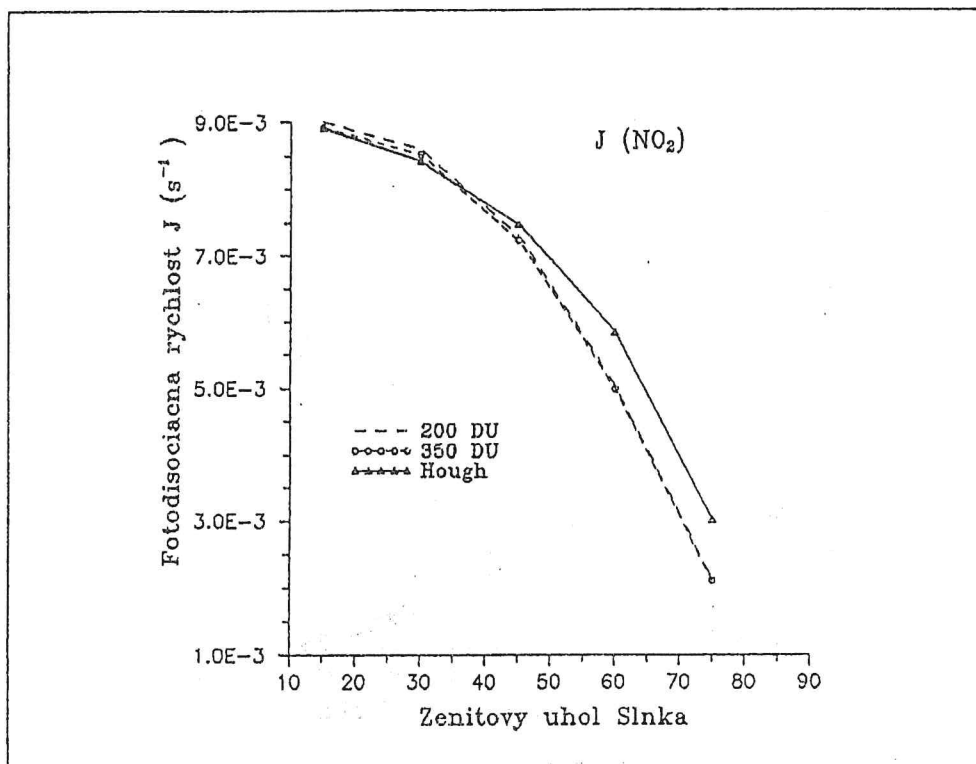
Obr. 2b Ako obrázok 2a, ale pre zenitový uhol Slnka $\theta_0 = 75^\circ$.



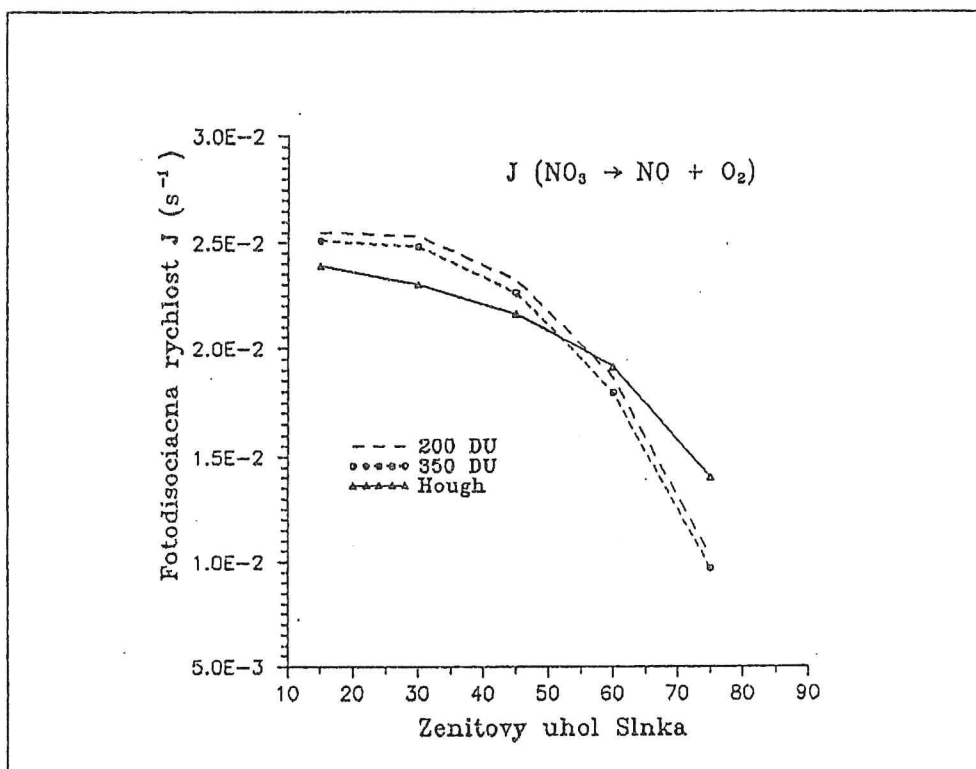
Obr. 3 Závislosť fotodisociačnej rýchlosti $J(O_3 \rightarrow O(^1D))$ od zenitového uhla Slnka a celkového ozónu. Jasná obloha; 0,5 km nad povrchom s albedom 0,10. Hough: jasná obloha; 0,5 km nad povrchom, 350 DU ozónu.



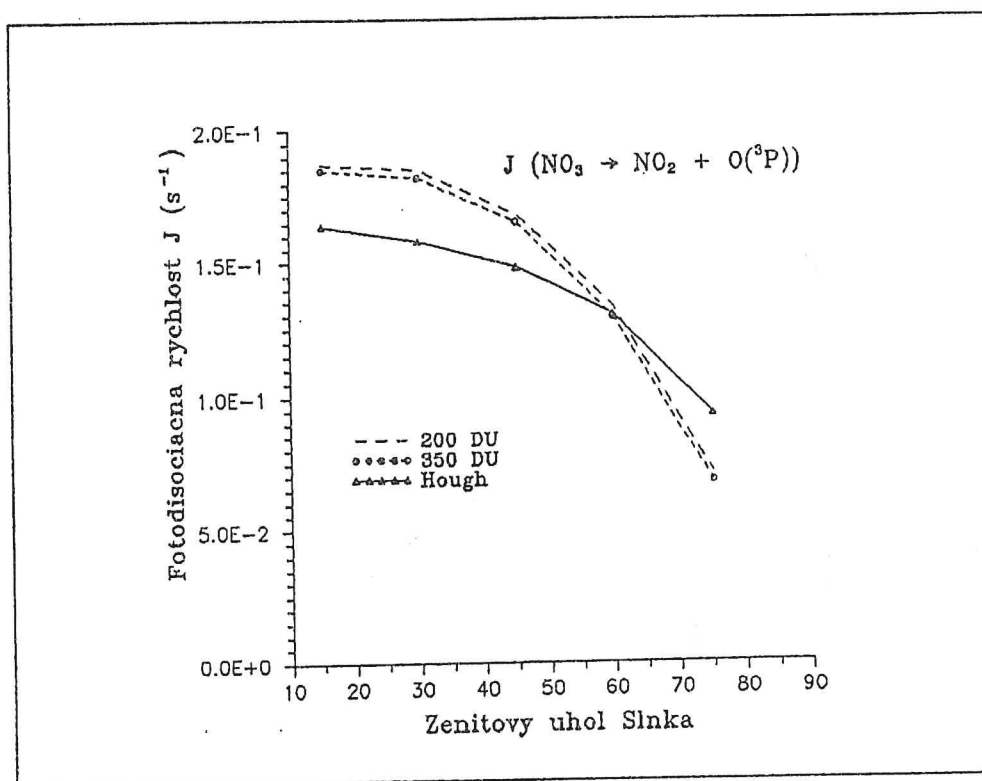
Obr. 4 Ako obrázok 3, ale pre $J(O_3 \rightarrow O(^3P))$.



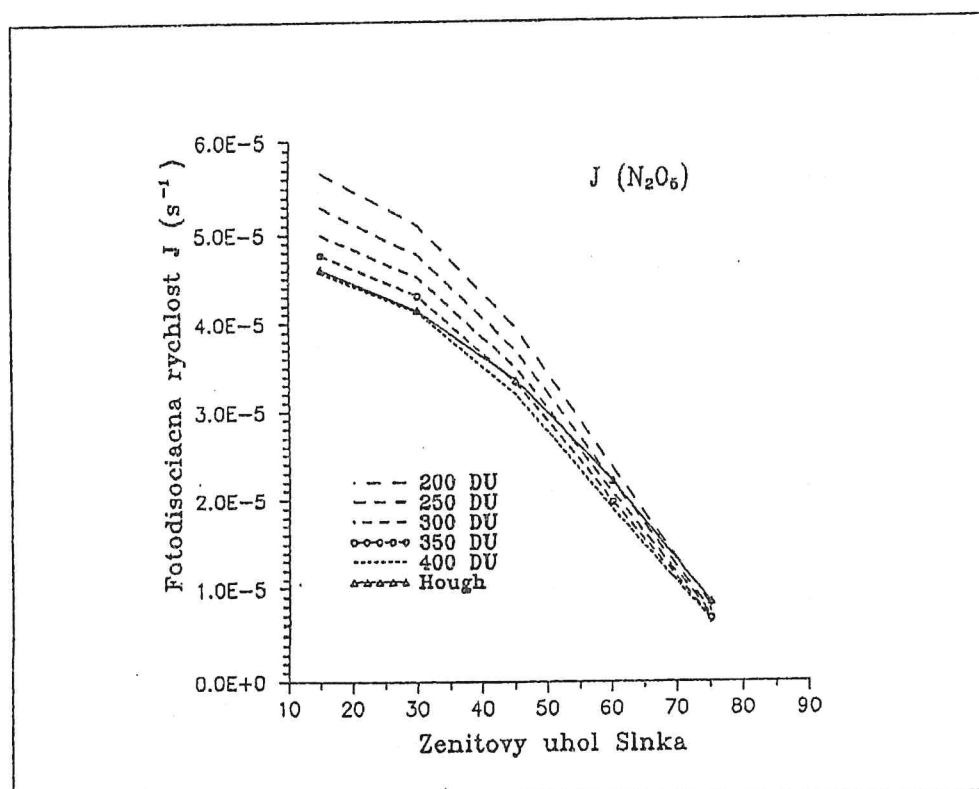
Obr. 5 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{NO}_2)$.



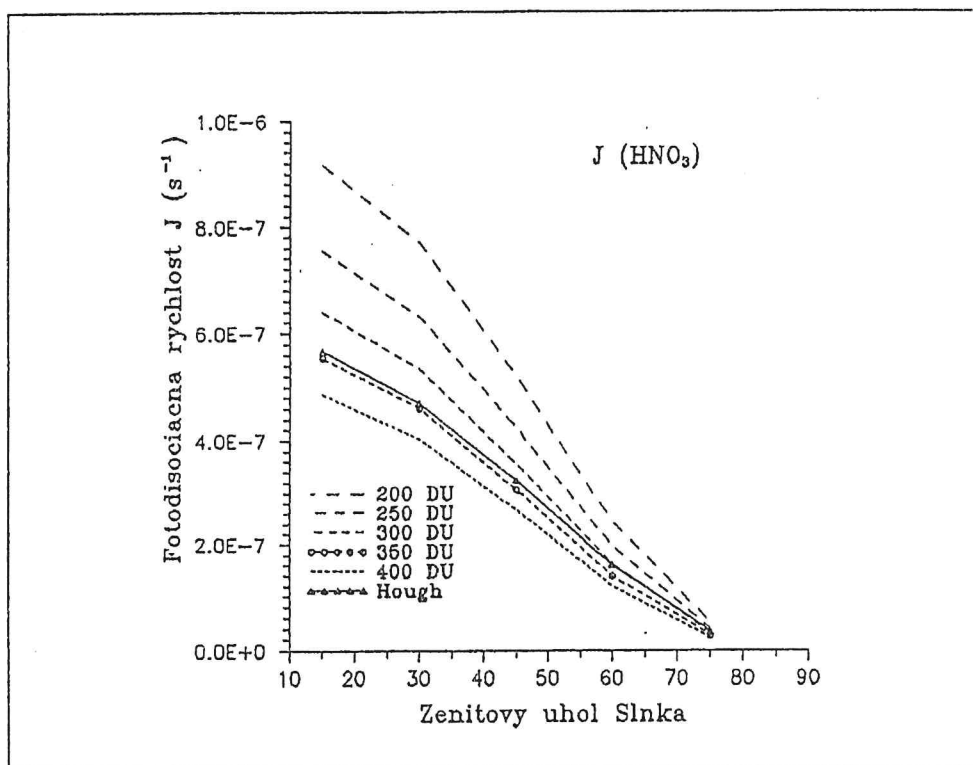
Obr. 6 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{NO}_3 \rightarrow \text{NO} + \text{O}_2)$.



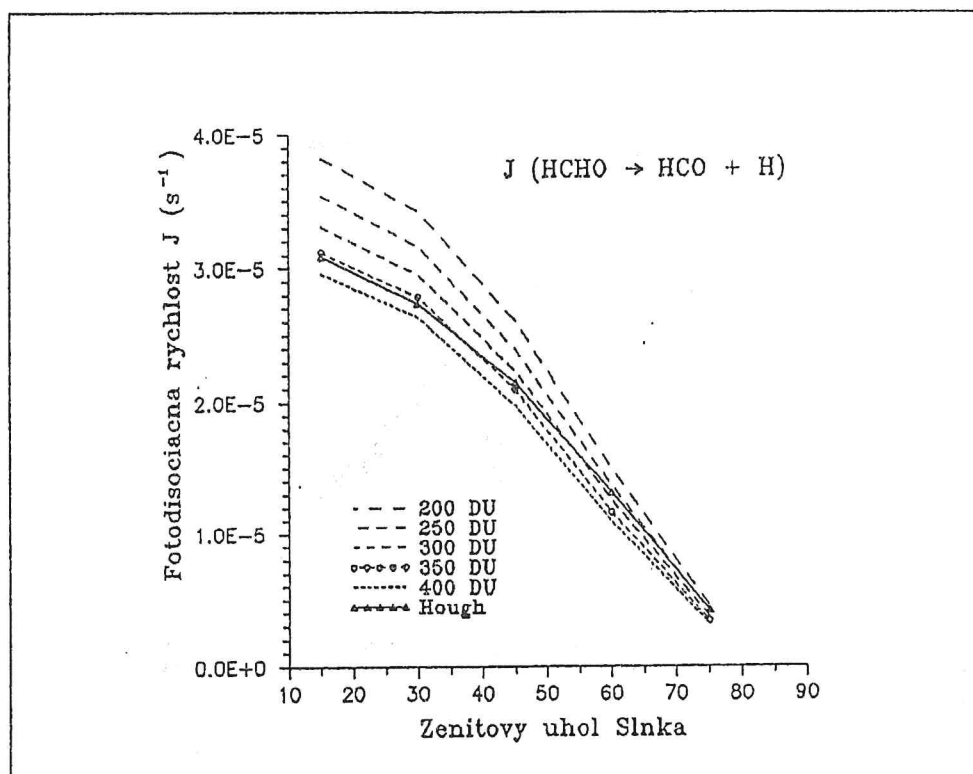
Obr. 7 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{NO}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}(^3\text{P}))$.



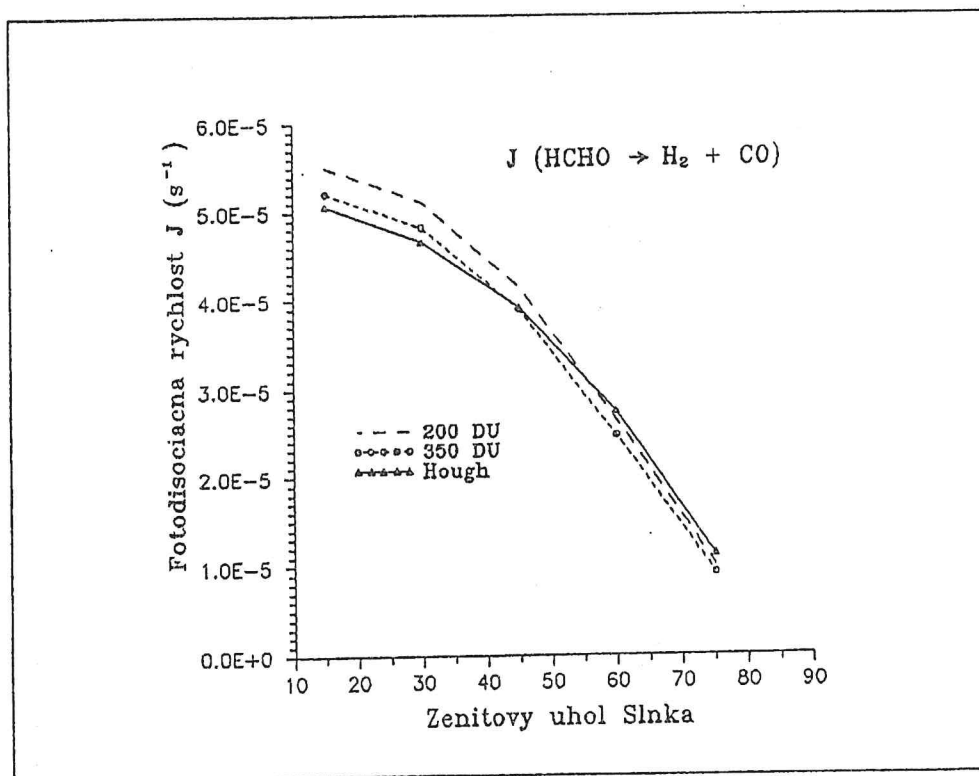
Obr. 8 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{N}_2\text{O}_5)$.



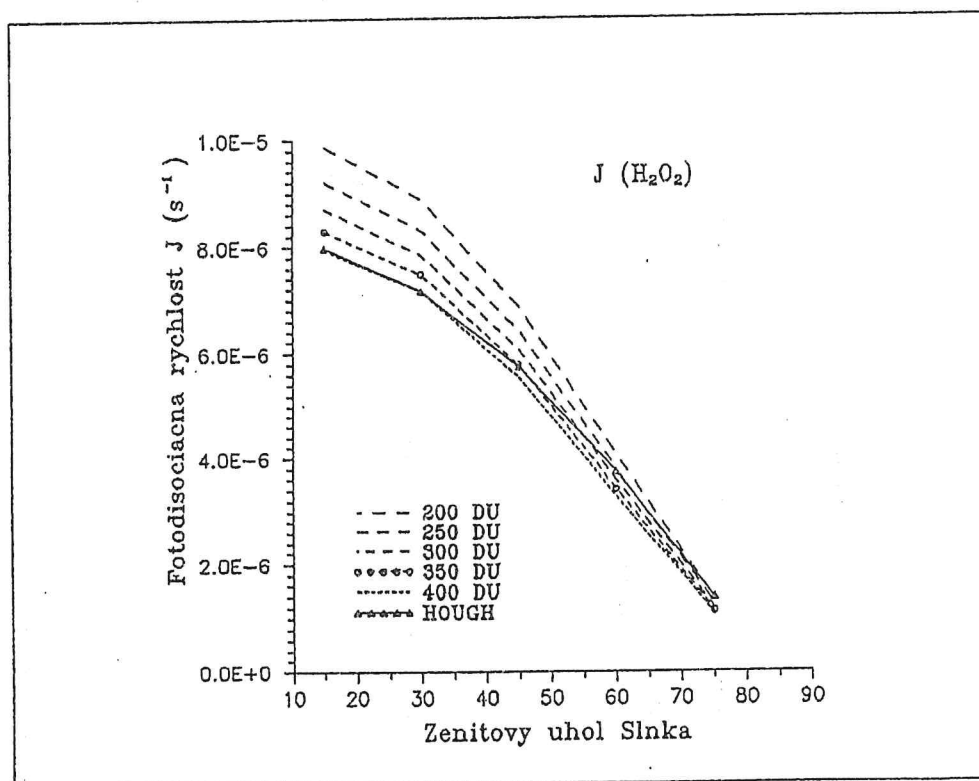
Obr. 9 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{HNO}_3)$.



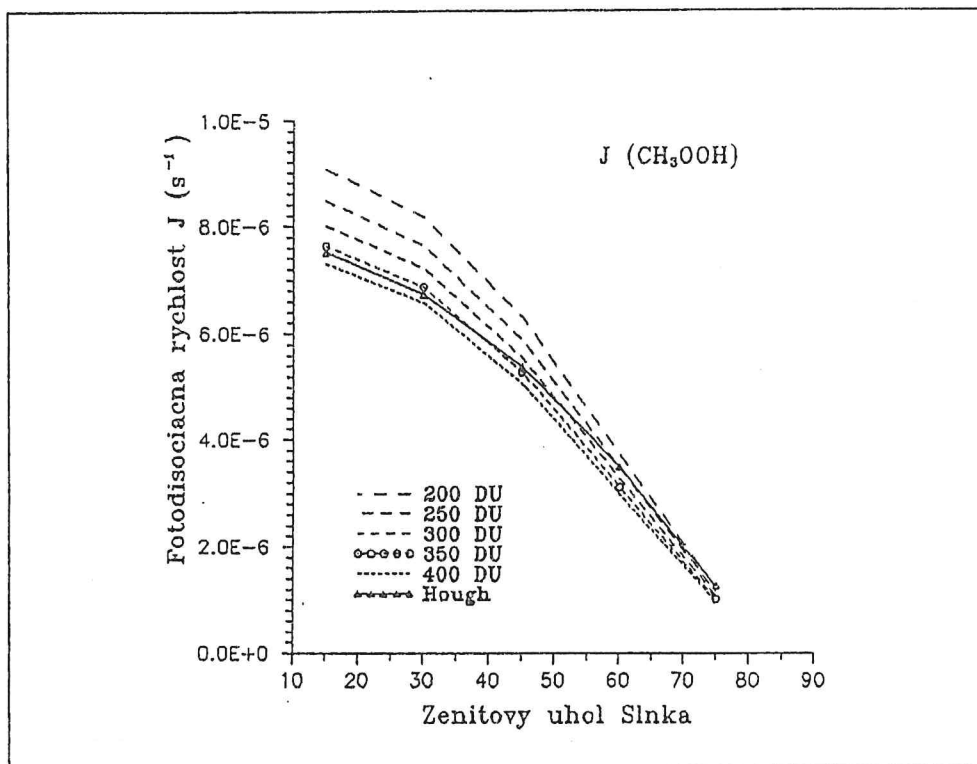
Obr. 10 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{HCHO} \rightarrow \text{HCO} + \text{H})$.



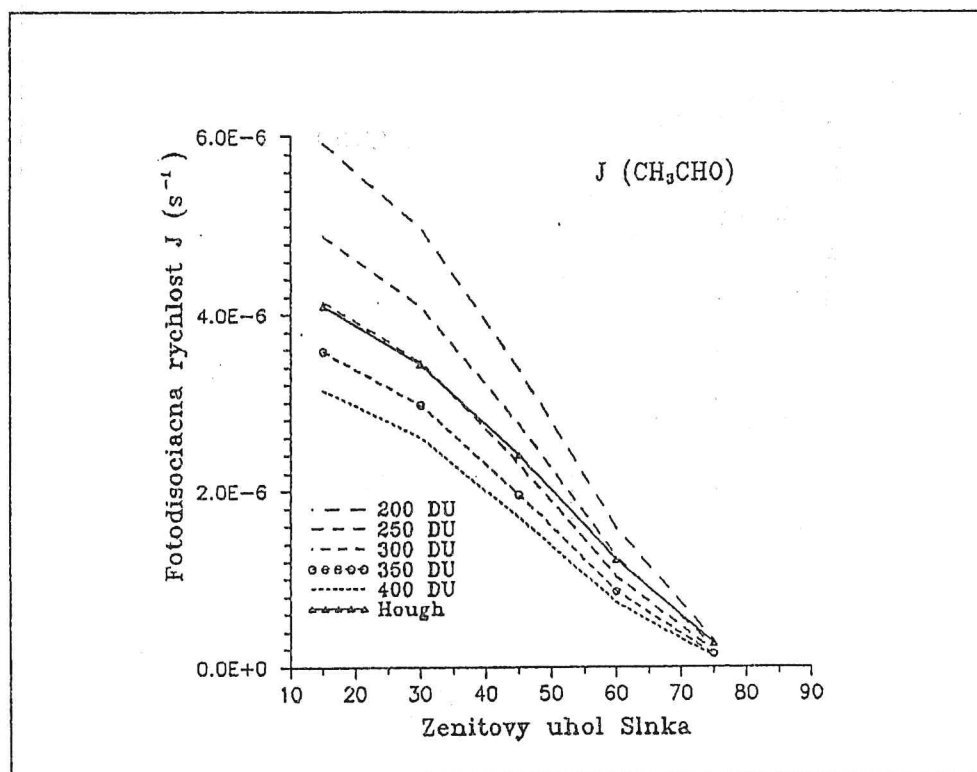
Obr. 11 Ako obrázok 3, ale pre $(\text{HCHO} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO})$.



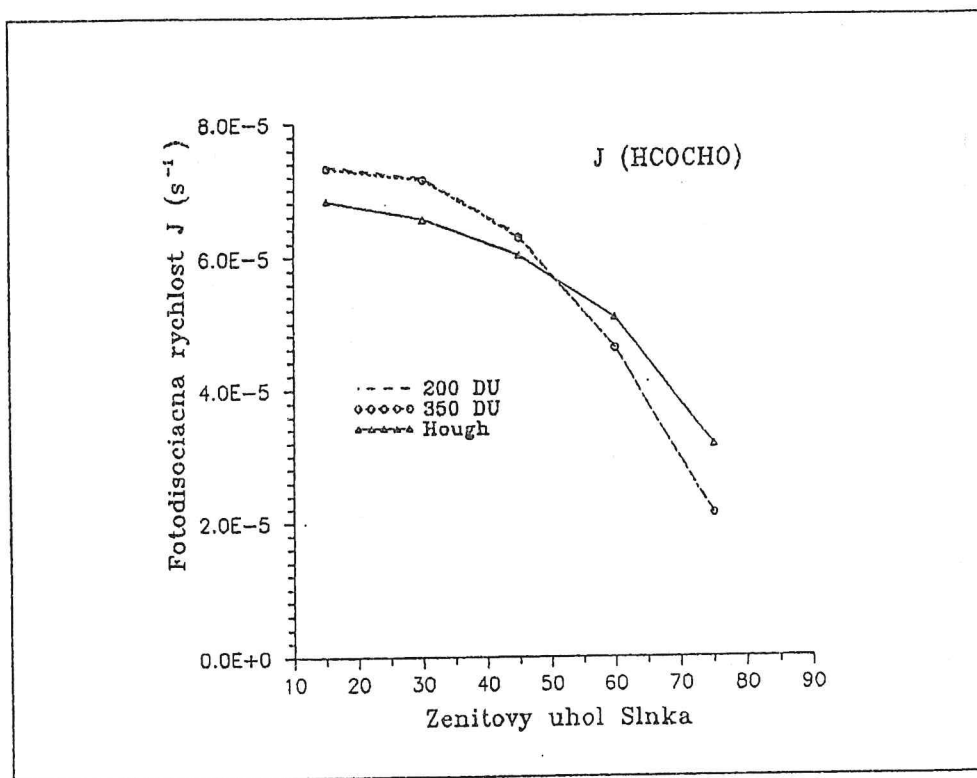
Obr. 12 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{H}_2\text{O}_2)$.



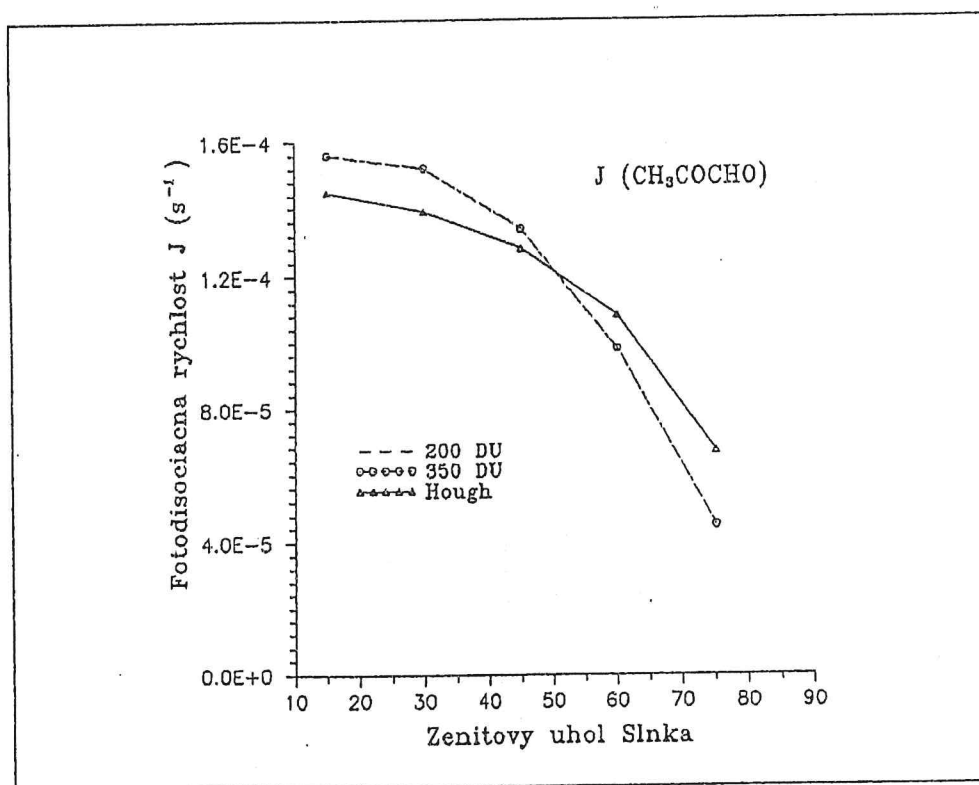
Obr. 13 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{CH}_3\text{OOH})$.



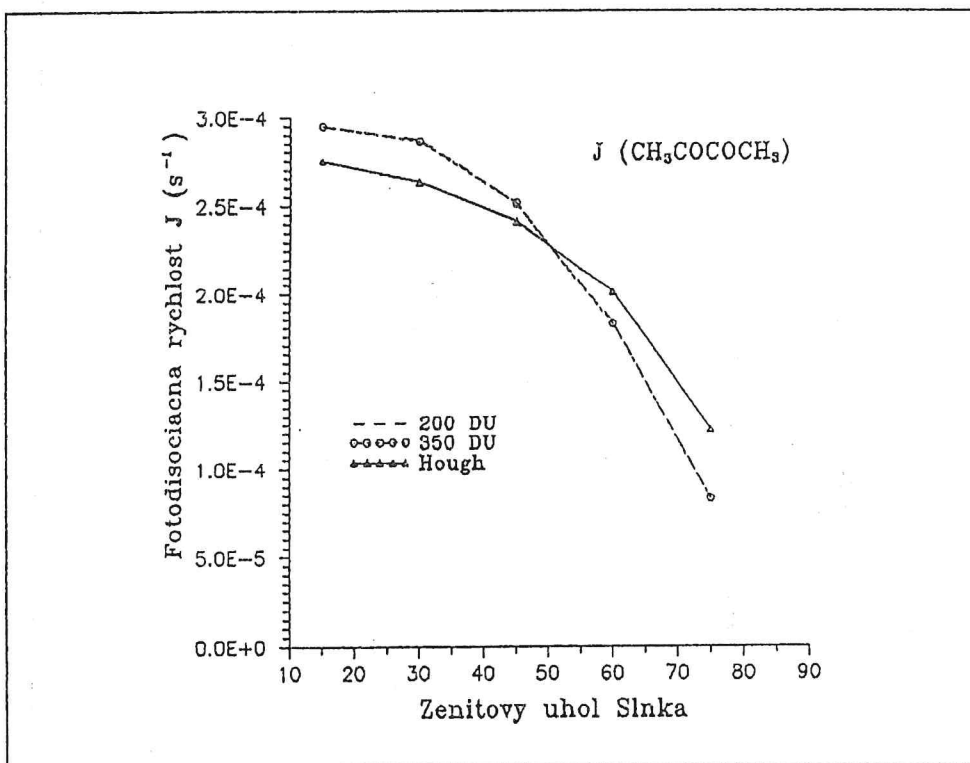
Obr. 14 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{CH}_3\text{CHO})$.



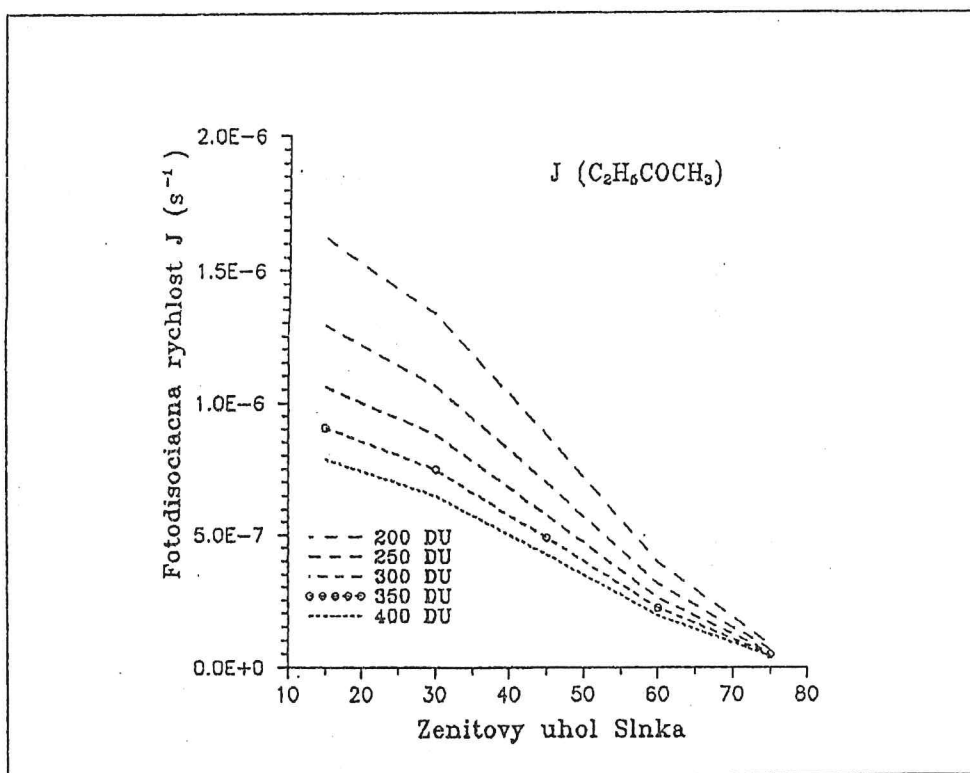
Obr. 15 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{HCOCHO})$.



Obr. 16 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{CH}_3\text{COCHO})$.



Obr. 17 Ako obrázok 3, ale pre $J(\text{CH}_3\text{COCOCH}_3)$.



Obr. 18 Závislosť fotodissociačnej rýchlosti $J(\text{C}_2\text{H}_6\text{COCH}_3)$ od zenitového uhla Slnka a celkového ozónu. Jasná obloha; 0,5 km nad povrchom s albedom 0,10.

5. ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV MODELOVÝCH VÝPOČTOV

Pomocou modelu chemizmu hraničnej vrstvy, vypracovanom v SHMÚ, sa realizovala séria výpočtov koncentrácií primárnych a sekundárnych atmosférických prímiesí, hlavne ozónu, pre rôzne vstupné emisné a meteorologické údaje. Základný variant vychádzal z emisií Slovenska v roku 1990, prepočítaných na jednotku plochy jeho územia.

Emisia	t.r ⁻¹	g.m ⁻² .r ⁻¹
SO ₂	542 000	10,8
NO	200 000	4,8
NO ₂	10 100	0,2
CO	461 000	9,2
CH ₄	362 000	7,2
NMHC	155 000	3,1

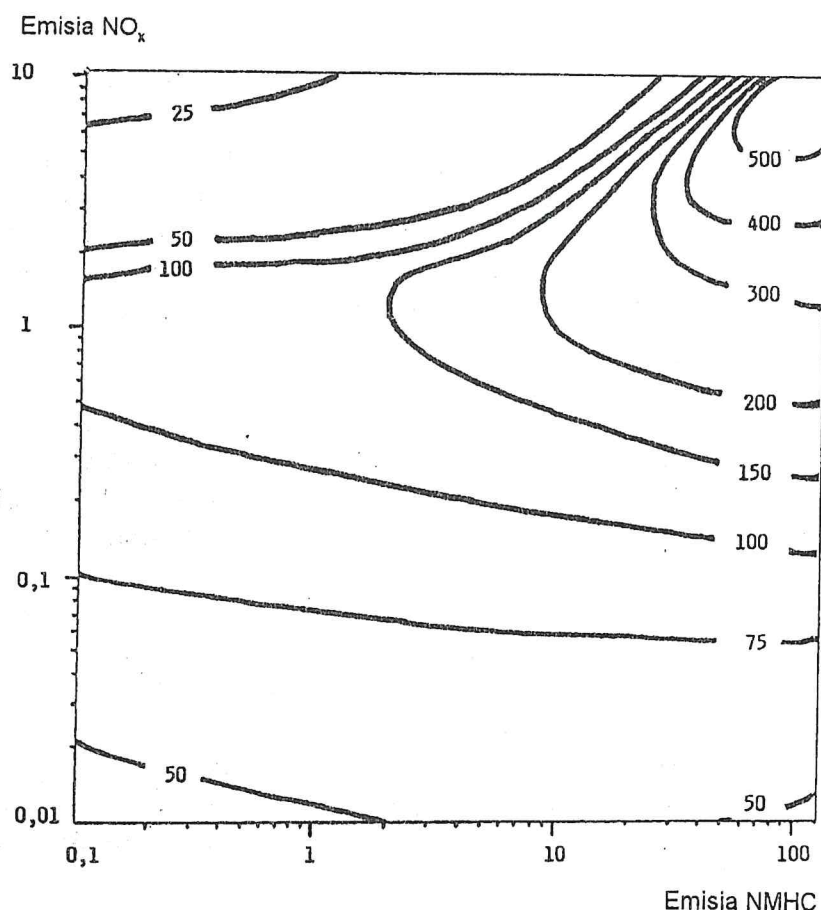
Disagregácia nemetánových uhľovodíkov (NMHC) sa zvolila rovnako ako v modeli EMEP, t.j. etán 7,5 %, etanol 12,1 %, n-bután 35,9 %, etén 3,2 %, propén 4,1 %, o-xylén 19,5 % atď. (všetko hmotnostné %). Emisie z lesov (izoprén a terpény) sa počítali podľa vzťahov (8), podľa momentálnej teploty. Teplota vzduchu sa menila variantne v rozmedzí 15-35°C, so sínusoidálnym denným chodom a s amplitúdou obvykle 10°C. Fotodisociačné rýchlosti sa počítali pre hladinu 500 m podľa vzťahov (17), (18) a údajov uvedených v tabuľke 3, vždy pre príslušnú hodnotu zenitového uhla. Predpokladal sa typický letný denný chod relatívnej vlhkosti vzduchu a hrúbky vrstvy premiešavania (500 -1 800 m). Počiatočné koncentrácie sa uvažovali na úrovni stredoeurópskeho pozadia (NO_x 5; SO₂ 3,5; CO 300; CH₄ 1 600; C₂H₆ 2; HNO₃ 0,4; PAN 0,35; nC₄H₁₀ 1; C₂H₄ 0,2; C₃H₆ 0,1; C₅H₈ 10; CH₂O 0,25; O₃ 40 atď., všetko v ppb). Koncentrácia O₃ vo voľnej troposfére sa pri výpočte maximálnych letných koncentrácií predpokladala 60 ppb. Numerická integrácia systému diferenciálnych rovníc sa vždy vykonávala pre časový interval 72 hodín s časovým krokom 15 minút. Hodnoty z tretieho dňa integrácie sa pokladali za reprezentatívne.

Na obrázku 19 sa nachádzajú izopléty maximálnych denných koncentrácií O₃, vypočítané podľa modelu SHMÚ pre rôzne úrovne emisií NO_x a NMHC. Úrovne emisií oxidov dusíka a prchavých uhľovodíkov, na obrázku označené hodnotou 1, zodpovedajú emisii týchto látok v Slovenskej republike v roku 1990, prepočítanej na 1 m² plochy (hodnoty sa nachádzajú vo vyššie uvedenej tabuľke). Pri tomto výpočte sa predpokladala hrúbka ozónovej vrstvy 350 DU, denný chod teploty vzduchu 23-33°C, jasný deň a deklinácia Slnka zodpovedajúca letnému slnovratu.

Obrázok 19 potvrdzuje všeobecne známu skutočnosť, že produkcia ozónu v zmesi oxidov dusíka a uhľovodíkov je zložitá nelineárna funkcia koncentrácií týchto prekursorov. Hodnoty koncentrácií ozónu v pravom hornom rohu obrázku zodpovedajú emisiám NO_x desaťkrát a NMHC stokrát vyšším, ako je súčasná slovenská emisia prepočítaná rovnomerne na plochu jeho územia. Koncentrácie O₃ vyššie ako 500 ppb (1 000 µg.m⁻³) sa doposiaľ pozorovali len v extrémnych epizódach fotochemického smogu v Los Angeles v 50. rokoch. Maximálne krátkodobé koncentrácie O₃ v strednej

Európe v extrémne teplom lete 1994 prekročovali hodnotu 100 ppb a v niekoľkých prípadoch 150 ppb (napr. v Bratislave dňa 28.7.1994 sa vyskytla krátkodobá koncentrácia 188 ppb). Najvyššie koncentrácie O_3 v tomto lete sa podľa očakávania pozorovali v oblasti s najvyššími emisiami NO_x a NMHC v Európe - Nemecku. Pre súčasnú slovenskú emisiu model predpovedá v horúcich letných dňoch maximálne krátkodobé (30 minútové) koncentrácie v intervale 100 -150 ppb, čo je v dobrom súhlase s meraniami.

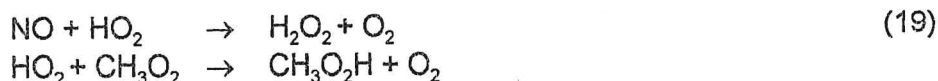
Podľa modelových výpočtov pri malých emisiách NO_x (emisie menšie ako 0,3 na obrázku 19) sú koncentrácie O_3 len málo závislé na emisiách NMHC. Rast emisií NO_x , pri nezmenenej emisii NMHC, vedie k rastu koncentrácií O_3 následkom rýchlejšej konverzie NO na NO_2 , a to oxidáciou RO_2 radikálmi. Pri vysokej úrovni NO_x však začne redukcia koncentrácií O_3 , nakoľko prevládne odstraňovanie OH a HO_2 radikálov ich reakciami s NO a NO_2 , čím sa zoslabí produkcia RO_2 radikálov (Simpson, 1992). Typický príklad sú nízke hodnoty O_3 na monitorovacích staniciach umiestnených na frekventovaných križovatkách, napr. na Trnavskom mýte v Bratislave.



Obr. 19 Izopléty maximálnych krátkodobých koncentrácií O_3 v ppb, vypočítané pomocou fotochemického modelu SHMÚ pre rôzne úrovne emisií oxidov dusíka a prchavých uhľovodíkov (NMHC) pre bezoblačnú oblohu, celkový ozón 350 DU a denný chod teploty v intervale 23 -33°C. Hodnota emisie 1 pre NO_x aj NMHC zodpovedá emisii Slovenskej republiky v roku 1990 rovnomerne rozloženej po celom jej území. (1 ppb O_3 = 2 $\mu g.m^{-3}$).

Z údajov na obrázku 19 vyplýva jeden závažný záver, ktorý potvrdzujú tiež výpočty EMEP (Simpson, Styve, 1992) aj skúsenosti z USA (Jacob et al., 1993), a to efekt 30 % redukcie emisií NO_x a antropogénnych prchavých organických látok sa v stredoeurópskych podmienkach prejaví len niekoľkopercentným (menej ako 10 %) znížením maximálnych a možno ukázať aj priemerných koncentrácií ozónu. Pri extrémne vysokých koncentráciách O_3 (nad 400 ppb, v Európe sa takéto koncentrácie zatiaľ nepozorovali) sa väčší efekt znižovanie O_3 dosiahne znižovaním emisií NMHC (túto cestu zvolila napr. Kalifornia v prvej fáze riešenia fotochemických smogov v Los Angeles). Naopak, pri znižovaní súčasných maximálnych koncentrácií O_3 v strednej Európe sa treba zamerať na obmedzovanie emisií NO_x . Modelové výpočty SHMÚ však ukazujú, že desaťnásobné zníženie emisií NO_x prinesie len asi 40 % redukcii maximálnych koncentrácií O_3 . Pri tejto úrovni emisií NO_x , ako vidno z obrázku 19, znižovanie emisií NMHC má na koncentrácie ozónu len malý vplyv. Uhlíkovodíky sú už v prebytku a celá produkcia O_3 je riadená oxidmi dusíka. Na tomto mieste je vhodné pripomenúť, že protokol o oxidoch dusíka, prijatý v rámci Dohovoru o diaľkovom znečisťovaní ovzdušia prechádzajúcom hranice štátov, požaduje do konca roku 1994 len zastaviť v Európe rast emisií NO_x . Druhý protokol o oxidoch dusíka sa zatiaľ len pripravuje. Zníženie emisií NO_x v Európe do roku 2000 o viac ako 30 % sa však zdá byť nereálne. Prítom návrat na preindustriálnu úroveň prízemných koncentrácií O_3 (priemerné 10 -15 ppb, maximálne do 50 ppb) si vyžaduje pravdepodobne viac ako päťdesiatnásobné zníženie súčasných emisií NO_x .

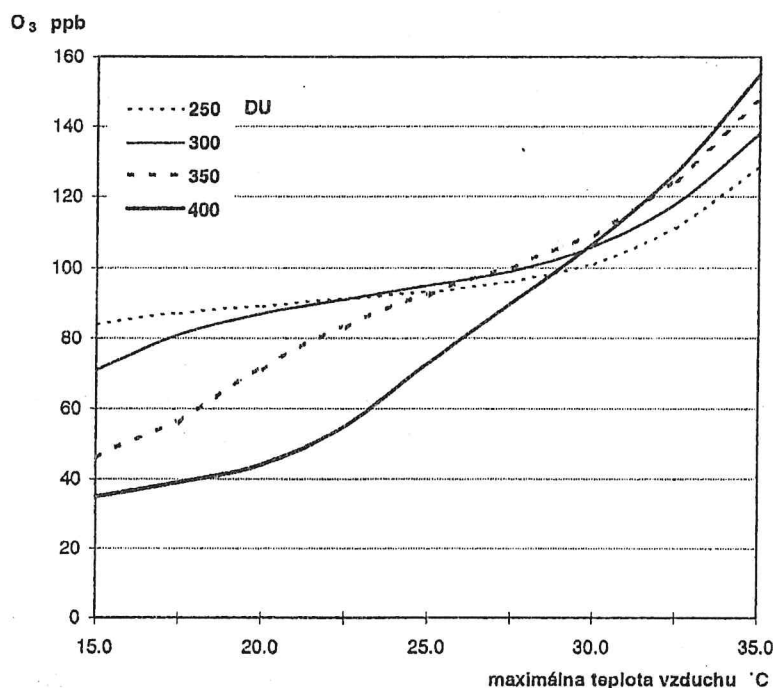
Z uvedených záverov by mohol vzniknúť dojem, že obmedzovanie emisií uhlíkovodíkov vlastne nemá zmysel. Nie je to pravda. Pri oxidácii uhlíkovodíkov vznikajú HO_2 a RO_2 radikály (R - je napr. metylová skupina). V prípade, že nie sú spotrebované na oxidáciu NO, zvyšuje sa produkcia peroxidov, najmä peroxidu vodíka a metylhydroperoxidu:



To znamená, že pokles koncentrácií O_3 dosiahnutý len redukcii emisií NO_x môže byť kompenzovaný (nakolko reakcie (19) sú druhého rádu) zvýšenou produkciou peroxidov, hlavne H_2O_2 . Peroxid vodíka je druhý najvýznamnejší oxidant a na organizmy má rovnaký účinok ako ozón. Sporadické merania H_2O_2 v Európe indikujú rýchly rast jeho koncentrácií (Závodský, 1992).

Uvedené závery vychádzajú z prvých modelových výpočtov chemizmu hraničnej vrstvy, vykonaných v SHMÚ. Doprevádza ich rad neistôt a neurčitostí. Majú skôr kvalitatívny charakter. Otázne je, nakolko chemický mechanizmus EMEP reprezentuje reálne pomery v hraničnej vrstve. Kritizovať možno použitú numerickú metódu, nedostatky emisnej inventarizácie uhlíkovodíkov, spôsob ich disagregácie, predpoklad rovnomerného rozloženia emisií na území štátu a rad ďalších predpokladov. V súlade s inými modelovými výpočtami sa však ukazuje možnosť akceptovať záver, že 30 % zníženie emisií NO_x a NMHC v Európe je nedostatočné, že prinesie len malé (menej ako 10 %) zníženie úrovne O_3 (maximálnych aj priemerných koncentrácií), ktoré, ako bude dokumentované ďalej, môže byť kompenzované vplyvom globálnych klimatických zmien.

Obrázok 20 znázorňuje závislosť maximálnych koncentrácií O_3 v hraničnej vrstve atmosféry na teplote vzduchu a hrúbke ozónovej vrstvy, vypočítanú podľa modelu SHMÚ pre emisie NO_x a NMHC Slovenska z roku 1990 (rovnomerne rozdelené po celom území republiky). Emisia izoprénu a terpénov sa priebežne počas integrácie počítala podľa momentálnej teploty vzduchu. Na osi x obrázku 20 sú vynesené maximálne denné teploty, pričom denná amplitúda sa počas integrácie predpokladala $10^\circ C$. Potrebne je pripomenúť, že ide o charakteristickú (priemernú) teplotu celej hraničnej vrstvy, ktorá v lete zodpovedá obvykle teplote vo výške 500-900 m nad povrchom. Táto teplota ani v teplých stagnujúcich letných anticyklónach nepresahuje v našich podmienkach $30^\circ C$. Výpočty sa robili pre jasný deň, typický letný denný chod relatívnej vlhkosti aj hrúbky vrstvy premiešavania a deklináciu Slnka blízko slnovratu.

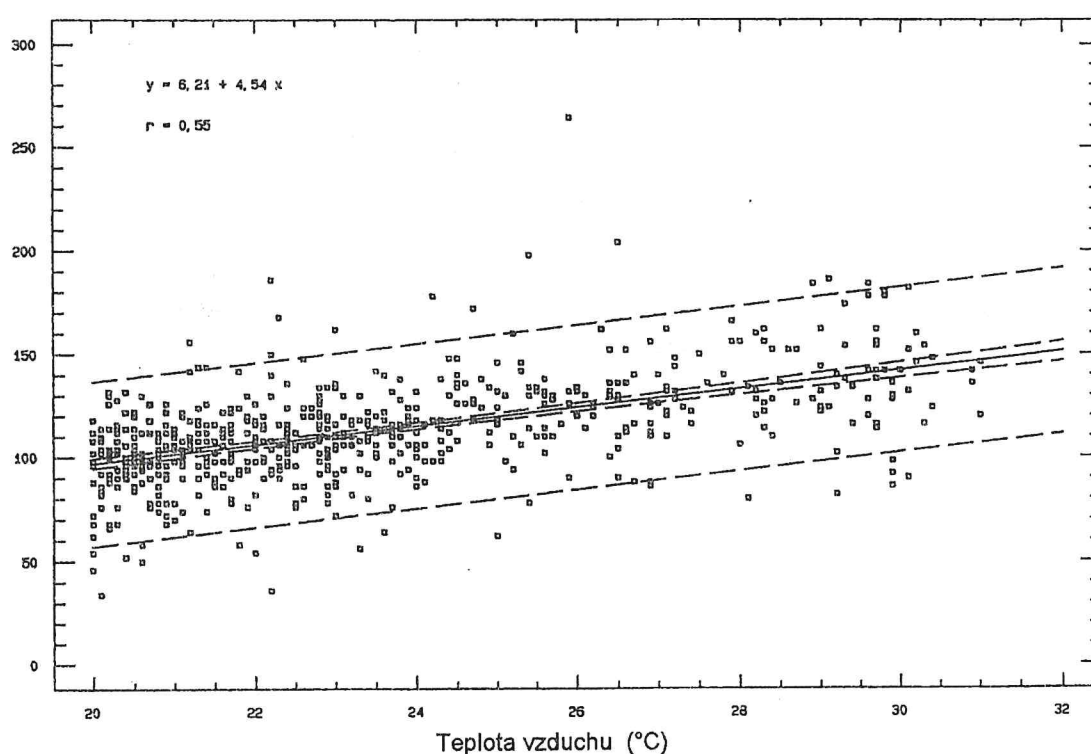


Obr. 20 Závislosť maximálnych koncentrácií ozónu od teploty vzduchu a hrúbky ozónovej vrstvy podľa modelových výpočtov SHMÚ pre emisie NO_x a NMHC Slovenska z roku 1990. Výpočty sa robili za predpokladu rovnomerného rozloženia emisií po celom území republiky, jasný deň, deklináciu Slnka blízko slnovratu a typický letný denný chod relatívnej vlhkosti vzduchu aj hrúbky vrstvy premiešavania. Na osi x sú vynesené maximálne denné teploty vzduchu, pričom sa amplitúda denného chodu uvažovala $10^\circ C$.

Obrázok 20 dokumentuje komplikovanú nelineárnu závislosť ozónu od teploty vzduchu a celkového ozónu. Podľa týchto výpočtov pri teplotách vzduchu nad $23^\circ C$ a celkový ozón menší ako 350 DU sú koncentrácie O_3 v hraničnej vrstve málo závislé od momentálnej hrúbky ozónovej vrstvy. Pri nižších teplotách prízemný ozón s poklesom celkového ozónu rastie, napr. pri $20^\circ C$ poklesu z 350 na 300 DU zodpovedá nárast prízemného ozónu o 16 ppb. Pri teplotách nad $30^\circ C$ (u nás sa prakticky nevyskytujú) sa charakter závislosti obracia (prevládnu termálne reakcie). Pri všetkých úrovniach

celkového ozónu koncentrácie prízemného ozónu sa zvyšujú s rastom teploty. So zoslabovaním ozonosféry sa však závislosť od teploty zoslabuje. Pre typickú letnú ozonosféru 350 DU v intervale maximálnych denných teplôt 20-30°C podľa modelu SHMÚ predstavuje nárast O_3 asi 3 ppb ($6 \mu g.m^{-3}$) na 1°C. Pre 300 DU je v uvedenom intervale teplôt tento nárast len 1,5 ppb na 1°C. Na obrázku 21 je znázornená závislosť krátkodobých (hodinových) koncentrácií prízemného ozónu od teploty vzduchu (nad 20°C) na stanici SHMÚ na meranie regionálneho znečistenia ovzdušia Stará Lesná (TANAP, 800 m nad morom) v roku 1992. Podľa týchto údajov prízemný ozón v Starej Lesnej v priemere rástol o $4,54 \mu g.m^{-3}$ na 1°C, čo je v dobrom súlade s modelovými výpočtami.

Hodinový priemer O_3 ($\mu g/m^3$)



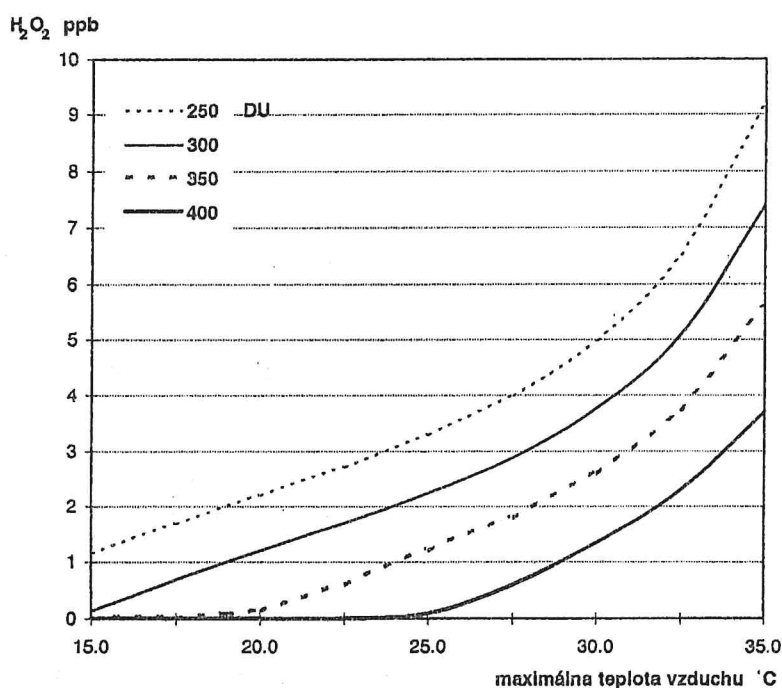
Obr. 21 Závislosť krátkodobých koncentrácií O_3 na teplote vzduchu (nad 20°C) na stanici na meranie regionálneho znečistenia ovzdušia Stará Lesná (800 m n.m.) v roku 1992.

Za predpokladu reálnosti modelových výpočtov globálnemu rastu teploty o 2°C a zoslabeniu ozonosféry o 10 % zodpovedá rast maximálnych letných koncentrácií O_3 asi 5-8 ppb ($10-16 \mu g.m^{-3}$). Rast teploty vzduchu a najmä zoslabovanie ozonosféry by sa malo významnejšie prejavíť pri teplotách pod 20°C a mohlo by viesť k rastu priemerných koncentrácií O_3 za vegetačné obdobie až okolo 30 % (pri nezmenených emisiách NO_x a NMHC). Podľa modelových výpočtov závislosť koncentrácií O_3 na teplote a hrúbke ozónovej vrstvy je relatívne citlivá na zmeny pomeru NMHC/ NO_x . Z tohoto dôvodu treba uvedené prognózy pokladať skutočne za veľmi predbežné.

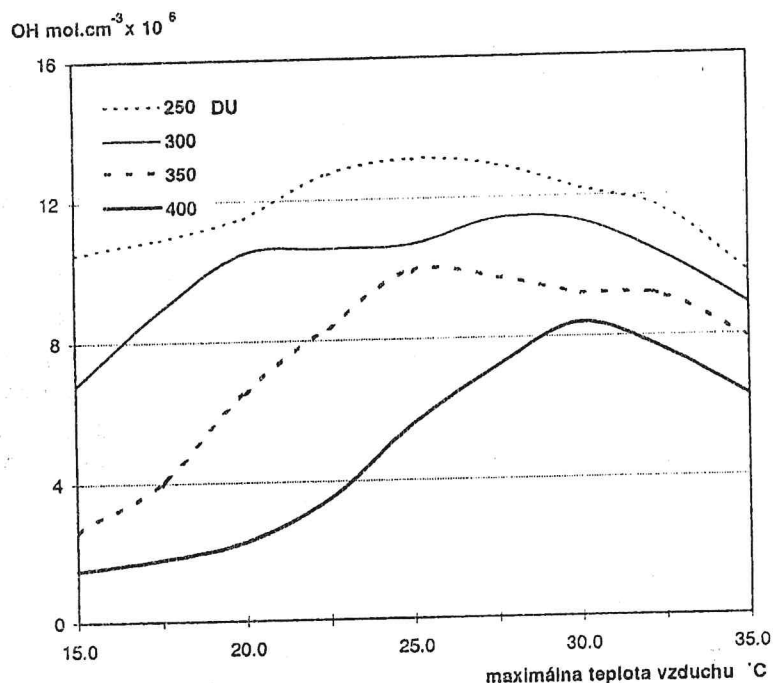
Rast produkcie O_3 v hraničnej vrstve so zvyšujúcou sa teplotou vzduchu súvisí s kinetikou termálnych reakcií chemického mechanizmu modelu a teplotnou dekompozíciou

PAN-u. Pri vyšších teplotách sa významnejšie uplatnia reakcie O_3 s radikálmi, alkénmi a najmä oxidmi dusíka, čím sa spomalí rast jeho koncentrácie. Zoslabovanie ozonoféry (rast UV slnečného žiarenia) intenzifikuje fotochemické reakcie a závislosť koncentrácií O_3 od teploty sa zoslabuje.

Na obrázku 22 je znázornená závislosť maximálnych koncentrácií druhého najvýznamnejšieho oxidantu - peroxidu vodíka od teploty vzduchu a hrúbky ozónovej vrstvy. Modelové výpočty sa robili za rovnakých predpokladov ako pri O_3 (obr. 20). Z obrázku vidno exponenciálny rast koncentrácií H_2O_2 s rastom teploty aj významnú závislosť od hrúbky ozónovej vrstvy. Tento nárast je typický pre regionálne znečistenia ovzdušia s relatívne nižšími koncentraciami NO_x oproti uhľovodíkom. Pri vysokých koncentraciách NO_x v mestách je produkcia H_2O_2 malá, nakoľko HO_2 radikál z oxidácie uhľovodíkov sa spotrebuje hlavne na oxidáciu NO a tak aj na produkciu O_3 . Peroxid vodíka je podobne ako ozón stresový faktor lesných ekosystémov. Rast jeho koncentrácií sa očakáva hlavne v prípade neúmerného znižovania emisií NO_x oproti uhľovodíkom, kedy dôjde k väčšej produkcii H_2O_2 na úkor O_3 a OH radikálu. Klimatické zmeny rast koncentrácií H_2O_2 ešte zosilnia. Meranie H_2O_2 sa zatiaľ pravidelne nevykonávajú. Úroveň koncentrácií v letnom období sa odhaduje na niekoľko ppb. Pri nesprávnej stratégii znižovania emisií NO_x a NMHC aj následkom klimatických zmien sa koncentrácie H_2O_2 v hraničnej vrstve v priebehu budúcich desaťročí môžu viac ako zdvojnásobiť a do určitej miery kompenzovať prípadný pokles ozónu.



Obr. 22 Závislosť maximálnych koncentrácií H_2O_2 na teplote vzduchu a hrúbke ozónovej vrstvy podľa modelových výpočtov SHMÚ za predpokladov uvedených v legende obrázku 20.



Obr. 23 Závislosť maximálnych koncentrácií OH radikálu na teplote vzduchu a hrúbke ozónovej vrstvy podľa modelových výpočtov SHMÚ za predpokladov uvedených v legende obrázku 21.

Obrázok 23 dokumentuje závislosť maximálnych koncentrácií OH radikálu od teploty vzduchu a hrubej ozónovej vrstvy, vypočítanú podľa modelu SHMÚ za rovnakých podmienok ako pri O_3 a H_2O_2 . "Čistiaci prostriedok atmosféry" - OH radikál, riadi homogénnu oxidáciu väčšiny atmosférických prímiesí (uhľovodíky, CO, SO_2 , NO_2 atď.). Vzhľadom na len niekoľko sekundovú dobu zotrvania v ovzduší je koncentrácia OH radikálu výsledkom momentálnej rovnováhy jeho produkcie a strát. Z obrázku 23 vidno nárast koncentrácií OH so zoslabovaním ozonosféry v celom rozsahu teplôt. Je to dôsledok rastu fotodisociácie O_3 rastúcim UV-B slnečným žiarením a tým zvýšenou produkciou OH. Koncentrácie OH radikálu, podobne ako pri O_3 a H_2O_2 , rastú so zvyšujúcou sa teplotou vzduchu. Pri teplotách okolo $30^\circ C$ sa charakter tejto závislosti mení, vzhľadom na exponenciálny nárast rýchlostí termálnych reakcií OH radikálu s atmosférickými prímiesami. Väčšia pozornosť problematike H_2O_2 a OH radikálu bude venovaná v nasledujúcich etapách riešenia subprojektu. Osobitne bude zhodnotený tiež význam emisií oxidu uhľnatého na produkciu ozónu a oxidantov.

6. DISKUSIA A ZÁVERY

Súčasná úroveň prízemných koncentrácií O_3 v stredných zemepisných šírkach severnej hemisféry dva až trikrát prevyšuje úroveň z druhej polovice minulého storočia (Bojkov, 1986). Bázové stanice GAW WMO za posledných dvadsať rokov vykazujú rastúci trend prízemného ozónu, napr. Mauna Loa (Havajské ostrovy, 3397 m n.m.) +0,37 %, Barrow (Aljaška) +0,67 % (Oltmaus-Levy, 1994). Naproti tomu Samoa (Južný

Pacifik) +0,03 % a Južný pól -0,68 % za rok. Bázové stanice sa vo väčšine prípadov nachádzajú v odľahlých polohách s veľmi nízkou úrovňou koncentrácií NO_x . In situ produkcia ozónu je zanedbateľná. Tieto stanice majú opačný denný a sezónny chod koncentrácií (maximá v noci a v zime). Opačný chod sa pozoruje aj na niektorých bázových staniciach blízkych miernemu pásnu severnej hemisféry (Barbados, Bermuda, Reykjavik). Na všetkých týchto staniciach denný a ročný chod koncentrácií určuje rýchlosť fotodisociácie O_3 . Pokles prízemného ozónu na Južnom póle je prvým priamym dôkazom vplyvu rastúceho UV-B slnečného žiarenia (ozónové diery) na rozklad ozónu. Pozitívny trend na väčšine bázových staníc sa vysvetľuje rastúcou produkciou O_3 vo voľnej troposfére severnej pologule a horizontálnym i vertikálnym prenosom ozónu. Na vysokohorských staniciach našej hemisféry, napr. Izaña na Kanárskych ostrovoch 2 360 m alebo Niwot Ridge v Colorade 3 000 m n.m., sa najvyššie koncentrácie pozorujú v mesiacoch apríl až jún.

Väčšie trendy ozónu sa zaznamenali v Európe a Severnej Amerike. Napr. v Arose vo Švajčiarsku sa koncentrácie O_3 oproti roku 1950 viac ako zdvojnásobili (Staehelin et al., 1994). Na území Slovenska sa za posledných 25 rokov pozoroval rast priemer-
ných koncentrácií asi o $1 \mu\text{g.m}^{-3}$ za rok (Warbmt, 1977; Závodský, Závodská, 1991, 1992). Zodpovedá to ročnému rastu koncentrácií asi 2 %. V hraničnej vrstve celého mierneho pásma už prevláda antropogénna produkcia ozónu, maximá v dennom chode sa vyskytujú v odpoľudňajších hodinách a maximum ročného chodu sa presúva až na letné mesiace. Rast koncentrácií je dôsledkom rastu emisií fotochemických prekursorov ozónu (NO_x , uhľovodíky, CO). Žiaľ, inventarizácie emisií týchto látok sú v súčasnosti vypracované s nedostatočnou presnosťou, takže porovnanie trendov zatiaľ nie je možné.

Stredná doba zotrvania O_3 v spodnej troposfére je niekoľko dní a jeho prekursorov (s výnimkou CH_4) niekoľko hodín až 3 mesiace. Z tohoto pohľadu in situ produkciu ozónu v hraničnej vrstve atmosféry nad priemyselnými kontinentami treba chápať regionálne. Oblasti vysokých koncentrácií ozónu v teplých letných anticyklónach (napr. epizódy fotochemického smogu v strednej Európe v roku 1994) môžu mať horizontálne rozmery niekoľko tisíc kilometrov. Modelové výpočty (Jacob et al., 1993) ukázali, že 70 % ozónu vyprodukovaného v hraničnej vrstve nad USA je exportované mimo ich územia, hlavne východným smerom a ovplyvňuje troposférickú úroveň O_3 v hemisférickom meradle. Budúci vývoj úrovne oxidantov v stredoeurópskom regióne bude závisieť od vývoja celoeurópskych emisií prekursorov ozónu, hlavne oxidov dusíka a antropogénnych nemetánových uhľovodíkov a od trendu O_3 vo voľnej troposfére celého mierneho pásma. Samotnú produkciu ozónu budú intenzifikovať: globálne otepľovanie, rast ultrafialového slnečného žiarenia následkom zoslabovania ozonosféry, zmeny oblačnosti a absolútnej vlhkosti vzduchu.

Výpočty pomocou modelu chemizmu hraničnej vrstvy SHMÚ umožňujú urobiť nasledujúce predbežné závery:

1. Redukcia emisií oxidov dusíka a uhľovodíkov v Európe o 30 % bude mať relatívne malý efekt na úroveň koncentrácií prízemného ozónu v strednej Európe. Maximálne koncentrácie sa znížia len o niekoľko percent (do 10 %).

2. Pri existujúcej regionálnej úrovni koncentrácií oxidov dusíka má obmedzovanie emisií nemetánových uhľovodíkov len veľmi malý vplyv na koncentrácie O_3 . Zníženie produkcie O_3 sa dá dosiahnuť len znížením emisií oxidov dusíka. Desaťnásobné zníženie emisií NO_x však prinesie len asi 40 % zníženie maximálnych koncentrácií O_3 .
3. Návrat na preindustriálne hodnoty prízemného ozónu si vyžaduje viac ako päťdesiatnásobnú redukciu dnešných emisií NO_x , čo je zatiaľ ekonomicky nemysliteľné.
4. Jednostranné znižovanie emisií NO_x pri zachovaní, prípadne zvyšovaní emisií uhľovodíkov, by viedlo k rastu koncentrácií peroxidov, najmä H_2O_2 , ktorých negatívny účinok na vegetáciu je podobný ako pri ozóne.
5. Strategickým cieľom v Európe by mala byť minimálne 50 % redukcia emisií NO_x a uhľovodíkov.
6. Závery 1 až 5 sú v súlade s modelovými prognózami EMEP aj US NOAA a nezohľadňujú zmeny klímy.
7. Produkcia ozónu aj peroxidov v hraničnej vrstve podporuje rast teploty vzduchu aj ultrafialového slnečného žiarenia. Závislosť od teploty sa so zoslabovaním ozonosféry znižuje.
8. Pre typickú letnú hrúbku ozonosféry 350 DU, v rozpätí maximálnych denných teplôt hraničnej vrstvy 20-30°C, rastie maximálna koncentrácia O_3 asi o $6 \mu g \cdot m^{-3}$ na 1°C. Pri 300 DU je tento nárast len asi $4 \mu g \cdot m^{-3}$.
9. Pri maximálnej teplote hraničnej vrstvy (nie prízemnej teplote) nad 23°C sa stráca závislosť koncentrácií O_3 od hrúbky ozónovej vrstvy. Pri nižších teplotách prízemný ozón s poklesom celkového ozónu rastie, napr. pri 20°C poklesu z 350 na 300 DU zodpovedá nárast prízemného ozónu asi o $30 \mu g \cdot m^{-3}$.
10. Za predpokladov rastu teploty vzduchu v priemere o 2°C a zoslabenia ozonosféry o 10 % možno očakávať nárast maximálnych koncentrácií O_3 v rozmedzí 10-16 $\mu g \cdot m^{-3}$. Vzhľadom na väčšiu citlivosť čistej produkcie O_3 na zmene teploty pri nižších teplotách možno predpokladať väčší nárast priemerných koncentrácií (o 30 %).
11. Kvantitatívne odhady zmien koncentrácií ozónu v bodoch 8 až 10 boli urobené pre emisie NO_x a uhľovodíkov Slovenska z roku 1990, pre bezoblačnú oblohu a typický letný denný chod meteorologických parametrov.
12. Redukcia emisií prekursorov O_3 v Európe do roku 2000 pravdepodobne nedosiahne 30 %. Z titulu globálnych klimatických zmien, úbytku oblačnosti a pravdepodobného rastu ozónu vo voľnej troposfére mierneho pásma treba naďalej počítať s rastom priemernej úrovne koncentrácií O_3 asi o 0,5 % ročne a výskytom letných epizód fotochemického smogu s krátkodobými koncentraciami O_3 nad $200 \mu g \cdot m^{-3}$, výnimočne aj $300 \mu g \cdot m^{-3}$. Vývoj po roku 2000 bude závisieť od vývoja emisií prekursorov aj trendov globálnych zmien klímy.

LITERATÚRA

- Bilčík, D. - Závodská, E. - Závodský, D.:** Recalculation of EMEP photolysis rates as a function of total ozone using LOWTRAN 7 code. *Időjárás*, v tlači.
- Bojkov, R.D.:** Surface ozone during the second half of the nineteenth century. *Climat. Appl. Meteorol.* 25, 1986, 343-352.
- Derwent, R.G.:** Evaluation of the chemical mechanism employed in the EMEP photochemical oxidant model. *Atm. Environ.* 27A, 1993, 2, 277-279.
- Ellingson, R.G. - Ellis, J. - Fels, S.:** The intercomparison of radiation codes used in climate models: Long-wave results. *J. Geophys. Res.* 96, 1991, 8929-8953.
- Hesstvedt, E. - Hov, O. - Issaksen, I.S.A.:** Quasi-steady state approximation in air pollution modelling. *Int. J. Chem. Kinet.* 1978, 10, 971-994.
- Hough, A.M.:** The calculation of photolysis rates for use in global tropospheric modelling studies. Harwell Laboratory. Report AERE R 13259, 1988.
- Iversen, T. (Editor):** Comparison of three models for long term photochemical oxidants in Europe. EMEP MSC-W, Report 3/91, Oslo 1991, 156 s.
- Jacob, D.J. - Logan, J.A. - Gardner, G.M. - Wofsy, S. - Sillman, S. - Prather, M.:** Factors regulating ozone over the U.S. and its export to the global atmosphere. *J. Geophys. Res.* 98, 1993, D8, 14817-14826.
- Lubkert, B. - Schopp, W.:** A model to calculate natural VOC emissions from forests in Europe. IIASA WP 89-082, Laxenburg 1989, 55 s.
- Lin, X. - Tainer, M. - Liu, S.C.:** On the nonlinearity of the tropospheric ozone production. *J. Geophys. Res.* 93, 1988, 15879-15888.
- Madronich, S.:** Photodissociation in the atmosphere. 1. Actinic flux and the effects of ground reflexion and clouds. *J. Geophys. Res.* 92, 1987, 9740-9752.
- ONCORE:** Personal Computer Version of the LOWTRAN 7 Atmospheric Model, Version 2a. Ontar Corporation 1991.
- Oltmans, S.J. - Lee, H.:** Surface ozone measurements from a global network. *Atm. Environ.* 28, 1994, 1, 9-24.
- Ruggaber, A. - Forkel, R. - Dlugi, R.:** Spectral actinic flux and its ratio to spectral irradiance by radiation transfer calculation. *J. Geophys. Res.* 98, 1993, 1151-1162.
- Simpson, D. - Hov, O.:** Long period modelling of photochemical oxidants in Europe. EMEP MSC-W, Note 2/90, Oslo 1990, 78 s.
- Simpson, D.:** Long period modelling of photochemical oxidants Europe. EMEP MSC-W, Note 1/92, Oslo 1992, 45 s.

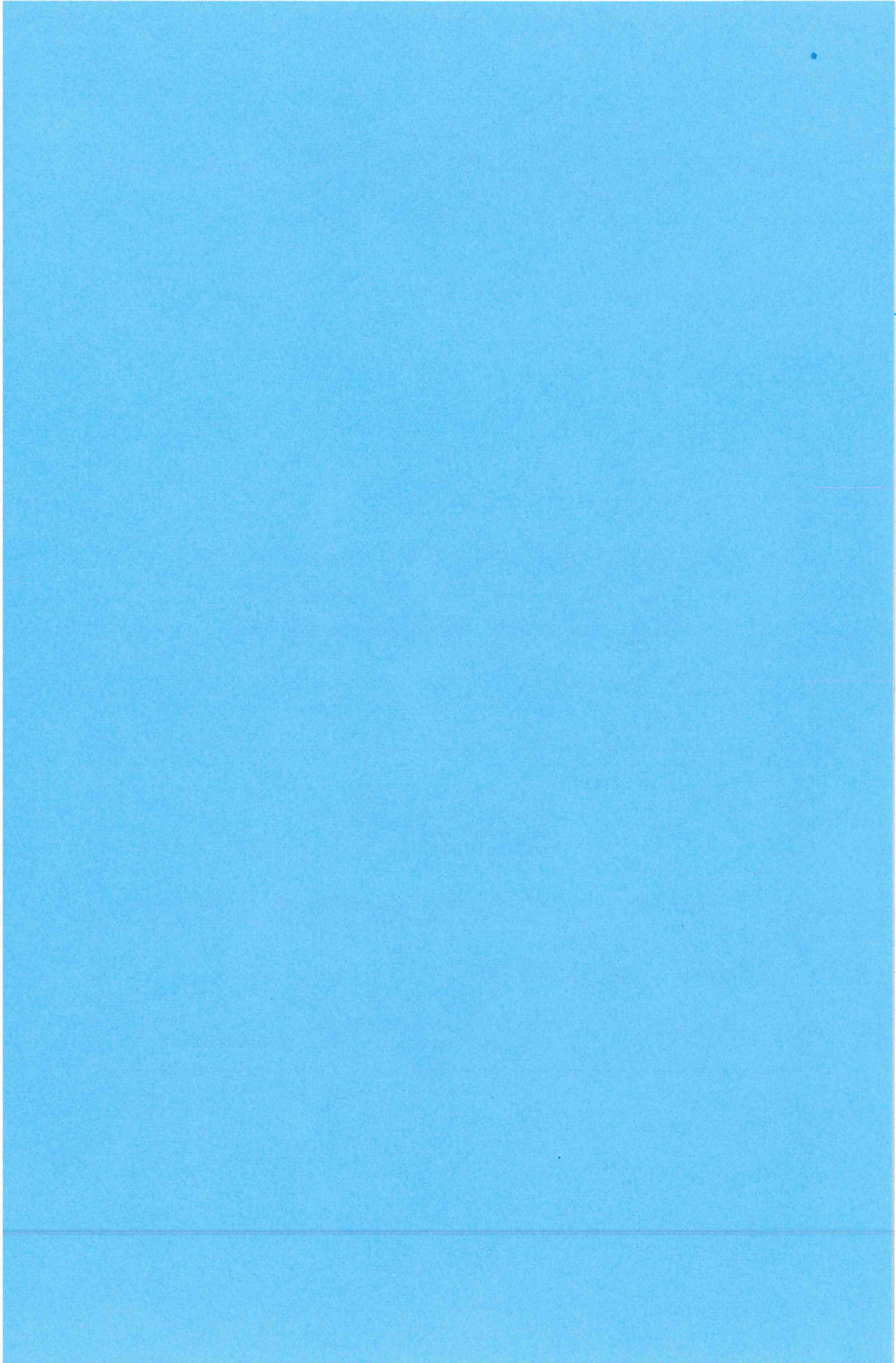
- Simpson, D.:** Long period modelling of photochemical oxidants in Europe. *Atm. Environ.* 26A, 1992, 4, 1609-1634.
- Simpson, D. - Styve, H.:** The effects of the VOC protocol on ozone concentrations in Europe. EMEP MSC-W, Note 4/92, Oslo 1992, 24 s.
- Simpson, D.:** Photochemical model calculations over Europe for two extended summer periods: 1985 and 1989. *Atm. Environ.* 27A, 1993, 921-943.
- Solberg, S. - Dye, C. - Schmidbauer, N.:** VOC measurements 1993. EMEP CCC, Report 3/94, Kjeller 1994, 117 s.
- Staehelin, J. - Thudinn, J. - Volz, A. - Graber, W.:** Trends in surface ozone concentrations at Arosa. *Atm. Environ.* 28, 1994, 1, 75-87.
- Thompson, A.M. - Stewart, R.W.:** Effect of chemical kinetics uncertainties on calculated constituents in a tropospheric photochemical model. *J. Geophys. Res.* 96, 1991, D7, 13089-13108.
- Thompson, A.M.:** The oxidizing capacity of the Earth's atmosphere: Probable past and future changes. *Science* 256, 1992, 1157-1165.
- Warmbt, W.:** Ergebnisse langjähriger Messungen des bodennahen Ozons in der DDR. *Zeitschrift für Meteorologie* 29, 1979, 24-31.
- Závodská, E. - Závodský, D.:** Atmosférický ozón. Bratislava, Štúdia SBKS IX, 1991, 89 s.
- Závodská, E. et al.:** Prízemný ozón na území Slovenska. Správa za subprojekt 4/2. In: Zabezpečenie medzinárodných záväzkov SR, Bratislava, SHMÚ 1993, 116 s.
- Závodský, D.:** Peroxidy vodíka v atmosfére. *Ochrana ovzduší* 6, 1992, 38-40.
- Závodský, D. - Závodská, E.:** Kvalita ovzdušia a zmeny klímy. In: Národný klimatický program ČSFR č. 7, Praha, ČHMÚ 1992, 4-50.
- Závodský, D. - Pukančíková, K.:** Mathematical modelling of the boundary layer chemistry. *Acta Meteorologica Universitatis Comenianae* 22, 1993, 1-20.
- Závodský, D. - Závodská, E.:** Vplyv globálnych klimatických zmien na chemizmus troposféry. *Meteorologické zprávy* 46, 1993, 4, 106-110.

**NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM
SLOVENSKEJ REPUBLIKY**

**NATIONAL CLIMATE PROGRAMME
OF THE SLOVAK REPUBLIC**

PREDPOKLADANÉ DÔSLEDKY KLIMATICKÝCH ZMIEN NA LESNÉ EKOSYSTÉMY

Riešitelia:	RNDr. Ing. Jozef Mindáš, Lesnícky výskumný ústav, Zvolen Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc. Lesnícka fakulta Technickej univerzity, Zvolen
Projekt:	MŽP SR Výskum zmien kvality ovzdušia, klimatické zmeny a narušovanie ochranných vlastností atmosféry - NKP SR
Zadávatel':	MŽP SR
Lektor:	Doc. RNDr. Dušan Závodský, CSc., Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava



Possible impacts of climate change on forest ecosystems (Summary)

Jozef MINĐÁŠ - Jaroslav ŠKVARENINA

Forest Research Institute Zvolen, Forest Technical University Zvolen, Slovakia

In the paper the most important expected changes in the forest ecosystems of Slovakia are discussed. The starting situation, which determines adaptability of Slovak forests to the expected changes, can be described as follows:

- present species composition does not correspond fully with their climate demands (changed upper forest limit, artificial planting of Norway spruce in lower locations, dominance of monotree species stable slightly)
- existence of large areas of forest stands affected by imissions (mountain coniferous forests especially)
- present uniform genotype and ecotype composition of the part of our stands.

Issuing from the state and regional scenarios in the evolution of climate (temperature, precipitation) as well as from concentrations of some gases in the atmosphere (greenhouse gases, photooxidants, etc.), an analysis of possible impacts of global changes upon the forests of Slovakia has been executed from the following aspects:

- changes in species composition
- physiological aspects, changes in bioproduction
- forest soils
- injurious agents
- forest as a source and sink of greenhouse gases

Based on our own analyses and knowledge from literature we came to the following conclusions:

- European fir and Norway spruce will be probably the most disposable tree species towards the endangerment by climate changes (in lower occurrence limit and outside of their natural range; favourable climate potential in upper limit will be limited by sensibility to imision activity)
- by unimproving vitality of mountain Norway spruce forests certain expansion of beech into upper locations can be expected
- expected intensity and a time scope of climate changes will cause such changes in forest ecosystems which they will not be able to control autoregulatorly
- very unfavourable changes of soil moisture will be in lower locations what will lead to physiological weakness of oaks and locally (carbonates) to considerable coming of xerophytes and forest steppe communities
- it is expected a possible increase of production in range of 10-30 % in dependence on vitality and existence of stable and able stands productionally
- it is expected dynamization of nutrients circulation especially in upper altitudes from 6th forest altitudinal zone where production optimum of our forests will be probably shifted
- change of biotic and abiotic injurious agents is unknown, especially for insects very flexible adaptation to changing environmental conditions can be presumed

Considering these serious risks it is necessary the elaboration and practicable realization of measures to minimize negative impacts of global changes. In a short time it would be necessary to realize the following measures:

- acceleration of change of Norway spruce monocultures to mixed stands of pine, oaks, beech and the other broad leafed species
- to preserve biodiversity of forest communities extensively in forest management
- preparation of genetic material for the artificial regeneration to changed climate conditions
- revaluation of the system in planning materials for formation of forest management plans for the conditions of expected climate change
- to estimate the possibilities to increase carbon dioxide fixation by enlargement of forested areas of soils unused in agriculture

1. ÚVOD

Súčasný stav európskych lesov je výsledkom dlhodobého pôsobenia prírodných faktorov a od neolitu aj stupňujúcej sa antropogénnej aktivity. Najmä v druhej polovici dvadsiateho storočia sa stáva vplyv ľudských aktivít (antropogénne podmienené emisie toxických a radiačne aktívnych plynov a aerosólov) určujúcim faktorom vo vývoji zdravotného stavu lesov nielen v industriálnych oblastiach, ale stáva sa problémom regionálnym až globálnym. Na pozadí kalamitného imisne podmieneného poškodzovania lesov na rozsiahlych plochách Európy a Severnej Ameriky sa začína vynárať dnes snád' už globálny problém číslo jeden - globálne zmeny klímy a narušovanie ochranných vlastností atmosféry. Hrozba zmeny klímy sa považuje za vôbec najzávažnejšie ohrozenie životného prostredia z pohľadu "trvale udržateľného rozvoja" ľudskej civilizácie a celej biosféry na tejto planéte.

Lesy ako dôležitá súčasť biosféry budú veľmi senzitívne reagovať na zmeny klímy nakoľko intenzita týchto zmien bude s veľkou pravdepodobnosťou mnohonásobne prevyšovať zmeny klímy z poslednej doby poľadovej. Charakter týchto zmien však bude odlišný od postglaciálneho vývoja rastlinných spoločenstiev, a to z týchto dôvodov: zmeny klímy budú také rýchle, že lesné ekosystémy nebudú schopné sa na tieto zmenené podmienky adaptovať (v zmysle prirodzených sukcesných procesov); ide o zmeny vyvolané činnosťou človeka s možnosťou aktívneho ovplyvnenia ich následkov a príčin človekom.

Súčasný lesný hospodárstvo tak stojí pred mimoriadne náročnou úlohou zabezpečenia trvale udržateľného rozvoja lesného hospodárstva v podmienkach pretrvávajúceho imisného stresu a pod hrozbou globálnych klimatických zmien. Vzhľadom na skutočnosť, že očakávané zmeny prebehnú počas jednej generácie lesa sa stáva prijatie účinných opatrení znižujúcich negatívne dôsledky týchto zmien vysoko aktuálnou už v súčasnosti. Nesmieme dopustiť situáciu nedávnych rokov, kedy došlo k podceneniu varovných signálov imisného poškodzovania lesov a prijímaniu neadekvátnych opatrení. Už dnes na základe podrobnej analýzy súčasného stavu a poznatkov je naliehavá potreba vypracovať kvalitné adaptačné opatrenia na minimalizáciu negatívnych dôsledkov a rizík a začať s ich urýchlenu aplikáciou v praxi na jednotlivých organizačných úrovniach lesného hospodárstva.

2. VÝCHODISKOVÁ SITUÁCIA

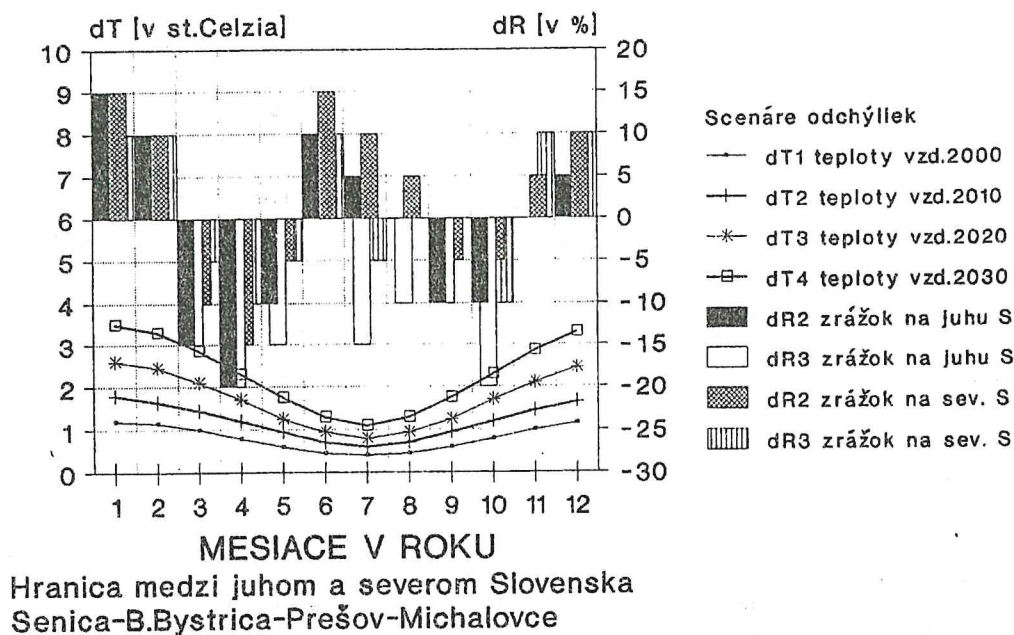
Prv ako pristúpime k analýze možných zmien lesných ekosystémov pod vplyvom globálnych zmien atmosféry, musíme vedieť v akom východiskovom stave sa v súčasnosti naše lesy nachádzajú, nakoľko tento do značnej miery determinuje adaptačnú schopnosť lesných spoločenstiev na očakávané zmeny. Ďalej je dôležité aspoň rámcové poznanie charakteru, veľkosti a časového rámca očakávaných zmien, z ktorých je potrebné pri úvahách o možných dôsledkoch klimatických zmien vychádzať. V zásade ide teda o poznanie týchto problémov:

- očakávané klimatické zmeny
- zmeny chemizmu atmosféry
- súčasný stav lesov - zdravotný stav a ekologická stabilita
 - druhová a veková štruktúra
 - systém obhospodarovania

2.1 Očakávané klimatické zmeny

Pre naše územie scenár zmien predpokladá, že v januári by sa v priemere zvýšila teplota vzduchu o 1.2 až 4.6 °C a v júli o 0.4 až 1.4 °C. Očakáva sa tiež zníženie relatívnej vlhkosti vzduchu, rast potenciálnej evapotranspirácie a znížovanie pôdnej vlhkosti, hlavne na nížinách. Tu sa prognózuje aj výrazný pokles počtu dní so snehovou pokrývkou, ako aj jej výšky (LAPIN 1992, 1993). Možné sú aj zmeny v ročnom chode zrážok, predpokladá sa aj väčšia variabilita a extrémnosť počasia. Podrobnejší scenár zmien teploty vzduchu a zrážok pre naše územie podáva obr. 1.

Predbežné scenáre zmien T a R od doterajších dlhodobých priemerov z obdobia 1951-80, resp. 1901-80 na Slovensku



Obr. 1. Predbežné scenáre zmien teploty vzduchu (dT) a zrážok (dR) od doterajších dlhodobých priemerov z obdobia 1951-80, resp. 1901-80 na Slovensku
Preliminary scenarios of changes of air temperature (dT) and precipitation (dR) from the normals of the period 1951-1980 and 1901-1980, resp., for Slovakia (LAPIN et al. 1993)

2.2 Zmeny chemizmu atmosféry

Atmosféra Zeme je charakterizovaná svojím chemickým i fyzikálnym stavom. Doterajší rozvoj ľudskej civilizácie vedie k jeho vážnemu narušovaniu. Na prahu tretieho tisícročia preto stojíme pred problémami globálnych zmien klímy, redukciou stratosférickej ozónovej vrstvy, ako aj pred problémami tzv. imisií majúcich svoj pôvod hlavne v spaľovacích procesoch.

Predpokladá sa, že súčasné poškodzovanie lesov na rozsiahlych plochách je, a s najväčšou pravdepodobnosťou aj naďalej bude, podmienené predovšetkým antropogénnym znečisťovaním atmosféry. Tento fenomén prešiel vo vedeckých kruhoch v posledných desiatich rokoch intenzívnym bádáním. Došlo sa k názoru, že nemôžeme očakávať jednoduchý kauzálny reťazec: príčina (imisia) - následok (symptóm poškodenia). Predpokladá sa, že súčasný stav lesa je determinovaný komplexom týchto hlavných príčin: imisná záťaž, narušenie fyziologických procesov (poruchy v zásobovaní živinami a vodou, patogény), stav atmosféry, pričom celkový pokles vitality lesných ekosystémov je podmienený ich vzájomnou interakciou.

Skleníkové plyny

Pod pojmom skleníkové plyny rozumieme skupinu atmosférických plynov s väzbou na ovplyvňovanie radiačnej bilancie atmosféry a zemského povrchu (radiačne aktívne plyny). Základná charakteristika vybraných skleníkových plynov je uvedená v tabuľke 1.

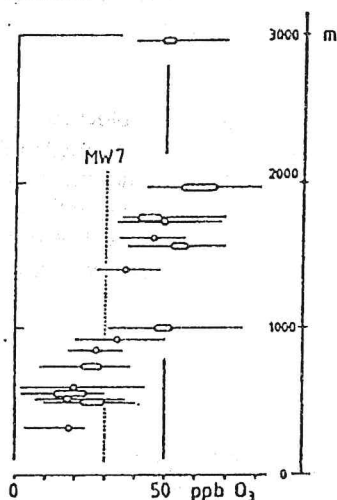
Tab.1. Charakteristika najdôležitejších radiačne aktívnych plynov vo vzťahu k antropogénnym emisiám
Characteristic of the most important greenhouse gases in relation with anthropogenic emissions
(MOLDAN et al. 1993)

Skleníkové plyny	CO ₂	CH ₄	CFC-11	CFC-12	N ₂ O
Koncentrácia	ppmv	ppmv	pptv	pptv	ppbv
-predindustriálna	280	0.79	0	0	280
-súčasná	353	1.72	280	484	310
Radiačná účinnosť na molekulu CO ₂	1	11	3400	7100	270
Doba zotrvania v atmosfére-roky	120	10.5	55	116	132
Príspevok v % k radiačným účinkom 1980 - 1990	55	15	24 CFCs spolu		6
Ročný prírastok %	0.5	0.6	4		0.25

Ak odhliadneme od nepriamych vplyvov týchto plynov prostredníctvom klimatických zmien na lesné ekosystémy, tak najdôležitejším plynom z pohľadu lesných spoločenstiev je oxid uhličitý ako primárny vstup pre tvorbu organickej hmoty v procese fotosyntézy, ktorého nárast koncentrácie môže mať kľúčový význam v produkčnom procese tvorby organickej hmoty.

Fotooxidanty

Slovensko patrí podľa ZÁVODSKÉHO a ZÁVODSKEJ (1992) do oblastí s najvyššou úrovňou ozónu v Európe. Pre relatívne málo znečistené oblasti Európy sa uvádzajú hodnoty 20 - 40 ppb (BAUMBACH et al. 1990). BUCHER (1986) publikoval pre horské polohy Nemecka hodnoty : ročný priemer 30-80 ppb, letný priemer 40-88 ppb s maximálnymi hodinovými priemerami 175 ppb. SMIDT et al. (1990) syntetizovali viacročné poznatky z výškových profilov meraní O₃ v alpskej oblasti (obr.2). Najvyššie hodnoty z pohľadu vertikálneho rozšírenia lesov sú práve v oblasti horského lesa a jeho hornej hranice.



Obr.2. Závislosť priemerných ročných a mesačných koncentrácií O₃ od nadmorskej výšky, (MW 7: hraničná hodnota pre rastlinstvo podľa WHO) v alpskej oblasti

Dependence of the yearly and monthly averaged ozone concentrations on altitude (MW 7: critical level for plants by WHO) in the Alps (SMIDT et al. 1990)

SLADKOVIC (1991) uvádza pre Bavorské Alpy ročný vzostup troposférického ozónu v priemere 2.5 ppb. V nadväznosti na rast NO_x a organických uhlíkovodíkov (automobilová doprava) sa očakáva nárast O₃ o 0.5 %, resp. 1 % ročne (GRASSL 1987). Posledné odhady trendového nárastu koncentrácií troposférického ozónu hovoria zhruba o 20 % zvýšení do roku 2035 (pri takmer nezmenených emisiách uhlíkovodíkov a bez vplyvu klimatických zmien (ZÁVODSKÁ 1993)).

Peroxyacetylitrát (PAN) patrí do skupiny látok, ktorých produkcia je podmienená fotochemickými reakciami (GRABER 1991). Ako uvádzajú ZÁVODSKÝ a ZÁVODSKÁ (1992) $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{NO}_2$ (PAN) vzniká sekundárne v ovzduší bohatom na uhlíkovodíky a oxidy dusíka. Podľa meraní GEHRIGA a WUNDERLIHO (1991) jestvuje dobrá spojitosť v priebehu maximálnych denných koncentrácií PAN a O_3 , avšak len počas teplých ročných období. Pri nízkych teplotách sú koncentrácie PANu na rozdiel od ozónu stabilné.

Peroxid vodíka (H_2O_2) sa v atmosfére tvorí v plynnej fáze i v kvapkách oblakov a zrážok (ZÁVODSKÝ 1992). Ako dominantný oxidant SO_2 vo vode oblakov a zrážok, sa podieľa na generovaní kyslosti zrážok. Tento efekt je zosilnený v horskej oblačnosti s ohľadom na dodatkový prísun škodliviny i oxidantu svaluovými vetrami (ZÁVODSKÝ a ZÁVODSKÁ 1992). Zatiaľ je len málo údajov o koncentráciách v Európe, napr. MASUCH et al. (1985) uvádzajú pre zrážky z hmly a nízkej oblačnosti hodnoty H_2O_2 0.1 - 5 ppm.

Kyslá atmosférická depozícia škodlivín a poškodenie lesov

Z "tradičných" plyných škodlivín bude s najväčšou pravdepodobnosťou narastať význam NO_x , menej SO_2 . Pozornosť sa zrejme bude upierať aj na preskúmanie vplyvov aldehydov, ako aj uhlíkovodíkov (halogenizovaných, alifatických, aromatických), karbonylových zlúčenín, fenolov a pod. Z hľadiska lesných spoločenstiev produkčných oblastí bude mať pravdepodobne najväčší význam mokrá depozícia.

Mokrá depozícia, všeobecne označovaná ako kyslé zrážky, je tiež považovaná za vážny zdroj pôsobiaci na lesné ekosystémy a je pomerne dobre preštudovaná. Prítomnosť aniónov silných minerálnych kyselín (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) je všeobecne známa. Pozornosť sa venuje nárastu dusičnanov, ale aj ťažkým kovom, peroxidom, organickým (karboxylovým) kyselinám, nitrofenolom a pesticídmi.

Chemizmus zrážok je určený predovšetkým trajektóriami vzduchových hmôt, typom synoptickej situácie, procesom vymývania v oblačnej a podoblačnej vrstve, ako aj druhom zrážky. Horizontálne zrážky sú 3 - 12 ráz viac mineralizované než zrážky vertikálne (ich pH je výrazne posunuté do extrémne kyslej oblasti $\text{pH} < 3,5$). Trajektórie vzduchových hmôt podmieňujú hlavne pomer koncentrácií jednotlivých zložiek, poveternostné typy určujú predovšetkým množstvo prímiesi (MOLDAN 1989, ŠKVARENINA - MINĐÁŠ 1991).

Lesný ekosystém sa vyznačuje rozsiahlou povrchovou plochou nehomogénnej štruktúry a veľkej drsnosti, a je preto veľmi účinným filtrom vzduchových hmôt. Dažďová voda získava prechodom cez koruny porastu, ako aj jej stokom po kmeňoch stromov podstatne inú kvalitu, ako majú zrážky na voľnej ploche. Dochádza tu k obohacovaniu sa o biogénne prvky vymyté z povrchu ihličia a listov, ako aj o prirodzené a imisné látky intercepčne zdržané na vegetačnom povrchu (plyny, aerosóly, častice, hmly a pod.). Tab.2 poukazuje na mieru obohatenia mokrej atmosférickej depozície vplyvom lesného porastu pre oblasť strednej Európy podľa ŠKVARENINU a MIHÁLIKA (1993).

Tab.2.

Atmosférická depozícia (Atmospheric deposition) (v kg na hektár za rok) (in kg per hectare yearly)		
Komponenty	Voľná plocha Open area	Lesný porast Forest
H^+	0.3 - 0.8	0.3 - 3
$\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$ ako S	10 - 25	20 - 80
$\text{N}-\text{NH}_4^+$ ako N	6 - 12	5 - 35
$\text{N}-\text{NO}_3^-$ ako N	5 - 10	8 - 20

Z hľadiska perspektívy ďalšieho vývoja chemizmu zrážok je potrebné uviesť predpoklad ZÁVODSKÉHO a ZÁVODSKEJ (1992), že s ohľadom na pokles oblačnosti u nás (zoslabovanie frontálnej činnosti v dôsledku zoslabovania meridionálneho gradientu teploty) možno predpokladať zosilnenie oxidácie SO_2 vo vode oblakov a zrážok, a tým zvýšenie negatívnych efektov kyslých zrážok,

najmä skrytej depozície (záhyt oblačnej a hmlovej vody vegetáciou) v horách. Tento efekt by mohol spomaliť pozitívny účinok znižovania emisií SO₂ na kyslé zrážky (pri celkovom náraste NO_x).

Priame (cez asimilačný aparát) i nepriame (prostredníctvom pôdy) účinky kyslých zrážkových depozícií sú dnes po nepotvrdení tzv. "čistých" ozónových teórií odumierania lesov i naďalej predmetom značného odborného záujmu (HUBER 1992, KÄNDLER 1993). Osobitná pozornosť sa venuje depozíciám dusíka, nakoľko trend ich nárastu je badateľný nielen v zrážkach, ale aj v asimilačných orgánoch drevín a v pôde (známych je potrebné uvažovať s ich synergizmom s extrémami klímy, ako napr.: zakysľovanie v dôsledku sucha EICHHORN a PAAR 1992). Popri účinkoch kyslých zrážkových depozícií známych už z osemdesiatych rokov, je potrebné brať do úvahy ich synergizmus a extrémnosti klímy, ako napríklad: zakysľovanie v dôsledku sucha, dusíkovým antagonizmom podmienený pokles mrazuvzdornosti a ďalšie.

Dnešný imisný tlak na lesy nepôsobí izolovane, ale ako ukázali skúmania príčin novodobého poškodenia lesov je v synergických vzťahoch s činiteľmi poveternostnými. Nakoľko trendy fyziologicky najrelevantnejších atmosférických polutantov nesmerujú k ich výraznejšiemu poklesu, je logicky nutné tiež predpokladať ich negatívne spolupôsobenie s účinkami vyvolanými zmenami globálnej klímy.

2.3 Súčasný stav našich lesov

Druhovú zloženie našich lesov je výsledkom pôsobenia rôznych krajinnno-ekologických faktorov, z ktorých najdôležitejšie sú klíma, pôda a reliéf.

V dôsledku značnej výškovej členitosti územia Slovenska sa vo vzťahu klímy a lesných spoločenstiev prejavujú najmä vertikálne zmeny klímy, ktorých dôsledkom je výšková diferenciácia lesných spoločenstiev vyjadrená najmä druhovým zložením lesných porastov. Tieto vertikálne zmeny v druhovom zložení lesných porastov sú v lesníctve vyjadrené prostredníctvom fytoecologicky definovaných lesných vegetačných stupňov (lvs), ktorých stručná klimatická charakteristika je uvedená v nasledujúcej tabuľke 3.

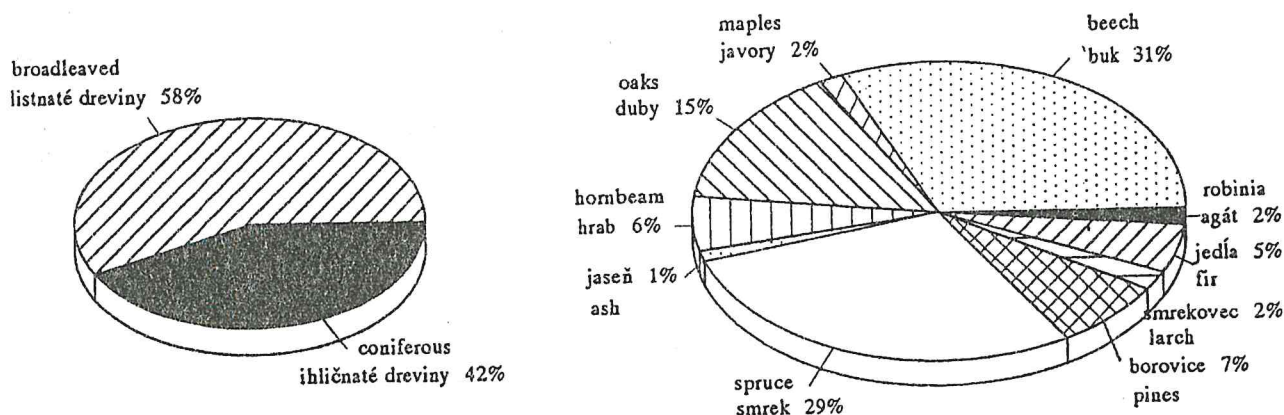
Tab.3. Vegetačné lesné stupne - krátka klimatická charakteristika

Forest altitudinal vegetation zones - short climatic characteristic (HANČINSKÝ 1972)

Veg. les. st.	Priem. roč. teplota °C	Priemerný ročný úhrn zrážok v mm	Počet dní s priem. dennou tepl. > 10 °C	Trvanie sneh. pokrývky v dňoch
1.	8.5 a viac	600 a menej	180	50 a menej
2.	6.0 - 8.5	600 - 700	165 - 180	40 - 60
3.	5.5 - 7.5	700 - 800	150 - 165	60 - 80
4.	5.0 - 7.0	800 - 900	130 - 160	80 - 100
5.	4.5 - 6.5	900 - 1050	110 - 130	100 - 120
6.	3.5 - 5.0	1000 - 1300	90 - 120	120 - 150
7.	2.0 - 4.0	1100 - 1600	70 - 100	150 - 180
8.	2.5 a menej	1500 a viac	60 a menej	180 a viac

Vegetačné stupne (Vegetation altitudinal zones): 1.dubový (oak) 2.bukovo - dubový (beech - oak) 3.dubovo - bukovo (oak - beech) 4.bukový (beech) 5.jedľovo - bukovo (European fir - beech) 6.smrekovo - bukovo - jedľový (Norway spruce - beech - European fir) 7.smrekový (Norway spruce) 8.kosodrevinový (mountain pine).

Súčasnú drevinové zloženie lesných porastov je znázornené na obr.3.



Obr.3. Súčasnú drevinové zloženie lesných porastov Slovenska
Present stand composition of forests in Slovakia

Takto chápané lesné vegetačné stupne vyjadrujú určité optimálne výškové členenie hlavných lesných drevín (smrek, jedľa, buk, dub) ako výsledok pôsobenia len prírodných faktorov. Nakoľko lesné spoločenstvá sú objektom hospodárskej činnosti človeka, ich súčasné druhové zloženie plne nezodpovedá optimálnemu zastúpeniu drevín.

Z hľadiska stability lesných ekosystémov je drevinové zloženie a druhová diverzita veľmi dôležitá, nakoľko má priamy vzťah k stabilite, resp. k schopnosti odolať určitému druhu vonkajšej či vnútornej zmeny (MÍCHAL 1992). Z tohto aspektu sú pre ďalší vývoj našich lesov dôležité tieto skutočnosti:

- existencia smrekových monokultúr v nižších lesných vegetačných stupňoch (1.-5.lvs)
- vysoké zastúpenie monodrevinových porastov v súčasnom lesnom hospodárstve
- neadekvátny pomer umelej obnovy a holorubného hospodárenia vo vzťahu k prirodzenej obnove a biologickým princípom pestovania lesov
- súčasné uniformné genotypové a ekotypové zloženie našich porastov

Pri úvahách o súčasnom stave našich lesov nemožno opomenúť fakt ich zdravotného stavu najmä vo vzťahu k imisnej situácii. Vývoj zdravotného stavu lesov Slovenska v posledných rokoch nám názorne ukazuje tabuľka 4.

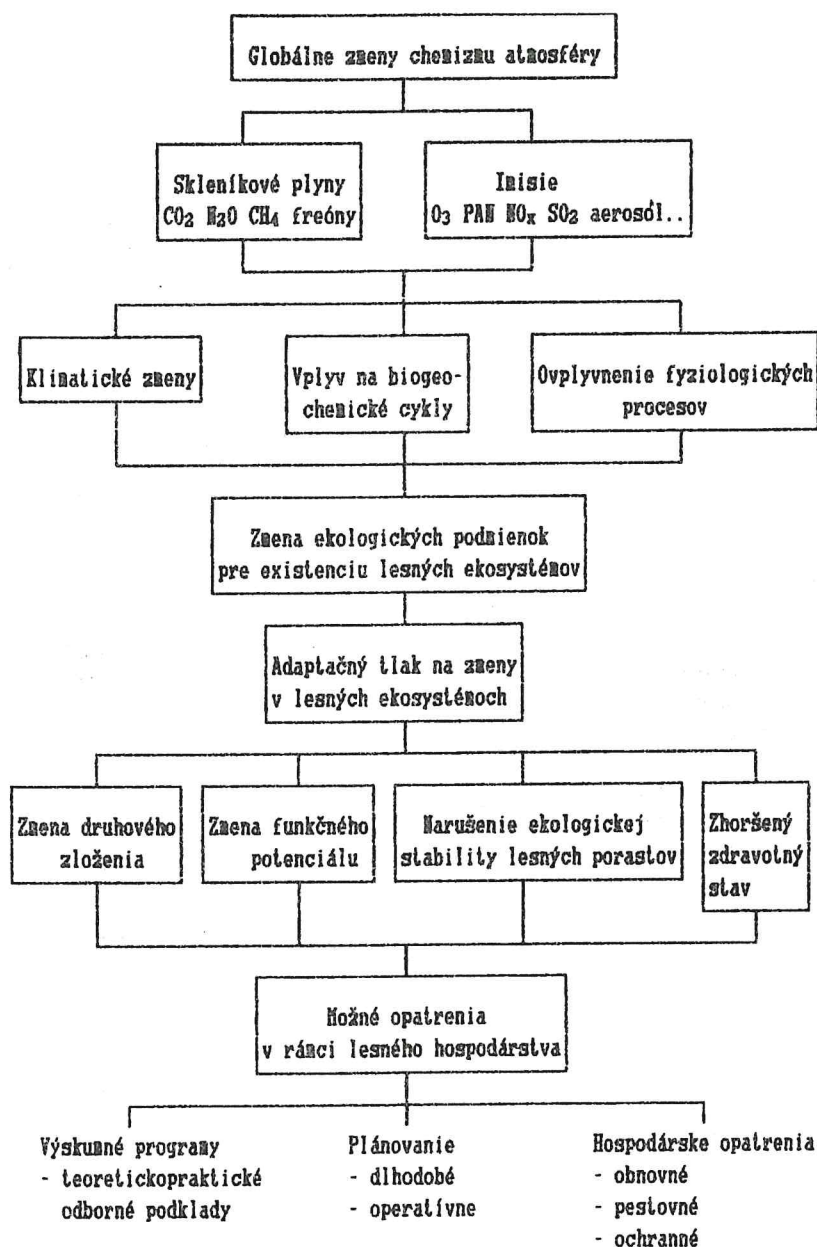
Tab.4. Vývoj poškodenia lesov na Slovensku.
Evolution of forest damage in Slovakia (RAČKO et al.1993)

Druh drevín	Priemerné percento v 3,-4, stupni poškodenia(%)						
	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Ihličnaté Coniferous	35	32	35	33	27	29	29
Listnaté Broadleaved	24	23	27	25	19	24	23

Z uvedených údajov vyplýva, že po kulminácii poškodenia v roku 1989 došlo k určitej stabilizácii poškodenia, takže v súčasnosti môžeme hovoriť zhruba o štvrtinovom poškodení našich lesov. Prognózy do budúcnosti hovoria o niekoľkých variantoch vývoja zdravotného stavu do r. 2015, ale aj pri tom najpriaznivejšom variante môžeme predpokladať len pozvoľný pokles poškodenia. Vývoj poškodenia je dôležitý najmä v horských oblastiach, kde je problém chradnutia lesov najvypuklejší a značne znižuje adaptačnú schopnosť horských lesov na stresové pôsobenie akéhokoľvek druhu.

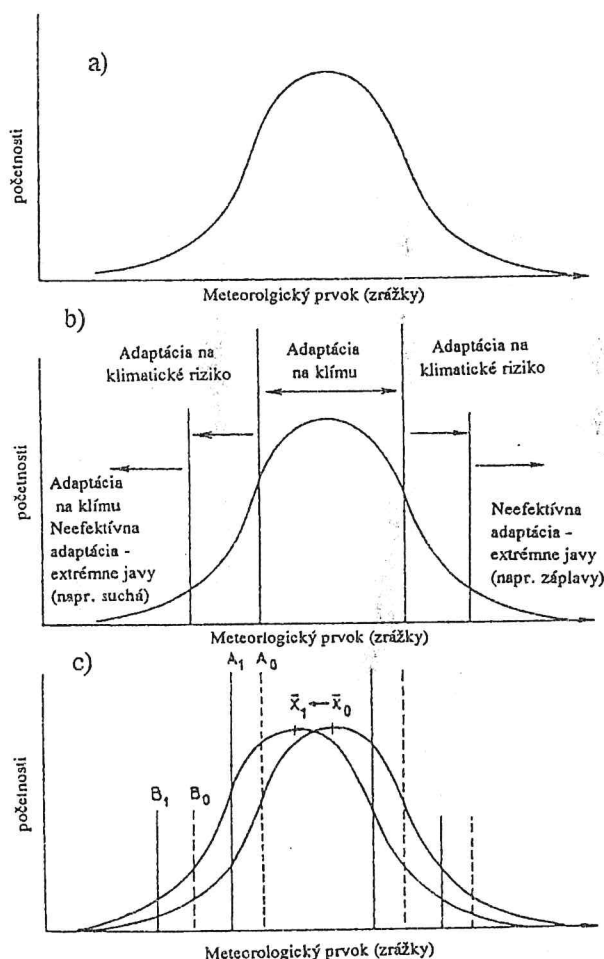
3. MOŽNÉ DÔSLEDKY GLOBÁLNYCH ZMIEN ATMOSFÉRY NA LESY SLOVENSKA

Dôsledky globálnych zmien atmosféry sa s najväčšou pravdepodobnosťou prejavia v celom komplexe priamych či nepriamych zmien na úrovni bunkových štruktúr, buniek, pletív, orgánov, jednotlivých stromov a celých spoločenstiev, čo bude mať značné dôsledky na všetky aspekty existencie a životných prejavov lesných ekosystémov. Táto skutočnosť bude mať za následok aj výrazné zmeny najmä z pohľadu lesného hospodárstva, ako aj z hľadiska celkového stavu životného prostredia (biodiverzita, ekologická stabilita krajiny a pod). Schematicky môžeme vplyv globálnych zmien na lesné ekosystémy vyjadriť nasledovne:



3.1 Zmeny druhového zloženia vo vzťahu ku klimatickým zmenám

Druhovú zloženie lesných spoločenstiev je výsledkom pôsobenia rôznych ekologických faktorov, z ktorých faktory klímy sú často určujúce. Výsledkom je adaptácia rastlinných spoločenstiev na dané podmienky a vytvorenie ich areálov s charakteristickým rozpätím ekologických podmienok, pričom v rámci týchto podmienok môžeme vylišiť oblasť optima s postupným prechodom do ekologického pesima, ako to môžeme sledovať na obr.4. Ak uvažujeme s posunom ekologických (v našom prípade hlavne klimatických) podmienok nutne musí dôjsť k adaptačným zmenám v danom spoločenstve tak, ako je to ilustrované v danom obrázku.



Obr.4. Schéma adaptácie a vyrovnanie sa rastlinných spoločenstiev s pôsobením klímy a klimatickými zmenami

Pattern of adaptation of plant communities on influence of climate and of climate change (podľa -according to Warrick ex Moldan et al. 1993)

Otázkou však zostáva do akej miery bude táto nová adaptácia pre súčasné lesné hospodárstvo možná a ekonomicky únosná. Dôležitým bude aj časový faktor pôsobenia a dôsledkov klimatických zmien, ktoré sú výsledkom pôsobenia v troch časových dimenziách (KRÁUCHI 1993):

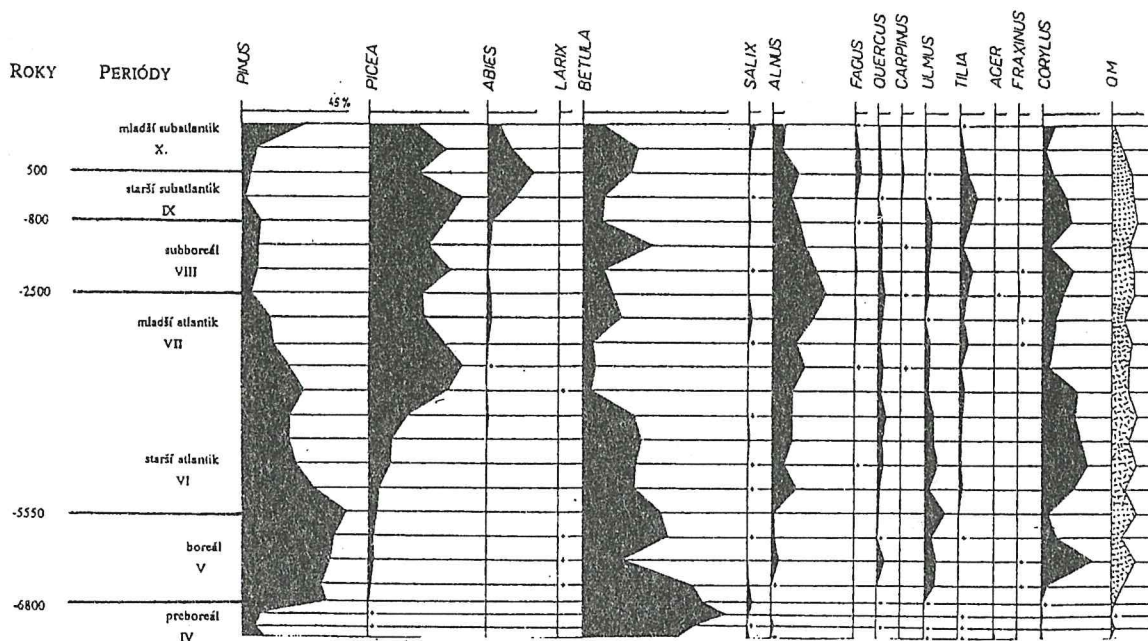
- prvou je celková klimatická zmena ako výsledok zvýšenia koncentrácie skleníkových plynov a následného zvýšenia globálnej teploty
- druhou je medziročná variabilita počasia spojená s krátkodobými klimatickými fluktuáciami
- tretou sú zmeny spojené s dennou, resp. sezónnou variabilitou počasia

3.1.1 Vývoj lesov v dobe poľadovej

Pre analýzu vplyvu klimatických zmien najmä na druhové zloženie lesov na našom území môže byť zaujímavé použitie historických analógií vývoja vegetácie v holocéne, kedy v určitých obdobiach (atlantik, subboreál) boli teplotné pomery na úrovni prognózovaných hodnôt antropogénne podmienených klimatických zmien pre 21. storočie. Prvé poznatky hovoria o veľkom vplyve zrážok (resp. cirkulačných pomerov) na rozšírenie jednotlivých drevín, resp. spoločenstiev. Ide predovšetkým o vzájomný pomer zastúpenia ihličnanových pralesov (dominancia smreka), zmiešaných pralesov (buk, jedľa) a zmiešaných dubín, ako to dokumentujú výsledky analýz KRIPPELA (1986), kedy pri

minimálnych rozdieloch v teplotách v atlantiku a subboreáli bolo zastúpenie jednotlivých spoločenstiev rôzne pravdepodobne práve vplyvom rôzneho vlhkostného režimu. V budúcnosti bude potrebné vykonať podrobnejšiu analýzu týchto skutočností najmä vzhľadom na celkové klimatické areály hlavných lesných drevín, ako aj z hľadiska ich adaptability a migrácie počas postglaciálneho vývoja v holocéne. Táto skutočnosť je navyše komplikovaná faktom, že šírenie jednotlivých drevín bolo nerovnomerné a časovo posunuté, takže interpretácia výsledkov je komplikovaná pôsobením klimatických a orografických podmienok in situ a inváznymi možnosťami danej dreviny vyplňať tento klimatický areál. Príklad druhového vývoja lesov v postglaciáli v oblasti Vysokých Tatier nám dokumentuje obr.5 na základe výsledkov palynologických rozborov rašeliniska Tatranský domov.

TATRANSKÝ DOMOV 1100 m.n.m.



Obr.5. Peľový diagram rašeliniska Tatranský domov (1 100 m n.m.)

Pollen diagram of peatery of Tatranský domov (1 100 m a.s.l.) (QM - Quercetum mixtum) (KRIPPEL 1963)

Zjednodušený popis vývoja lesov v holocéne nám ilustruje nasledujúca tabuľka 5, vypracovaná predovšetkým pre hercýnsku oblasť.

Uvedená tabuľka popisuje vývoj lesov v holocéne pre širšiu oblasť strednej Európy a zákonite nemôže detailne zachytávať určité lokálne odlišnosti vývoja druhového zloženia lesov. V tejto súvislosti treba upozorniť na niektoré odlišnosti vo vývoji lesov v oblasti Západných Karpát (Krippel 1986). Ide najmä o doložené existencie smrekových refúgií (oblasti prechovania daného druhu v glaciáli) vo vnútrokarpatských kotlinách (Spišská), a tým skorší nástup expanzie smreka a jeho najväčšie rozšírenia v preboreálnom a boreálnom období. Od tohto obdobia dochádza k postupnému ústupu smreka do horských polôh a k jeho formovaniu ako dreviny vyšších vegetačných stupňov. Aj nástup jedle a buka je odlišný od všeobecne konštatovanej schémy, keď už napr. v oblasti Vihorlatu sa buk aj jedľa objavujú už v preboreálno-boreálnom období. Zaujímavé je sledovať aj osud duba v postglaciáli, ktorého refúgiá boli pravdepodobne zhodné s bukom, avšak jeho expanzia nastala d'aleko skôr už v období neskorého glaciálu. Táto skutočnosť relativizuje poznatky o dubu ako o drevine nižších teplejších polôh a zdá sa, že v ďalších obdobiach postglaciálu formovanie jeho areálu bolo určované viac konkurenciou iných druhov (buk, smrek) ako vlastnými zmenami klímy. Uvedené rozpory možno vysvetliť nasledovne:

- existenciou relatívne blízkych samostatných refúgií (severomad'arské pohoria, vnútrokarpatské kotliny, ...) a následných rôznych smerov šírenia drevín
- výraznou modifikáciou klimatických podmienok determinovaných reliéfovou pestrosťou.

Tab.5. Vývoj lesov v holocéne
Evolution of forests in holocene (KREČMER et al. 1980)

Obdobie	Trvanie	Charakteristika klímy	Rozvoj lesných drevín
Preboreál	8.-6.tis. pred n.l.	Postupné otepľovanie od podnebia tundry k tajge	Dominancia brezy a borovice, postupný nástup liesky a duba
Boreál	6.-5.tis. pred n.l.	Kontinentálna suchá s dlhým teplým letom	Prevláda borovica a lieska, postupne pribúda smrek a listnáče
Atlantik	5.-2.tis. pred n.l.	Teplá s dostat. zrážok, oceánic. ku koncu klesajú zrážky, mierne ochladenie	Prevládajú zmiešané dubiny, lieska, vo vyšš. polohách smrek v 2.polovici nástup buka a jedle, ústup borovice
Subboreál	2500-800 pred n.l.	Suchšia postupné ochladzovanie	Pribúda buk, smrek, jedľa, ústup zmieš. dubín, pribúda hrab
Subatlantick starší	800 pred n.l. až stredovek	Chladná dostatok zrážok, oceánický charakter	Výrazná prevaha jedle a buka, v horách so smrekom
mladší	od stredoveku	Ubúdanie zrážok oceánický charakter	Pribúdanie duba, liesky a jelše pred začiatkom premeny na lesy kultúrne

Z pohľadu súčasných problémov vplyvu klimatických zmien na druhové zloženie našich lesov je potrebné na základe poznatkov o postglaciálnom vývoji lesov upozorniť na tieto skutočnosti:

- formovanie vegetačnej stupňovitosti trvalo rádovo tisíce rokov pri vystriedaní niekoľkých desiatok generácií
- areály drevín v súčasnosti nie sú len výsledkom klimatických nárokov drevín, ale sú tiež výsledkom ich vzájomnej konkurencie
- kolísanie klímy v holocéne za spolupôsobenia ostatných ekologických faktorov prispeli k sformovaniu lokálne adaptovaných populácií (ekotypov), ktoré predstavujú významný genetický potenciál pre obnovu a zachovanie biodiverzity lesných spoločenstiev najmä v budúcnosti.

3.1.2 Zmeny druhového zloženia

Ak chceme hovoriť o možných zmenách druhového zloženia našich lesov musíme poznať niektoré skutočnosti, a to najmä klimatickú amplitúdu danej dreviny na našom území, rýchlosť klimatickej zmeny a adaptačnú schopnosť danej dreviny reagovať na tieto zmeny.

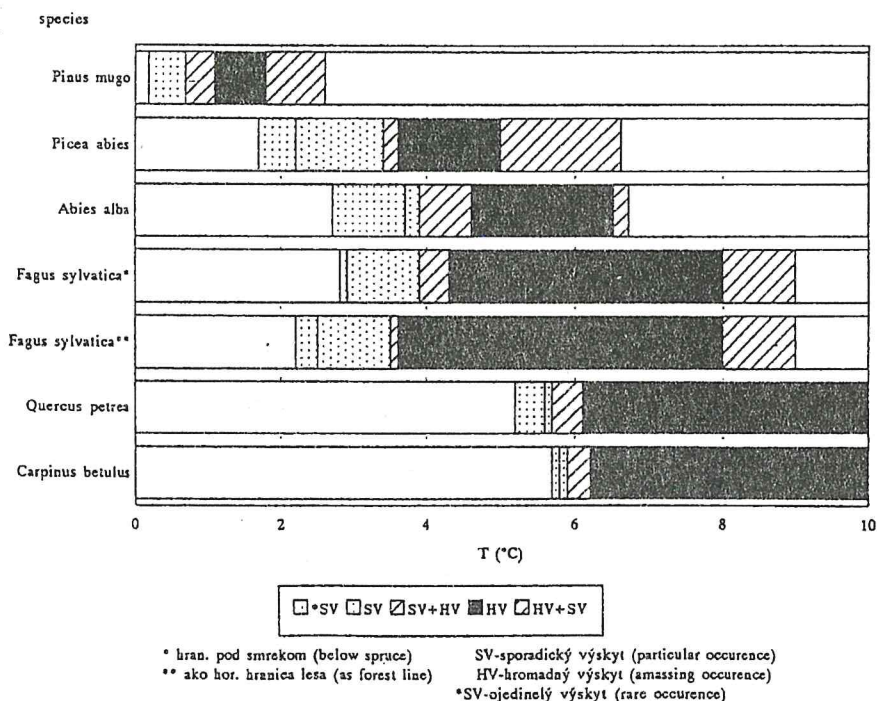
Veľkosť klimatickej amplitúdy nám nepriamo napovedá o schopnosti danej dreviny reagovať na klimatické zmeny. Čím užšia je táto amplitúda, tým ťažšie reaguje daná drevina na klimatickú zmenu, najmä ak táto zmena značne prekročí rámec bežnej klimatickej fluktuácie, ako o tom svedčí aj vývoj vegetácie v ľadových a medziľadových dobách.

Z tohto dôvodu sme sa pokúsili o podrobnejšiu analýzu klimatických amplitúd hlavných lesných drevín Slovenska. Vychádzali sme pritom z vertikálneho rozšírenia lesných drevín v jednotlivých

pohoriach na Slovensku (Blatný, Šťastný 1959) a z ich vyjadrenia hodnotami vybraných klimatických charakteristík (Mind'áš 1992). Ďalej sme urobili prienik takto vyjadrených vertikálnych klimatických intervalov výskytu danej dreveniny zo všetkých pohorí (berúc pritom do úvahy hranice sporadického a hromadného výskytu danej dreveniny v zmysle Blatného a Šťastného (1959)) a dospeli sme takto k vyjadreniu klimatických amplitúd na základe 5 intervalov výskytu:

1. ojedinele sporadický výskyt
2. sporadický výskyt
3. sporadický a hromadný výskyt (horná hranica)
4. hromadný výskyt
5. sporadický a hromadný výskyt (dolná hranica)

Výsledok tohto skúmania môžeme vidieť na priloženom obr.6.



Obr.6. Klimatické amplitúdy vybraných lesných drevín
Climatic range of main forest trees

Ak porovnáme celkové klimatické amplitúdy týchto drevín, vidíme, že stúpajú v tomto nasledovnom poradí: kosodrevina - jedľa - smrek - buk - dub (na našom území nedosahuje svoju dolnú hranicu rozšírenia). Ak porovnáme veľkosti amplitúd len ich hromadného výskytu tak môžeme konštatovať, že smrek má v tomto prípade užšiu amplitúdu ako jedľa. Tento fakt však možno pripísať čiastočne na vrub antropogénnych zmien v oblasti hornej hranice lesa (najväčšia amplitúda sporadického výskytu) a na druhej strane to svedčí o skutočnosti, že smrek je typickou horskou drevinou. Ak si uvedomíme, že posun klimatických podmienok bude prebiehať do vyšších nadmorských výšok, tak hromadný výskyt by sa mal posúvať do oblasti súčasného sporadického výskytu prípadne až nad jeho rámec. Z tohto aspektu má dobré možnosti smrek a prekvapujúco aj jedľa, ktorých šírka intervalu od hromadného výskytu po absolútnu hranicu výskytu je väčšia, ako má buk a dub. Za "normálnych" okolností by tento fakt hovoril v prospech rozvoja horského boreálneho stupňa pod vplyvom klimatických zmien, pravda s uvažovaním reálneho vplyvu imisného stresu v polohách horských lesov je tento problém zložitejší.

V tejto súvislosti je potrebné bližšie si všimnúť klimatické areály smreka a buka (MINDÁŠ 1993), z ktorého môžeme vidieť, že ak uvažujeme oblasti, kde sa buk dostáva až k hornej hranici lesa je buk schopný takmer úplne "prekryť" klimatický areál smreka. Svedčí to o vzájomných konkurenčných vzťahoch týchto drevín a v určitom zmysle aj o charaktere vývoja vegetácie v postglaciáli, t.j. smeroch a rýchlostiach ich šírenia v holocéne. Jednoducho povedané, ak v danej oblasti výrazne prevládol buk (východné Slovensko) postglaciálna expanzia smreka do tejto oblasti bola minimálna, čo platí aj opačne (napr. vysokotatranská oblasť). Ak sa pozrieme na tento problém z pohľadu súčasného zdravotného stavu našich lesov, musíme konštatovať, že smrek reaguje citlivejšie na imisný stres ako

buk. V dôsledku toho, ak prijmem predpoklad očakávaných klimatických zmien, môžeme dedukovať "určitý" expanzný tlak buka do oblasti horských smrečín, ktorých schopnosť reakcie na klimatické zmeny bude oslabená vplyvom ich zlého zdravotného stavu. Táto očakávaná skutočnosť však môže byť do istej miery brzdená inými faktormi napr. reprodukčnou schopnosťou buka.

Ďalším aspektom vzájomných vzťahov systému klíma-lesný ekosystém je aj otázka možnej reakcie lesných drevín v závislosti od rýchlosti, resp. veľkosti klimatickej zmeny. Ak si všimneme vývoj klímy v holocéne, tak najprudšie zmeny vyrovnaných priemerných ročných teplôt v holocéne neprevýšili hodnotu 0.3-0.5 °C/100 rokov (MINDÁŠ 1992). Z tohto hľadiska veľkosť očakávaného zvýšenia priemernej ročnej teploty v najbližších 100 rokoch predstavuje hodnotu o jeden rád vyššiu, čo je zhruba 10 - krát rýchlejšia zmena, aká sa kedy udiala v holocéne. Z tohto aspektu sa zdá, že prirodzená reakcia (resp. prirodzená sukcesia) lesných drevín pri tak rýchlej zmene klímy, aká sa predpokladá, prakticky nebude možná. Inak povedané lesné dreviny už len z hľadiska reprodukčného nemôžu byť fyzicky schopné premiestnenia sa do teritórií, do ktorých sa budú presúvať ich klimatické areály. Na tento fakt prakticky zanedbateľného významu prirodzených sukcesných procesov (ide o časový horizont prakticky jednej generácie) upozorňujú aj ďalší autori (Kräuchi 1994). Zatiaľ čo sformovanie dnešných klimaxových spoločenstiev nastalo v priebehu rádo tisícov rokov (postglaciálne obdobie), scenáre budúcich zmien kalkulujú s rozsahom desiatok až stovky rokov. Podľa BURSCHELA (1990) čím rýchlejšie sa zem oteplí, tým menšie šance majú súčasné rastlinné spoločenstvá prežiť, a tým viac špecializovaných druhov zahynie, resp. sa nahradí inými, nenáročnejšími.

Predpokladá sa, že predovšetkým oteplenie vyvolá posun doterajšej stupňovitosti lesných spoločenstiev (LAMB 1984), podľa niektorých úvah až o 400 - 500 m (FANTA 1992). Nazdávame sa, že jednoduchý posun lvs smerom nahor by bol aj pri podstatne pomalšom postupe klimatických zmien otázný. K najdramatickejším zmenám môže dôjsť hlavne v hraničných vegetačných stupňoch. 1. dubový lvs nahradí krovinatá lesostep, najmä vo vápencových oblastiach. Letné suchá v spolupôsobení s kyslou atmosférickou depozíciou môžu podmieniť narušenie procesov kolobehu dusíka v lesných pôdach, čo hlavne v kyslom rade 1. lvs môže viesť k drastickému rozpadu lesných celkov. Takto lesom opustené plochy pravdepodobne nahradí všeobecné adaptabilný kozmopolitný druh, napr. trávny, ako je to už dnes známe na imisných holinách. Aj v 2. bukovo-dubovom a 3. dubovo-bukovom lvs väčšina prác predpokladá expanziu xerofytov, okrem krovín aj borovic (FANTA 1992, ROLOFF 1992) alebo vyššie zastúpenie javorov, jaseňov a líp. Sucho v letných mesiacoch a teplejšie zimy vytvoria priaznivejšie podmienky pre fytopatogény, napr. tracheomykózy dubov, čo poskytne väčšie šance pre cer. Buk podľa niektorých autorov, napr. ROLOFF (1992), veľmi citlivo reaguje na teplé a suché roky, preto tento autor predpokladá jeho plný ústup z nižších vegetačných stupňov. Naproti tomu FELBERMEIER (1994), na základe rozboru výškového rastu buka vo vzťahu ku klíme v Bavorsku, dospel k názoru, že oteplenie o 1-2 °C nepovedie k výraznému ústupu buka z nižších polôh a vo vyšších chladnejších polohách môže prispieť (pri vylúčení patogénov) k zvýšeniu jeho produkcie. Toto zistenie je v rozpore s doteraz všeobecne konštatovaným názorom o buku ako o drevine chladnejších a vlhších polôh. Podobne aj TESAR (1994) uvažuje s bukom pri obnovných postupoch v nižších horských polohách ako s ekosystémovo stabilizačným prvkom. Všeobecne sa však očakáva rozpínanie buka v 5. jedľovo-bukovom a 6. smrekovo-bukovo-jedľovom lvs, na úkor citlivejšej jedle a smreka. Doterajšie výskumy veľkoplošného poškodenia lesov zreteľne poukázali, že okrem porastov v dosahu lokálnych zdrojov polutantov sú stredobodom imisného vplyvu horské lesné ekosystémy. Preto sa domnievame, že lesy od 5. jedľovo-bukového lvs nahor, už dnes najviac oslabované extrémnymi dávkami kyslých depozícií a fotooxidantov, budú aj v budúcnosti veľmi senzitivne reagovať na zmeny teploty, zrážok, ako aj na možnú absenciu snehovej pokrývky. Výskyt snehovej pokrývky mení výrazne podmienky bilancie slnečného žiarenia a tiež podmienky výparu a výmeny tepla medzi pôdou a atmosférou (LAPIN 1993). Viacero prác (STIFTUNG WALD IN NOT 1990, FANTA 1992, ROLOFF 1992) predpokladá podstatný ústup, resp. zúženie pásma smreka, ako aj jedle, s prípadným ich zachovaním len vo vlhkejších údoliach a terénnych zárezoch. Na základe analýzy rastového procesu smreka pre rôzne klimatické podmienky ŠINDELÁŘ (1994) poukazuje na jeho slabšie (dnes už prakticky vyčerpané) schopnosti adaptácie na teplejšie a suchšie podnebie. Podobne aj MRÁČEK A PAŘEZ (1986) uvádzajú ako kritickú spodnú hranicu pre pestovanie smreka 300 mm zrážok vo vegetačnom období, čo prakticky bude znamenať vylúčenie smreka z nižších polôh (do 5.lvs). Pri dostatku vlhky a oteplení sa môžu lokálne vytvárať konkurenčne lepšie podmienky pre buk, javor horský a jaseň aj v 6. smrekovo-bukovo-jedľovom a 7. smrekovom lvs na úkor senzitivnejšieho smreka. Existencia kosodreviny, limby, horského ekotypu smreka v 8. kosodrevinovom stupni bude limitovaná okrem zrážok a snehovej pokrývky aj pôdnymi a imisnými pomermi. V súvislosti so znižovaním filtračnej kapacity

stratosférickej ozónovej vrstvy je treba v týchto polohách počítať aj so zvýšenými fotodeštruktívnymi účinkami UV-B radiácie. Spolupôsobenie uvedených faktorov môže na týchto polohách viesť aj k úplnej degradácii lesa. Možno preto očakávať isté zmeny aj v hornej hranici lesa.

Osobitný problém tvoria porasty a spoločenstvá stojace mimo vegetačnej stupňovitosti (súbory lesných spoločenstiev "a" (rašeliniská, zamokrené resp. podmáčané pôdy) a "c" - (prameništne, potočné a lužné lesy)). V súvislosti s očakávanými zmenami vodnej bilancie (zrážky, výpar) sa predpokladá zníženie prietokov vo väčšine povodí zhruba o 20 % oproti dnešku (LAPIN et al. 1993). Tento fakt bude znamenať aj lokálne zníženie hladín podzemnej vody v inundačných územiach, čo bude mať pravdepodobne za následok ústup mäkkého luhu (na úkor tvrdého luhu) a v oblasti tvrdých lužných lesov nezvratné zmeny (vysychanie). Túto skutočnosť nemožno opomenúť ani pri brehových porastoch, čo môže ovplyvniť ich ochranný charakter.

V literatúre sa však môžeme stretnúť s úvahami o vzniku nových spoločenstiev napr. z pionierskych drevín, resp. s dominanciou lúp, javorov, rôznych krovín a pod. (LAMB 1984, FANTA 1992). Nepôvodným smrekovým monokultúram v nižších polohách nové klimatické podmienky zabránia v prežití. Otáznymi zostávajú reakcie niektorých introdukovaných drevín, napr. agátu, duglasky a pod. TESAŘ (1993) predpokladá účasť naturalizovaných drevín (agát, dub červený, orechy a pod.) v záujme budúcej ekologickej stability a druhovej pestrosti porastov.

Na záver teda môžeme stručne konštatovať tieto niektoré pravdepodobné dôsledky (okrem mnohých ďalších) očakávaných klimatických zmien na druhové zmeny lesných ekosystémov:

- najdisponibilnejšou drevinou na ohrozenie klimatickými zmenami bude pravdepodobne jedľa a smrek najmä na dolnej hranici svojho rozšírenia a mimo svojho prirodzeného areálu
- pri nezlepšení zdravotného stavu horských a vysokohorských smrečín možno pravdepodobne očakávať určitú "expanziu buka" do týchto polôh
- aj napriek očakávanému posunu buka do vyšších polôh tento potom pravdepodobne bude hrať aj naďalej významnú úlohu v nižších lvs
- rýchlosť očakávaných klimatických zmien vyvolá také zmeny v lesných ekosystémoch, ktoré tieto nebudú schopné autoregulačne zvládnuť.

3.2 Vplyv na bioprodukciiu lesných ekosystémov

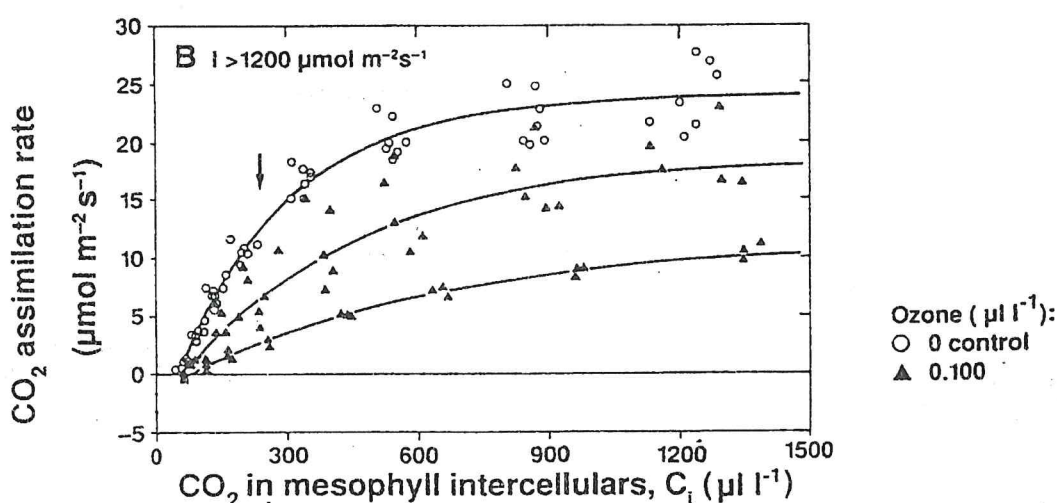
3.2.1 Fyziologické aspekty globálnych zmien

Fotosyntetická asimilácia oxidu uhličitého je kľúčovým fyziologickým procesom v celej biosfére, a preto aj malé zmeny vo fotosyntetických procesoch majú mimoriadny dosah na všetky zložky a funkčné procesy v lesných ekosystémoch.

Narastajúce koncentrácie CO₂ v atmosfére vedú na základe známych závislostí fotosyntetickej asimilácie od koncentrácie CO₂ (CO₂ krivky fotosyntézy) k úvahám o možných krátkodobých aj dlhodobých efektoch na produkciu biomasy. Výsledky štúdií produkčných efektov pri dvojnásobku CO₂ v kontrolovaných podmienkach v zásade potvrdzujú tieto domnienky. LUXMOORE et al. (1993) uvádza analýzu výsledkov z 28 štúdií vplyvu dvojnásobku CO₂ na sadenice, pričom priemerné zvýšenie fotosyntézy bolo 1,46 - krát (t.j. o 46 %). Väčšina experimentov potvrdzuje aj celkové zvýšenie rastu a objemu biomasy. Analýza výsledkov porovnania 398 pozorovaní rastu sadeníc pri dvojnásobku CO₂ viedla k týmto výsledkom (LUXMOORE et al. 1993):

- priemerné zvýšenie rastu (nárast sušiny)	1,32 - krát
z toho pre druhy - boreálne	1,38 - krát
- temperátne a tropické	1,25-1,31 - krát
- priemerný nárast sušiny podľa časti drevín	- listy 1,33 - krát
	- kmene 1,29 - krát
	- korene 1,38 - krát
	- plocha listov
	1,13 - krát

Ďalšou možnosťou overenia potenciálneho zvýšenia produkcie biomasy v lesných ekosystémoch je skúmanie prírastkových zmien za posledné desaťročia. WEST et al. (ex LUXMOORE et al. 1993) dokumentuje pre periódu 1950 (310 ppm CO₂) - 1987 (344 ppm CO₂) 40 % zvýšenie hrúbkového prírastku borovice močiarnnej (*Pinus palustris*), pričom tu boli eliminované vplyvy klimatických variácií a zmien stanovištných podmienok. Zvýšený prírastok ide na vrub zvýšenej depozície dusíka a zvýšenej koncentrácie CO₂. Aj ďalšie analýzy hovoria o zvyšovaní prírastkov cca o 60 % (LUXMOORE et al. 1993); podľa práce KIMBALLA et al. (1993) dochádza pri náraste koncentrácie CO₂ z 350 na 700 ppm pri C3-type rastlín (sem patrí väčšina našich lesných drevín) k zvýšeniu čistej fotosyntézy až o 60 %. Na druhej strane MORRISON (1987) konštatuje, že zvýšenie koncentrácie CO₂ z 330 na 660 ppm vedie k redukcii stomatálnej vodivosti rastlín až o 60 %. Pritom je potrebné si uvedomiť, že činnosť prieduchov je veľmi citlivá aj na ďalšie faktory najmä vodný režim, ale aj napríklad na koncentrácie ozónu, ako to môžeme vidieť aj na obr.7.

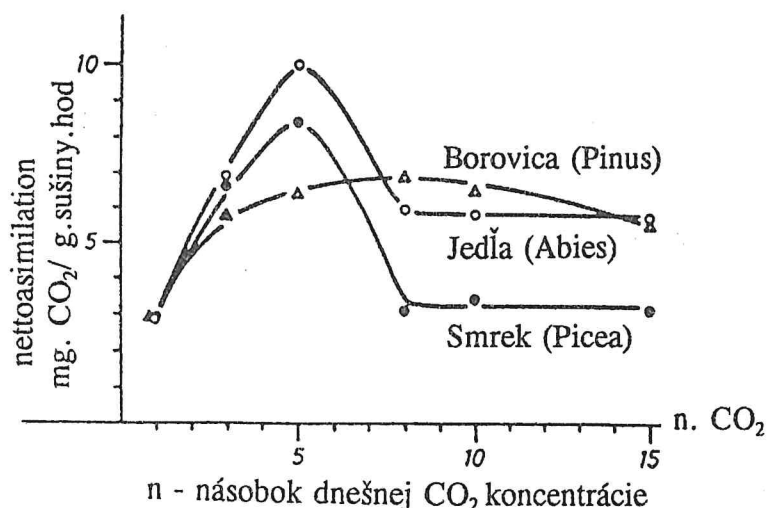


Obr.7. Účinky ozónu na príjem CO₂

Effects of ozone on assimilation rate of CO₂ (MATYSSEK et al. 1990)

Tieto výsledky je však potrebné hodnotiť trpezlivo nakoľko boli dosiahnuté spravidla za optimálnych podmienok, a preto v súvislosti s ich posudzovaním je lepšie hovoriť v intenciách potenciálneho, t.j. maximálneho zvýšenia fotosyntézy, resp. produkcie biomasy pri optimálnych podmienkach. Je zrejmé, že v reálnych či stresových podmienkach bude rastová odozva menej výrazná.

Už z tohto krátkého výpočtu problémov okolo možného zvyšovania fotosyntézy vplyvom zvýšenia koncentrácie CO₂ je vidieť, že rastová odpoveď rastlín je nejednoznačná avšak v každom prípade možno pre najbližšie desaťročia uvažovať s určitým kladným efektom fotosyntézy na bioprodukcii BURSCHEL-WEBER (1990) (obr.8).



Obr.8. Účinok zvyšovania koncentrácií CO₂ na fotosyntézu v laboratórnych podmienkach
Effect of increasing of CO₂ concentrations on photosynthesis rate in controlled conditions
(Koch ex BURSCHEL-WEBER 1990)

Ak by sme vychádzali len z rámcových údajov vývoja porastových zásob na Slovensku, tak tieto vzrástli od roku 1950 z hodnoty 149 m³ ha⁻¹ na hodnotu 189 m³ ha⁻¹ v roku 1991, čo je 1,27 - násobné zvýšenie, čo je v pozoruhodnej zhode s už spomínanými hodnotami nárastu produkcie.

Z celkového pohľadu fungovania fyziologických pochodov v rastline bude veľmi dôležité ich ovplyvnenie stresovými podmienkami. Z tohto hľadiska je veľkou neznámou vývoj potenciálnych poveternostných stresových faktorov, pre ktoré doteraz neboli vypracované žiadne scenáre ich vývoja. Veľmi dôležitý bude aj vývoj koncentrácií niektorých komponentov v atmosfére so stresujúcim účinkom na lesné ekosystémy. V tejto súvislosti ide najmä o vývoj koncentrácií fotooxidantov (najmä troposférického ozónu), nakoľko ich fyziologické vplyvy môžu byť značné. Z dlhotrvajúcich fumigačných experimentov, uskutočňovaných v definovaných podmienkach, sú známe charakteristické stresové odozvy rastlinných pletív už na nízke koncentrácie ozónu.

Ozón zvyšuje tvorbu voľných radikálov a ich medziproduktov v asimilačných pletivách (BERMADINGER et al. 1990). Na úrovni bunky voľné radikály deštruuju membrány, menia aktivity mnohých enzýmov a zásoby dôležitých metabolitov. Pôsobenie tohoto oxidatívneho stresu sa sleduje nepriamo, zisťovaním množstva antioxidantov, prípadne aktivít antioxidantných enzýmov, ktoré slúžia ako detoxikačné mechanizmy. Extrémny oxidatívny stres vyvolaný pôsobením koncentrácie 600 ppb O₃ jednoznačne potvrdil signifikantne zvýšenie hladiny týchto detoxikačných látok (SHITTENHELM et al. 1993). Pri súčasnom spolupôsobení ostatných negatívnych faktorov prostredia, v prirodzených podmienkach (zvýšená intenzita slnečnej radiácie, sucho, silné mrazy a i.) nezmetabolizované voľné radikály spôsobujú nevratné poškodenie, rozklad pigmentov, v poslednom štádiu viditeľné chlorotické až nekrotické zmeny na asimilačnom aparáte (OSSWALD et al. 1992).

Atmosférický ozón už pri nízkych koncentráciách spôsobuje špecifické ultraštruktúrne bunkové poškodenie. Prejavuje sa zmenšovaním veľkosti chloroplastov a zásobných škrobových grán v membránach tylakoidov (HUTTUNEN 1994). Celkove je redukovaný obsah škrobu v asimilačných pletivách. Príčinou alebo dôsledkom porušenia metabolizmu sacharidov je aj zmena v procese fotosyntézy. Celková fixácia CO₂ je znížená, zvyšuje sa respirácia (HAVRANEK et al. 1989). Zmenšená intenzita fotosyntézy sa následne prejaví redukciou rastu a znížené množstvo sacharidov v asimilačných orgánoch, znižovaním odolnosti drevín voči mrazu (FRIEND et al. 1992). Všetky uvedené negatívne odozvy drevín na ozón boli sledované prevažne na sadenicích ihličnanov rodu Picea a Pinus v kontrolovaných podmienkach. SAMUELSON A EDWARDS (1993) uskutočnili experimenty s dubom,

pričom zistili, že sadenice boli menej citlivé na pôsobenie ozónu, než 30-ročné jedince. Najcitlivejšie reagovala ich najnižšia korunová úroveň, kde nižšia teplota a väčšia vlhkosť spôsobuje väčšie otvorenie prieduchov, a tým možný vyšší príjem O_3 . Z výsledkov vyplýva, že citlivosť asimilačných orgánov drevín na ozón závisí od fyziologického veku jedinca, ako aj od veľkosti a umiestnenia listov v korune (ŠABLATÚROVÁ 1994). Hraničné hodnoty pre asimilačné orgány rastlín udávame v tab.6.

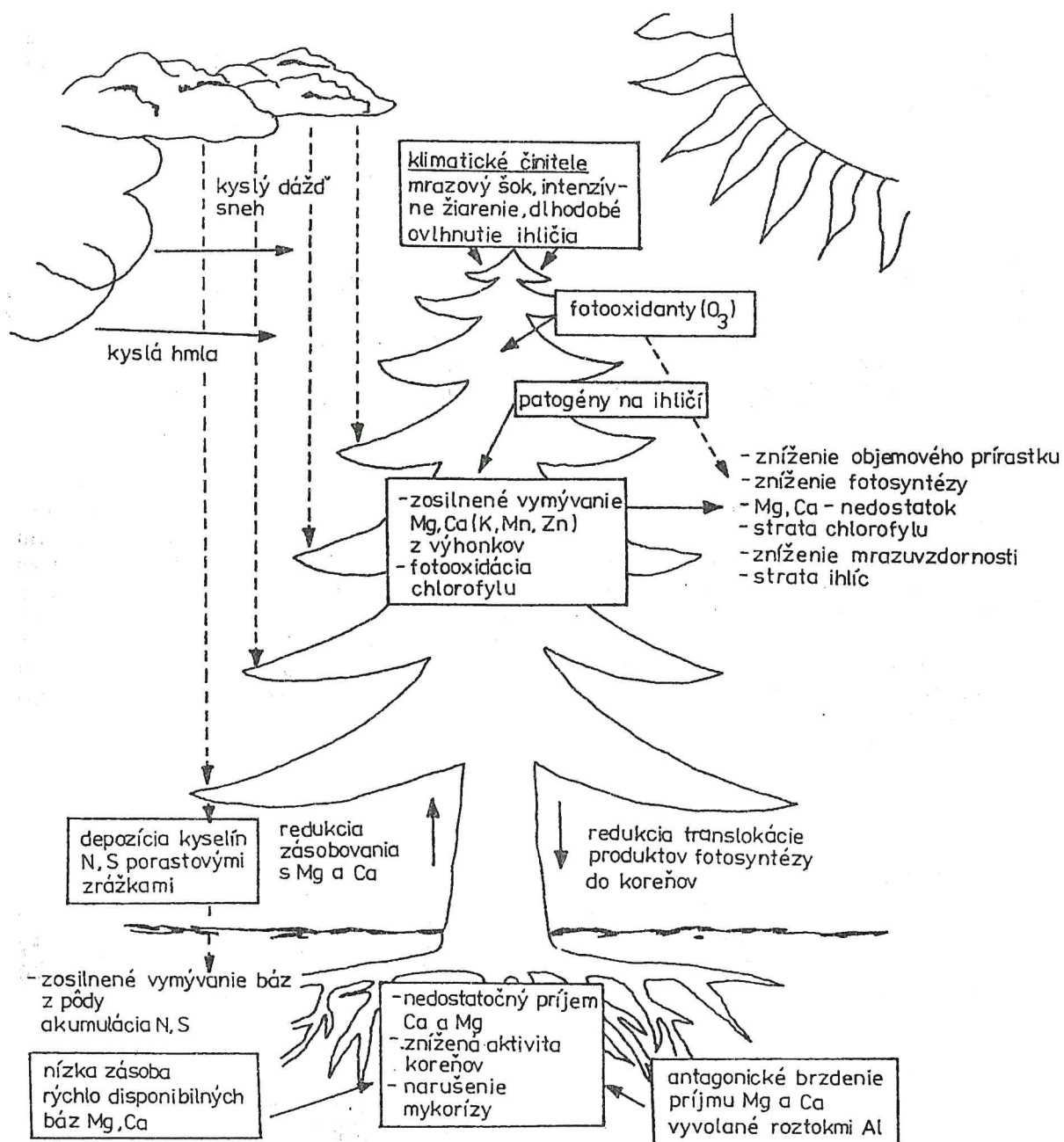
Tab.6. Hraničné hodnoty O_3 pre vegetáciu.
Critical levels of O_3 for vegetation (VDI 1989)

Stupeň rezistencie	0.5h	2h	4h	8h
Veľká citlivosť	150 ppb	60 ppb	50 ppb	40 ppb
Citlivosť	250 ppb	125 ppb	100 ppb	85 ppb
Malá citlivosť	500 ppb	200 ppb	175 ppb	150 ppb

Začiatkom 80. rokov značná časť autorov považuje ozón na základe severoamerických poznatkov za najvýznamnejšiu škodlivinu pre lesnú vegetáciu. Dnešné skúsenosti z európskych pokusov sú rozporné. Podľa KRAUSEHO (ex SMIDT et al. 1990) sa na smreku obyčajnom a na jedli bielej neprejavili charakteristické poškodenia ihlíc, sledované na koniferoch v USA. Pri dlhodobom (6-týždňov) zaplynovaní smreka a buka koncentráciami 75 ppb O_3 sa prejavili negatívne fyziologické reakcie (PRINZ et al. 1985). HÄSLEROVI et al. (1991) sa neprejavila spojitosť medzi fotosyntézou smreka a epizodickým vysokými koncentráciami O_3 . VDI (1989) hodnotí smrek a buk ako dreviny "málo citlivé". FLÜCKINGER - BRAUN - LEONARDI et al. (1989) na pokusných sadenicích buka lesného zistili signifikantné zníženie rastu nových výhonkov a jemných koreňov, zvýšený výdaj vody, ako aj silne redukovanú mrazuvzdornosť. Výrazné fyziologické účinky ozónu sa prejavili na niektorých listnatých drevinách, napr. topole, brezy, jarabina. SMIDT et al. (1990) upozorňujú na veľkú citlivosť smrekovca opadavého na O_3 , ktorý má hojný výskyt práve v zóne najbohatšej na túto škodlivinu (cca 1000 m n.m.).

Ďalším fyziologicky významným fotooxidantom je PAN, ktorého mechanizmus poškodenia je podobný ako má ozón. Jeho účinkami dochádza k brzdeniu syntézy tukov a enzymatickej činnosti. BAUMBACH et al. (1990) uvádzajú z lesných drevín ako najcitlivejšie rody: borovice, topole a duby. GUDERIAN A TINGEY (1987) považujú dreviny za menej citlivé voči PAN v porovnaní s poľnohospodárskymi plodinami. Ako hraničná hodnota sa uvádza 10 ppb / 8 h. Pokiaľ ide o účinky peroxidov, výskumy na sadenicích buka a smreka zaťažených simulovanou hmlou (2.5 ppm H_2O_2) ukázali na pokles hrúbky listov, medzibunkových priestorov, zväčšenie prieduchov, ktoré viedli k vodnému stresu a redukovanej fotosyntéze (Masuch et al. 1985).

Posledné poznatky poukazujú na skutočnosť, že samotné vysoké koncentrácie fotooxidantov ešte nemusia vyvolať viditeľné prejavy poškodenia našich domácich drevín (smrek, jedľa, buk). Synergické spolupôsobenie ozónu a iných stresujúcich podmienok (obr.9), (pôdna výživa, sucho, mraz, vstup škodlivín kyslými zrážkami a pod.) sa dnes javí ako veľmi významné a v niektorých prípadoch aj experimentmi dokázané (REHFUESS 1991). Obr.9 podáva informáciu o možnom postavení a úlohe fotooxidantov pri poškodzovaní ekosystémov horských lesov.



Obr.9. Poškodzovanie lesných ekosystémov dnes i v budúcnosti je výsledkom spoločného pôsobenia mnohých faktorov - hypotéza sformulovaná REHFUESSOM A BOSCHOM (1986)
Decline of forest ecosystems at the present and future time is of result of common influence of many factors - hypothesis formulated by REHFUESS and BOSCH (1986)

3.2.2. Lesné pôdy

Pôdne procesy spolu s fotosyntézou sú dominantným fenoménom z hľadiska produkcie biomasy, kolobehu živín a následných fyziologických dejov v lesných spoločenstvách. Je takmer isté, že očakávané regionálne klimatické zmeny sa prejavajú aj v ovplyvnení pôdných procesov a následne aj lesných drevín, ktoré sú s nimi úzko zviazané. Pri úvahách o očakávaných zmenách v pôdnom prostredí možno hovoriť o týchto oblastiach potenciálneho vplyvu globálnych zmien:

- zmeny režimu pôdnej vlhkosti a jeho fyziologické aspekty
- zmeny dynamiky kolobehu živín v pôde
- bilančné zmeny uhlíkového a dusíkového cyklu.

Vlhkostný režim lesných pôd je najmä v oblastiach nižších lesných vegetačných stupňov na Slovensku často limitujúcim faktorom fyziologických procesov lesných drevín pôsobiacim až inhibične na ich životné prejavy. Z tohto hľadiska sú veľmi poučné poznatky zo 70. a 80. rokov, kedy pri absencii dostatočného množstva atmosférických zrážok a vysokej potenciálnej evapotranspirácii došlo k výskytu dlhších období s fyziologicky nepriaznivým vlhkostným stavom pôdy. Táto skutočnosť sa veľmi negatívne prejavila na zdravotnom stave dubových porastov a spolu s ďalšími biotickými faktormi sa výrazne podieľala na "hromadnom odumieraní dubov" (Kocián 1987).

Doterajšie predpoklady zmien vodnej bilancie na Slovensku naznačujú, že najnepriaznivejšia bude situácia v nížinných a pahorkatinných oblastiach (LAPIN, ŠIPÖCZ 1991), t.j. oblasti 1.-3. lesného vegetačného stupňa s prevládajúcim výskytom dubov a buka. Táto skutočnosť bude mať nepriaznivý vplyv na presychanie pôd najmä v rade D (karbonáty), čo môže viesť k deštrukcii lesa s nástupom stepných krovinných a bylinných druhov.

Sprievodným znakom celkového zvyšovania teplôt vzduchu bude aj postupné zvyšovanie teploty pôdy, s ktorou sú veľmi tesne zviazané procesy kolobehu uhlíka, t.j. pôdnej respirácie. CRILL (1991) ukázal, že emisie CO₂ z pôdy a oxidácia metánu sa zvyšuje s pôdnou teplotou. Oteplenie o 2 - 4 °C by mohlo zvýšiť pôdnu respiráciu cca o 15 - 32 % (pri nezmenenom množstve zrážok), nedostatok pôdnej vlhky by mohol tok CO₂ z pôdy inhibovať (LUXMOORE et al. 1993). Pôdna respirácia sa môže zvyšovať nielen ako priamy dôsledok zvýšenia teploty pôdy, ale aj nepriamo aktivizáciou mikrobiálnej činnosti zvýšeným "hnojením CO₂" a zrýchlením kolobehu živín. Zásoba uhlíka v pôde je približne 2 - krát taká ako v atmosfére (JARVIS ex LUXMOORE 1993), takže aj malé zvýšenie mikrobiálnej aktivity môže mať veľké dôsledky na atmosférický CO₂. Otáznou zostáva celková zmena humusového režimu pôd pri zvýšení teplôt pôdy a predpokladanom vývoji atmosférických depozícií a celkového kolobehu dusíka.

Podľa ŠÁLYHO (1987) sa najvyššie realizovaná úrodnosť - produkcia - dosahuje pri poľnohospodárskych plodinách u nás v najnižšie položených oblastiach s najvyššou teplotou a najväčšou dĺžkou vegetačného obdobia. Najvyššia produkcia našich hlavných drevín (sm, jd, bk, db) dosahuje sa v živnom rade B, prípadne v prechodnom rade B/C na rozhraní 4. a 5. lesného vegetačného stupňa. Ide teda o polohy vo výške 700 - 900 m n.m., s pôdami stredne až dobre zásobenými živinami, s mierne kyslou reakciou. Hlavná príčina tohoto sa vidí v priaznivej vlhkosti pôd, v dostatku vody. Napr. aj v rastových tabuľkách (HALAJ - ŘEHÁK 1979) sa tvrdí, že z hľadiska stanovišťa zásobovú úroveň porastov ovplyvňuje predovšetkým vodný režim, ako aj priaznivý fyzikálny stav týchto vyššie položených pôd.

Doplňujúce potvrdenia o väzbe najproduktnejších porastov na chladnejšie a vlhkejšie pôdy vidno i z údajov GREGUŠA (ex ŠÁLY 1987), ktorý uvádza, že v SR v dvoch výškových pásmach, od 500 do 1000 m n.m., nachádza sa u nás 58 % porastových zásob. Pokiaľ ide o väzbu zásob na expozíciu, pri 8. uvažovaných expozíciách sa na troch najchladnejších z nich (S, SV, SZ), a teda aj na relatívne vlhkejších, hlbších a kyprejších pôdach nachádza 40 % zásob.

Za predpokladu možných posunov ekologických podmienok smerom nahor (vzrast teploty, znižovanie pôdnej vlhkosti) možno uvažovať aj s istým posunom tohto produkčného optima do vyšších nadmorských výšok, kde sa v súčasnosti nachádzajú o niečo kyslejšie a sčasti aj podzolované pôdy, ale fyzikálne rovnako priaznivé. Pravda možný teplotný efekt môže prispieť k dynamizácii kolobehu živín a priaznivejšiemu rozkladu humusu, čo v spojitosti s možným efektom zvýšenej koncentrácie CO₂ môže priniesť aj zvýšený produkčný efekt za predpokladu ak drevinové zloženie a celková stabilita lesných ekosystémov budú v súlade so zmenenými ekologickými podmienkami.

3.3 Škodlivé činitele

Výskyt biotických škodcov je viazaný na určité ekologické podmienky a zväčša ich môžeme geograficky lokalizovať do areálov. Na našom území môžeme vylišovať ich horné a dolné hranice výskytu. S uvažovaním o možnom posune ekologických podmienok dôjde zrejme aj k zmene areálov výskytu škodcov. Prítom iba na dolnej hranici ich výskytu budú tieto zmeny negatívne, na ich hornej hranici sa ich podmienky budú zlepšovať podobne, ako aj rastlinných druhov. Na rozdiel od lesných drevín, kde vek jednej generácie je rádovo 100 rokov, budú škodcovia veľmi pružne reagovať na klimatické zmeny nakoľko za 2-3 desaťročia sa vystrieda veľké množstvo generácií a prirodzenou selekciou sa budú veľmi pružne adaptovať na meniace sa podmienky prostredia (HEDDEN ex KRÄUCHI 1993). Vyššie zimné teploty môžu potenciálne zvýšiť prezimovanie druhov a prispievať tak k následným populačným zmenám (PORTER ex KRÄUCHI 1991). MRKVA (1993) poukazuje na možné urýchlenie vývoja hmyzu, skrátenie diapauzy a v niektorých prípadoch k vzniku viacerých generácií, čo všetko významne ovplyvňuje populačnú dynamiku hmyzu a vedie k hmyzím gradáciám a vznikom pandémie. Veľkou neznámou však zostáva úloha predátorov a parazitov škodcov, resp. invázia nových druhov, či transformácia dovtedy indiferentných druhov na kalamičných škodcov drevín (príkladom môže byť *Scolytus intricatus*, ktorého škodlivosť v dubových porastoch významne vzrástla v suchých rokoch v spojitosti s "hromadným odumieraním duba") a ich vzájomné interakcie. Dlhodobé periódy sucha môžu viesť pri väčšine drevín k oslabeniu obranného potenciálu a následnému odštartovaniu fáz vyčerpania a nástupu mortality za významného spolupôsobenia hmyzích škodcov.

Ďalší škodcovia, ako napr. hrdze, huby, plesne a iné, budú pravdepodobne priamo závislé na pozitívnych, resp. negatívnych väzbách vo vzťahu k teplotným a vlhkostným zmenám v tom ktorom roku (KRÄUCHI 1993).

V súvislosti s narastajúcim významom prirodzenej obnovy lesných porastov je potrebné poukázať na dnešné značné škody na náletoch a kultúrach drevín spôsobených zverou (najmä jelenou a srnčou). Súčasné vysoké stavy zveri spôsobujú, že zver nespotrebovávajú prebytok biomasy, ale ich konzumácia ohrozuje nielen súčasný stav lesa, ale dokonca i existenciu budúcich transformovaných lesných ekosystémov.

Vzhľadom na neexistenciu scenárov vývoja extrémnych javov počasia (silné vetry, extrémne periódy sucha a horúčav, náhle poklesy teplôt, výskyt periód kladných teplôt v zimnom období a pod.) boli by unáhlené akékoľvek predbežné úvahy o potenciálnom vplyve týchto abiotických škodlivých činiteľov na lesy.

3.4 Les ako zdroj a sink skleníkových plynov

Les ako klimaxové vývojové štádium biologických spoločenstiev predstavuje významný článok väčšiny biogeochemických cyklov. Mimoriadny význam zohráva les v uhlíkovom a dusíkovom cykle, súčasťou ktorého sú aj niektoré skleníkové plyny, a to najmä CO_2 , CH_4 , N_2O , nepriamo aj CO a NO_x . Vzhľadom na neustály nárast koncentrácií skleníkových plynov v atmosfére je veľmi potrebné sledovanie ich bilancii v lesných ekosystémoch a ich možné antropické ovplyvňovanie. Z pohľadu emisie či spotreby skleníkových plynov lesnými spoločenstvami sú najdôležitejšie tieto procesy: (+ viazanie, resp. spotreba, sink; - produkcia, resp. emisia)

- CO_2 - fyziologické a biochemické - fotosyntéza (+)
 - procesy
 - respirácia (-)
 - humifikácia (+)
 - pôdna respirácia (-)
 - antropické vplyvy - lesné požiare a spaľovanie biomasy (-)
 - trvalé odlesnenie (-)
 - zalesnenie nelesných pôd (+)
 - ťažba drevnej hmoty nad rámec výšky prírastku drevnej hmoty (-)
 - holorubné hospodárenie (-)
 - fixácia uhlíka vo výrobkoch z dreva (nábytok, papier, stavby) (+)

CH₄ - biochemické procesy - anaeróbny rozklad organickej hmoty (-)
 - antropické vplyvy - meliorácia (odvodnenie) zamokrených pôd (+)
 - zaplavovanie nových území (-)
 - lesné požiare a spaľovanie biomasy (-)

N₂O - biochemické procesy - nitrifikácia a denitrifikácia
 - antropické vplyvy - lesné požiare a spaľovanie biomasy (-)
 - nevhodné obhospodarovanie lesných pôd (denitrifikácia organickej hmoty v pôde) (-)
 - používanie dusíkatých hnojív (-)
 - atmosférická depozícia N (?)

V súčasnosti (rok 1991) predstavuje celková zásoba drevnej hmoty v lesných porastoch Slovenska 352,2 milióna m³, čo pri cca 50 % obsahu uhlíka predstavuje 140,9 milióna ton viazaného uhlíka. Zaujímavé sú porovnania oproti roku 1950 uvedené v nasledujúcej tabuľke 7:

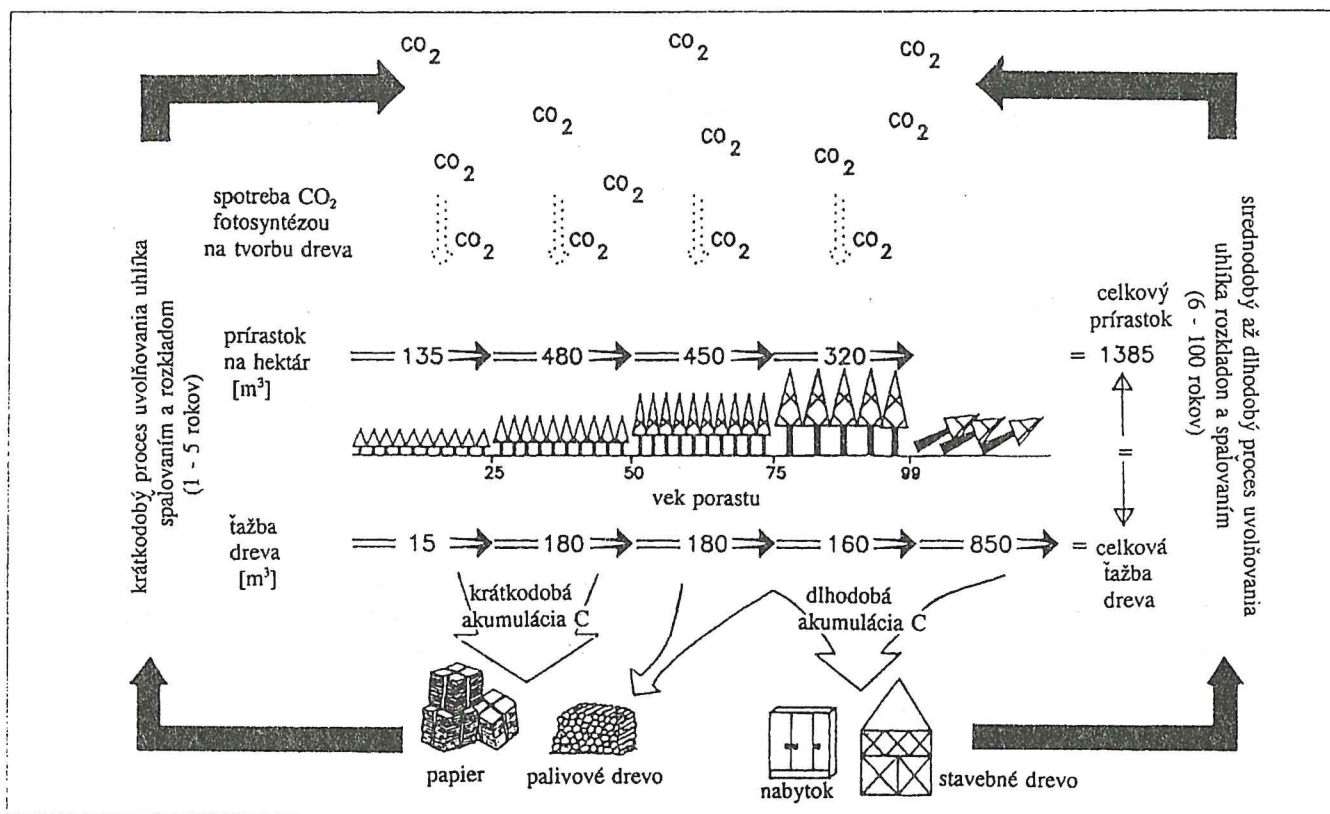
Tab.7. Viazanie uhlíka v lesoch Slovenska
 Carbon fixation in the forests of Slovakia

Rok Year	Výmera lesov Forest area 10 ³ ha	Zásoba dreva Growing stock 10 ⁶ m ³	Zásoba ha m ³ /ha	Viazaný uhlík C - fixed 10 ⁶ ton
1950	1 743	193.5	149	77.4
1991	1 989	352.2	189	140.9
Bilančný rozdiel				+ 63.5

Vidíme, že bilančný rozdiel tu dosiahol hodnotu +63,5 milióna ton viazaného uhlíka. Uvedené údaje sa vzťahujú len na zásoby drevnej hmoty, ak by sme zobrali do úvahy celkovú biomasu stromov (+ korene + asimilačné orgány + tenké konáriky + kôra), tak by sme dostali hodnotu cca 183 miliónov ton C viazaného v biomase lesných drevín (rok 1991). Veľmi významným je v tejto súvislosti množstvo uhlíka viazaného v pôde najmä v zásobách humusu. Ak by sa celoročný objem ťažieb (5.6 mil. m³) realizoval holorubom, potom by sa na vytlačenej ploche zhruba 8 600 ha uvoľnilo rozkladom humusu asi 0.5 - 0.9 milióna ton uhlíka. Uvedené procesy fixácie a uvoľňovania CO₂ v drevnej hmote názorne ilustruje obr. 10 a zároveň poukazuje na možnosti dlhodobej akumulácie uhlíka.

Už len z týchto niekoľkých ilustračných čísel vidíme, že hospodárenie v lesoch môže veľmi signifikantne ovplyvniť bilanciú uhlíka. Z tohto aspektu je veľmi dôležité množstvo vytlačenej drevnej hmoty, a to vo vzťahu k celkovému prírastku (vyrovnanosť bilancie), ako aj k hospodárskemu spôsobu a jeho forme (vplyv na humusový režim pôd). Pre porovnanie uvádzame bilanciú ťažieb a prírastku pre rok 1991:

Prírastok drevnej hmoty r.1991:	9.8 mil.m3	Viazaný uhlík	3.92 mil.ton
Celková ťažba dreva r.1991:	5.6 mil.m3		2.24 mil.ton
Bilančný rozdiel			+ 1.68 mil.ton



Obr.10. Viazanie a uvoľňovanie uhlíka na príklade modelu rúbaňového smrekového lesného porastu s výmerou 100 ha

Fixation and release of carbon as example of model of management of even-aged stand with 100 ha area of Norway spruce (BURSCHEL - WEBER 1993, upravené-modified).

Ak by sme urobili rámcový odhad pre rok 2030 za predpokladu nárastu produkcie o cca 10 % a nárastu výmery lesov o cca 100 tisíc ha (plán zalesnenia nelesných pôd do roku 2000 je cca 50 tisíc ha (BELÁČEK A ZÁLESŇÁK 1994)), tak by hodnota viazaného uhlíka v drevnej hmote predstavovala 174,6 milióna ton (resp. 227 mil. pre celú biomasu stromov), čo by bol bilančný nárast o +33,7 milióna ton viazaného uhlíka v dreve viac oproti roku 1991. Pravda všetky tieto úvahy vychádzajú z predpokladu zachovania produkcie schopných lesných porastov.

S humusovým režimom v pôde je tiež veľmi úzko zviazaný aj kolobeh dusíka, a preto systém hospodárenia v lesoch môže výrazne ovplyvniť aj emisiu dusíka vo forme N_2O pri denitrifikácii nadložného aj pôdneho humusu.

4. NÁVRH PRVÝCH MOŽNÝCH OPATRENÍ V LESNOM HOSPODÁRSTVE NA MINIMALIZÁCIU RIZÍK SPOJENÝCH S VPLYVOM KLIMATIC- KÝCH ZMIEN

Závažnosť skúmaného problému vzhľadom na charakter lesného hospodárstva (dlhodobosť produkcie, vekové rozpätie jednej generácie) nás núti hľadať také možné opatrenia, aby sme zosúladiли funkcie lesa pre potreby ľudí dnes aj v budúcnosti (Pollard 1991). Preto na základe uvedených skutočností by bolo potrebné v najbližšom období začať o týchto opatreniach uvažovať:

- vytvorenie odbornej a informačnej bázy o vplyve globálnych zmien na lesy pre potreby riadiacich orgánov
- zostavenie tematických máp a ďalších dokumentov pre plánovanie cieľových drevinových skladieb pri vypracovávaní lesného hospodárskeho plánu (LHP) pre podmienky očakávaných klimatických zmien
- pri plánovaní drevinového zloženia v porastoch hraničných lvs uprednostnenie zastúpenia vybraných vhodných drevín z nižších lvs
- príprava genetického materiálu pre umelú obnovu do zmenených klimatických podmienok
- urýchlenie premeny smrekových monokultúr v 1. až 5. lvs na zmiešané porasty borovice, duba, buka a ďalších listnáčov
- pri obhospodarovaní lesov zachovávanie čo najväčšiu biodiverzitu lesných spoločenstiev
- zváženie prípadné možnosti zvýšenia fixácie CO₂ prostredníctvom zväčšenia zalesnených plôch, najmä v horských a pod horských oblastiach
- z hľadiska emisií skleníkových plynov (najmä CO₂) zváženie problematiky obmedzenia spaľovania ťažobných zvyškov

5. ZÁVER

Dalšia existencia lesných spoločenstiev je dnes podmienená schopnosťami civilizácie zastaviť negatívne zhoršovanie chemickej klímy. Rozhodujúce riešenia preto zostávajú v rukách politikov a priemyselnej sféry. Napriek tomu by lesnícko-ekologický výskum mal zodpovedne a v predstihu reagovať na očakávané globálne zmeny a ich dôsledky s cieľom pripraviť východiská a alternatívy možných praktických opatrení. Nebolo by rozumné zakrývať si oči pred prvými varovnými signálmi zmien klímy tak, ako to bolo v nedávnej minulosti v prípade imisií.

Na základe zhrnutia doterajších poznatkov môžeme konštatovať nasledujúce možné dôsledky globálnych zmien na lesy Slovenska:

- pri uvažovaní o možných dôsledkoch klimatických zmien na lesné ekosystémy nemožno zanedbať dnešný aj budúci vplyv imisného pôsobenia
- rýchlosť očakávaných klimatických zmien vyvolá také zmeny v lesných ekosystémoch, ktoré tieto nebudú schopné autoregulačne zvládnuť pri zachovaní ich dnešného stavu
- prvé výsledky úvah naznačujú, že najdisponibilnejšími drevinami na ohrozenie globálnymi zmenami budú pravdepodobne smrek a jedľa, najmä na dolnej hranici svojich prirodzených areálov (a mimo nich)
- duby, javory, jaseň a buk sa na základe dnešných poznatkov javia ako relatívne plastické voči predpokladaným zmenám (odolnosť cudzokrajných drevín je v našich podmienkach zatiaľ diskutabilná)
- očakávaná zmena ekologických podmienok súčasných lesných vegetačných stupňov spôsobí pravdepodobne zmeny v ich druhovom zložení
- je veľmi pravdepodobné, že zmenené podmienky vyvolajú markantné zmeny aj v bioprodukcii lesných spoločenstiev
- lesnícka prevádzka by však už v súčasnosti mala upustiť od preferencie smreka a monokultúr, hlavne mimo ich prirodzených areálov a zamerať sa na pestovanie druhovo pestrých zmiešaných porastov, na ktorých je možné predpokladať väčšiu ekologickú plasticitu
- zvážiť potencionálne možnosti fixácie CO₂ lesnými drevinami.

Doposiaľ neboli presne definované komplexnejšie scenáre možných klimatických zmien. V čase keď budú známe, bude už pravdepodobne, pri dlhodobosti lesníckej produkcie, neskoro na praktické kroky. Vážna úloha preto dnes stojí pred komplexným výskumom (lesníckym, klimatologickým, fyziologickým, dendrochronologickým a pod.) tejto problematiky, ktorý by mal byť aj náležite finančne podporený ako jeden z nosných výskumných programov súčasnosti. Taktiež sa ukazuje naliehavým zriadenie určitej koordinačnej skupiny (rady) na úrovni najvyšších riadiacich orgánov Ministerstva pôdohospodárstva s cieľom koordinácie a zabezpečovania trvale udržateľného rozvoja lesného hospodárstva v podmienkach nastupujúcich prejavov globálnych zmien atmosféry.

LITERATÚRA

- BAUMBACH, G. et al.: Luftreinhaltung. Springer-Verlag Berlin, 1990, 431 s.
- BELÁČEK, M.-ZÁLESNÁK, S.: Program zalesňovania poľnohospodárskych nevyužitelných nelesných pôd. Les, 50, č. 7., s. 3-6.
- BERMADINGER, E.-GUTTENBERG, H.-GRILL, D.: Physiology of young Norway spruce. Environ. Pollution 68, (1990), s. 319-330.
- BLATTNÝ, T.-ŠTASTNÝ, T.: Prirodzené rozšírenie lesných drevín na Slovensku. SVPL, Bratislava 1959, 402 s.
- BUCHER, J.: Wirkungen von Ozon auf Waldbäume. 18th IUFRO - World Congress Ljubana, Sept. 1986, Div.2. Vol. 1. s. 306-319.
- BURSCHEL, P.: Das Menetekel - Klimaänderung. AFZ, 45, 1990, s. 255-257.
- BURSCHEL, P.-WEBER, M.: Möglichkeiten der Forst- und Holzwirtschaft zur Abmilderung des Kohlendioxidanstiegs in der Atmosphäre. In: Stiftung Wald in Not, Bonn 1993, s. 16-44.
- CRILL, P.M.: Seasonal patterns of methane uptake and carbondioxide release by a temperate woodland soil. Global Biogeochem. Cycles 5, 1991, s. 319-334.
- EICHHORN, J.-PAAR, U.: Stress in einem stickstoffgesättigten Buchenwaldökosystem. AFZ, 12, 1992, 666 - 668.
- FANTA, J.: Possible impact of change on forested landscapes in Central Europe: a review. Catena Supplement, 22, 1992, s. 133-151.
- FELBERMEIER, B.: Arealveränderungen der Buche infolge von Klimaänderungen. AFZ, 59, 5, 1994, s. 222-224.
- FLÜCKINGER, W.-BRAUN, S.-LEONARDI, S.: Waldschadensbericht. Schönenbuch 1989, 59 s.
- FRIEND, A. L. et al.: Biochemical composition of loblolly pine reflects pollutant exposure. Tree Physiol. 11, 1992, s. 35-47.
- GEHRIG, R.-WUNDERLI, S.: Zusammenhänge zwischen den bodennahen Konzentrationen von PAN und Ozon. In: Schüpbach, E.: Meteorologie und Luftchemie in Waldbeständen. VDF Zürich 1991, s. 169 - 174.
- GRABER, W.: Wetterlagenaufschlüsselung der Spurengase. In: Schüpbach, E.: Meteorologie und Luftchemie in Waldbeständen. VDF Zürich 1991, s. 143 - 168.
- GRASSL, H.: Klimaveränderung durch Spurengase. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 37, 1987, s. 127-133.
- GUDERIAN, R.-TINGEY, D.: Notwendigkeit und Ableitung von Grenzwerten für Stickstoffoxide. Ber. Umweltbundesamt, Berlin, 1/1987.
- HALAJ, J.-ŘEHÁK, J.: Rastové tabuľky hlavných drevín ČSSR. Bratislava, Príroda 1979, 352 s.
- HANČINSKÝ, L.: Lesné typy Slovenska. Príroda, Bratislava 1972, 307 s.
- HAVRANEK, W.M.-WIESER, G.-BODNER, M.: Ozone fumigation of Norway spruce at timberline. Ann. Sci. For. 46, (1989), s. 581-585.
- HÄSLER, R.-SAVIC, C.-GRABER, W.: Episoden starker Luftverschmutzung im Hinblick auf die Gaswechsellmessungen. In: SCHÜPBACH, E.: Meteorologie und Luftchemie in Waldbeständen. VDF Zürich 1991, s. 133 - 142.
- HUBER, B.: Risikoabwägung statt Beweisführung. Stand der Waldschadensforschung in der Schweiz. AFZ, 14, 1992, s. 763-769.
- HUTTUNEN, S.: In project: Impact of elevated UV-B radiation and climate change on forest trees (leaf ultrastructure and function prepare mechanisms under low temperature conditions). Oulu, 1994.
- KÄNDLER, G.: Immissionen und Waldökosysteme - Langfristige Wirkungen. AFZ, 58, 13, 1993, s. 661-665.
- KIMBALL, B.A. et al.: Effects of elevated CO₂ and climate variables on plants. Journal of soil and water conservation, january-february 1993, s. 9 - 14.
- KociÁN, V.: Klimatické pomery a ich vplyv na hromadné hynutie dubov. In: Vedecké práce VÚLH vo Zvolene, 1987, s. 93-103.
- KREČMER, V. et al.: Bioklimatický slovník terminologický a explikativní. Academia, Praha 1980, 242 s.
- KRIPPEL, E.: Postglaciálny vývoj lesov Tatranského národného parku. Biol. Práce, 9, Bratislava, 5, s. 1 - 41.
- KRIPPEL, E.: Postglaciálny vývoj vegetácie Slovenska. Bratislava, Veda, 1986.
- LAMB, H.H.: Climate in the last thousand years: natural climatic fluctuations and change. In: Flohn, H. & Fan techi, R. (eds.) The climate of Europe: past, present and future. Reidel 1984, Dordrecht, s. 25-64.
- LAPIN, M. et al.: Dôsledky možnej klimatickej zmeny na rôzne sektory. Záverečné správy z riešenia projektu NKP ČSFR, Praha, Bratislava 1992, 14 správ.
- LAPIN, M.: Dopady rastúceho skleníkového efektu atmosféry na zmeny charakteristik vlhkosti vzduchu a snehovej pokrývky na Slovensku. In: Dopady klimatických zmien na poľnohospodársku a záhradnícku výrobu. VŠP Nitra, Štúdia XI., SBKS Bratislava 1993, s. 8 - 18.
- LAPIN, M.-ŠÍPÓCZ, M.: Možné dopady predpokladaných zmien klímy na vodnú bilanciú na nížinách Slovenska. Meteorologické zprávy, 44, 1991, s. 79-83.
- LAPIN, M. et al.: Upresnenie alternatívnych scenárov zmien základných klimatických prvkov na Slovensku do r. 2035. Priebežná správa z riešenia projektu NKP SR, SHMÚ Bratislava, 1993, 15 s.
- MASUCH, G.-KETTRUP, A.-MALLANT, R.-SLANINA, J.: Wirkungen von wasserstoffperoxidhaltigen saurem Nebel auf die Laubblätter jungen Buchen (Fagus sylvatica L.). VDI-Berichte, 560, 1985, s. 761-776.
- MATYSSEK R. et al.: Ozonwirkungen auf den verschiedenen Organisationsebenen in Holzpflanzen. Schweiz. Z. Forstwes., 141, 8, 1990, s. 631-651.

- MINDÁŠ, J.: Klimatická charakteristika vertikálneho rozšírenia lesných drevín na Slovensku. [Diplomová práca.] Lesnícka fakulta TU Zvolen, 1992, 40s.
- MINDÁŠ, J.: Rekonštrukcia teplotných pomerov oblasti Vysokých Tatier v holocéne. Meteorologické zprávy, 45, č.5, 1992, s.140-143.
- MINDÁŠ, J.: Klimatické areály rozšírenia lesných drevín vo vzťahu ku klimatickým zmenám. In: Zborník prác zo seminára "Klimatické zmeny a lesní hospodárství" VŠZ Brno 1993, s.83-88.
- MÍCHAL, I.: Ekologická stabilita. MŽP ČR a Veronica, Brno 1992, 244 s.
- MOLDAN, B.: Chemické faktory väzané na atmosféru. In: Dykyjová, D.: Metody studia ekosystémů. Academia, Praha 1989, s. 91-110.
- MOLDAN, B.-LAPIN, M.-NEMEŠOVÁ, I.-SOBÍŠEK, B.: Národní klimatický program ČSFR - Problémy, záměry a cíle. Národní klimatický program ČSFR č. 1., ČHMÚ Praha, 1991, 53 s.
- MOLDAN et al.: Rizika změny klimatu a strategie jejich snížení. Národní klimatický program ČR - svazek 10, ČHMÚ Praha, 1993, 175 s.
- MORRISON, J.I.L.: Intercellular concentration and stomatal response. In: ZEIGER, E. et al.(Eds.): Stomatal functions. University Press, Stanford, CA, 1987, 251s.
- MRÁČEK, Z.-PAŘEZ, J.: Pěstování smrku. SZN Praha, 1986.
- OSSWALD, W. F. et al.: Comparison of enzymatic activities of dehydroascorbic acid reductase, glutathione reductase, catalase, peroxidase and superoxide dismutase of healthy and damaged spruce needles (*Picea abies* (L.) Karst.). J. Plant Physiol. Vol. 139, (1992), s.724-748.
- POLLARD, D.F.W.: Forestry in British Columbia: Planning for future climate today. The Forestry Chronicle, vol.67, No.4, 1991, p.336-341.
- PRINZ, B.-KRAUSE, G.H.-JUNG, K.D.: Untersuchungen zur Problematik der Waldschäden. Kolloquium der EVS, Stuttgart-Hohenheim, 1985.
- RAČKO, et al.: Zdravotný stav lesov Slovenska. Monitoring zdravotného stavu lesov. [Záverečná správa.] LVÚ Zvolen, 1993.
- REHFUESS, K.E.: Waldschädensforschung im Nationalpark Bayerischer Wald. In: Expertentagung "Waldschädensforschung im östlichen Mitteleuropa und in Bayern", ed: Reuther, M. et al., 13. - 15. 11. 1990 in Schloß Neuburg / Inn bei Passau 1991 a, GSF-Bericht 24/91, s. 120-142.
- REHFUESS, K.E.-BOSCH, CHR.: Experimentelle Untersuchungen zur Erkrankung der Fichte auf sauren Böden der Hochlagen: Arbeitshypothese und Versuchsplan. Forstw. Cbl., 105, 1986, s. 201-206.
- ROLOFF, A.: Mögliche Auswirkungen des Treibhauseffektes auf die Konkurrenzsituation in Waldökosystemen. Forstarchiv, 63, 1992, s. 4-10.
- SAMUELSON, L.J.-EDWARDS, G.S.: A comparison of sensitivity to ozone in seedlings and trees of *Qercus rubra* L. New Phytol. 125, (1993), s.373-379.
- SHITTENHELM, J.-WESTPHAL, S.-TODER, S.-WAGNER, E.: Das antioxidative System der Fichte: Einfluß von verschiedenen Stressfaktoren. Forstw. Cbl. 112, (1993), s.240-250.
- SLADKOVIC, R.: Observation of the climatological-hygienic conditions in the Bavarian Alps. In: Mountainous meteorology, climatology and aerology of the lower layers of troposphere, Proceedings of the International Conference Stará Lesná, 26 -30 August 1991, Edited by I. Panenka, Bratislava 1991, p.150-158.
- SMIDT, S.-GABLER, K.-PUXBAUM, H.: Die Zeitliche und vertikale Zunahme der Ozonkonzentration. Österreichische Forstzeitung, 7, 1990.
- STIFTUNG WALD IN NOT: Treibhauseffekt und Wald. Selbstverlag, Bonn 1990, 48 s.
- ŠABLATÚROVÁ, E.: Fyziologické aspekty poškodenia lesných drevín vplyvom ozónu. LVÚ Zvolen, 1994, nepublikované.
- ŠÁLY, R.: Úrodnosť lesných pôd a jej ohrozenie v súčasnosti. In: Problematika lesných ekosystémov ohrozených imísiami v SSR. Zborník z odborného podujatia "Tvorba a ochrana ŽP", Banská Bystrica, jún 1987, s.20-26.
- ŠINDELÁŘ, J.: Má smrč ztepilý za předpokladu změny klimatu v budoucnu (skleníkový efekt) v lesním hospodářství ČR perspektivy? Zprávy lesnického výzkumu, 39, 1, 1994, s.11-14.
- ŠKVARENINA, J.-MÍHALÍK, A.: Comparison of deposition rates of selected elements from open field precipitations in Slovakia and in western and central Europe. In: Ekologická stabilita, diverzita a produktivita lesných ekosystémov, Zvolen, ÚEL SAV, 28.-29. 9. 1993, (in print).
- ŠKVARENINA, J.-MINDÁŠ, J.: Reflection on weather conditions in the chemism of horizontal fog / cloud precipitation in the region of mountainous forest. In: Mountainous meteorology, climatology and aerology of the lower layers of troposphere, Proceedings of the International Conference Stará Lesná, 26 -30 August 1991, Edited by I. Panenka, Bratislava 1991, p.245 - 251.
- TESAŘ, V.: Základní představy o nutných systémových změnách lesního hospodářství v důsledku globálních změn klimatu. In: Zborník prác zo seminára "Klimatické zmeny a lesní hospodárství" VŠZ Brno 1993, s.77-82.
- VDI: Verein Deutsche Ingenieure, Richtlinien 2310, 1989, Blatt 6.
- ZÁVODSKÁ, E.: Předpokladané zmeny prízemného ozónu v Strednej Európe. In: Zborník prác zo seminára "Klimatické zmeny a lesní hospodárství" VŠZ Brno 1993, s.58-64.
- ZÁVODSKÝ, D.-ZÁVODSKÁ, E.: Kvalita ovzdušia a zmeny klímy. NKP ČSFR, ČHMÚ Praha 1992, s. 4-50.

**NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM
SLOVENSKEJ REPUBLIKY**

**NATIONAL CLIMATE PROGRAMME
OF THE SLOVAK REPUBLIC**

**SPOĽAHLIVOSŤ
DLHODOBÝCH KLIMATICKÝCH
ZÁZNAMOV
Z HĽADISKA VPLYVU
ĽUDSKÉHO FAKTORA
V POZOROVACOM PROCES
A HISTÓRIA POZOROVANÍ
NA VYBRANÝCH KLIMATICKÝCH
STANICIACH SLOVENSKA
(Krátené *)**

Riešiteľ:	Ing. Radoslav Tihlárík, Stavebná fakulta STU, Bratislava, Katedra vodného hospodárstva krajiny
Projekt:	MŽP SR Výskum zmien kvality ovzdušia, klimatické zmeny a narušovanie ochranných vlastností atmosféry - NKP SR
Zadávatel:	MŽP SR
Lektor:	RNDr. Elena Nieplová, CSc., Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava

* Okrem skrátenia textu sú v appendixe vynechané niektoré obrázky, na ktoré sa text odvoláva. Neskrátená verzia práce je dostupná na vyžiadanie v centre Národného klimatického programu SR na Slovenskom hydrometeorologickom ústave ako správa Národného klimatického programu SR s totožným názvom.

BRATISLAVA 1994

SUMMARY

The reliability of climatological records is affected by measuring errors. In brief, it is possible to divide measuring errors into two basic groups: (I) systematic errors - due to specific properties of measuring instruments linked up with natural conditions and human factors, (II) random errors - predominantly due to human factors, but also caused by natural influences (environmental changes - growing or cutting screening trees, movement, exchange or failure of instruments, new buildings, etc.), the duration, range and influence of which are difficult to determine for various reasons. Human factors have (i) a social aspect - wars, changes in social systems, economic conditions, etc., as well as (ii) an individual aspect - the reliability of observers and the variability of reliability in time.

The aim of this article is to judge the range of reliability of climate records affected by random errors. Attention is paid to random errors due to human factors with an emphasis placed on an individual character.

Yearly temperatures, precipitation totals and wind speed compiled over a long period of time from six climatological stations in the mountainous region of the High Tatras in the northern part of Slovakia have been analysed. The stations are: *Starý Smokovec* (from June 1875), *Oravský Podzámok* (from January 1871), *Spišská Nová Ves* (from January 1872, together with parallel army measurements from January 1941 - June 1952), *Liptovský Hrádok* (from May 1881), *Tatranská Lomnica* (from July 1897) and *Poprad* (from February 1908). The time period for the collection of data ran from the above dates until 1960.

Data and information used in this study were directly copied by the author from historical record books in the archives of the Slovak Hydro-Meteorological Institute (SHMU). Changes of observer and all other discovered information important for analysis were noted.

A strong discrepancy could be caused by the use of daily observation times at 6⁰⁰-14⁰⁰-22⁰⁰ (B) in Oravský Podzámok till 1888; only then were regular observation times at 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰ (A) introduced. No clear information on observation times before 1888 exists in other records; subsequently (if introduced), they were of type A. The climatological stations on Slovak territory during the mentioned period belonged to the state administration of the Austro-Hungarian Empire, and it is possible to assume the similarity of observation times in other stations.

Changes in daily observation times seem to be a significant problem in general. There is no evidence in the records as to which time zone was used, i.e., local or Central European. Only in the record book of *Starý Smokovec* appeared two notices about possible local time shifts of 30 (1919) and 21 minutes (1920) with respect to Central European Time. Is it just an unusual coincidence or does it partly reveal the origin of a significant positive temperature trend that began just after a strong negative deviation in 1888 and lasts till ca. 1935? Both deviation and trend are very evident at 17 Central European stations (Brázdil, 1991) and on the course of land air temperature of the Northern Hemisphere (Jones, Hansen and Lebedeff, Vinikov 1990).

Further, when testing the correctness of the calculation for average monthly values, some irregularities have been found. For instance, randomly selected monthly temperatures in *Poprad* showed errors above $|0,05 \div 0,10^{\circ}\text{C}|$ during 1925-29. Likewise, corrections of primary daily observations have been found. They reach up to 20 mm of precipitation per month in *Spišská Nová Ves* (November 1903) and *Liptovský Hrádok* (1952-60). A lot of original notes made by observers or inspectors in the record books also exist. They mention problems such as leaking rain gauges, white paint eroded from a meteorological screen, broken thermometers, and the unreliability of observers.

The relationship between changes in observers and fluctuations in mean yearly temperature, precipitation and wind speed has been proved significant. Many changes of observer or station administrator have affected data consistency more than a station displacement. That is unfortunately very identifiable on wind speed courses (Fig. 7, Fig. A-8 to Fig. A-13). The most likely reason is that generally wind speed had not been measured, but assessed (in Beaufort degrees) either subjectively or with the help of Wild's weather cock. Because wind speed courses have shown excessively high inhomogenities, they have been excluded from the detailed analysis.

Also, the range of similarity, calculated separately for both precipitation and temperature courses, in all station combinations has been tested. The method of Pearson correlation for moving cross-correlation coefficients was applied for a 10-year period (in case of missing values, a minimal six pairs of values for each correlation coefficient were required) A diagram of the method is shown on Fig. 5.

Comparison of all cross-correlation courses facilitated the identification of time sections with evident data discrepancies, and consequently, determining those stations which evoked the discrepancies (compare

correlation courses from Fig. A-15 to Fig. A-18). These figures demonstrate that the beginning, extent and disappearance of discrepancies are well-connected with changes in the observer.

The values which give rise to discrepancies have been excluded from the original data set; therefore, a second reduced data set has been obtained. The regional standardised yearly anomalies of temperature and precipitation separately for both original and reduced data sets have been calculated. The following method has been used: the data from each station was standardised according to formula $x_{i\text{stand}} = (x_i - \bar{x}) / \sigma$, where σ is the standard deviation. After that, the regional yearly averages from all stations were computed. The same has been repeated for the reduced data set. Finally, a comparison of both reduced and original data sets could be made. Results are shown in Fig. 14. It is interesting that precipitation courses have the same trends; on the other hand, temperature trends are significantly different.

The results shown in Fig. 14 should be understood as an illustration of the potential disturbances in data that could be due to human factors or other mentioned imperfection in the measuring process. However, these disturbances could overlap the real climate variability and the systematic errors too.

In general, the results should improve estimating the information standard of developed data and the interpretation possibilities of any other analyses. They also demonstrate the best reliability of the observations from the period 1921-60 in *Starý Smokovec* (observer - František Berkovský).

LIST OF FIGURES AND TABLES:

- Fig. 1. Climatological stations in Slovakia established during 1852-1950.
- Fig. 2. Differences (°C) in long-term monthly mean temperatures in Poprad and Zakopane caused by different observation time-limits (A-B) during 1951-60.
- Fig. 3. Gradual growth of synchronisation during the course of yearly precipitation totals (mm) from World War II.
- Fig. 4. Diagram for the analysis of data reliability.
- Fig. 5. Diagram of applied correlation method. Ten-year moving cross-correlation of x_i and y_i samples with one-year step has been used.
- Fig. 7. Comparison of mean yearly wind force (in Beaufort scale).
- Fig. 9. Relationship between the station altitude and $\Delta t = A - B$ (A: 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰, B: 6⁰⁰-14⁰⁰-22⁰⁰) during 1951-60.
- Fig. 10. Comparison of yearly precipitation totals (mm). The periods that are well synchronised are marked by underlying shaded areas.
- Fig. 11. Comparison of mean yearly temperatures (°C).
- Fig. 12. Temperature trends (°C) calculated from original data sets.
- Fig. 13. Precipitation trends (mm) calculated from original data sets.
- Fig. 14. Comparison of reduced and original data sets. Values represent standardised regional yearly anomalies of temperature and precipitation.
- Fig. 15. Hierarchical cluster analysis for reduced and original data sets. The distance metric is the Pearson correlation coefficient. Average linkage method has been applied.
- Fig. A-1, Fig. A-2. Structure of original data. Missing points represent missing monthly values of (from top) precipitation totals, temperature and wind speed. The first line represents January, the second February, etc.
- Fig. A-8 to Fig. A-13 The relationship between fluctuation in variables and changes in observers or some other events (movement or exchange of instruments, etc.). Variables are standardised according to formula $module_i = x_i / \bar{x}$ (variables from top: yearly wind speed, precipitation totals and temperatures).
- Fig. A-15. Mean yearly temperatures - 10-year moving cross correlation, original data sets.
- Fig. A-16. Mean yearly temperatures - 10-year moving cross correlation, reduced data sets.
- Fig. A-17. Mean yearly precipitation sums - 10-year moving cross correlation, original data sets.
- Fig. A-18. Mean yearly precipitation sums - 10-year moving cross correlation, reduced data sets.
- Tab. 1. Differences (°C) in long-term monthly mean temperatures caused by different observation times $\Delta t = A - B$ (A: 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰, B: 6⁰⁰-14⁰⁰-22⁰⁰) for the period 1951-60.
- Tab. 2. Temperature trends extrapolated on common period 1870-1969.
- Tab. 3. Precipitation trends extrapolated on common period 1870-1969.
- Tab. 4. Trends of standardised and regionalised temperature and precipitation extrapolated during common period 1870-69.
- Tab. At-1. Excerpts of monthly precipitation and temperature values used in the analysis; excluded values are marked by the symbol #.

1. ÚVOD

Spôľahlivosť klimatických záznamov je ovplyvňovaná meracími chybami, ktoré sa dajú v stručnosti rozdeliť na: (I) chyby systematické, indukované najmä špecifickými vlastnosťami meracích prístrojov v spojitosti s prírodnými podmienkami a ľudským faktorom, tieto chyby sú zväčša determinovateľné, (II) chyby náhodné, indukované prevažne vplyvom ľudského faktora, ale aj prírodnými vplyvmi, vznikajú postupne alebo náhle (environmentálne zmeny - výstavba, rast alebo výrub tieniacich stromov; prístrojové zmeny - sťahovanie, výmena, porucha; zmeny pozorovacích pravidiel, atď.), ich trvanie, rozsah a mieru je z rozličných dôvodov ťažké determinovať. Ľudský faktor má (i) sociálny aspekt - vojny, zmeny spoločenských systémov, ekonomických pomerov, atď. a (ii) individuálny aspekt - spoľahlivosť pozorovateľov a variabilita ich spoľahlivosti v čase.

Táto práca sa zameriava na posúdenie spoľahlivosti záznamov teplôt, úhrnov zrážok a rýchlostí vetra v ročnom chode z hľadiska vplyvu náhodných chýb spôsobených ľudským faktorom s dôrazom na individuálny aspekt. Sú tu analyzované údaje zo 6 klimatických staníc v oblasti Tatier s dlhodobými pozorovaniami. Je tu tiež uvedená stručná história pozorovaní na týchto staniciach a analýza trendov vývoja posudzovaných klimatických charakteristík.

2. VÝBER REGIÓNU, KLIMATICKÝCH STANÍC A POZOROVACÍCH OBDOBÍ

Pri výbere oblasti, z ktorej by sa dali čerpať vstupné údaje a ktorá by zároveň bola dostatočne reprezentatívna pre posudzovanie spoľahlivosti, rozhodovali najmä tieto kritériá:

- ☐ čo najväčšia dĺžka pozorovaní,
- ☐ čo najnižšie ovplyvnenie antropogénnymi environmentálnymi aktivitami,
- ☐ predpoklad dobrého odrazu globálnych klimatických fluktuácií (teploty, zrážky).

Ukázalo sa, že predpoklad najlepšieho prieniku uvedených kritérií ponúka oblasť Vysokých Tatier: (i) je relatívne najmenej zasiahnutá antropogénnymi vplyvmi, (ii) je tu najvyššia hustota staníc s dlhodobými pozorovaniami na Slovensku (obr.1), navyše v relatívne homogénnych podmienkach z hľadiska environmentálnych zmien, (iii) dá sa tu tiež predpokladať dobrý odraz globálnych klimatických fluktuácií (teplota vzduchu, zrážky) a má značný hydrologický význam z hľadiska odtoku.

Po rozhodnutí spracovávať túto oblasť boli v archívoch SHMÚ autorom práce preštudované dostupné výkazy meteorologických pozorovaní 13-tich klimatických staníc z oblasti Tatier s najdlhšími pozorovaniami. Boli evidované všetky vo výkazoch uvedené, či inak získané doplnkové informácie. išlo o mená pozorovateľov a ich výmenu, zmeny prístrojov, záznamy revízorov, informácie najrozličnejšieho typu uvádzané pozorovateľmi, taktiež subjektívny dojem z kvality výkazov pozorovaní, atď. Informácie boli získavané aj konzultáciami s pamätníkmi, napríklad s Dr. Štefanom Petrovičom, ktorý ako revízor dôverne poznal situáciu na staniciach v tejto oblasti už na začiatku 40-tych rokov, mnohé zo staníc aj zakladal.

Na základe získaných informácií bolo z týchto staníc vybraných 6+1 na podrobné spracovanie. Kritériom výberu bola najmä predbežne odhadnutá kvalita výkazov pozorovaní a dĺžka pozorovaní. Údaje z týchto staníc boli autorom opäť osobne vypisované z originálnych historických výkazov meteorologických pozorovaní. Ide o tieto stanice (obr.1):

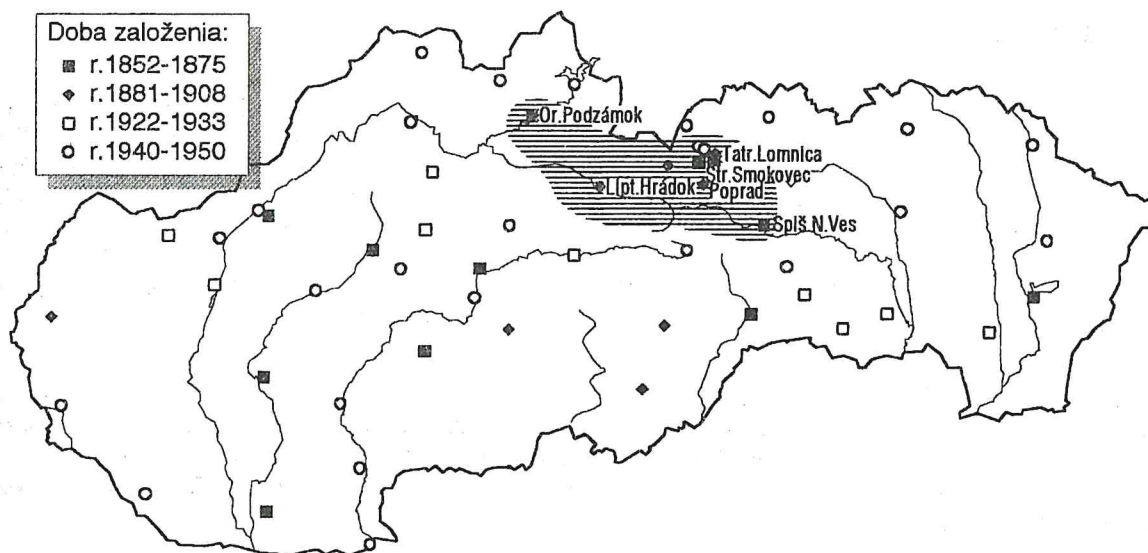
Oravský Podzámok	1.1. 1871 - 31.12. 1960,	Starý Smokovec	1.6. 1875 - 31.12. 1960,
Liptovský Hrádok	1.5. 1881 - 31.12. 1960,	Tatranská Lomnica	1.7. 1897 - 31.12. 1960,
Poprad	1.2. 1908 - 31.12. 1960,		
Spišská Nová Ves	1.1. 1872 - 31.12. 1960 + (paralelná vojenská st.		1.1. 1941 - 30. 6. 1952),

Horný časový limit je obmedzený rokom 1960 z viacerých dôvodov, najmä však preto, že údaje od roku 1961 sú archivované v počítačovej databáze SHMÚ. Na niektorých staniciach tiež v tejto dobe alebo krátko po nej, ukončili pozorovania, respektíve ich presťahovali.

Ako vstupné údaje pre analýzu boli zvolené tieto základné klimatické charakteristiky:

- ročné úhrny zrážok ● priemerné ročné teploty vzduchu ● priemerné ročné rýchlosti vetra.

Séria obrázkov obr.A-1 až obr.A-7 v appendixe poskytuje prehľad o časových periódach meraní a skutočne existujúcich mesačných údajoch o úhrnoch zrážok, teplotách vzduchu a rýchlosti vetra na uvedených staniciach.



Obr.1 Klimatické stanice na Slovensku založené v rokoch 1852-1950 (stanice spracovávané v tejto štúdii sú uvedené menovite)

3. HISTÓRIA POZOROVANÍ NA VYBRANÝCH KLIMATICKÝCH STANICIACH

Treba povedať, že informácie o histórii merania a pozorovateľoch na staniciach sú vo všeobecnosti neúplné a často rozporuplné. Zachovalo sa iba minimum korešpondencie s pozorovateľmi a správ z revízií staníc pred rokom 1950. Miera pravdivosti reality odhadnutej z takýchto podkladov je potom hypotetická.

Sled udalostí na staniciach s dobrovoľnými pozorovateľmi, ktorí pracovali len za symbolickú finančnú odmenu, mal často veľmi ľudský a logický priebeh, ako v personálnom obsadení, tak aj následne vo výraznej rozkolísanosti kvality meraní.

Spoločenské a sociálne postavenie pozorovateľov sa vyvíjalo vcelku logicky: od inteligencie - lekári, učitelia, štátni úradníci, väčšinou nadšenci pre prírodovedu - v minulom storočí a na začiatku tohto storočia, cez horárov, správcov úradných budov a hotelov, učiteľov, školníkov, vojakov základnej služby až po záhradníkov a ženy v domácnosti v 50. rokoch. Záznamy pozorovaní nesú výraznú pečať osobností jednotlivých pozorovateľov a už aj z nich si je možné vytvoriť predbežné úsudky o spoľahlivosti jednotlivých úsekov pozorovaní.

Séria obrázkov obr.A-8 až obr.A-14 v apendixe uvádza spolu so štandardizovanými priebehmi klimatických premenných v jednotlivých staniciach aj niektoré vybrané informácie z ich histórie tak, ako boli "vylúštené" z kníh výkazov pozorovaní a ktoré sú podrobnejšie rozpísané v prehľade uvedenom v nasledujúcich kapitolách. Lomenou hrubou čiarou sú naznačené intervaly, v ktorých pozorovali jednotliví pozorovatelia, prípadne prerušovanou hrubou čiarou často sa striedajúci pozorovatelia (napr. učitelia z jednej školy, vojaci z jednej posádky,...).

3.1. ORAVSKÝ PODZÁMOK

1.1871 - poz. lekár Dr. Károly Veszelovsky, teploty v °R (Reaumur), pozorovacie termíny 6⁰⁰-14⁰⁰-22⁰⁰, zrážky udávané v desatinách palca, 12.1882 - pravdepodobný prechod na °C, 1.1.1884-31.1.1885 - prerušenie, 1.1888 - uvedené nové pozorovacie termíny 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰, 4.1893 - poz. lekár Dr. Pál Lányi, striedajú sa rozličné rukopisy, údaje nekompletné, 12.1898 - poz. Dr. Mihály Tardon (respektíve Tarolon?), 9.-12.1901 iný rukopis, 9.1905 - poz. Tomas Rusznyák, 1.1916 - poz. neznámy, kvalita diskutabilná, občas chýbajú merania o 14⁰⁰, údaje sú nekonzistentné, 31.12.1916-3.9.1917 - prerušenie, 9.1917 - poz. Jozsef Pokorný, občas nezapisoval, 1.1919 - zmena stupnice Beauforta pre rýchlosť vetra z 0-10 na 0-12, 7.1925 - správca zrejme Ing. Main (Ředitelství ...?), poz. Adolf Soláč, 9.1926 - správca Prokop Mrňa, pozorovatelia Strnad, Milan Zach, 6.1928 - poz. Vajda, 9.1928 - tečie zrážkomerná nádoba, žiadajú novú (starú vraj letovali, aj tak

tiekla), 4.1929 - poz. Juraj Tvrdoň, 8.1931 - poz. Štefan Žiak, 9.1932 - poz. Štefan Milko, 5.1933 - prístroje premiestnené do novej meteorologickej budky, 5.1934 - správca F. Lanka (profesor poľnohosp. školy), predtým A. Pajer (detto) 9.1937 - poz. Sečánsky, 7.1939 - správca Alfonz Ondrejka riaditeľ školy, poz. Ľudovít Černák - poľnohospodársky akcesista, 6.1940 - správa o existencii termografu (bol opravovaný), 6.1944 - inštalovaný ombrograf, 4.1945-5.1945 - prerušenie, 8.1945 - poz. Viktor Bobák, Jozef Pacek, 1.1947 - poz. Július Kubáň, 6.1947 - premiestnený elektrický stĺp, ktorý "tínil na zariadenie s páskou", 4.1948 - striedajú sa v krátkych intervaloch poz.: V. Bobák, Valček, Kudiak, J. Kubáni, 7.1950 - Alojz Raček ("smluvný" úradník), J. Kubáni, 6.1951 - natretá žalúziová budka, 11.1951 - poz. J. Konôpka (technický úradník), 10.1953 - opäť poz. J. Kubáni a A. Raček, 1.7.1954-1.1.1955 - prerušenie, 1.1955 - poz. Dagmar Kopáľková (domáca), 9.1958 - poz. Terézia Drozdíková (domáca),

revízie stanice:

24.7.1934 - stanica v poriadku, od poslednej návštevy P. Končeka bez zmien, 9.7.1940 - stanica v poriadku, zrážkomer v tieni (poz.aut. - nebolo jasné v akom) - odporúčenie premiestniť, stanica v úzkom údolí, celkom voľné okolie, revízor Štefan Petrovič, 26.11.1949 - opadaná farba z budky, revízor Štefan Petrovič, 1951 - problémy so stanicou, 1952 - problémy so stanicou, zhrdzavená Wildova veterná smerovka, 30.3.1953 - najneakvátnejšie záznamy v Žilinskom kraji, poz. Konôpka to nechce robiť, 3.11.1953 - noví pozorovatelia Kubáni, Raček, údaje lepšie, 14.12.1954 - poz. D.Kopáľková - svedomitá, 3 deti, maturantka, 1958 - dodaná nová zrážkomerná súprava,

špecifikácia polohy a klimatickej expozície stanice (údaje z rokov 1934-60):

- stanica cca 3 km od Oravského Podzámku po prúde Oravy pri osade Široká v oplotenej zeleninárskej záhrade Výskumného ústavu poľnohospodárskeho
- orografická lokalizácia - úzke údolie dobre vetrané, smer SSW - NW
- úplne voľné okolie, meteorologická budka netienená, 20 m západne od nej sklad, 35 - 50 m južne objekt výskum. ústavu (poz. aut. - zrejme ide o stodolu), 80 m východne cesta lemovaná vysokými topoľmi
- nadmorská výška otvoru zrážkomera 494 m.n.m (r.1940), mení sa v rozpätí ± 10 m
- Petrovič tvrdí, že stanica nebola od začiatku pri osade Široká, Veszelovsky v minulom storočí ju mal zrejme v Oravskom Podzámku.

3.2. SPIŠSKÁ NOVÁ VES

1.1872 - poz. Geyer G. Gyula, udávané len teploty, zrážky až od 3.1873, občas chýbajú údaje, 1.1894 - poz. Miháli Karoliny, 9.1896 - poz. Örön Kardos, M. Karoliny, 9.1997 - poz. Klyncsárik, 1.1901 - poz. Ferencz Öhlschläger, zhruba od tejto doby je zjavné, že stanica je v správe školy, 3.1901 - poz. Lajos Tary, Lajos Rokfalusi, János Galbawy, 9.1903 - poz. Aladár Klepeisz, 6.1904 - poz. Geza Szaghy, nevyhodnotené mesačné priemery, zlý rukopis, 1.1905 - poz. opäť A. Klepeisz, L. Rokfalusi, 6.1907 - poz. Zoltán Rázgha, Béla Törzsök, József Juresik, Józ András, Gusztáv Sommer, Gusztáv Lesch, Károly Csecskédi, od 1911 sa striedajú cca 3. - 4. ďalší pozorovatelia ročne, 31.12.1918 - 30.11.1919 - prerušenie, 12.1919 - pokračuje striedanie prevažne "učiteľských kandidátov", od tohto dátumu sa vyskytuje množstvo prerušení, v jednom prípade až 2 mesiace, kvalita meraní pochybná, problémy cez prázdniny, 11.1924 - "teplomer v plechovej budke", 31.5.1925-1.1.1940 - prerušenie, stanica presťahovaná do Výskumného ústavu poľnohospodárskeho, 1.1940 - správca Samuel Bažík poľnohospodársky akcesista, poz. Samuel Barlog, František Štefanec, veľmi neakvátne záznamy, hlavne 22.6 - 15.9.1941 - nezacvičený pozorov., 31.4.1943-30.4.1944 - prerušenie, stanica presťahovaná do záhrady štátnej školy hospodárskej, 5.1944 - správca št. Štátna škola hospodárska, poz. Ondrej Hambor (záhradník), 1.1.1945-15.6.1945 - prerušenie, 10.1949 - tečie zrážkomerná nádoba, 2.1950 - inštalovaný nový zrážkomer, 15.12.1960 stanica presťahovaná,

revízie stanice:

23.3.1942 - zrážkomer 2m od budovy železničnej stanice v dažďovom tieni, položený voľne na neupevnenej drevenej lavici (existuje foto); bol premiestnený na kalváriu na voľné priestranstvo po obvode dobre chránené stromami a zástavbou (existuje foto), 26.3.1944 - Š. Petrovič prevzal inventár od št. výskum. poľnohosp. ústavu a odovzdal ho št. škole hospodárskej, do záhrady ktorej sa presťahuje meteorologická stanica, 11.1944 - Petrovič postavil veternú smerovku na 16 m vysokom stožiar, 20.11.1955 - premiestnenie stanice kvôli tieniacim stromom (? - nie je uvedené v výkazoch pozorovaní) a vylievajúcemu sa potoku, pričom vyliata voda zamrzá, po premiestnení bola stanica ďaleko pre pozorovateľa a správca povedal, "že nové miesto je horšie ako staré a navrhol dať stanicu späť", nie je známe, či sa tak stalo,

špecifikácia polohy a klimatickej expozície stanice:

- do roku 1925 stanica umiestnená v učiteľskom ústave, podľa Petroviča veterne tienená, bližšie informácie neznáme
- 1.1940-4.1943 stanica v záhrade Výskum. ústavu poľnohospodárskeho pri železničnej stanici, spoľahlivosť pochybná, prístroje zrejme v otvorenom priestore - meteorologická budka netienená, zrážkomer

voľne premiestňovaný (viď. revízie stanice v r.1942) • od r.1944 je stanica v záhrade Štátnej školy hospodárskej s ovocnými stromami na južnom okraji mesta pri novostavbe školy pri ceste na Novovesskú Hutu, pozemok je pod svahom, letisko je 500 m západne, budka je 100 m od budovy celý deň na slnku, zrážkomer zrejme aerodynamicky tienený, • nadm. výška 474 m.n.m (r.1920) • nadm. výška 445 m.n.m (r.1944)

3.3. STARÝ SMOKOVEC

6.1875 - poz. Dr. Miklós Szontagh, 1.7.1875-30.6.1876 - prerušenie, 1.6.1878-31.12.1880 - prerušenie, 3.1885 - striedajú sa poz. Dr. Lajos Pekár, Dr. M. Szontagh, Dr. Grász, Etelka Madarasz, 6.1888 - striedajú sa poz. Dr. Imre Bosch, Béla Bölcsházy, sR., E. Madarász, Martha Gambos, Máday, 5.1891 - uvádzané len teploty a zrážky, aj to neúplné - chýbajú celé týždne, 1.1.1892-31.5.1905 - prerušenie, 6.1905 - poz. neznámy, 1.1908 - uvádzané len vietor, teploty a zrážky, 3.1910 - poz. Zoltán Talmady, úplný zápis, (veľmi zlý rukopis), 1.1911 - poz. neznámy, opäť ako v 1908, má tiež podobný rukopis, 1.1912 - zrážky merané 3x denne až do 1.1916, 3.1913 - poz. István Sichtár, (neskôr sa uvádza ako Štefan Šichtár - vrchný záhradník), 11.1918-7.1919 - prerušenie, 9.1919 - nejasná poznámka k poz. termínom: "(Pražský) miestny čas: 6³⁰ - 13³⁰ - 20³⁰", 2.1920 - opäť k poz. termínom: "(miestny čas = stredoeur. čas) 7 = 6³⁹, 14 = 13³⁹, 21 = 20³⁹", 4.1920 - poz. František Berkovský (technický správca a neskôr inšpektor št. kúpeľov, zrejme ďaleko najlepším pozorovateľ v tatranskej oblasti, pozoruje až do svojej smrti v septembri 1960), 1.1923 - zmienka: drevená žalúziová budka väčšinou na slnku, 20.6.1923 - "nová budka umiestnená s veškerými prístrojmi na promenáde pred vilou Bellevue", 15.5.1926 - nová Wildova veterná smerovka na 15 m tyči umiestnená v bezprostrednej blízkosti stanice, 7.1926 - do činnosti uvedený ombrograf, 1.1934 - správca F. Berkovský, poz. L. Rozum (záhradník), 18.1.1935 - výmena minimálneho prízemného teplomera, 17.4.1942 - výmena termografu, 24.1.1945-1.3.1945 - prerušenie - prechod vojnového frontu, prístroje ukryté, 3.1945 - správca F. Berkovský, poz. I. Bohuš (tajomník riaditeľa kúpeľov), 12.1948 - správca F. Berkovský, poz. D. Fábry (záhradník), 8.1956 - správca F. Berkovský, poz. J. Greš, (kurič), P. Labuda (záhradník),

revízie stanice:

21.3.1934 - zrážkomer 500 cm², otvor 1 m nad zemou, Wildova veterná smerovka 11,5 m nad zemou, stanica - dobrý stav, 12.1.1935 - "najlepšia stanica", 17.8.1936 - "najlepšia stanica" (existuje foto), 25.8.1953 - Berkovský mal vadný ručný anemometer, ukazoval menej, bol vymenený, inak všetko v najlepšom poriadku, 25.7.1955 - "stanica v najlepšom poriadku",

špecifikácia polohy a klimatickej expozície stanice:

• 20.6.1923 bola presťahovaná budka (nebolo uvedené odkiaľ), od tejto doby ostáva na tom istom mieste (viď. časový sled) • poloha stanice v prirodzenom horskom zákutí na svahu Popradskej doliny, budka pri nízkom slnku tienená stromami, stanica sa nachádza cca 25 m juhovýchodne od priečelia vily Bellevue, od západu, juhu a východu vo vzdialenosti cca 15 m stromy • Berkovský neudáva ani 5 víchric do roka, stanica je veľmi chránená stromami a budovami • nadmorská výška 1018 m.n.m - kolíše (1953), • orografická lokalizácia - svah.

3.4. LIPTOVSKÝ HRÁDOK

5.1881 - poz. Leopold Zyblikiewicz (mimoriadne úhladný rukopis), 5.12.1881-23.12.1881 - prerušenie, 1.1.1883-31.3.1883 - prerušenie, 1.5.1883-30.9.1883 - prerušenie, 31.3.1886-31.7.1886 - prerušenie, 8.1886 - poz. Károly Gurszky, 1.5.1889-31.5.1889 - prerušenie, 6.1889 - správca škola (pečiatka "szakiskola"), poz. anonymný, 1.1910 - správca škola ("szakiskola"), poz. Simon Ferencz Lajos, Pál Tóth, - zrážky merané 3x denne až do 10. 1918, 10.1910 - poz. Janos Bakos, chýba pečiatka školy, 5.1911 - striedajú sa poz. István Haverlík, Gyula Horváth, Motiszkász, Hornyánszky, Matiszka, Sandor Kravík, 5.1915 - poz. sa striedajú často, cca každé 2 mesiace, údaje nespoľahlivé, poznámka vo výkaze: "V údajoch je mnoho chýb, pred publikovaním extenza treba zrovnať", 9.1916 - v zápise samé machule, 1.1917 - 9.1918 dve stanice paralelne "v lese" a v "otvorenom teréne", 1.10.1918-31.12.1919 - prerušenie, 1.1920 - poz. Hrnk (respektíve Hornák ?), 9.1920 - 4.1921 čudné zrážkové údaje, zrejme zlé, 7.1921 - poz. Florián (záhradník), "Štátna hájenská škola", 8.1921 - poz. sa pýta ako odhadovať vietor, 1.1923 - poznámka: "prenesené teplomery aj s búdkou na voľné priestranstvo v záhrade", budka žalúziová drevená malá väčšinou na slnku, 3.1924 - poz. Jozef Hanes ("žiak Štátnej hájenskej školy"), kontroluje Jakubský ("št. lesný"), chyby, 1.1924 - poz. Reganer (záhradník, neskôr sa uvádza ako "zemědělský revident"), 8.1924 - poz. žiada novú veternú smerovku, 2.1928 - poznámka "odhad sily vetra mením v zmysle obežníka č. 13 A z 26.2.1928", 5.1928 - 3 mesiace pozoruje Š. Kurán, je uvedený ako správca, 5.1930 - až do konca roku Reganer zacvičuje nového pozorovateľa, sú chyby, píše, že ich odstraňuje, 9.1931 - Reganer zacvičuje ďalšieho poz., prvý sklamal, tento spolupracuje, meno neznáme, 6.1932 - správca Reganer až do r.1945, poz. Král (záhr. pomocník) + neznámy,

9.1935 - poz. Jozef Straňák, Jar. Šedivý, 9.1936 - poz. Michal Kapitán, Marendiak, Kolář, Vrabec, Biskup, Š. Sliach, striedajú sa (všetci sú záhradní pomocníci), 1.1941 - búdka 82 x 52 x 64 cm, 5.1941 - poz. L. Görök, 10.1942 - poz. Andráš, Lahoda, J. Lehárka, chyby, 9.1943 - poz. Nižňanský, + neznámy, 7.1944 - poz. Hlavatý + neznámy + neznámy, 1.1.1945-30.9.1945 - prerušenie, 10.1945 - správca Mikluščák, poz. Mikluščák, (záhradník), Filo, chyby, 7.1946 - správca Vrabec, poz. Vrabec, Svrček, Kostka, Gajdoš, striedajú sa, 9.1949 - poz. Junek, Krajan, Mikuš, striedajú sa, 10.1952 - poz. Bohdal, opäť chyby, viac-menej až do r.1960, 6.1953 - správca (asi) Junek, poz. Junek, 11.1953 - ukradnutý zrážkomer aj max. teplomer,

revízie stanice:

11.12.1954 - "pozorovania za tento rok zlepšené", 1970 - výška otvoru zrážkomera 1,1 m nad zemou, vietor sa odhaduje, stanica na tom istom mieste od marca 1968, poz. Junek, Juneková, 1981 - stanica (údajne) na tom istom mieste od r.1920, poz. Junek, Juneková,

špecifikácia polohy a klimatickej expozície stanice:

• stanica v záhrade, zo severozápadu a západu stromy vysoké 4 - 5 m vo vzdialenosti 8 - 12 m, 30 m južne cesta a stromy vysoké 5 - 8 m, z východu voľný priestor, 60 m východo-severo-východne budova vysoká 20 m (resp. 35 m) • nadmorská výška 648 m.n.m - kolíše (r.1970 - 81) • orografická lokalizácia - dolina.

3.5. TATRANSKÁ LOMNICA

1.7.1897 - János Früstök, 4.1899 - vietor vo výkaze vyčiarknutý (celý mesiac), 6.1905 - poz. Jozef Weisz, 9.1905 - poz. Jozef Vados, 3.1918 - poz. Jozef Bakkay, 11.8.1918-26.9.1918 - prerušenie, 27.9.1918 - poz. Márton Lehotzky, 1.10.1918-4.1.1926 - prerušenie, 5.1.1926 - poz. Karel Maus, 1.1926 je problematický mesiac, 4.1928 - poz. František Burian, 1.1929 - poz. Jozef Černík, 3.1931 - poznámka: drevená žalúziová búdka, vždy zatienená (je to v rozpore s revíziou stanice a fotografiou z tej doby - búdka netienená), 1.1932 - poz. Pavel Mlynár (záhradník), 4.1933 - správca P.Mlynár, poz. Ján Turek, množstvo chýb v mesačnom výkaze (sú revidované), 1.1934 - správca Jaroslav Mašek, menej chýb, 1.1935 - žaluz. búdka presunutá o 30 m smerom ESE, "homogenita v umiestnení zachovaná", postavená nová tyč Wildovej veternej smerovky, 4.1939 - poz. František Straka, 17.8.1939-16.10.1939 - prerušenie, 1.1942 - poz. Jozef Kuruc, 4.1942 - poz. Jozef Glevanák ("kúpeľný policista"), chyby, 1.7.1944-30.9.1945 - prerušenie, 10.1945 - poz. Blažej Slivka (hlavný záhradník), chyby, adresa: Záhrada komunálnej služby, 7.1956 - poz. Viera Urbanová, adresa TANAP,

revízie stanice:

8.8.1931 - poz. Černík, zrážkomer 500 cm², otvor zr. 1 m nad zemou, stanica v zeleninovej záhrade 100 x 160 m, okolo záhrady les, terén rovný, búdka netienená 1,8 m nad terénom (existuje foto), 19.8.1934 - poz. Turek, inak detto ako 1931, blízko búdky novopostavený skleník, 26.7.1955 - dobre obsluhovaná stanica, 2.6.1956 - premiestňovanie stanice (zrejme bola preložená až neskôr, možno o týždeň alebo aj mesiac), nový pozorovateľ Pilarčík so ženou (? - nie je uvedený vo výkazoch), 26.8.1970 - stanica dobre ventilovaná v zeleninovej záhrade, otvor zrážkomera 1,17 m nad zemou, búdka stále osvetlená,

špecifikácia polohy a klimatickej expozície stanice:

• búdka celý deň na slnku, zo severovýchodu a severozápadu skleníky, z juhu a juhovýchodu vo vzdialenosti 80 - 100 m smrekový les, stanica dobre ventilovaná, (viď. revízia z r.1931) • stanica v prieseku, ktorým steká studený vzduch • nadmorská výška 840 m.n.m (kolíše) • orografická lokalizácia - svah (1970).

3.6. POPRAD

2.1908 - poz. János Husz, chýba teplota, merané sú zrážky a rýchlosti vetra, 6.1908 - údaje kompletné, 20.1.1912-14.4.1912 - prerušenie, 10.6.1912-4.7.1912 - prerušenie, 1.9.1915-17.11.1915 - prerušenie, 12.1915 - poz. Géza Clementis, 1.1.1917-23.2.1918 - prerušenie, 2.1918 - merané len zrážky, 31.10.1918-4.9.1925 - prerušenie, 9.1925 - poz. Adalbert Greisinger, 10.1925 - zrejme presunutý zrážkomer na voľné priestranstvo, 7.1927 - 19.7-31.7 nebolo merané, 10.1928 - teplota nebola meraná celý mesiac, 7.1929 - poz. Štefan a Michal Bartúnek, 12.1929 - búdka žalúziová drevená, 8.2.1931 - 1.6.1934 pozorujú vojaci, nie je isté, či sú údaje z tej istej stanice, alebo ide o paralelné pozorovanie, 6.1934 - búdka do 8⁰⁰ a od 16⁰⁰ tienená, 6.1937 - správca M. Bartúnek, poz. Margita a Irma Bartúnková (domáca), 10.1938 - celý mesiac pozoruje niekto iný, 31.8.1941-31.12.41 - prerušenie, 1.6.1942-19.5.1944 - prerušenie, 5.1944 - správca Š. Mikoviny (poručík v zálohe), poz. vojaci (v zákl. službe), stanica je presťahovaná do leteckých kasární (VLPS), 1.8.1944-30.9.1945 - prerušenie, 16.10.1946 - stanica presťahovaná z kasární na letisko Tatry, zrejme začiatok používania anemometra, 1.7.1947 - začiatok merania zrážok paralelne s protiveternou ochranou (Niferovým

kuželom) a bez, nie je jasné, z ktorého zrážkomera sú hodnoty uvádzané vo výkazoch, 18.5.1950 - premiestnenie budky k novopostavenej staničnej budove, 1.6.1950 - zmienka o elektrickom anemometri a el. veternej smerovke, od 25.6. používanie anemografu, 4.8.1951 - natretie žalúziovej budky, 5.1954 - správca (alebo poz.?) Dr. Gregor Zdeneček, 8.1954 - správca (alebo poz.?) Július Kolesár, 8.1956 - poz. Pavol Sališ, 5.1958 - poz. Ján Pribiš, 1.1961 - správca RNDr. Ing. Milan Nedelka, poz. Belohorec, Tatarka, 30.5.1961 - stanica presťahovaná,

revízie stanice:

1.11.1925 - existujúca fotografia meteorologickej budky, 27.6.1930 - poloha stanice asi 15 minút od nádražia Poprad v malom parku pri Karpatskom múzeu, adresa: "Múzeum tatranské č.14"; na streche budky čierny térový papier, budka žalúziová maďarská, zrážkomer 500 cm², otvor zr. 1,60 m nad zemou, 9.1.1935 - náznaky rozporov a nekvality poz. Bartúnka, 20.5.1944 - "... som navštívil VLPS Poprad (voj. letecká poveter. stanica). Po príchode som videl, že stanica bola už postavená a prístroje pracovali.", 10.11.1946 - postavenie anemografu (vo výkazoch je však zmienka o ňom až 25.6.1950), 21.5.1950 - premiestnenie meteorologickej budky a prístrojov k novej staničnej budove, zmienka o používaní elektrického anemometra, 27.5.1974 - rekonštrukcia odbavovacej haly letiska, úpravy zasiahli aj umiestnenie niektorých meteorologických prístrojov,

špecifikácia polohy a klimatickej expozície stanice:

• prístroje vo vzdialenosti cca 10 m od 15 m vysokej budovy Karpatského múzea v Poprade v areáli parčíku, z ostatných strán tienia prístroje stromy v 45° uhle - stanica zrejme silne tienená veterne aj svetelne, 684 m.n.m (revízie r.1925, 1930) • nie sú známe údaje o polohe v leteckých kasárňach od r.1944-46 • materiály o polohe na letisku Poprad v r.1946-50 sa nenašli, podľa Petroviča je poloha silne veterná • nová poloha pri novej staničnej budove letiska opäť silne veterná • nadmorská výška 703 m.n.m (kolíše) • orografická lokalizácia - kotlina.

3.7. SPIŠSKÁ NOVÁ VES - vojenská (paralelná stanica)

1.1.1941 - poz. vojaci zákl. služby, striedajú sa, rýchlosti vetra pravdepodobne merané anemometrom, 4.1941 - správca Bočišín, 10.1941 - správca J. Sklenár, 12.1941 - prístroje vo veľkej žalúziovej budke, 19.6.1942 - "premiestnená žalúziová budka s prístrojmi na rozkaz Dr. Petroviča", 10.1942 - správca Ladislav Jančo, 6.1943 - správca Andrej Sobek, 1.8.1944-31.8.1945 - prerušenie, 7.1946 - správca (veliteľ stanice) Ján Lipčík, 11.4.1947 - stanica presťahovaná zo Spišských kasární na letisko, presťahoval Dr. Petrovič, (ešte v ten deň sa pozorovalo), 7.1947-11.1950 - zrážky pozorované s dvoma zrážkomermi, jeden má protiveternú ochranu (Niferov kužel), 6.1952 - koniec záznamov,

revízie stanice:

12.1.1940 - vojenská stanica 15 - 20 m pred budovami letiska (? - nejasná informácia, vid. revízia v r.1947), 2,5 km od nádražia, otvor zrážkomera 1 m nad zemou, veterná smerovka na budove, (z tohto obdobia však neexistujú výkazy), 10.6.1942 - problémy s ombrografom pri väčších rýchlostiach vetra, 10.4.1947 - Dr. Petrovič presťahoval vojenskú stanicu z kasární na letisko (vzdialenosť 1,5 km), 4.8.1948 - zrážkomer s protiveternou ochranou (Niferov kužel) 0,93 m nad zemou, obyčajný zrážkomer s lievikom 0,9 m a bez lievika 0,755 m nad zemou; "veliteľ vôbec nepoučuje pozorovateľov, pozorovatelia (vojaci základnej služby) nič nevedia; sľúbili prestať zrážkomery tak, aby boli vo výške 1,2 m nad zemou...",

špecifikácia polohy a klimatickej expozície stanice:

• informácie o polohe v leteckých kasárňach sa nepodarilo získať • po premiestnení v r.1947 boli prístroje (meteorologická budka so zrážkomermi a ombrografom) východne od budovy letiska, podľa existujúcej fotografie je možné odhadnúť ich vzdialenosť od budovy na 15 - 25 m, popri prístrojoch sa ťahal zo severu drôtený plot, anemometer bol na streche budovy; vzhľadom na to, že ide o letisko, bola poloha zrejme silne veterne exponovaná, je možné predpokladať svetelné tienenie budky budovou vo večerných hodinách • udávaná nadmorská výška prístrojov nelogicky kolíše, výška otvoru zrážkomera bola 464 - 488,11 m.n.m.

4. PREHLAD DOKUMENTOVANÝCH NEKONZISTENTNOSTÍ V ÚDAJOCH

Pojem (ne)konzistentnosť je v tejto práci používaný na všeobecné vyjadrenie (ne)narušenia vnútornej spätosti údajov v širšom zmysle, t.j. z hľadiska ich homogenity, jednotliatosti, dôslednosti získavania, atď.

Ukázalo sa, že ani jedna stanica nemá kontinuálne pozorovania, naopak, je v nich množstvo kratších, či dlhších prerušení (séria obr.A-1 až obr.A-7 v apendixe). Tento problém sa, pochopiteľne, odrazil na filozofii riešenia celej práce a ovplyvnil exaktnosť jej výsledkov.

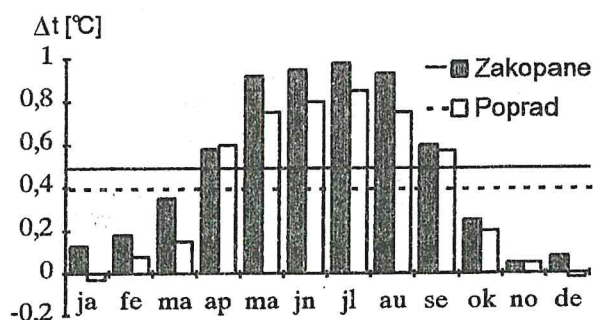
Významné bolo zistenie, že pred rokom 1888 sú vo výkaze Oravského Podzámku prerušovane uvádzané pozorovacie termíny 6⁰⁰-14⁰⁰-22⁰⁰ (B). Až v januári 1888 sa prvý raz objavuje štandardných 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰ (A). Vo výkazoch ostatných staníc nie sú v tejto dobe uvádzané pozorovacie termíny a neskôr sú prerušovane, niekedy skutočne ojedinele, uvádzané len termíny A. Priebehy teplôt v ostatných staniach (Spišská Nová Ves, Starý Smokovec) nevykazujú taký výrazný pokles oproti priemeru ako priebehy v Oravskom Podzámku v tejto dobe (obr.A-8), môže to však byť spôsobené aj následnou zmenou polohy stanice v Oravskom Podzámku (viď. špecifikácia polohy, kapitola 3.1).

Klimatické stanice na Slovensku patrili do roku 1918 pod štátnu správu Rakúsko-Uhorskej monarchie a je logické očakávať na nich totožné pozorovacie termíny. Čo môže znamenať zmena pozorovacích termínov, reprezentuje obr.2, kde sú uvedené rozdiely $\Delta t = A - B$ v °C v dlhodobých mesačných priemerných teplotách v Poprade a Zakopanom (1951-60), ktoré sa svojou nadmorskou výškou približujú Oravskému Podzámku. Rozdiel v priemerných 10-ročných teplotách pre uvedené pozorovacie termíny bol v Poprade 0,4 °C a v Zakopanom 0,5 °C. Tieto hodnoty sú však stále o niečo menšie ako rozdiel v dlhodobých priemeroch teplôt v Oravskom Podzámku pred zmenou a po zmene pozorovacích termínov. Tab. 1 uvádza Δt aj pre ďalšie stanice. Podklady pre výpočet Δt boli čerpané z práce [4].

Zistené zmeny pozorovacích termínov v Oravskom Podzámku (O.P. koncom minulého storočia patrila medzi významné stredoeurópske klimatické stanice) naznačujú, že silná záporná fluktuácia teploty v roku 1888 spolu s následným výrazným kladným trendom teploty trvajúcim do cca 1935 na inak nízko korelujúcich ($r < 0,5$) 17 stredoeurópskych staniach [3], ktoré sa prejavujú aj v priebehoch suchozemských teplôt severnej pologule [2], môžu byť spôsobené antropogénnym faktorom.

Termíny klimatických pozorovaní sú všeobecne závažným problémom. Zdá sa, že k ich ustáleniu dochádza až niekedy v polovici tohto storočia. Je isté, že tieto termíny sa v niektorých oblastiach Európy, vrátane Slovenska, v tomto storočí (možno aj viackrát) menili. Nejde len o zmenu termínov, možné sú aj ich časové posuny. Napríklad vo výkazoch pozorovaní Starého Smokovca sú v septembri 1919 uvedené takéto poznámky: "miestny čas (Pražský) 6³⁰-13³⁰-20³⁰" a vo februári 1920: "miestny čas 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰, stredoeurópsky čas 6³⁹-13³⁹-20³⁹". Tieto poznámky môžu znamenať posun štandardných pozorovacích termínov (A) v súvislosti s posunom lokálneho času vzhľadom na stredoeurópsky, v rozsahu 30 a 21 minút. Z výkazov pozorovaní však nie je zjavné, ktoré časy boli pri meraniach akceptované, či lokálne, alebo stredoeurópske. Na základe uvedeného teda nie je možné robiť definitívne závery o časových posunoch a táto otázka by sa mala podrobnejšie preskúmať.

Vo výkazoch pozorovaní má byť dodatočne kontrolovaná správnosť výpočtov priemerných mesačných hodnôt uvádzaných údajov. Niektoré pôvodné výkazy pozorovaní však neniesli žiadne stopy revízií. Nebolo v časových možnostiach autora urobiť revízie všetkých nerevidovaných úsekov, ale priebežne v nich robil náhodné kontroly. V prípade zistenia chyby, boli prepočítavané celé podozrivé úseky a chyby opravené. Tam, kde neboli priemerné hodnoty vôbec uvedené, autor údaje vypočítal. Tu sú niektoré príklady chýb: v Poprade v r.1925-29 dosahovali chyby v priemerných mesačných teplotách vzduchu minimálne $|0,05 \div 0,10 \text{ °C}|$. V júni 1901 v Tatranskej Lomnici priemerné mesačné termínové teploty vzduchu 19-19,8-14 °C sa po oprave zmenili na 12-18,1-13,3 °C. V Tatranskej Lomnici v auguste 1943 priemerná mesačná teplota: 18,05 °C, po oprave: 17,25 °C, v septembri 1932: 12 °C, po oprave: 13,75 °C. V niektorých výkazoch (Spišská Nová Ves 11.1903, Tatranská Lomnica 12.1943 - 1.1944, 1.1948, 6.1960, Liptovský Hrádok 1952-60) boli robené neskoršie kladné korekcie pôvodných denných úhrnov zrážok, čo spolu predstavovalo prírastok niekedy až 20 mm za mesiac. Takto revidované úhrny zrážok neboli v práci akceptované. Časté bolo aj nekorektné zaokrúhľovanie len na jedno desatinné miesto, napr. 0,1 °C namiesto skutočných 0,19 °C (Oravský Podzámok od 4.1893, a tiež iné stanice). Údaje v niektorých úsekoch sa javili ako silne nespoľahlivé, ako napríklad zrážky v Liptovskom Hrádku v rokoch cca 1947-54 (obr.3 a obr.A-9).



Obr.2 Rozdiely $\Delta t = (A-B)$ v °C v dlhodobých priemerných mesačných teplotách v období 1951-60 spôsobené odlišnými pozorovacími termínami A=7-14-21 a B=6-14-22 h

Obr.3 ilustruje aj evidentný postupný nárast vzájomnej synchronizácie (zladenosti) chodu ročných úhrnov zrážok z jednotlivých staníc od konca 2. svetovej vojny po 60. roky. Takýchto prechodov zo vzájomne nesynchronizujúcich priebehov pozorovaných hodnôt na synchronizujúce a naopak, je v chode úhrnov zrážok v celom období merania viac. Vidno to na obr.10 a obr.11, na ktorých možno porovnať priebehy ročných úhrnov zrážok a priemerných ročných teplôt vzduchu medzi jednotlivými stanicami. Z dôvodu prehľadnosti boli priebehy oddelené vždy do dvoch obrázkov.

Na obr.10 so zrážkami sú obdobia, v ktorých údaje dobre harmonizujú, vyznačené rastrom. Dĺžka týchto období sa pohybuje v rozpätí 5 - 8 rokov a je v zhode s korelačnou analýzou urobenou v nasledujúcej kapitole. Ročný krok v chode spracovávaných hodnôt je však príliš hrubý na to, aby bolo možné považovať za preukázanú spojitost výmien pozorovateľov s jednotlivými výskytmi období dobrej/zlej vzájomnej synchronizácie chodov ročných úhrnov zrážok, napriek tomu, že mnohé v tejto práci to naznačuje. Nie je teda možné jednoznačne odpovedať ani na otázku, čo hrá rozhodujúcu úlohu v uvedených zmenách vzájomnej synchronizácie, či ich prirodzené fluktuácie, alebo vplyv ľudského faktora. V každom prípade, ľudský faktor nie je možné zanedbávať. Podľa obr.3 všetko nasvedčuje tomu, že v tom období zohral hlavnú úlohu práve on.

Dá sa tiež predpokladať existencia ďalších latentných chýb, ako napríklad nemerané, ale vymyslené údaje, nedodržovanie denných pozorovacích termínov najmä pri teplote, atď., takéto nedostatky boli v histórii pozorovaní viackrát preukázané. Tak isto je možné prihliadať na informácie o detailných, ale významných problémoch, ako netesniaci zrážkomer (Oravský Podzámok 1928), čierny térový papier na streche meteorologickej budky (Poprad 1930), opadaná farba z budky alebo natretie budky, etc.

Čo sa týka presunov prístrojov, či už len o pár metrov, alebo premiestnení stanice na vzdialenosť rádovo v km, ukazuje sa, že tento jav je častý, omnoho častejší ako by sa dalo predpokladať (viď. predchádzajúca dokumentácia staníc).

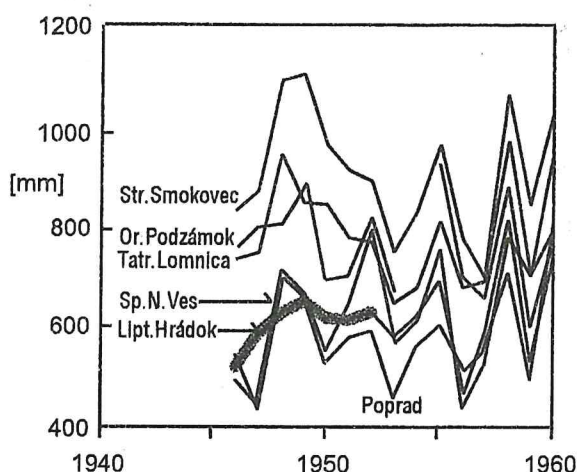
5. ANALÝZA MIERY SPOLAHLIVOSTI ÚDAJOV A ICH VLASTNOSTI

V úvode práve tejto kapitoly by som rád vyzdvihol jedinečnú prácu Františka Berkovského, ktorý pozoroval (a po krátkom čase sa stal správcom) na meteorologickej stanici v Starom Smokovci od apríla 1920 až do svojej smrti v septembri 1960, t.j. 40 rokov. Na základe výsledkov a porovnávaní uvedených ďalej, sa toto pozorovacie obdobie v Starom Smokovci dá považovať za jedno z najlepších a najspoľahlivejších a môže byť vo všeobecnosti považované za referenčné. Svedčí o tom tiež mimoriadna kvalita výkazov doplnených jedinečnými sprievodnými listami s rozličnými postrehmi o výnimočných prírodných a klimatických udalostiach.

5.1. METODIKA ANALÝZY SPOLAHLIVOSTI ÚDAJOV

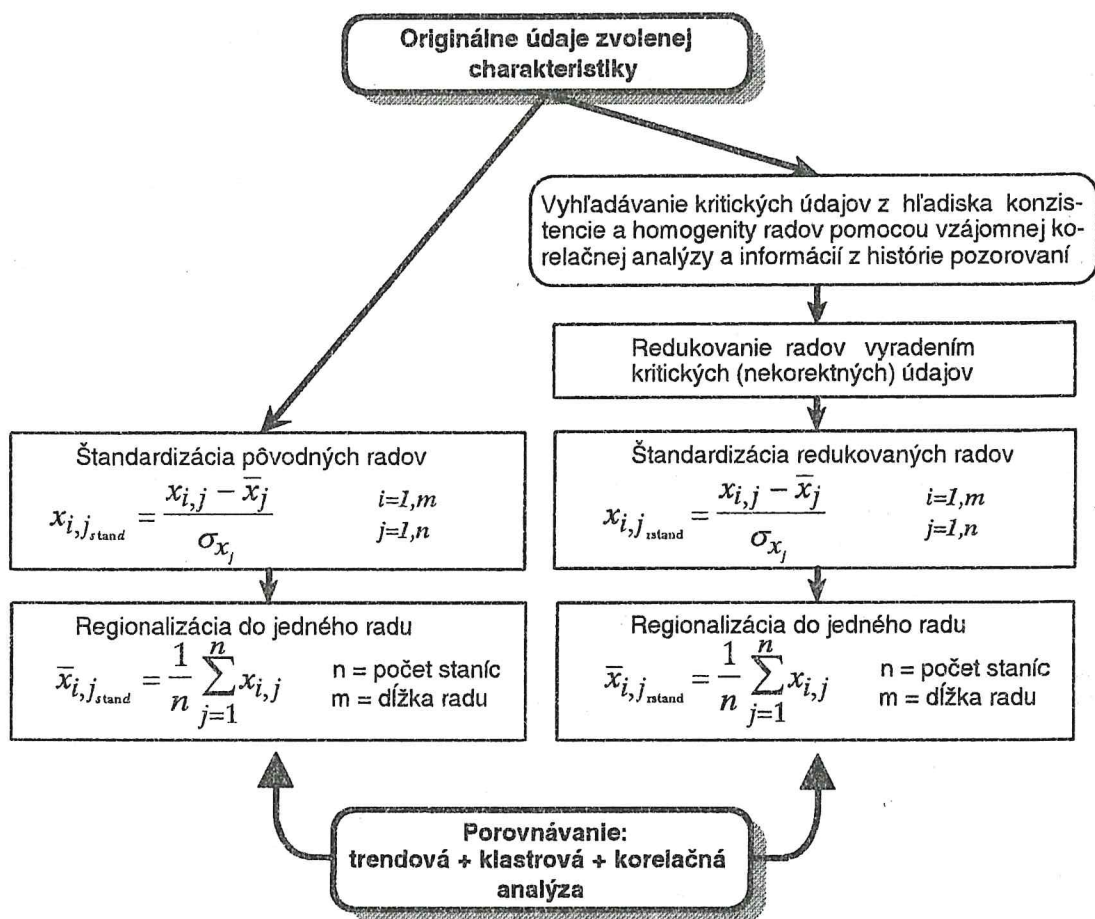
Zámernom v nasledujúcich kapitolách je analyzovať vlastnosti a mieru podobnosti časových radov ročných hodnôt klimatických charakteristík (teplota vzduchu, rýchlosť vetra a zrážky) na vybraných stanicách a posúdiť mieru podielu ľudského faktora (najmä osobné kvality a zmeny pozorovateľov, ale aj iné) na existujúcich nekonzistentnostiach v radoch.

Postup je nasledovný: pomocou vzájomnej kľzavej korelácie posúdiť konzistenciu radov a pomocou nej a tiež pomocou konfrontácie s uvedenou históriou pozorovaní, sa pokúsiť určiť v každom rade tie údaje, ktoré s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobujú prípadnú nekonzistenciu. Tieto údaje potom vylúčiť a tak vygenerovať z pôvodného súboru radov ďalší súbor tentoraz redukovaných radov s vylúčenými nekorektnými



Obr.3 Ilustrácia postupného zosynchronizovania priebehov ročných úhrnov zrážok [mm] od 2.sv.vojny

údajmi. V ďalšom kroku oddelene pre oba súbory radov (redukované aj neredukované) štandardizovať a zregionalizovať rady tých istých charakteristík zo všetkých staníc do jedného radu pre každú charakteristiku. Takýmto spôsobom získame po dva štandardizované regionalizované rady (redukovaný a neredukovaný) pre každú klimatickú charakteristiku a môžeme ich vzájomne porovnať. Ich porovnanie by mohlo poslúžiť ako určitá forma odhadu, či ilustrácie vplyvu ľudského faktora v dátových radoch (obr.4).



Obr. 4 Schéma postupu pri analýze spoľahlivosti klimatických údajov

Séria obrázkov obr.A-8 až obr.A-14 prezentuje modulovo štandardizované hodnoty ročných úhrnov zrážok, priemerných teplôt a rýchlostí vetra pre spracovávané stanice zároveň s niektorými vybranými informáciami z ich histórie. Modulová štandardizácia v týchto obrázkoch bola urobená z dôvodov vzájomnej porovnateľnosti radov na základe vzťahu:

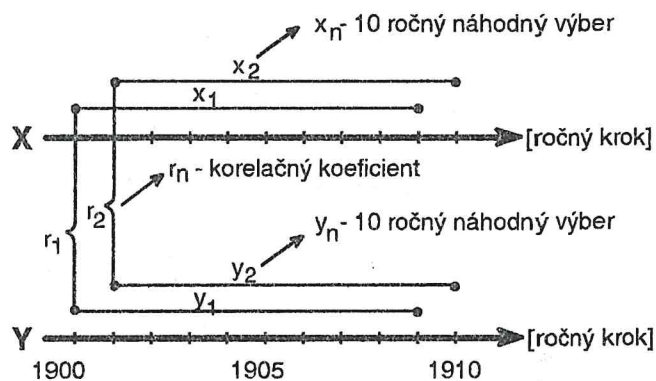
$$k_i = \frac{x_i}{\bar{x}} \quad 1.$$

Ďalej boli pre všetky kombinácie staníc vypočítané 10-ročné kľzavé vzájomné korelačné koeficienty (obr.5). Bola použitá klasická Pearsonova korelácia:

$$r_i = \frac{\text{COV}_{x_i, y_i}}{\sqrt{\sigma_{x_i}^2 \sigma_{y_i}^2}} \quad 2.$$

COV_{x_i, y_i} - výberová kovariancia, kde x_i a y_i reprezentujú 10 prvkové náhodné výbery,

σ_{x_i} σ_{y_i} - smerodajné odchýlky x_i a y_i náhodných výberov.



Obr.5 Spôsob výpočtov korel. koeficientov. Boli použité vzájomné kľzavé korelácie 10 - ročných náhodných výberov s ročným krokom

V prípade chýbajúcich údajov bol akceptovaný korelačný koeficient s minimálne 6 párovými dvojicami hodnôt na 10 rokov. Tento postup v niektorých prípadoch znížil prehľadnosť získanej informácie: ako extrém môže poslúžiť situácia, keď v jednom rade chýbajú 4 hodnoty, potom 6 hodnôt nechýba a opäť chýbajú 4 hodnoty, pričom druhý rad je neprerušovaný, vtedy by v tomto úseku bolo za sebou päť rovnakých korelačných koeficientov tak, ako sa výpočet koeficientov posúva s jednoročným krokom a korelujú sa stále tie isté hodnoty. Avšak, za daných okolností (množstvo chýbajúcich údajov) je tento postup vhodným kompromisom a dáva informáciu stále dostatočne zrozumiteľnú. Aby bolo možné konfrontovať podobné prípady, ako spomenutý, bola zostavená tab.A-1 (viď. apendix), ktorá reprezentuje existujúce údaje ročných priemerných teplôt a ročných úhrnov zrážok.

Vypočítané korelačné koeficienty sú uvedené v sérii obrázkov obr.A-15, obr.A-16 v apendixe tak, že korelačný koeficient napríklad v r.1930 reprezentuje 10-prvkový (minimálne však 6-prvkový) výber hodnôt pre roky 1930-39, v r.1931 výber hodnôt z rokov 1931-40, atď.

Štandardizované regionálne priebehy vybranej klimatickej charakteristiky v ročnom chode boli vypočítané tak, že sa najprv štandardizovali údaje v každej stanici na základe vzťahu 3:

$$x_{istand} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \quad 3$$

σ_x - smerodajná odchýlka

a následne boli vypočítané priemerné ročné hodnoty $\bar{x}_{istand}$ zo všetkých staníc (obr.4). Pre tieto hodnoty sa určili trendy ich vývoja jednoduchou lineárnou regresiou. Výsledky porovnania možno konfrontovať na obr.14. Komentár k týmto a ďalším výsledkom je zhrnutý v záverečných kapitolách.

5.2. TEPLOTY VZDUCHU

Teplota vzduchu je jedným zo základných meteorologických a klimatických prvkov. V meteorologickej praxi sa ňou obvykle rozumie teplota meraná v meteorologickej búde zhruba 2 m nad terénom. Meria sa podľa rozličných stupníc, vo výkazoch bola udávaná v °C okrem Oravského Podzámku, kde v r.1871-82 bola udávaná v °Réaumur. Tento úsek bol prepočítaný na °C na základe vzťahu $T(^{\circ}\text{Celsius}) = 5/4 T(^{\circ}\text{Réaumur})$. V spracovávaných stanicach v prípadoch, že bola uvedená zmienka o meteorologickej búde, jednalo sa vždy o drevenú žalúziiovú, okrem Spišskej Novej Vsi, kde v novembri 1924 je uvedené: "teplomér v plechovej búde". V Poprade v r.1930 je uvedené: buda žalúziiová drevená "maďarská".

Teplota vzduchu je medzi klimatickými premennými považovaná za relatívne najmenej problematickú, čo sa týka procesu jej merania, pravidelnosti chodu a priestorovej distribúcie. Priemerná denná teplota vzduchu sa počíta z troch denných pozorovaní o 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰ hod., podľa vzťahu:

$$\bar{t}_{24} = \frac{t_7 + t_{14} + 2t_{21}}{4} \quad 4$$

dvojnásobná váha sa prisudzuje večernému meraniu, pretože zastupuje nočné meranie. Tento vzťah bol prijatý na základe analýzy denného chodu teploty.

Teplota vzduchu je premennou s cyklickým charakterom fluktuácií ako v ročnom chode: jar-leto-jeseň-zima, tak aj v dennom chode: ráno-poludnie-večer-noc. Jej ďalšie kolísania vyvolávané meteorologickými činiteľmi (prechody frontov, vpády teplého/studeného vzduchu, zmena oblačnosti, singularity, atď.) majú takmer vždy regionálny charakter, a preto je možné očakávať v regióne s takým klimatickým a orografickým charakterom, ako sú Tatry, aj napriek možnosti tepelných inverzií hlavne v zime, vysokú koreláciu priebehov priemerných ročných teplôt medzi jednotlivými stanicami. Aká je skutočnosť demonštruje obr.A-15 s korelačnými vzťahmi medzi priemernými ročnými teplotami v jednotlivých stanicach pre ich všetky kombinácie.

5.2.1. Výsledky analýzy vzájomných kľazových korelácií teplotných radov

Je naozaj zaujímavé vidieť, ako v začiatkoch meraní v minulom storočí vysoko korelujú údaje zo vzájomne najvzdialenejších staníc - Oravského Podzámku a Spišskej Novej Vsi: v r.1871-78 je 8 po sebe idúcich korelačných koeficientov (v ďalšom texte korelačný koeficient $\equiv r$) väčších ako 0,97. Následný pokles korelácie mohol byť spôsobený zmenou pozorovacích termínov v Oravskom Podzámku (z 6⁰⁰-14⁰⁰-22⁰⁰ na 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰) v r.1888. Avšak ten sa nemohol prejavovať dlhšie ako na ďalších deviatich r. Stanice však podobnú korelačnú úroveň opäť dosiahli až v 40. rokoch nášho storočia, aj to len nakrátko. Je až zarážajúce vidieť, ako

Starý Smokovec do r.1921 disharmonizuje (v r.1920 začal merať Š. Berkovský) a potom je 20 po sebe idúcich r vzájomne s Oravským Podzámkom a Liptovským Hrádkom (O.P. a L.H. s malými výchyľkami veľmi dobre koreľujú už od r.1898) a taktiež s Tatranskou Lomnicou (až na periódu 1933-38), väčších ako 0,95. Svedčí to o tom, že v týchto prípadoch dominuje ľudský faktor.

Niekedy bolo jednoznačné, ktorá stanica vyvolala pokles r , ako napríklad Tatranská Lomnica v už zmienených r.1933-38 (dôvodom mohlo byť presunutie meteorologickej búdky v januári 1935 o 30 m na voľné priestranstvo, či zlé pozorovania teploty v r.1941-43), alebo Spišská Nová Ves v r.1902 (na začiatku r.1901 zmena pozorovateľa, správcom sa stala škola, pokles kvality výkazov, časté striedanie pozorovateľov), alebo Oravský Podzámok koncom 40. a v 50. rokoch, keď boli problémy s pozorovateľmi (viď. revízia v marci 1953 - "najnekvalitnejšia stanica v Žilinskom okrese") a takto je možné pokračovať ďalej, niekedy však bolo obťažné odhadnúť pôvod poklesu.

Zaujímavé je, že pokles r počas sťahovaní staníc, respektíve premiestňovaní meteorologických búdok (viď. história staníc alebo obr.A-8 až obr.A-13), bol relatívne nízky. Vo väčšine prípadov neprekračoval 10% (absolútne 0,1) (Liptovský Hrádok - r.1923, Spišská N. Ves - r.1955, Spišská N. Ves - voj. 4.1947, atď). Jediný výraznejší prípad, keď prekročil bol presun búdky v Tatranskej Lomnici (január 1935) o 30 m.

Spoločné znaky priebehu korelačných koeficientov pre ročné teploty vzduchu:

- ☐ takmer na všetkých staniciach sa prejavilo obdobie 2. svetovej vojny znížením r , najmä v r.1943-46, (ide zrejme o odraz napätia sociálno-spoločenskej situácie),
- ☐ relatívne najdisharmonickejšie obdobie bolo cca r.1890-1920, dôvod disharmónie nie je jasný, možno prípadné nejednotné pozorovacie termíny,
- ☐ relatívne najharmonickejšie obdobia boli 1922-42, 1947-55.

5.2.2. Redukcie nekorektných údajov v teplotných radoch

Pri hľadaní hodnôt spôsobujúcich pokles korelačných koeficientov (r), boli v oblastiach ich poklesu skusmo vylučované jednotlivé hodnoty a pozorovaná následná reakcia r . Testovali sa vždy všetky stanice, aby sa čo možno najspoľahlivejšie určila tá, ktorá pokles vyvolala.

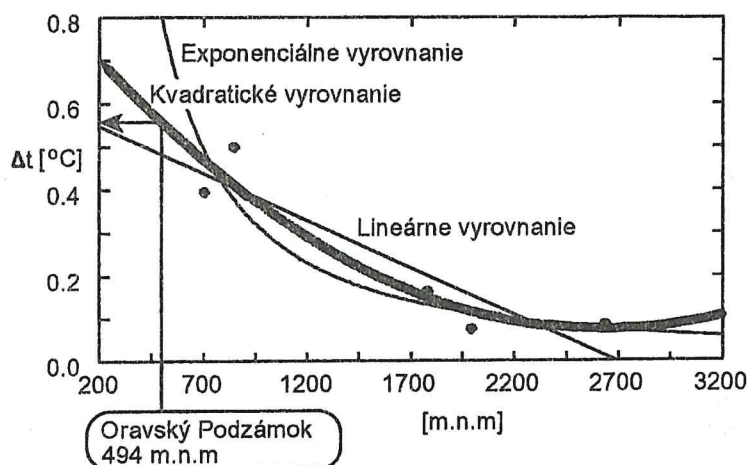
V momente, keď bol dosiahnutý optimálny kompromis (najvyššie hodnoty r pri čo najmenšom počte vylúčených hodnôt), vylučovanie údajov sa ukončilo. Proti tomuto spôsobu je, pravdaže, možné mať námietky. Mohli sa ním prekryť nehomogenity v údajoch z prípadných nezaregistrovaných zmien polohy stanice alebo zmien pozorovacích termínov. Za určitých okolností dochádzalo k stavu, že po vylúčení niektorého údaju zostalo v 10-ročnom (alebo väčšom) úseku menej ako 6 dvojíc údajov, tým pádom došlo k strate r (jedného alebo viacerých) v tomto úseku a nebolo teda možné pomocou zmeny hodnoty r určiť, či vylúčená hodnota bola zvolená správne. Tieto situácie sa posudzovali individuálne tak, že podozrivý údaj sa najprv pokusne korigoval. Vypočítali sa r a v prípade, že sa ich hodnoty výraznejšie zväčšili, bol pôvodný podozrivý údaj považovaný za nekorektný a bol vylúčený. Napriek tomu mohlo v týchto situáciách dôjsť k nepresnostiam. Úseky, kde tento stav nastal, je možné kontrolovať pomocou tab.At-1 obsahujúcej existujúce a vylúčené údaje, a pomocou priebehov korelačných koeficientov (obr.A-15 až obr.A-18).

Tab.1 Rozdiely dlhodobých priemerných mesačných teplôt pre odlišné pozorovacie termíny $\Delta t=A-B$ (A: 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰, B: 6⁰⁰-14⁰⁰-22⁰⁰) v období 1951-60 v °C

Stanica	m.n.m	jan	feb	mar	apr	máj	jún	júl	aug	sep	okt	nov	dec	priemer
Lomn.Stít	2635	0,00	0,00	0,05	0,15	0,10	0,18	0,15	0,13	0,13	0,08	0,00	0,02	0,09
Kasp.Wierch	1991	0,00	0,00	0,05	0,08	0,07	0,20	0,15	0,15	0,05	0,08	0,00	0,05	0,07
Skaln.Pleso	1778	0,00	-0,03	0,15	0,23	0,23	0,32	0,28	0,23	0,25	0,10	0,05	0,00	0,16
Poprad	703	-0,03	0,08	0,15	0,60	0,75	0,80	0,85	0,75	0,57	0,20	0,05	-0,02	0,40
Zakopane	844	0,13	0,18	0,35	0,58	0,92	0,95	0,98	0,93	0,60	0,25	0,05	0,08	0,50

Z hľadiska informačnej hodnoty sú údaje o teplote vzduchu z minulého storočia v Oravskom Podzámku nepochybne veľmi cenné, naviac keď sa ukázalo, že sú zrejme spoľahlivé vzhľadom na vysokú koreláciu so Spišskou Novou Vsou. Z tohto dôvodu bol urobený pokus homogenizovať periódu 1871-88 meraní v iných (B) denných pozorovacích termínoch. Postup bol nasledovný: z priemerných dlhodobých hodinových chodov teplôt uvádzaných Končekom a Orlitzom (1974) boli v období 1951-60 spracované rozdiely dlhodobých priemerných mesačných teplôt $\Delta t = A - B$ pre odlišné pozorovacie termíny (A: 7⁰⁰-14⁰⁰-21⁰⁰, B: 6⁰⁰-14⁰⁰-22⁰⁰) na piatich tatranských staniciach. Výsledky sú v tab.1.

Ďalej boli skúmané závislosti medzi nadmorskou výškou staníc a Δt pre všetky mesiace a ročný priemer. Ako vidno z obr.9, kde je vyhodnotená závislosť nadmorskej výšky a ročného priemeru Δt , najvhodnejším sa ukázalo byť vyrovnanie kvadratickou funkciou. To isté platilo aj pre mesačné priemery, pri ktorých sa krivka plynulo menila od "takmer priamky" po krivku s maximálnym zakrivením podľa klimatických špecifik jednotlivých mesiacov. Na základe tohto grafu bolo možné odhadnúť Δt pre ročné hodnoty Oravského Podzámku. Nové opravené ročné údaje teplôt vzduchu boli získané pripočítaním $\Delta t = 0,55^\circ\text{C}$ ku každému pôvodnému ročnému údaju v období 1871-88, čo znamená, že priemerná teplota vzduchu za toto obdobie stúpla o tú istú hodnotu.



Obr. 9 Závislosť Δt od nadmorských výšok jednotlivých staníc počas obdobia 1951-60

5.3. ATMOSFÉRICKÉ ZRÁŽKY

Atmosférické zrážky spolu s teplotou vzduchu patria medzi najdôležitejšie klimatické a meteorologické premenné. Zrážky sa doposiaľ merajú najmä bodovo zrážkomermi. Vo výkazoch boli udávané v mm vodného stĺpca, až na Oravský Podzámok v r.1871-83, kde boli udávané v desatinách palca. Meranie sa robí raz za 24 hodín v ranných hodinách. Čo sa týka typu u nás používaných zrážkomerov, najstarší záznam vo výkaze udávajúci zachytnú plochu 500 cm^2 , pochádza z r.1930 (plocha 500 cm^2 je dodnes nezmenená).

Proces merania zrážok je na rozdiel od teplôt omnoho problematickejší a citlivejší. Je zatažený množstvom silných systematických a náhodných chýb rozličného pôvodu. Ľudská nedokonalosť má v ňom tiež veľa možností na uplatnenie. Okrem toho, zrážky zachytené zrážkomerom reprezentujú zrážky padajúce na území s plochou rádovo desiatky km^2 , kde najmä dážď a sneh sú častokrát veľmi nepravidelne distribuované. Korelačné vzťahy medzi ročnými úhrnmi zrážok v jednotlivých staniach reprezentuje obr.A-17 pre všetky kombinácie staníc.

5.3.1. Výsledky analýzy vzájomných kľúčových korelácií zrážkových radov

Potvrdilo sa, že korelačné vzťahy ročných úhrnov zrážok medzi jednotlivými stanicami sú omnoho voľnejšie a rozkolísanejšie ako pri teplotách, a preto sa pri ich hodnotení odhadovali dôvody disharmónií v ich priebehoch obťažnejšie. Napriek tomu aj tu sa dá hovoriť o zjavnom podiele ľudského faktora. Dobré to reprezentuje napríklad vzťah Starý Smokovec - Tatranská Lomnica, kde polovica korel. koeficientov (r) v rokoch 1902-11 sa pohybuje okolo 0,1 a v rokoch 1922-55 sú takmer všetky $r > 0,9$. Navyše tieto stanice sú geograficky veľmi blízko. Stanice vzdialenejšie od seba však tiež môžu dosahovať silné korelačné vzťahy, ako Oravský Podzámok - Tatranská Lomnica v r.1922-40, keď až na jeden sú všetky $r > 0,8$ a sedem po sebe idúcich r v r.1932-38 je $> 0,9$, naopak v r.1897-1909 sú $r \in (0,5; -0,6)$. Po vylúčení niekoľkých hodnôt sa veľmi vylepšili korelačné vzťahy napríklad Liptovský Hrádok - Spišská Nová Ves v r.1882-1913, všetky $r > 0,8$ a väčšina sa pohybuje okolo 0,9, pôvodne však boli veľmi nízke. Takýmto spôsobom je možné pokračovať ďalej. Ďalšie porovnanie a informácie poskytuje obr.A-17.

Určiť, z ktorých staníc pochádzajú dáta spôsobujúce disharmónie, nebolo také jednoznačné ako pri teplotách vzhľadom na väčšiu rozkolísanosť korelačných koeficientov. Aj napriek tomu je možné povedať, že cca v r.1900-10 Tatranská Lomnica výrazne nekoreluje so žiadnou stanicou. Zaujímavý je relatívny pokles korelačného koeficientu v r.1927 vo všetkých prípadoch, ale príčina poklesu zatiaľ nie je známa.

Spoločné znaky priebehu korelačných koeficientov pre ročné úhrny zrážok sú v celkom dobrej zhode so spoločnými znakmi pre teploty vzduchu:

- rovnako ako pri teplotách sa takmer na všetkých staniach disharmonicky (poklesom r) prejavilo obdobie 2. svetovej vojny, najmä v r.1943-46 (ide zrejme o odraz napätej sociálno-spoločenskej situácie),

- relatívne najdisharmonickejšie obdobie nie je také jednoznačné ako u teplôt, k najväčším disharmóniám dochádzalo najmä v r.1900-10 (-20),
- relatívne najharmonickejšie obdobia boli 1920-42, 1950-55.

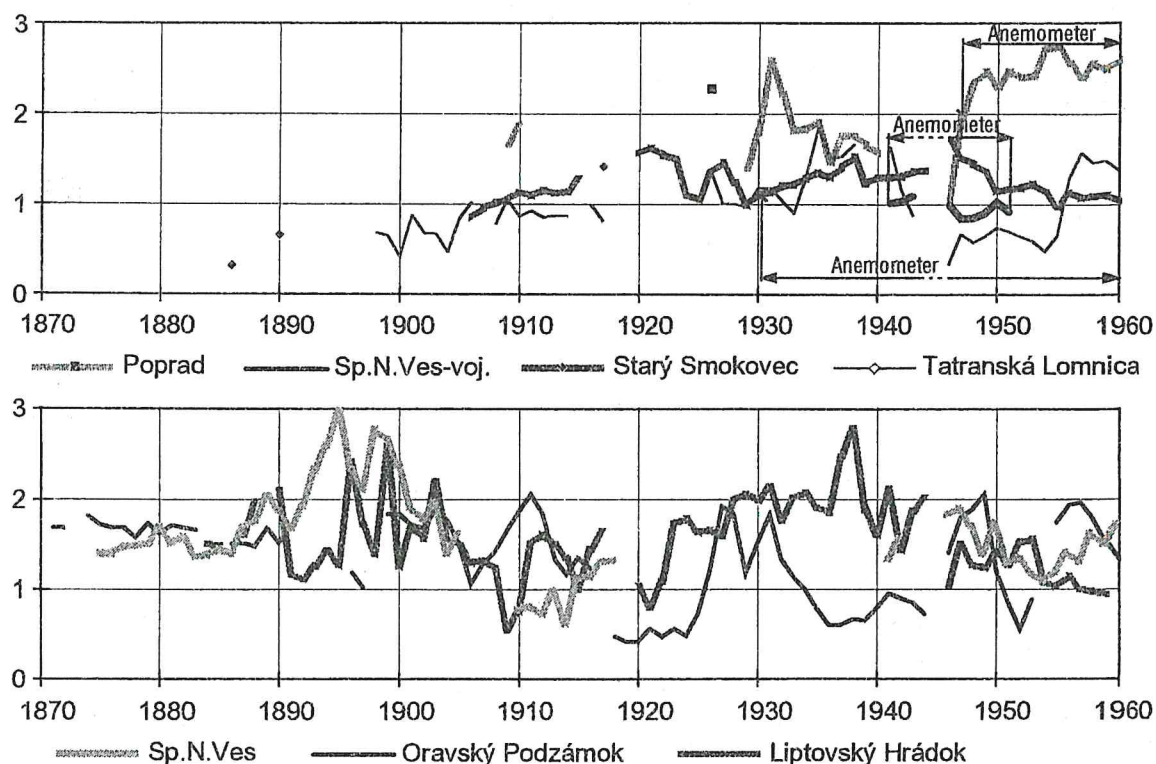
5.3.2. Redukcie a opravy nekorektných údajov v zrážkových radoch

Pri opravách jednoznačných chýb a hľadanií a vyradovaní hodnôt spôsobujúcich pokles korelačných koeficientov sa postupovalo rovnako, ako je uvedené v kap. 5.2.2 v oprave a redukcii teplôt vzduchu o nekorektné údaje. Vylúčené hodnoty je takisto možné konfrontovať v tab.At-1.

5.4. RÝCHLOSŤ VETRA

Vietor je tiež jedným zo základných meteorologických prvkov. Teoreticky je to vektorová veličina popisujúca pohyb zvolenej častice vzduchu v určitom mieste atmosféry v danom časovom okamžiku. V meteorologickej praxi je za vietor považovaná zvyčajne horizontálna zložka pohybu vzduchu vzhľadom na zemský povrch. Rýchlosť vetra sa meria v m.s^{-1} , v minulosti sa tiež merala sila vetra v stupňoch Beauforta. Vo výkazoch bola udávaná len sila vetra v stupňoch Beauforta a v týchto jednotkách je spracovávaná aj v tejto práci, pretože prepočet spracovávaných mesačných hodnôt na m.s^{-1} nie je možný kvôli nelineárnosti Beaufortovej stupnice.

Sila vetra je vo všetkých staniciach odhadovaná subjektívne v stupňoch Beauforta, okrem Starého Smokovca (anemometer používaný pravdepodobne od 30. rokov, podľa Petroviča: "Berkovský od 30-tych rokov meral ručným anemometrom, pretože robil schladzovanie", v r.1953 zmienka o výmene pokazeného ručného anemometra - "ukazoval menej"), Popradu (anemometer od r.1947) a vojenskej stanice v Spišskej Novej Vsi (1.1941 - 6.1952). Odhadované údaje sú natoľko nehomogénne a tak výrazne závislé na subjektivite pozorovateľov (viď. séria obr.A-8 až obr.A-14 a obr.7), že nemá zmysel ich štatisticky analyzovať tak detailne ako teploty a zrážky. Potvrdzuje to aj omnoho menšia variabilita modulov priemerných ročných síl vetra v Spišskej Novej Vsi - vojenskej a jej rapídne zníženie v Poprade po r.1946 a v Starom Smokovci po r.1930, odkedy sa tam meralo anemometrom. V Starom Smokovci však menej rapídne, pretože moduly priemerných ročných síl vetra tu majú počas celého pozorovacieho obdobia relatívne malú variabilitu, v porovnaní s ostatnými stanicami, čo je možné vidieť aj na obr.7. Zaujímavá je relatívne malá variabilita rýchlostí v Spišskej Novej Vsi a Oravskom Podzámku v r.1872-90 proti iným obdobiam.



Obr.7 Porovnanie priebehov priemerných ročných síl vetra [stupne Beauforta]

5.5. POROVNANIE VLASTNOSTÍ REDUKOVANÝCH A NEREDUKOVANÝCH RADOV

5.5.1. Regresná analýza, trendy, štandardizácia

Priebehy korelačných koeficientov po redukcii a opravách zrážkových a teplotných radov je možné posúdiť na obr.A-18. Vidno, že korelačné koeficienty sú vyššie. Je možné konfrontovať obdobia s vyradenými údajmi (tab. At-1) s históriou staníc. Vo väčšine prípadov je v histórii staníc možné nájsť logické zdôvodnenie potvrdzujúce podozrenia, že nezrovnalosti boli spôsobené nekorektným pozorovaním.

Na obr.12 a obr.13 je možné porovnať trendy neredukovaných radov zrážok a teplôt vzduchu všetkých spracovaných staníc okrem Spišskej Novej Vsi - vojenskej (príliš krátky rad). Na tieto obrázky nadväzuje tab.2, v ktorej je uvedený prepočet trendov teplôt v °C na jednotnú 100 ročnú časovú bázu (1870-1969) pre neredukované, redukované a niektoré dodatočne modifikované sporné rady teplôt vzduchu. Taká istá je tab.3 s prepočtom trendov zrážok v mm.

Ako vyplýva z tab.2, trendy teplôt po redukcii sa zmenili len mimimálne a vo všeobecnosti naznačujú stúpajúcu teplotu vzduchu, respektíve otepľovanie, avšak zostávalo ešte posúdenie vplyvu sporných úsekov niektorých staníc. V redukovanom rade Oravského Podzámku bol zvýšený teplotný priemer obdobia 1871-88 o $\Delta t = 0,55^{\circ}\text{C}$ (Δt sa pripočítalo ku každej pôvodnej ročnej hodnote, viď. kap. 5.2.2) na základe zmeny denných pozorovacích termínov v r.1888 a pre dopĺňujúce porovnanie bola táto perióda vynechaná. V oboch prípadoch trend výrazne poklesol, a to aj napriek tomu, že po redukcii bol vyšší ako neredukovaný. V redukovanom rade Tatranskej Lomnice po pokusnom vynechaní sporného obdobia 1905-17 trend takisto výrazne poklesol.

V Starom Smokovci je naopak podozrivo teplotne vysoké a so všetkými stanicami veľmi zle korelujúce obdobie 1880-90. Po jeho vylúčení sa trend v redukovanom rade Starého Smokovca z klesajúceho zmenil na mierne stúpajúci, je však zjavné, že toto stúpanie je ovplyvnené aj nižšími počiatočnými teplotami v období 1906-18. Táto úprava dát spôsobila, že trendy v relatívne veľmi blízkych stanicach začali navzájom viac harmonizovať. Zdá sa, že je to omnoho logickejšie ako pri pôvodných dátach, keď sa geograficky veľmi blízke stanice Tatranská Lomnica, Starý Smokovec a Poprad v charaktere trendov tak výrazne líšili.

Čo sa týka zrážok, prevláda v nich výrazný záporný trend, ktorý sa po redukcii údajov väčšmi zmenil len v Oravskom Podzámku (v zápornom smere) a v Tatranskej Lomnici (v kladnom smere). Prekvapujúce správanie, podobne ako pri teplotách, má Starý Smokovec, ktorého trendy nekorešpondujú s ostatnými stanicami. Ako jediný má výrazný pozitívny zrážkový trend. Bolo v ňom preto pokusne vynechané obdobie 1881-90. Trend sa prakticky priblížil k nule. V Oravskom Podzámku bolo opäť pokusne vynechané sporné obdobie 1871-90. Trend sa znížil a priblížil k ostatným stanicam.

Za spoločné znaky v trendovej analýze a porovnaní redukovaných a neredukovaných údajov spracovávaných staníc je možné považovať:

- ☐ Zrážky majú vo všetkých prípadoch výrazný klesajúci trend.
- ☐ Oravský Podzámok má najextrémnejšie výchylky trendov ako zrážok, tak aj teplôt. Charakter trendov je však v súlade s ostatnými stanicami (s výnimkou Starého Smokovca). Je možné to čiastočne vysvetliť podozrením na inú polohu stanice v minulom storočí a nedodržiavaním pozorovacích termínov.
- ☐ Starý Smokovec má výrazne opačné vlastnosti trendov v porovnaní s ostatnými stanicami. Do značnej miery sa na tom podieľa pozorovacie obdobie 1881-90. Hodnoty teplôt a zrážok z tohto obdobia nekorešpondujú s ostatnými stanicami a je tu silné podozrenie na ich nespoľahlivosť.

Čiastočne na obr. 14 a hlavne v tab. 4, sú prezentované výsledky porovnania priebehov redukovaných a neredukovaných trendov štandardizovaných regionalizovaných radov, zvlášť pre teploty a zrážky.

Štandardizácia a regionalizácia bola urobená tak, ako je uvedené v kap. 5.1, a podľa vzťahu 3. V redukovaných radoch boli pre porovnanie urobené ďalšie modifikácie v sporných obdobiach niektorých staníc, rovnako ako pri trendovej analýze radov jednotlivých staníc. V zrážkach, na rozdiel od teplôt, je opäť menej modifikačných zásahov vzhľadom na to, že problematické miesta sa, z hľadiska ich spoľahlivosti, určovali ťažšie. Mnohé sporné úseky boli navyše vyradené už pri samotnej redukcii na základe princípu popísanom v kap. 5.2.2 bez dodatočných modifikácií. Pri teplotách boli prevedené modifikácie v sporných úsekoch vybraných staníc tak, že buď boli tieto periódy vynechané, alebo bola najprv pre daný rad vypočítaná spoločná smerodajná odchýlka σ_x , potom sa rad v mieste zmeny pozorovacích podmienok rozdelil na dva, pre obidve časti sa vypočítali samostatné priemery a celý rad sa štandardizoval s dvomi odlišnými priemerami a spoločnou σ_x . Postup je naznačený v sérii vzťahov 5.

Tab. 2 Trendy teplôt vzduchu v prepočte na jednotné obdobie 1870-1969

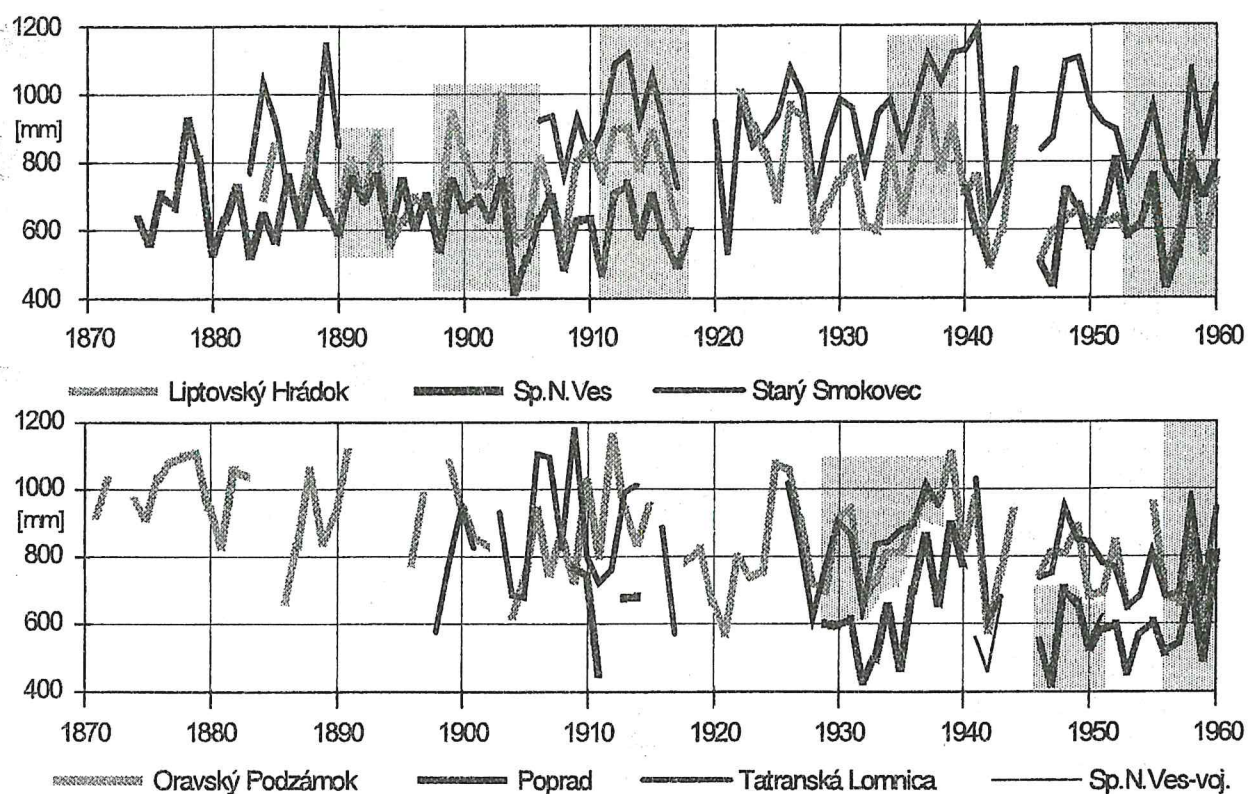
Stanica	r.1870 [°C]	r.1969 [°C]	Rozdiel [°C]
Pôvodné rady			
Oravský Podzámok	5,26	7,11	1,85
Liptovský Hrádok	5,77	6,25	0,47
Poprad	6,07	5,76	-0,31
Spišská Nová Ves	6,56	6,74	0,18
Starý Smokovec	5,12	4,54	-0,58
Tatranská Lomnica	5,53	5,53	2,01
Redukované rady			
Oravský Podzámok	5,20	7,12	1,91
Liptovský Hrádok	5,81	6,23	0,42
Poprad	6,02	5,80	-0,22
Spišská Nová Ves	6,54	6,73	0,19
Starý Smokovec	5,10	4,58	-0,52
Tatranská Lomnica	3,51	5,60	2,09
Redukované a modifikované rady			
Oravský Podzámok prípočítané $\Delta t=0,55^{\circ}\text{C}$ v rokoch 1871-88	5,65	6,88	1,23
Oravský Podzámok vynechané roky 1871-88	5,52	6,96	1,44
Tatranská Lomnica vynechané roky 1905-17	4,49	5,37	0,88
Starý Smokovec vynechané roky 1880-90	4,48	4,83	0,35

Tab. 3 Trendy úhrnov zrážok v prepočte na jednotné obdobie 1870-1969

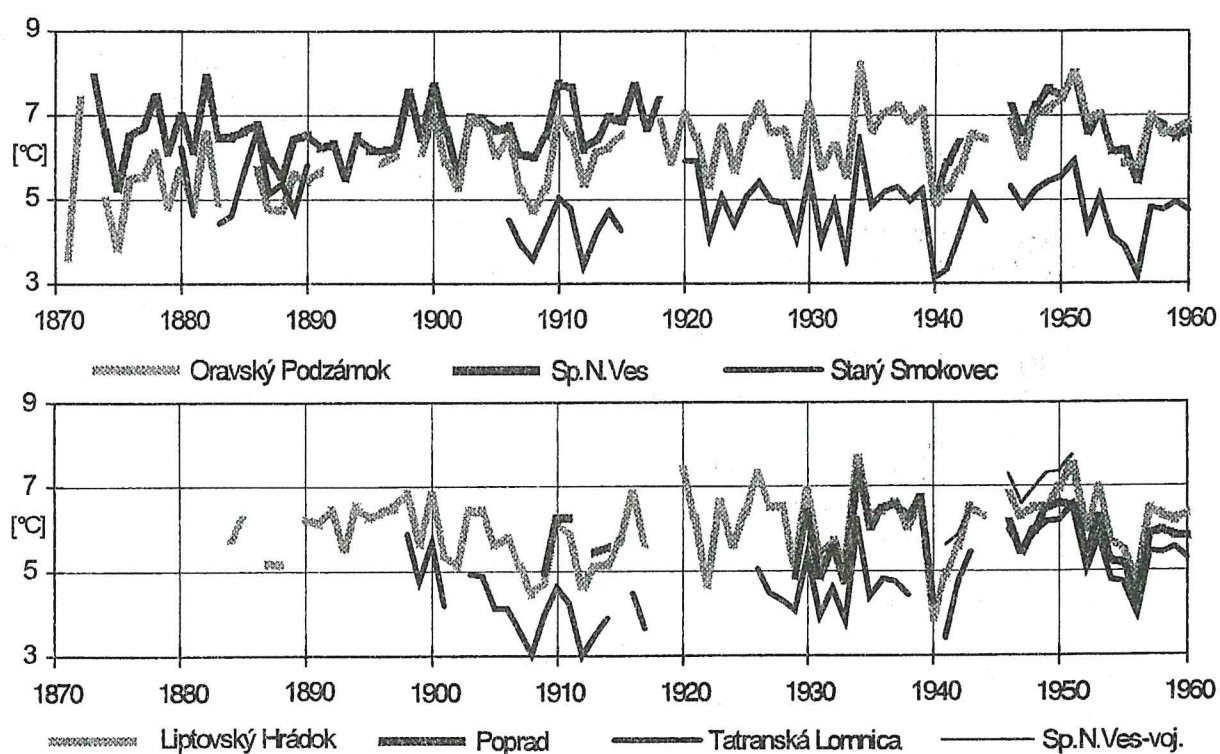
Stanica	r.1870 [mm]	r.1969 [mm]	Rozdiel [mm]
Pôvodné rady			
Oravský Podzámok	980	733	-247
Liptovský Hrádok	805	658	-147
Poprad	723	580	-144
Spišská Nová Ves	662	621	-41
Starý Smokovec	833	962	129
Tatranská Lomnica	900	780	-120
Redukované rady			
Oravský Podzámok	998	714	-284
Liptovský Hrádok	806	657	-148
Poprad	728	579	-149
Spišská Nová Ves	665	613	-51
Starý Smokovec	840	959	119
Tatranská Lomnica	871	784	-87
Redukované a modifikované rady			
Oravský Podzámok vynechané roky 1871-91	928	752	-176
Starý Smokovec vynechané roky 1881-90	917	925	8

Tab. 4 Relatívne trendy teplotných a zrážkových radov po štandardizácii a regionalizácii v prepočte na jednotné obdobie 1870-1969

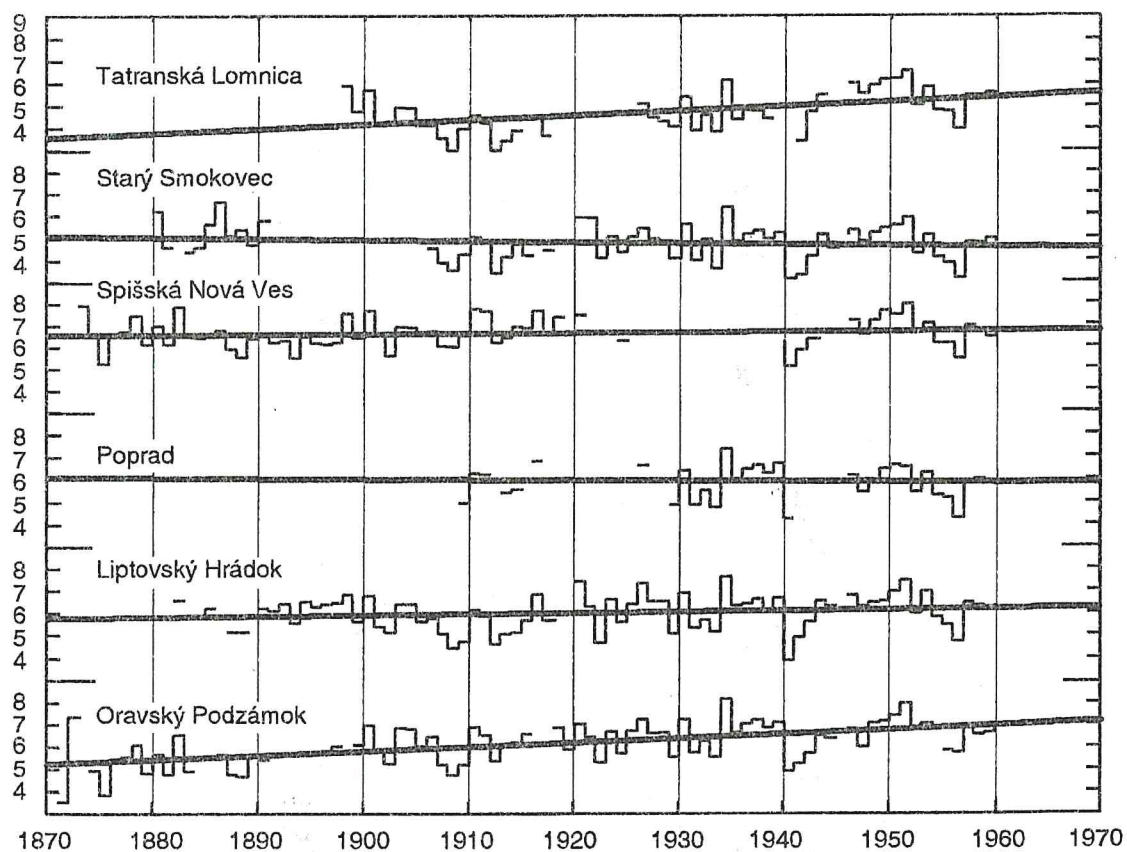
Štandardizované a regionalizované teplotné rady	Relatívny trend na 100 rokov	Štandardizované a regionalizované zrážkové rady	Relatívny trend na 100 rokov
1. teploty pôvodné:	0,621	1. zrážky pôvodné:	-0,695
2. teploty redukované:	0,599	2. zrážky redukované:	-0,722
3. teploty redukované + modifikované: Oravský Podzámok - vynech. r. 1871-88 Spišská N. Ves - vynechané roky 1946-60	0,088	3. zrážky redukované + modifikované: Oravský Podzámok - vynech. roky 1871-91	-0,632
4. teploty redukované + modifikované: Oravský Podzámok - rad rozdelený v roku 1891, dva priemery, spoločná σ_x Spišská N. Ves - detto v roku 1945	0,013	4. zrážky redukované + modifikované: Oravský Podzámok - vynech. roky 1871-91 Starý Smokovec - vynech. roky 1881-90	-0,511
5. teploty redukované + modifikované: Oravský Podzámok - prípočítané $\Delta t=0,55^{\circ}\text{C}$ v rokoch 1871-88, rad rozdelený na dva v r.1891, dva priemery, spoločná σ_x Tatranská Lomnica - vynech. r. 1905-18	0,049		
6. teploty redukované + modifikované: Oravský Podzámok - detto ako v 5.	0,120		
7. teploty redukované + modifikované: Oravský Podzámok - prípočítané $\Delta t=0,55^{\circ}\text{C}$ v rokoch 1871-88	0,388		



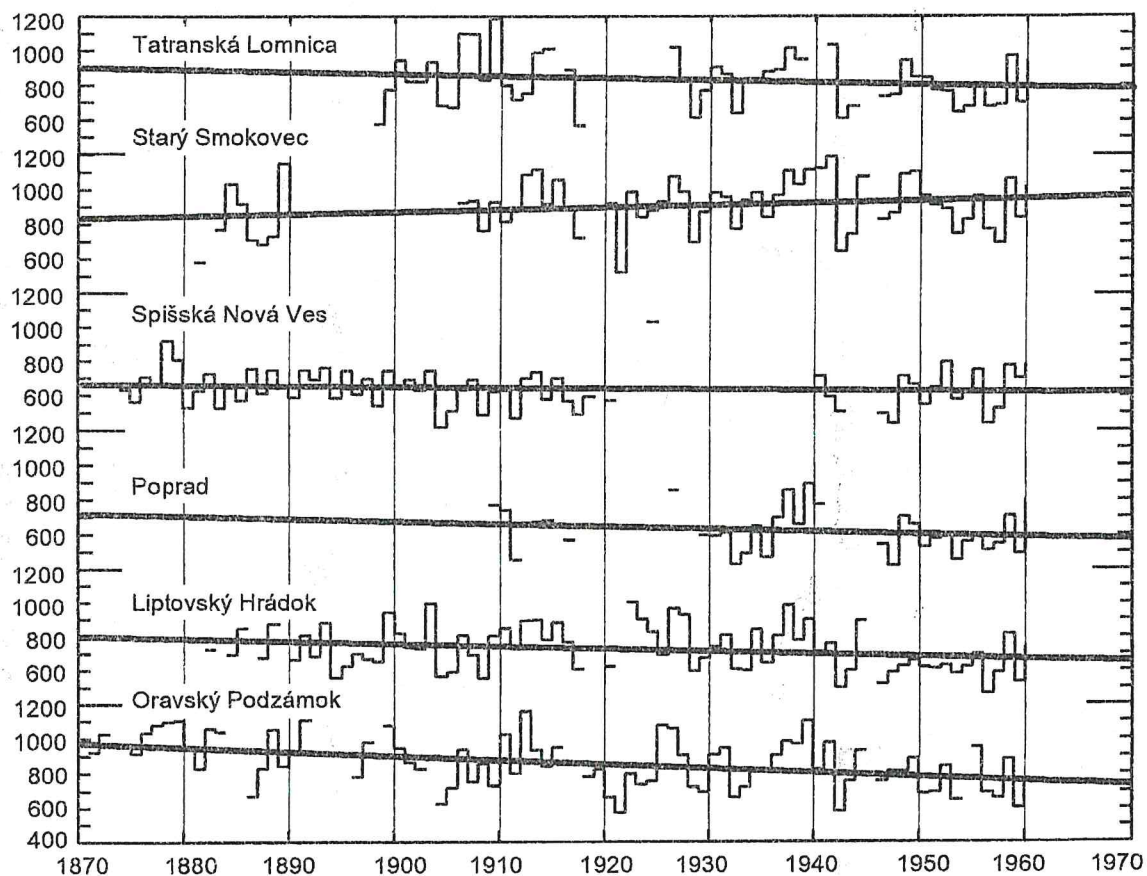
Obr. 10 Porovnanie priebehov ročných úhrnov zrážok [mm]. Obdobia dobrej synchronizácie sú vyznačené rastrom (pri významnej synchronizácii po celej výške obr.)



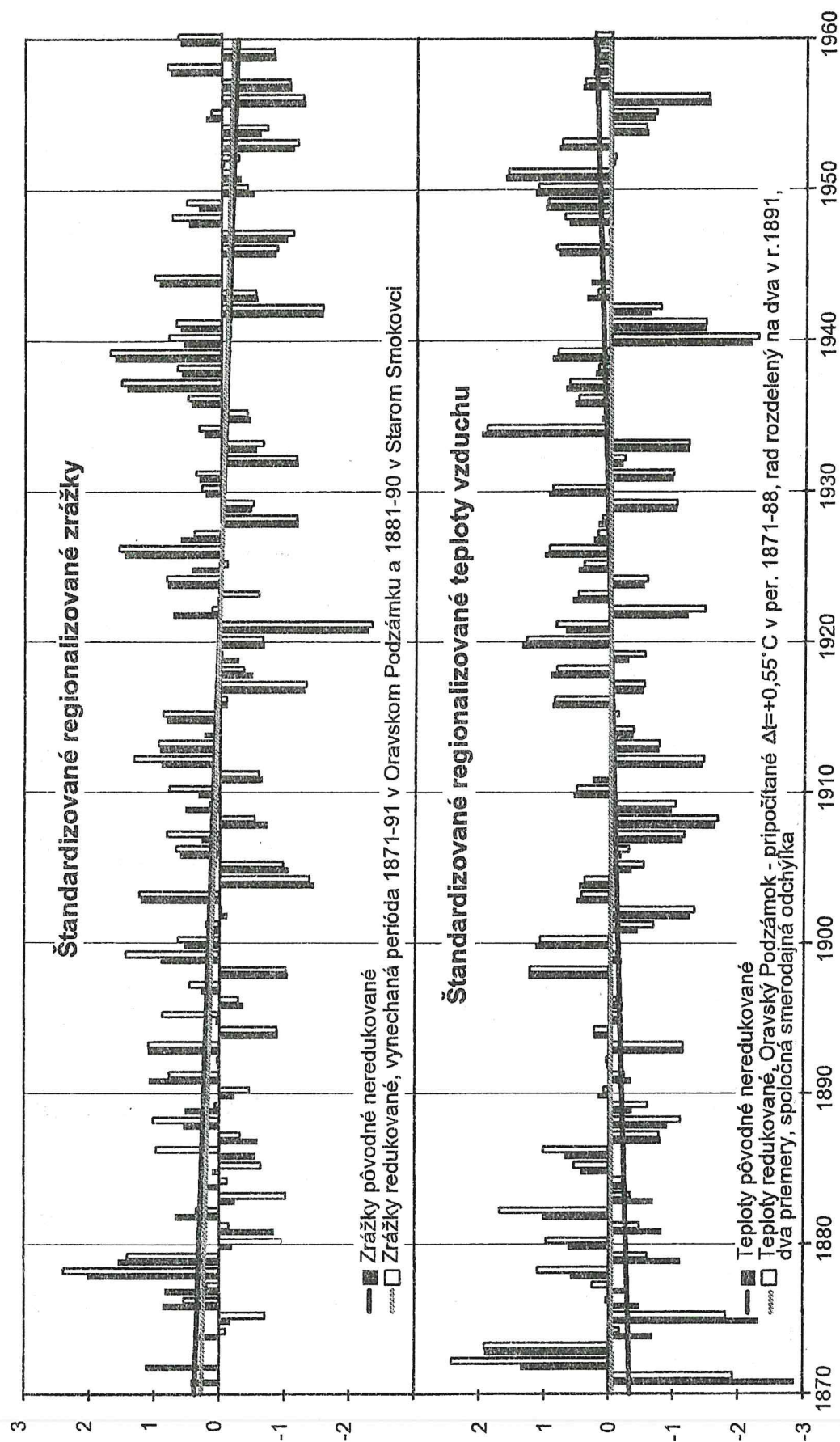
Obr. 11 Porovnanie priebehov priemerných ročných teplôt vzduchu [°C]



Obr. 12 Trendy ročných teplôt [°C] vzduchu pre pôvodné údaje



Obr. 13 Trendy ročných úhrnov zrážok [mm] pre pôvodné údaje



Obr. 14 Porovnanie neredukovaných a vybraných redukovaných údajov po štandardizácii a regionalizácii teplotných a zrážkových radov

$$\bar{x} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}{2}; i = 1, n; i_1 = 1, n-m; i_2 = n-m+1, n; s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}};$$

$$x_{i1stand} = \frac{x_{i_1} - \bar{x}_1}{\sigma_x}; x_{i2stand} = \frac{x_{i_2} - \bar{x}_2}{\sigma_x}$$

5

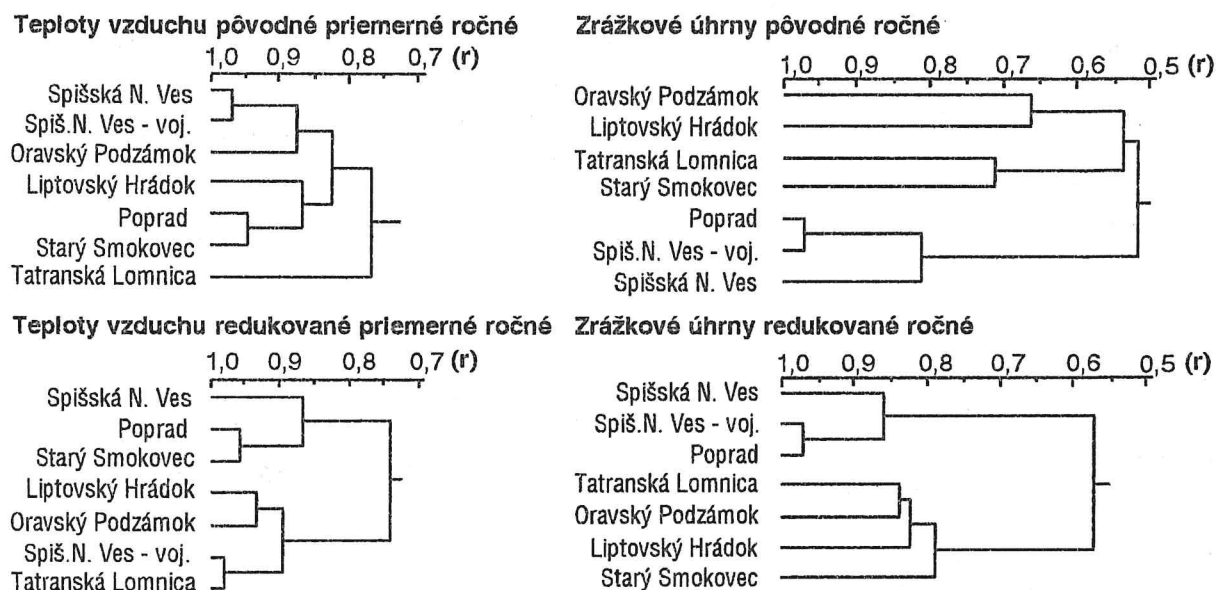
Na obr. 14, na ktorom sa porovnávajú pôvodné regionálne trendy s redukovanými, boli vybrané také redukované trendy, ktoré podľa autora výstižne reprezentujú reálnu situáciu v zrážkach a teplotách. Pre porovnanie zrážok bola vybraná najextrémnejšia modifikácia dát s najväčším rozdielom v trendoch. Ako vidno, rozdiel v trendoch je naozaj veľmi malý, rovnako ako aj trendy pre ostatné modifikácie uvedené v tab. 4. Pre teploty bola vybraná modifikácia, ktorá by sa mala čo najviac blížiť k pravde, t.j. vrátane opravy podhodnotených údajov v Oravskom Podzámku o $\Delta t = +0,55^\circ\text{C}$ (kap. 5.2.2) v období 1871-88 a štandardizácie prevedenej s dvomi priermi (rovnice 5) vzhľadom na predpokladanú inú polohu stanice v minulom storočí.

5.5.2. Hierarchická klastrová analýza

Klastrová ("cluster" - skupina, grupa) analýza je súbor metód a algoritmov pre detekovanie prirodzeného zoskupovania objektov v údajoch na základe ich podobnosti, respektíve odlišnosti. Podobné objekty by sa mali objaviť v tom istom klastri a odlišné v rozdielnych klastroch. Klastrovanie môže byť prekrývajúce ("overlapping") alebo výhradné ("exclusive"). Výhradná klasterizácia na rozdiel od prekrývanej neumožňuje, aby sa ten istý objekt objavil vo viacerých klastroch. Sú dva prístupy na vytváranie výhradných klastrov: hierarchický a nehierarchický (resp. delený). Hierarchické klastre sa skladajú z klastrov, ktoré sa skladajú z ďalších klastrov, a tie sa skladajú z ďalších, atď. Výstup z hierarchickej metódy môže byť reprezentovaný ako strom-dendrogram.

Všeobecne platí, čím sú dva objekty v danom priestore príbuznejšie, tým majú väčší index podobnosti a menší odlišnosti. Napríklad euklidovská vzdialenosť medzi dvoma objektmi je indexom odlišnosti, korelačný koeficient indexom podobnosti.

Blížší popis metódy uvádza Niepel s Nieplovou [5] aj s príslušným zoznamom literatúry. Dobrý všeobecný popis metódy je možné nájsť aj v príručke štatistického software Systat for Windows [7] aj s príslušným zoznamom najaktuálnejšej literatúry.



Obr. 15 Hierarchická klastrová analýza, Pearsonova metrika korelačného koeficientu r , metóda spájania priemerov

Na obr.15 je možné porovnať hierarchické usporiadanie staníc (stanica = objekt) do klastrov. Ako súbory príznakov boli zvolené redukované a neredukované priemerné ročné teploty a úhny zrážok. Redukované údaje neboli následne modifikované a zodpovedajú redukcii uvedenej v tab. At-1.

Z obrázkov je zrejmé, že po redukcii údajov sa zvýšila príbuznosť údajových radov jednotlivých staníc. Veľmi dobre je to pozorovateľné na zrážkach, kde sa po klastelizácii vytvorili dve výrazné skupiny staníc. Ide o skupinu Tatranská Lomnica - Oravský Podzámok - Liptovský Hrádok - Starý Smokovec a skupinu Spišská N. Ves - Poprad - Spišská N. Ves vojenská. Táto tendencia zoskupovania sa prejavuje aj v pôvodných zrážkových údajoch, ale menej výrazne najmä v prvej skupine, ktorá koreluje slabo.

6. ZÁVERY

Potvrdilo sa, že ľudský faktor - pozorovatelia a kvalita ich pozorovateľskej činnosti, je skutočne ďalším z významných sekundárnych zdrojov fluktuácií v klimatických údajoch, neraz dôkladne prekrývajúcim skutočné fluktuácie. Niektoré zmeny pozorovateľov alebo správcu stanice ovplyvnili konzistenciu dát výraznejšie ako presťahovanie stanice.

Pomocou redukcii a modifikácie údajov sa preukázalo, že vplyv ľudského faktora v pozorovacom procese je teoreticky schopný svojím šumom významne zmeniť charakter trendu teplôt v regióne. Signifikantne stúpajúci trend neredukovaného regionalizovaného radu poklesol po redukcii údajov len zanedbateľne, avšak poklesol takmer na nulu, keď sa zvýšila teplota o Δt v Oravskom Podzámku v perióde 1871-88. Taktiež v ostatných testovaných modifikáciách údajov sa trend blíži k nule.

Iná je situácia so zrážkami. Tam po procese redukcie a opráv ostal štandardizovaný regionalizovaný trend v porovnaní s klesajúcim trendom pre neredukované údaje prakticky nezmenený aj po modifikáciách údajov. Dôvody totožnosti zrážkových trendov môžu byť rôzne, okrem iného ich mohla ovplyvniť nižšia pravdepodobnosť správneho určenia nekorektných údajov, ako u teplôt a v neposlednom rade tiež neistota o používanom type zrážkomera pred r.1930 (prvá zmienka o zachytnej ploche 500 cm² bola v revízii z Popradu, r.1930).

Výsledky tejto práce by mali prispieť k spresneniu odhadu informačnej hodnoty údajov o zrážkach, teplotách vzduchu a rýchlostiach vetra zo spracovávaných staníc, a k vyjasneniu interpretačných možností výsledkov získaných z rozličných analýz vlastností týchto veličín, respektíve ich vzájomných vzťahov v rámci uvedených staníc.

Všeobecne sa dá povedať, že bez posúdenia miery vplyvu ľudského faktora na spoľahlivosť základných klimatických údajov, je sotva možné považovať výsledky akýchkoľvek analýz vlastností časových radov za úplné a vierohodné. Z tohto hľadiska je dôležitá informácia, že v rámci staníc spracovaných v štúdiu, sa najspoľahlivejšími preukázali pozorovania v období 1921-60 v Starom Smokovci, kedy pozoroval, resp. bol správcom stanice František Berkovský. V prípade, že neberieme do úvahy rozličné systematické prístrojové chyby, je možné toto pozorovacie obdobie akceptovať ako referenčné.

7. LITERATÚRA

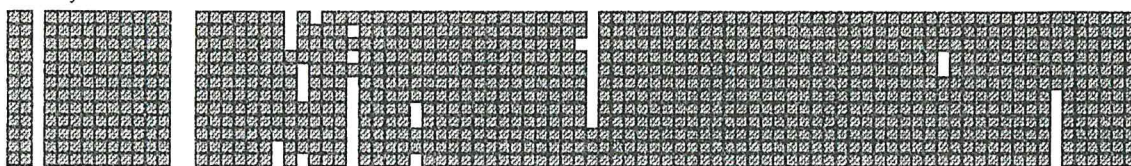
- [1] Plesník, P.: Fyzicko - geografické pomery. In: Konček, M. (ed.): Klíma Tatier. Veda Bratislava 1974, s. 17-26.
- [2] Jones, P. D., Hansen and Lebedeff, Vinnikov K. Y. A: Surface Temperature Variations and Change. In: Climate Change, The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press 1990, s. 206-218.
- [3] Brázdil, R.: Kolísání vybraných meteorologických prvků ve střední Evropě v období přístrojových pozorování. In: Národní klimatický program ČSFR - svazek 2., Praha ČHMÚ 1991, 56 s.
- [4] Konček, M., Orlicz, M.: Teplotné pomery. In: Konček, M., (ed.): Klíma Tatier. Veda Bratislava 1974. s. 89-162.
- [5] Niepel, L., Nieplová, E.: Využitie klastrovej analýzy na určenie teplotne homogénnych oblastí. Meteorologické Zprávy 1992/3, s. 80-84.
- [6] Petrovič, Š., (ed.): Klimatické a fenologické pomery Stredoslovenského kraja. Hydrometeorologický ústav, Bratislava 1972, 431 s.
- [7] Systat for Windows: Statistics, Version 5 Edition. Evanston, IL: SYSTAT, Inc., 1992. 750 s.

8. APENDIX - grafická a tabelárna príloha

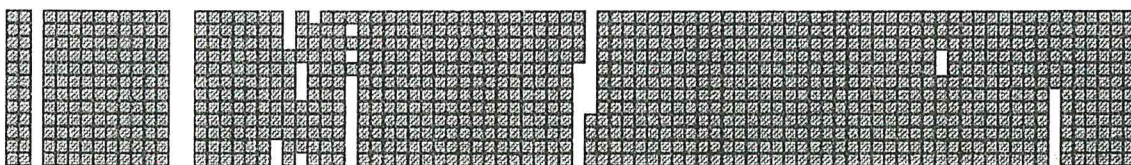
Roky	Priemerne ročné teploty vzduchu							Ročné zrážkové úhny						
	Oravský Podzám.	Liptovský Hrádok	Poprad	Spiš. N.Ves	Starý Smokovec	Tatr. Lomnica	Spiš.N. Ves-voj	Oravský Podzám.	Liptovský Hrádok	Poprad	Spiš. N.Ves	Starý Smokovec	Tatr. Lomnica	Spiš.N. Ves-voj
1871	5.60							623.8						
1872	7.37							1027.3						
1873														
1874	4.98				7.91			966.3			631.9			
1875	3.86				6.59			915.3			561.9			
1876	5.48				5.27			1033.5			707.5			
1877	5.54				6.50			1077.5			665.3			
1878	6.10				6.73			1097.0			920.9			
1879	4.84				7.45			1105.7			808.0			
1880	5.69				6.14			947.3			531.8			
1881	4.79				6.99	6.24		1055.1	726.1		725.8			
1882	6.56	#6,58#			7.89			1038.6#			524.9	768.5		
1883	4.94				6.47	4.44					642.5	1033.8		
1884		#5,77#			6.47	4.61			695.3		569.7	913.9		
1885		#6,23#			6.62	5.63			#845,3#		756.6	711.5		
1886	5.68				6.78	6.64		#667,8#			613.2	#683,9#		
1887	4.79	#5,19#			5.93	#5,15#		828.6	678.1		747.9	#732,7#		
1888	4.72	#5,16#			5.55	#5,38#		1053.3	878.8		651.8	#1148,4#		
1889	5.58				6.42	#4,71#		842.9			591.4	#847,7#		
1890	#5,43#	6.23			6.56	#5,82#		916.3	663.1					
1891	#5,55#	6.13			6.22			1109.0	608.2		690.4			
1892		6.46			6.31				684.6		760.7			
1893		5.54			5.51				883.0		585.8			
1894		6.55			6.49				558.0		745.0			
1895		6.26			6.17				#626,6#		607.3			
1896	#5,84#	6.39			6.14			780.4	697.9		697.0			
1897	#6,08#	6.51			6.22			#980,3#	#668,9#		543.6		577.0	
1898		6.85			7.53	5.90			653.6		744.1		#776,9#	
1899	#6,11#	#5,66#			6.45	4.76		1076.0	941.6		659.2		942.9	
1900	6.98	6.79			7.68	5.67		945.2	818.2					
1901	5.36	5.40			#6,61#	4.18		827.0	729.0		629.8			
1902	5.28	5.12			5.60				997.2		744.4		933.0	
1903	6.88	6.42			6.95	4.93		623.7	564.2		419.7		683.4	
1904	6.82	6.42			#6,92#	4.89		718.5	593.7		512.7		675.5	
1905	6.05	5.63			#6,63#	4.12		936.8	809.9		632.3	921.7	1103.3	
1906	#6,47#	5.79			6.73	4.53		#750,0#	#693,0#		692.2	933.4	1093.7	
1907	5.22	5.11			6.06	3.92		854.6	#557,7#		489.7	764.7	829.1	
1908	4.75	4.46			6.01	3.55		727.3	#800,5#	770.4	#624,3#	927.0	#1184,4#	
1909	5.24	4.77	4.99		6.51	#4,29#	3.99	1022.9	848.4	739.0	630.4	#815,6#	#798,9#	
1910	6.90	6.17	6.26		7.75	5.04	4.60		737.8	465.0	472.2	655.0	775.0	
1911	6.35	6.82	6.22		6.20	3.43	3.00	1155.6	890.5		699.3	1086.4	#757,4#	
1912	5.39	4.64			6.46	4.18	3.47	935.0	900.9	674.3	735.5	1115.7	#990,1#	
1913	6.08	5.09	5.43		6.94	4.71	3.90	840.5	780.2	680.9	578.4	916.8	#1011,4#	
1914	6.24	5.15	5.56		6.86	#4,26#		948.5	882.7		699.6	1056.0		
1915	6.07	5.70			7.67		4.48		765.9	570.1	567.3	890.4	888.0	
1916		6.81	6.82		6.72	#4,48#	3.64		608.9		495.6	724.2	570.6	
1917		5.66			7.35						593.8			
1918	6.85							782.0						
1919	5.90							820.7						
1920	7.03				7.47			664.3	622.9		570.4	919.4		
1921	#6,47#	6.27			5.90			572.1				626.1		
1922	4.81	4.68			4.11			795.4	#1001,8#			986.8		
1923	6.71	6.63			5.06			737.4	#904,2#			843.9		
1924	5.71	5.62			4.40			757.2	826.4		1031.7	878.5		
1925	6.75	6.39			5.06			#1073,7#	690.1			931.0		
1926	7.26	7.32	6.63		5.41	5.05		1055.5	964.4	855.4		1073.0	1017.4	
1927	6.60	6.52			4.97	4.48		906.8	#928,0#			987.0	838.9	
1928	6.64	6.52			4.89	4.29		724.0	597.0			698.7	616.3	
1929	5.57	5.11	4.86		4.06	4.07		693.0	672.5	#599,8#		873.3	770.6	
1930	7.26	6.91	6.39		5.59	5.38		908.7	740.2			981.0	902.1	
1931	6.77	6.35	4.86		3.98	3.92		948.1	818.0	818.2		958.4	887.2	
1932	6.26	5.70	6.51		4.91	4.58		659.3	609.1	433.0		776.0	640.4	
1933	5.57	5.17	4.76		3.63	3.82		723.1	597.7	494.5		937.6	#834,1#	
1934	8.19	7.65	7.34		6.36	6.12		809.4	840.4	650.1		980.8	#838,9#	
1935	6.64	6.30	6.04		4.85	4.38		810.9	647.8	470.6		843.6	878.2	
1936	7.03	6.42	6.44		5.19	4.81		902.0	802.5	698.1		968.9	888.5	
1937	7.22	6.60	6.60		5.29	4.74		981.2	984.4	856.8		1109.7	1014.3	
1938	6.86	6.05	6.29		4.97	4.43		954.6	774.9	657.7		1032.2	949.0	
1939	7.13	6.67	6.72		5.24			1101.7	902.1	891.7		1118.1		
1940	4.54	3.89	4.25		3.13			821.9	#709,1#	775.8		1123.3		
1941	5.66	4.82			3.52	#3,41#	5.61	872.5	156.3		596.3	1181.6	1059.0	560.3
1942	5.71	5.58			6.36	4.18	#4,73#	579.5	497.6		506.5	648.5	609.1	457.5
1943	6.54	6.51			5.12	#5,46#	6.52	754.7	599.0			744.4	680.1	665.4
1944	6.41	6.29			4.50			930.7	891.4			1071.6		
1945														
1946	6.83	6.78	#6,14#	7.19	5.34	5.99	7.29	#753,1#	521.6	545.8	496.0	832.3	735.5	525.5
1947	6.01	6.15	#5,45#	6.58	4.82	5.51	6.58	#808,6#	587.3	424.8	439.4	869.6	749.3	438.7
1948	7.07	6.49	#5,95#	7.23	5.23	5.89	6.96	809.9	#628,1#	702.3	714.6	1089.8	944.8	691.6
1949	7.16	6.53	6.46	7.62	5.42	6.15	7.30	884.9	#559,6#	660.1	668.7	1101.6	848.5	646.1
1950	7.41	6.96	6.61	7.47	5.64	6.19	7.35	882.1	#618,7#	528.8	546.9	963.2	844.4	544.3
1951	7.65	7.42	6.52	7.99	5.60	6.65	7.73	882.2	#518,0#	575.2	635.3	911.8	771.5	622.2
1952	#6,90#	5.97	5.95	6.61	4.29	5.02		#837,1#	#630,6#	594.3	#799,4#	889.5	758.2	
1953	#7,05#	6.97	6.27	7.02	5.08	5.79		#650,5#	582.5	459.1	#579,2#	750.4	648.4	
1954		5.79	5.25	6.14	4.11	4.78			623.1	563.4	#616,8#	829.2	679.3	
1955	#5,86#	5.46	5.18	6.17	3.88	4.73		#951,4#	693.7	605.3	753.7	962.7	811.3	
1956	5.79	4.76	4.31	5.45	3.17	3.97		687.9	464.2	514.2	437.9	775.4	680.0	
1957	6.97	6.46	5.85	6.95	4.80	5.45		658.7	588.6	547.1	524.5	700.1	690.4	
1958	6.57	6.32	5.96	6.72	4.75	5.41		879.5	814.3	708.5	778.8	1063.2	971.2	
1959	6.64	6.19	5.83	6.45	4.94	5.55		601.3	533.0	495.8	703.3	843.3	703.1	
1960	6.88	6.36	5.81	6.66	4.75	5.30		770.9	738.9	805.6	790.8	1024.0	943.1	

Tab. At-1 Prehľad vyradených údajov z existujúcich údajov o teplotách a zrážkach
(vyradené údaje sú označené symbolom #)

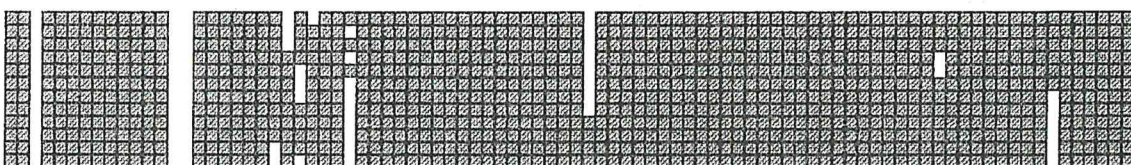
Zrážky



Teploty



Rýchlosti vetra

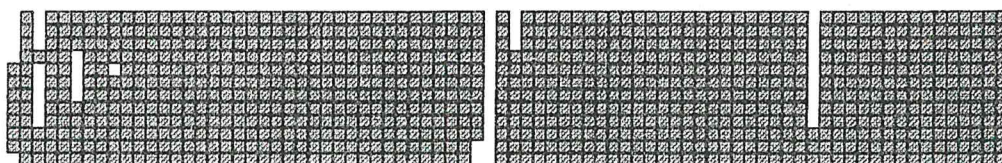


1870 1880 1890 1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960

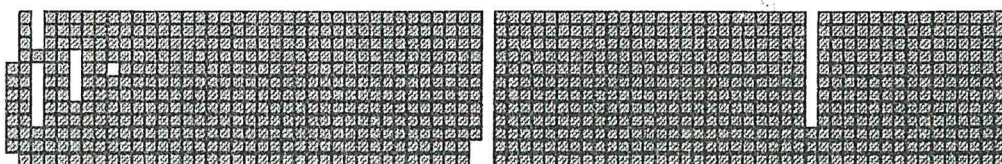
Obr. A-1. Oravský Podzámok

Pôvodná dátová štruktúra - každý bod reprezentuje jednu existujúcu mesačnú hodnotu (začína sa januárom zhora)

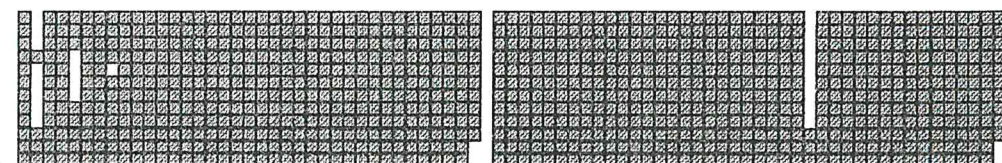
Zrážky



Teploty



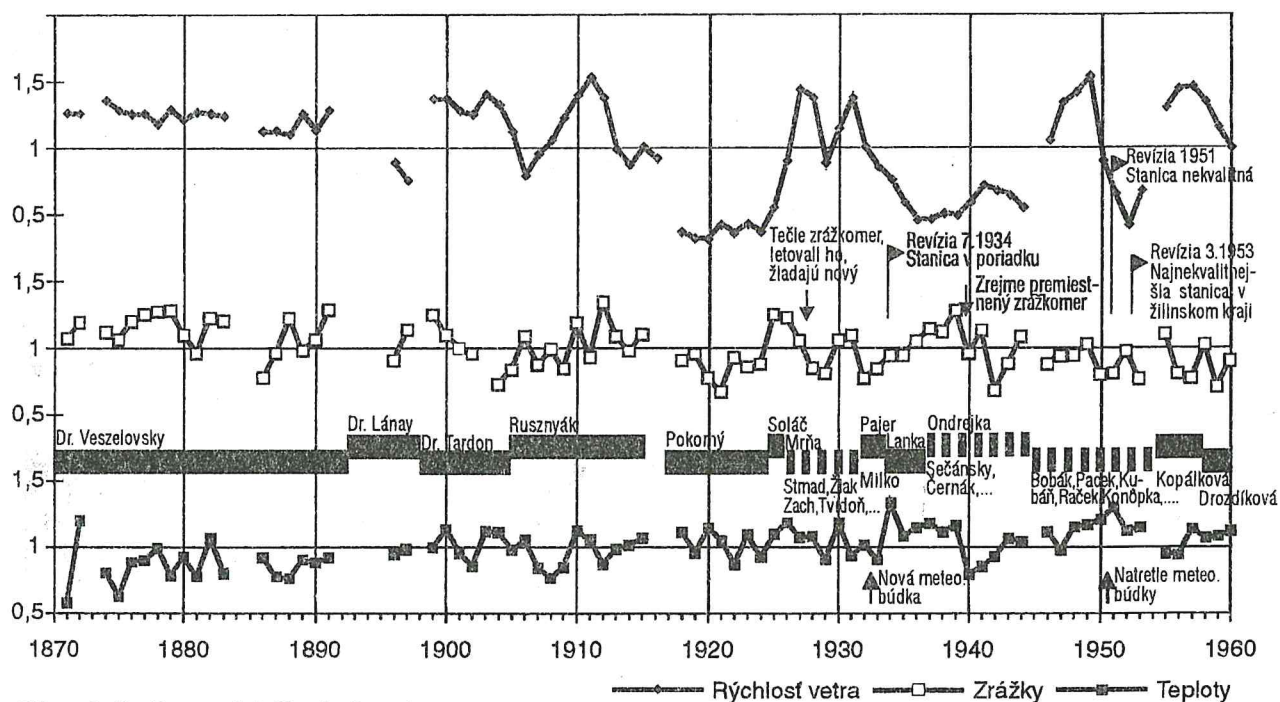
Rýchlosť vetra



1870 1880 1890 1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960

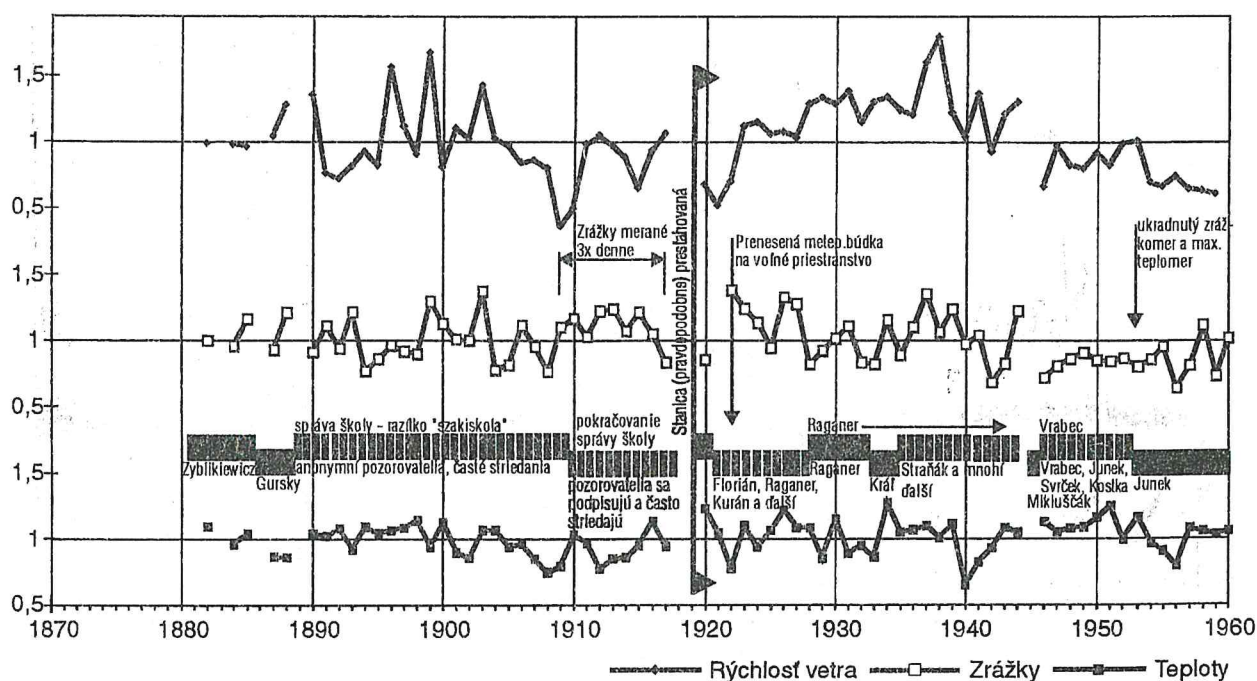
Obr. A-2. Liptovský Hrádok

Pôvodná dátová štruktúra - každý bod reprezentuje jednu existujúcu mesačnú hodnotu (začína sa januárom zhora)



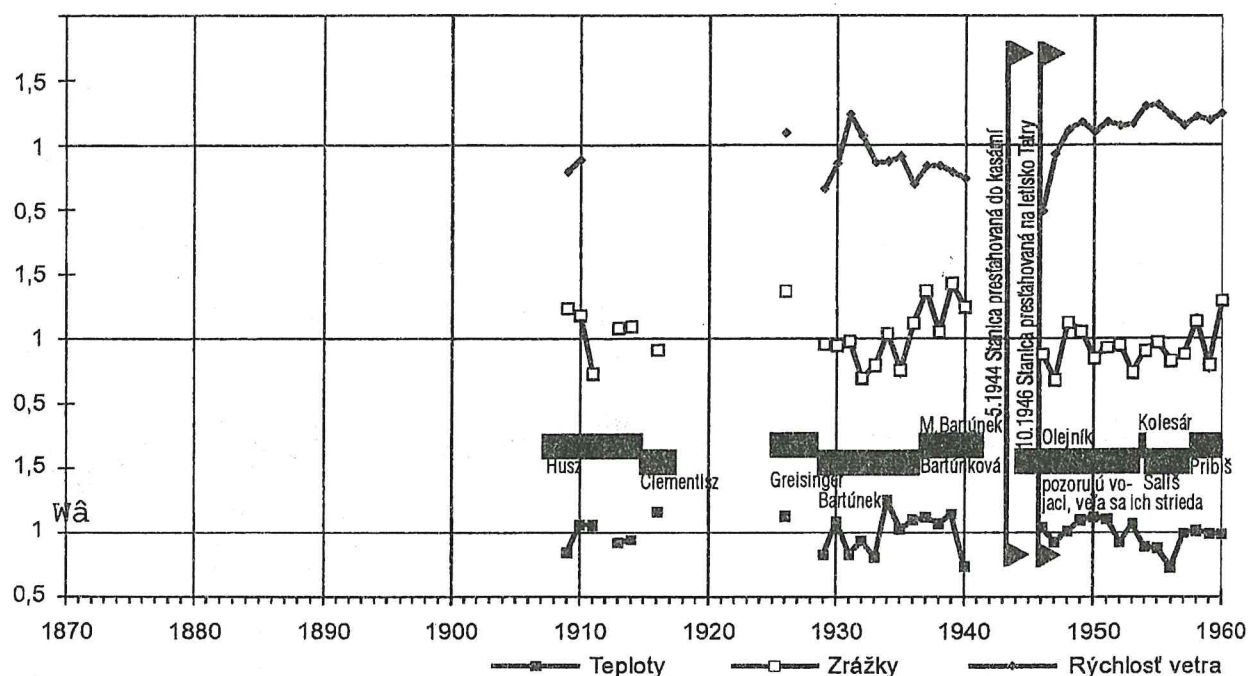
Obr. A-8. Oravský Podzámok

Priebehy modulov priemerných ročných teplôt, úhrnov zrážok a rýchlostí vetra ($modul = x_i / \bar{x}$) versus zaznamenané zmeny pozorovateľov a niektorých dôležitých udalostí v histórii stanice



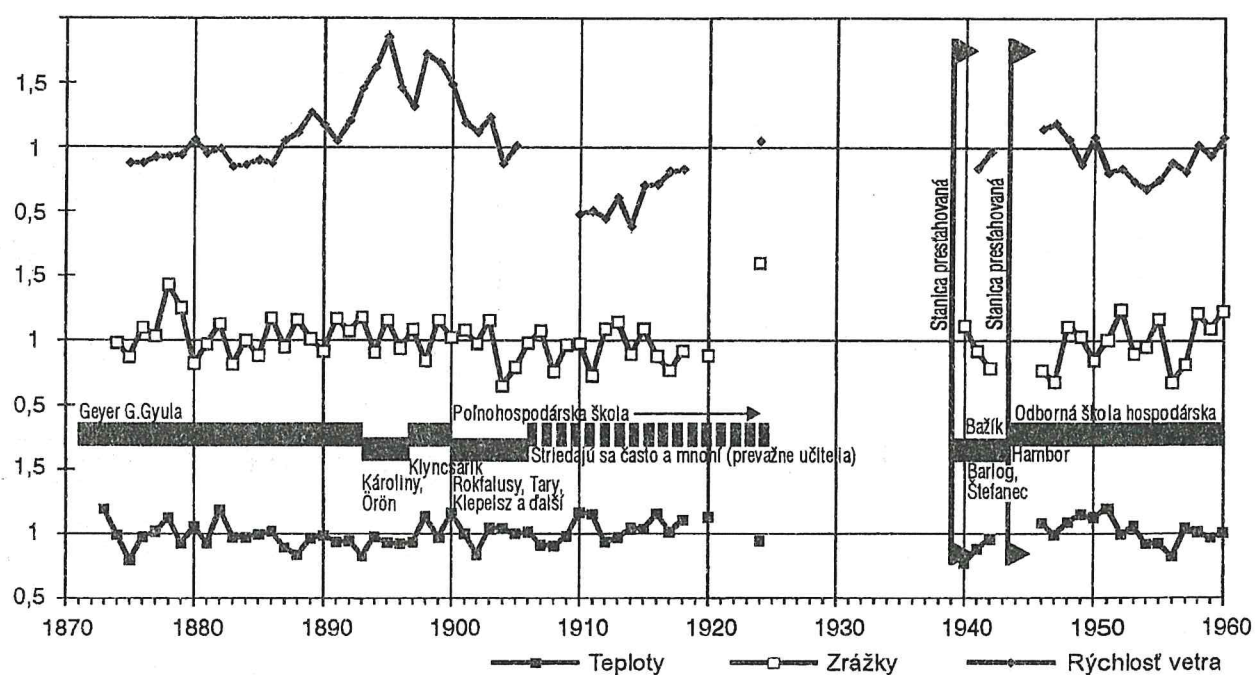
Obr. A-9. Liptovský Hrádok

Priebehy modulov priemerných ročných teplôt, úhrnov zrážok a rýchlostí vetra ($modul = x_i / \bar{x}$) versus zaznamenané zmeny pozorovateľov a niektorých dôležitých udalostí v histórii stanice



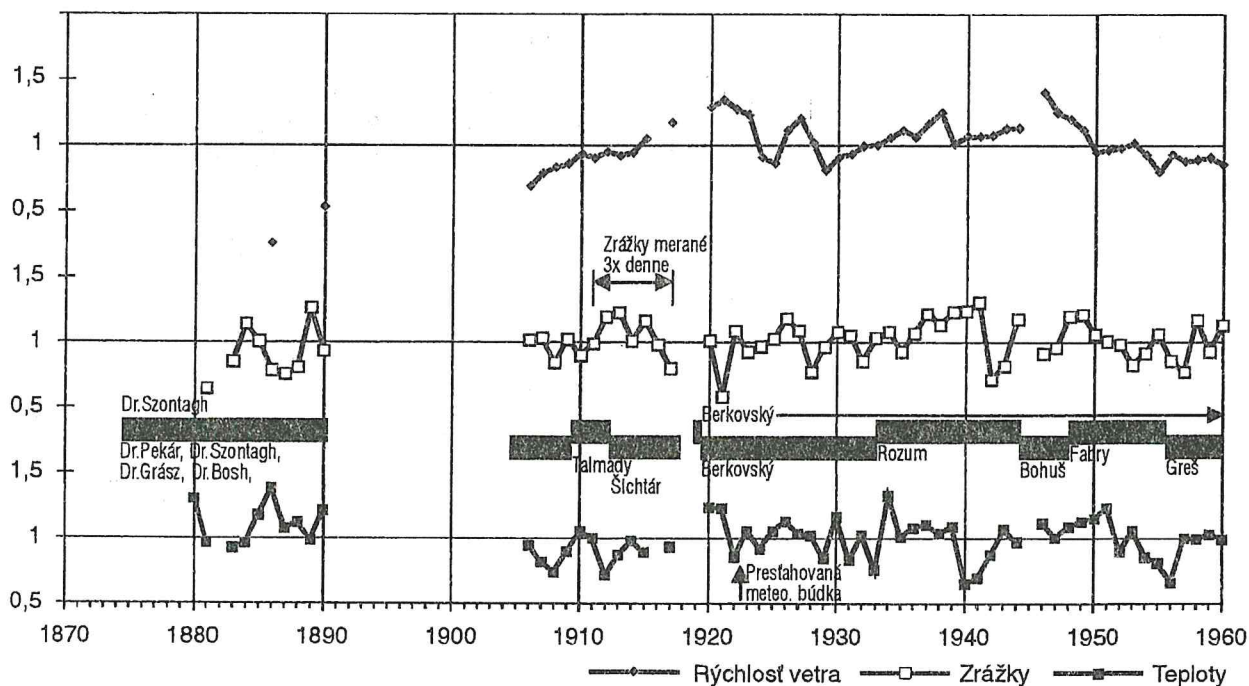
Obr. A-10. Poprad

Priebehy modulov priemerných ročných teplôt, úhrnov zrážok a rýchlostí vetra ($\text{modul} = x_i/\bar{x}$) versus zaznamenané zmeny pozorovateľov a niektorých dôležitých udalostí v histórii stanice



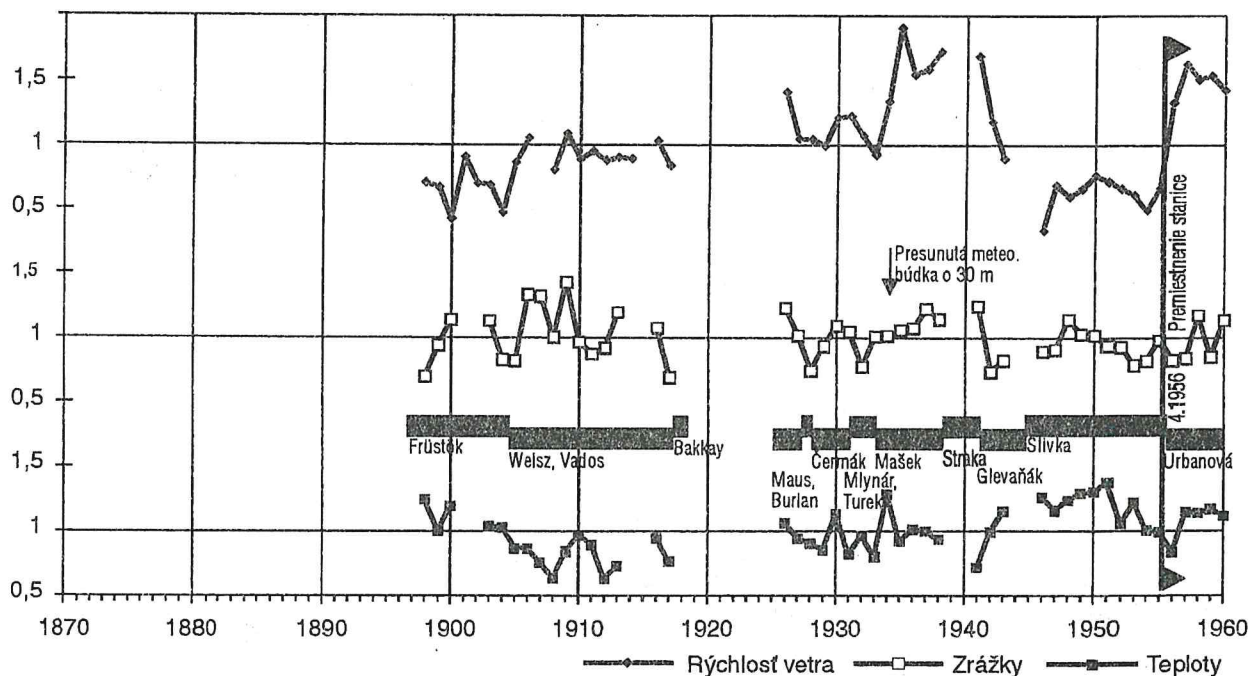
Obr. A-11. Spišská Nová Ves

Priebehy modulov priemerných ročných teplôt, úhrnov zrážok a rýchlostí vetra ($\text{modul} = x_i/\bar{x}$) versus zaznamenané zmeny pozorovateľov a niektorých dôležitých udalostí v histórii stanice



Obr. A-12. Starý Smokovec

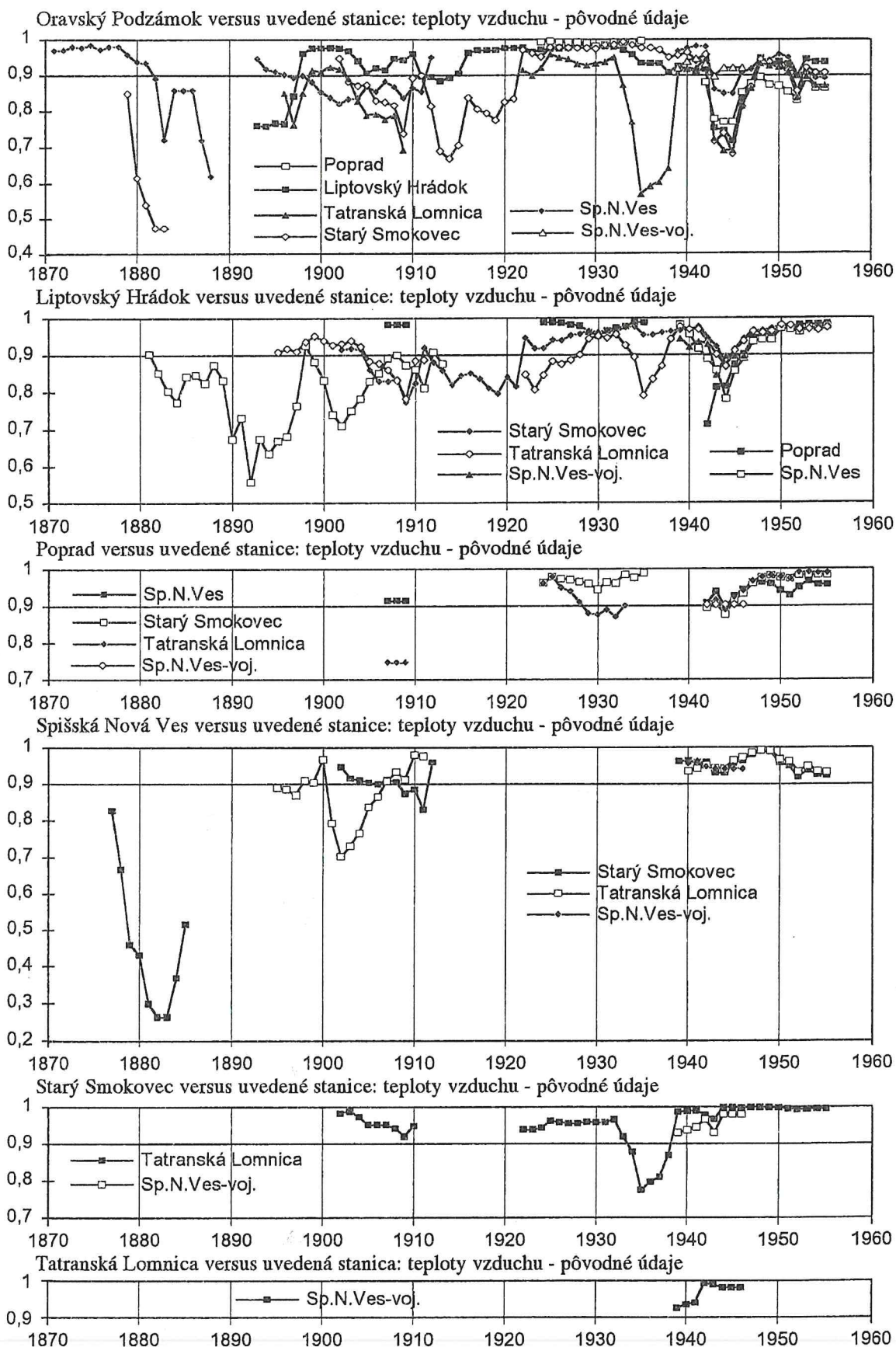
Priebehy modulov priemerných ročných teplôt, úhrnov zrážok a rýchlostí vetra ($modul = x_i/\bar{x}$) versus zaznamenané zmeny pozorovateľov a niektorých dôležitých udalostí v histórii stanice



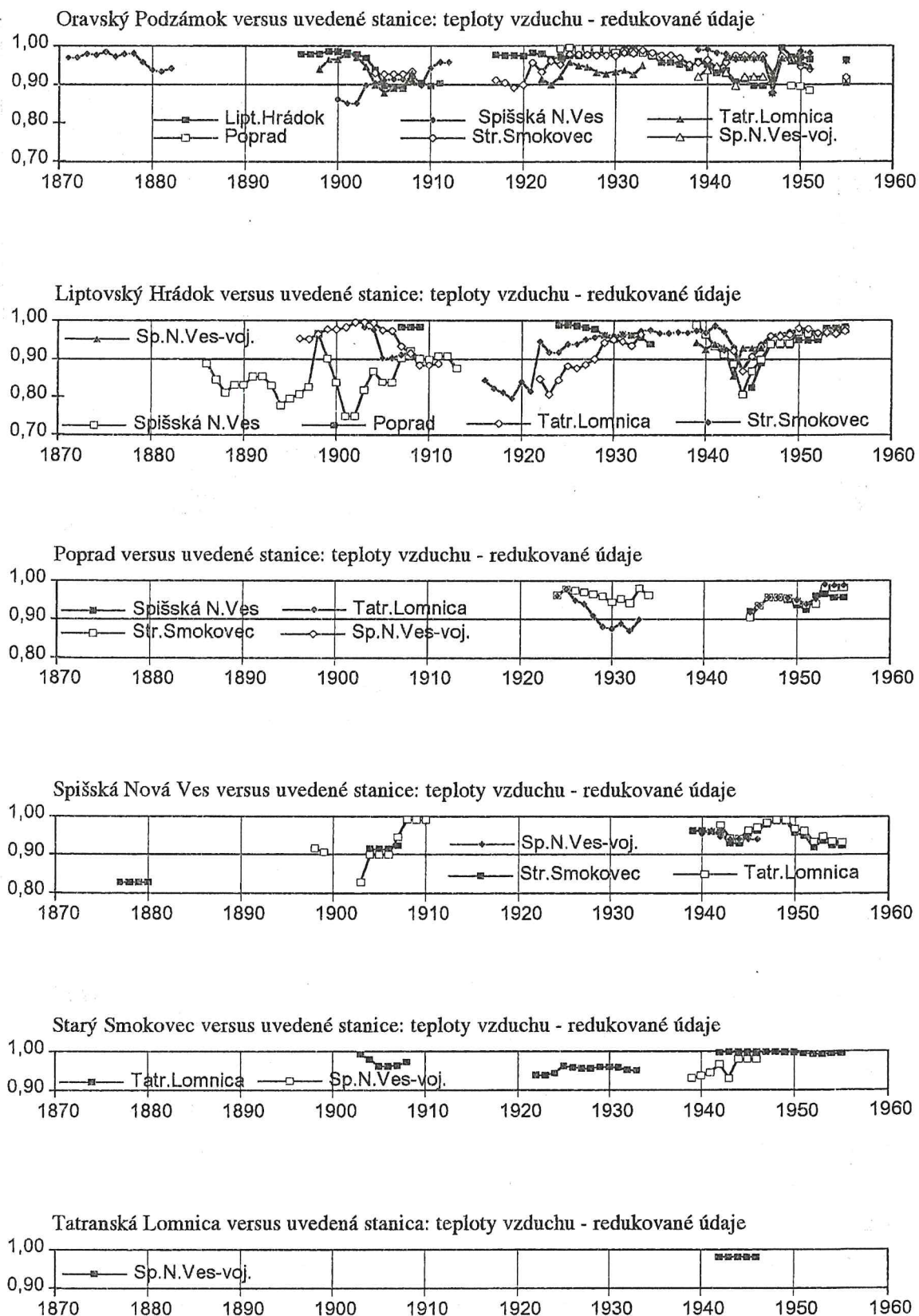
Obr. A-13. Tatranská Lomnica

Priebehy modulov priemerných ročných teplôt, úhrnov zrážok a rýchlostí vetra ($modul = x_i/\bar{x}$) versus zaznamenané zmeny pozorovateľov a niektorých dôležitých udalostí v histórii stanice

Obr. A-15 Priemerné ročné teploty vzduchu - vzájomné 10-ročné kľzavé korelácie

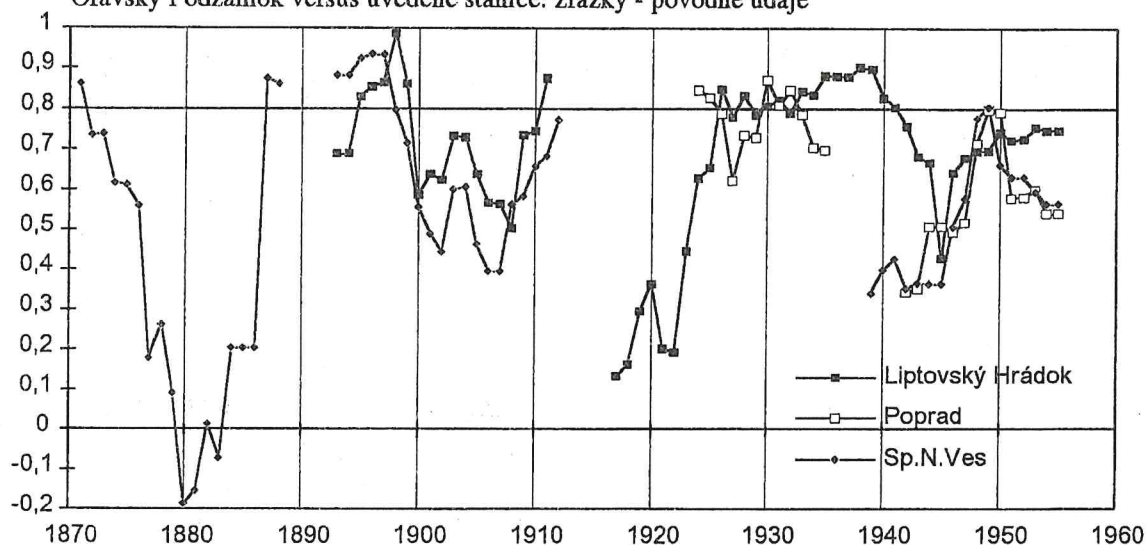


Obr. A-16 Priemerné ročné teploty redukované-vzájomné 10-roč. kľúčové korelácie

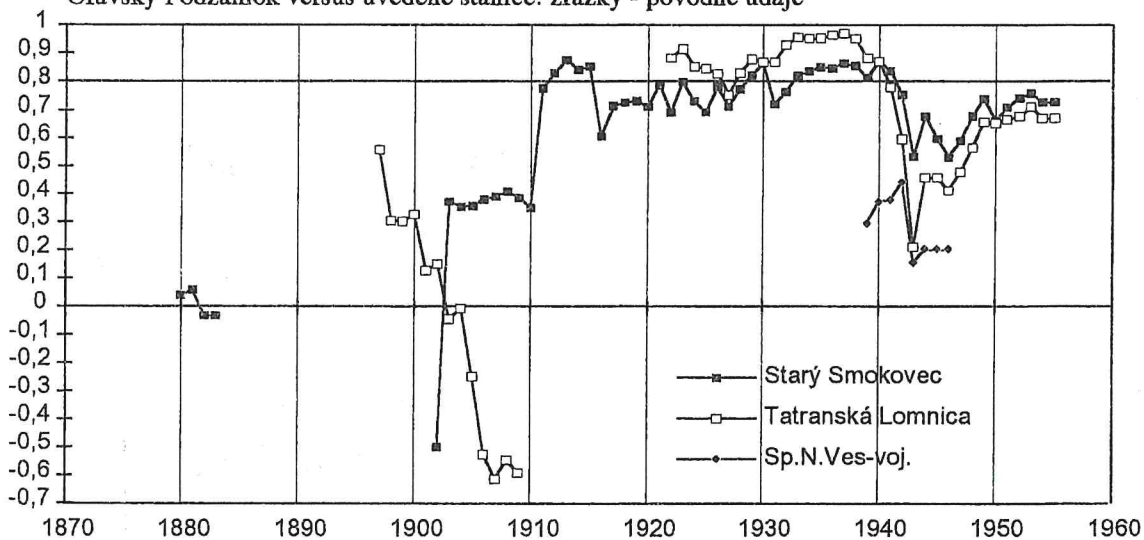


Obr. A-17 Ročné úhrny zrážok - vzájomné 10-ročné kľzavé korelácie

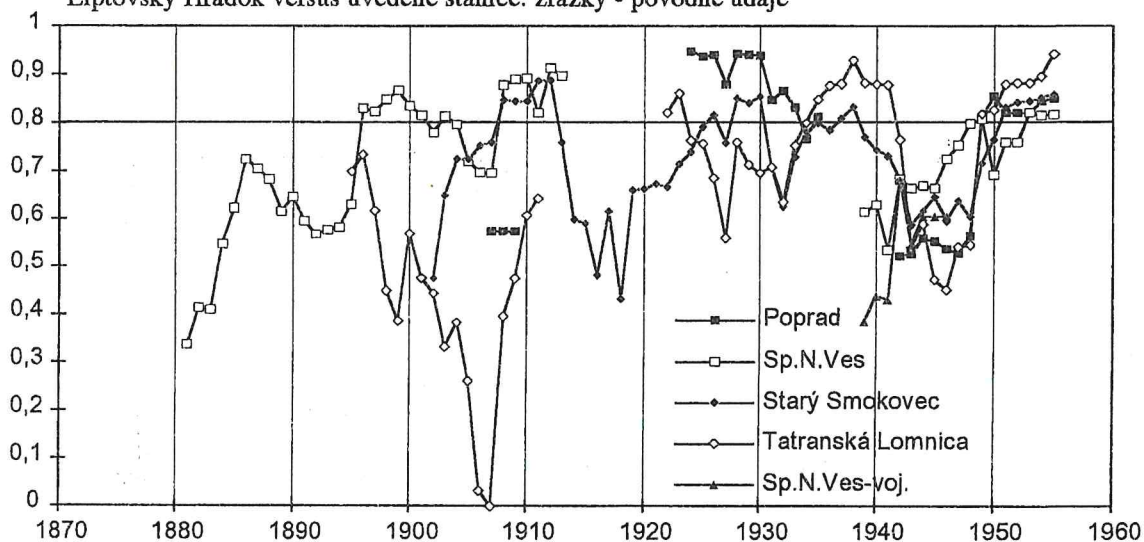
Oravský Podzámok versus uvedené stanice: zrážky - pôvodné údaje



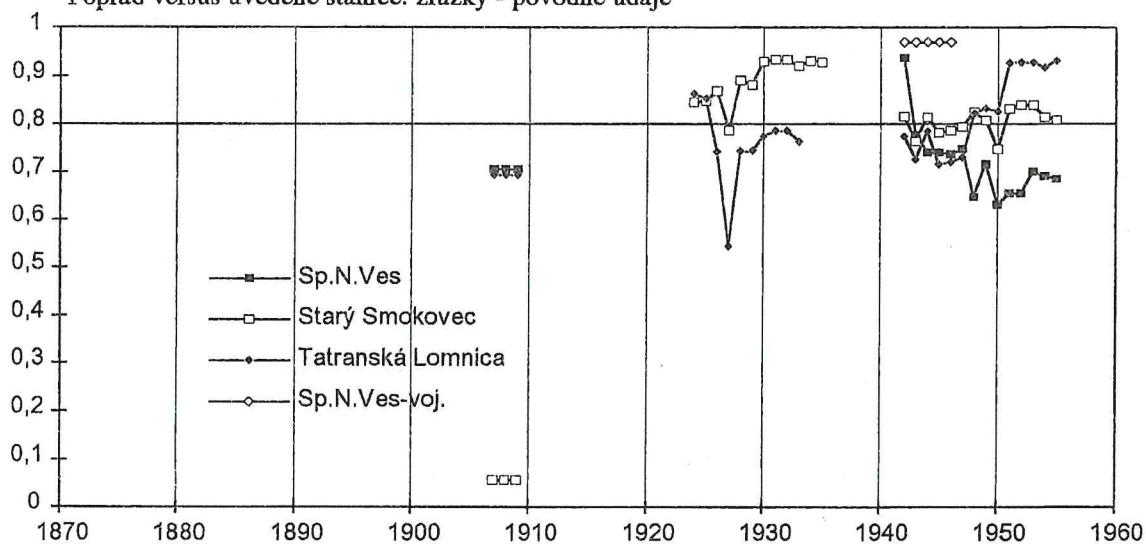
Oravský Podzámok versus uvedené stanice: zrážky - pôvodné údaje



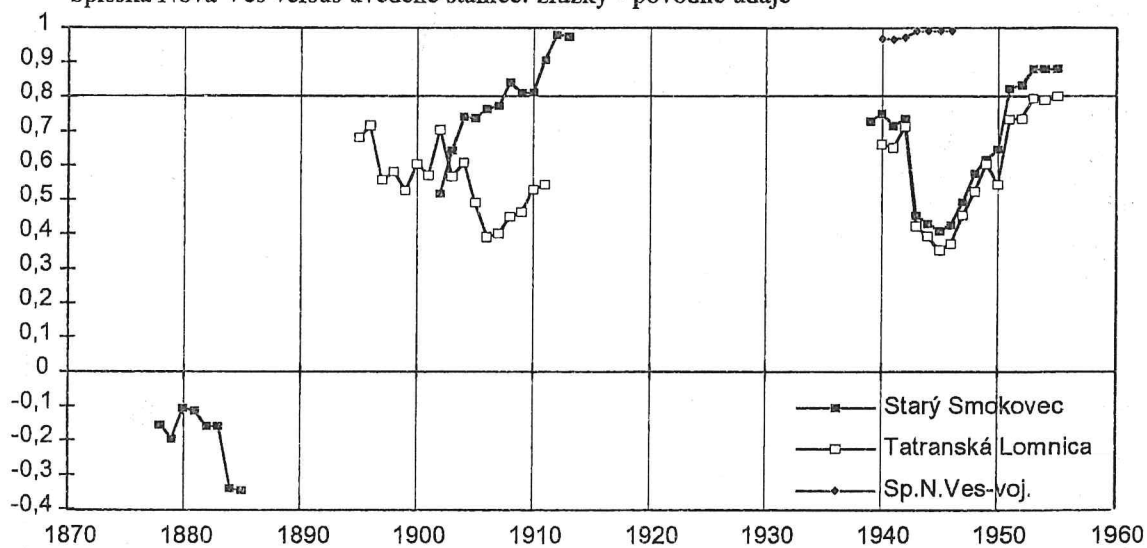
Liptovský Hrádok versus uvedené stanice: zrážky - pôvodné údaje



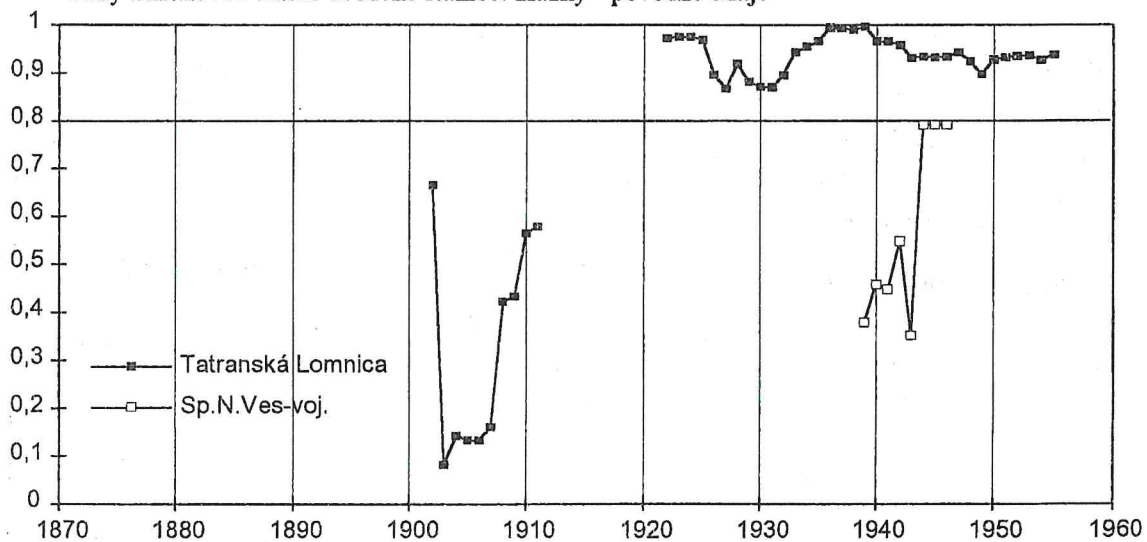
Poprad versus uvedené stanice: zrážky - pôvodné údaje



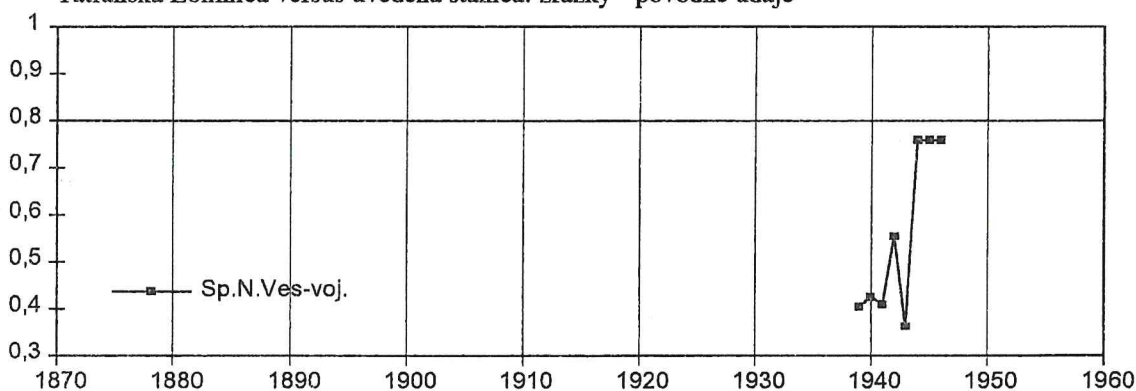
Spišská Nová Ves versus uvedené stanice: zrážky - pôvodné údaje



Starý Smokovec versus uvedené stanice: zrážky - pôvodné údaje

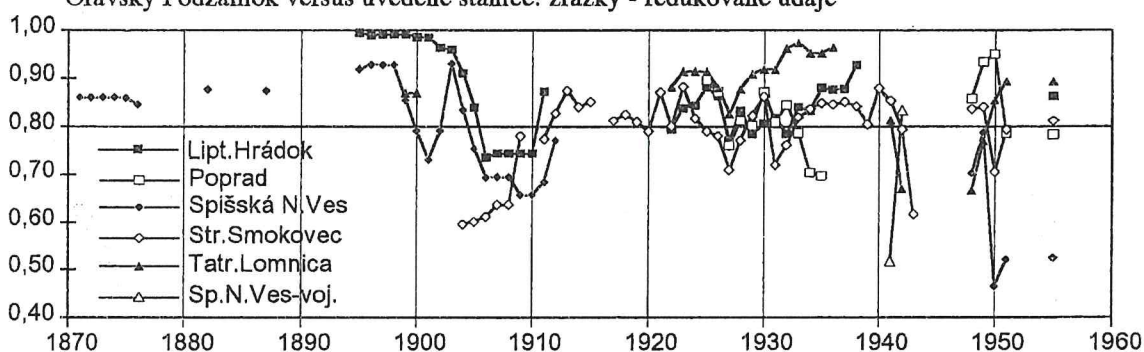


Tatranská Lomnica versus uvedená stanica: zrážky - pôvodné údaje

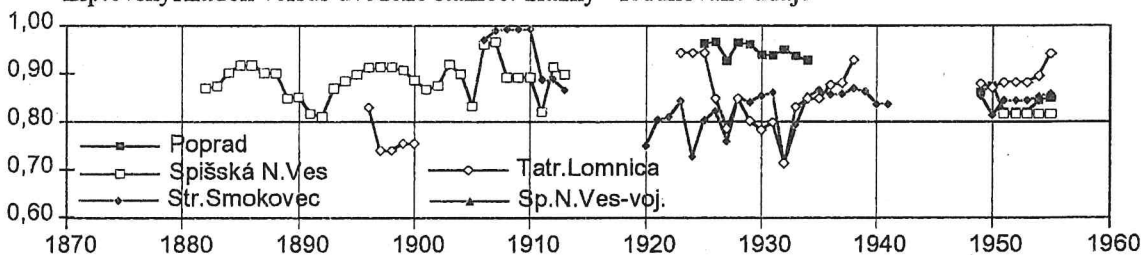


Obr. A-18 Ročné úhrny zrážok redukované - vzájomné 10-roč. kľúčové korelácie

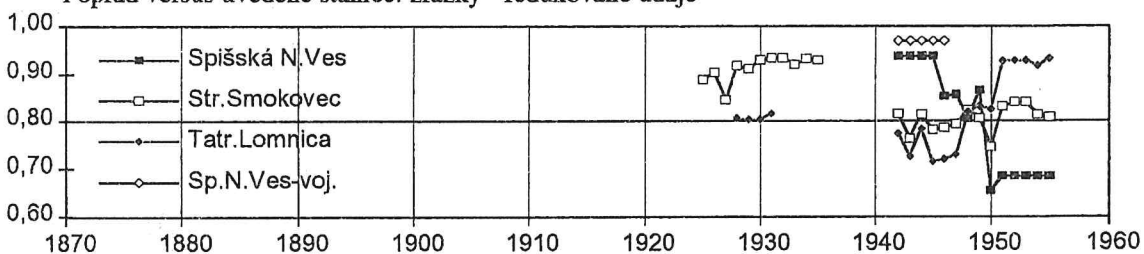
Oravský Podzámok versus uvedené stanice: zrážky - redukované údaje



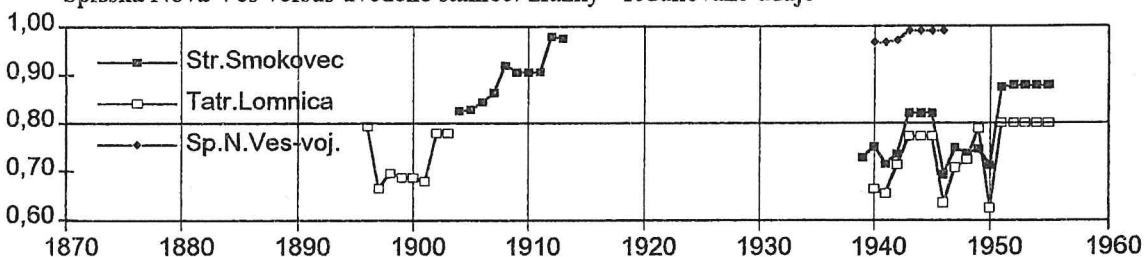
Liptovský Hrádok versus uvedené stanice: zrážky - redukované údaje



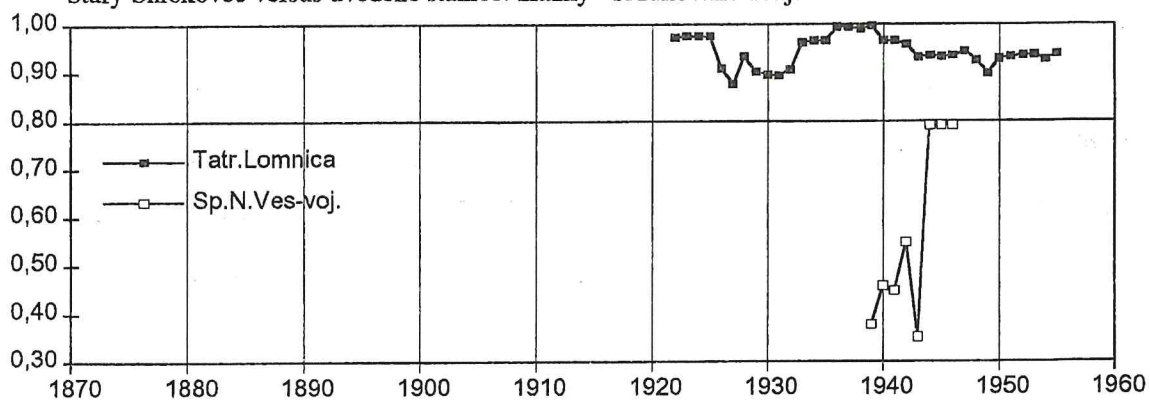
Poprad versus uvedené stanice: zrážky - redukované údaje



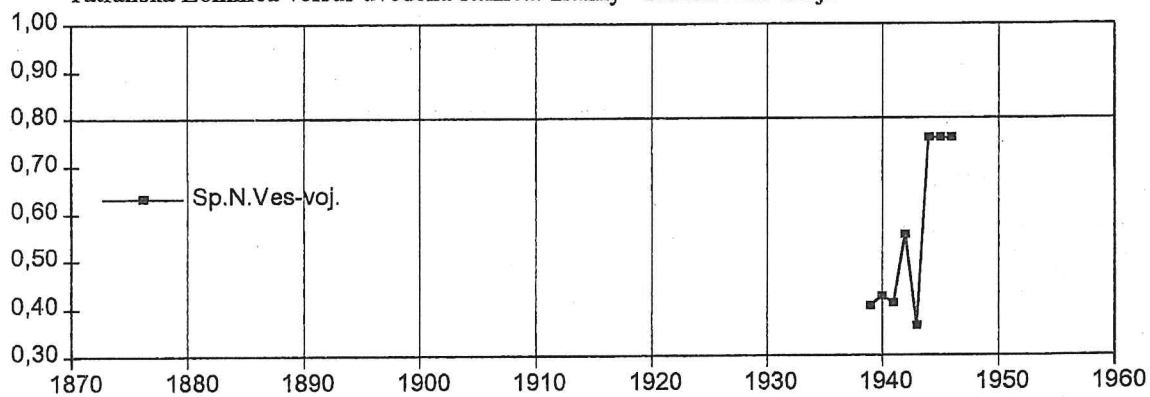
Spišská Nová Ves versus uvedené stanice: zrážky - redukované údaje



Starý Smokovec versus uvedené stanice: zrážky - redukované údaje



Tatranská Lomnica versus uvedená stanica: zrážky - redukované údaje



OBSAH

SUMMARY	85
1. ÚVOD.....	87
2. VÝBER REGIÓNU, KLIMATICKÝCH STANÍC A POZOROVACÍCH OBDOBÍ.....	87
3. HISTÓRIA POZOROVANÍ NA VYBRANÝCH KLIMATICKÝCH STANICIACH.....	88
3.1. ORAVSKÝ PODZÁMOK	88
3.2. SPIŠSKÁ NOVÁ VES	89
3.3. STARÝ SMOKOVEC	90
3.4. LIPTOVSKÝ HRÁDOK.....	90
3.5. TATRANSKÁ LOMNICA	91
3.6. POPRAD	91
3.7. SPIŠSKÁ NOVÁ VES - VOJENSKÁ (PARALELNÁ STANICA)	92
4. PREHLAD DOKUMENTOVANÝCH NEKONZISTENTNOSTÍ V ÚDAJOCH	92
5. ANALÝZA MIERY SPOLAHLIVOSTI ÚDAJOV A ICH VLASTNOSTI.....	94
5.1. METODIKA ANALÝZY SPOLAHLIVOSTI ÚDAJOV	94
5.2. TEPLoty VZDUCHU	96
5.2.1. Výsledky analýzy vzájomných kľzavých korelácií teplotných radov.....	96
5.2.2. Redukcie nekorektných údajov v teplotných radoch.....	97
5.3. ATMOSFÉRICKE ZRÁŽKY	98
5.3.1. Výsledky analýzy vzájomných kľzavých korelácií zrážkových radov.....	98
5.3.2. Redukcie a opravy nekorektných údajov v zrážkových radoch.....	99
5.4. RÝCHLOSŤ VETRA	99
5.5. POROVNANIE VLASTNOSTÍ REDUKOVANÝCH A NEREDUKOVANÝCH RADOV.....	100
5.5.1. Regresná analýza, trendy, štandardizácia	100
5.5.2. Hierarchická klastrová analýza	105
6. ZÁVERY.....	106
7. LITERATÚRA.....	106
8. APENDIX - GRAFICKÁ A TABELÁRNA PRÍLOHA.....	107

Redakčná rada

Predseda:

Ing. Ľubomír Žiak, MŽP SR

Členovia:

RNDr. Milan Lapin, CSc., SHMÚ

RNDr. Oľga Majerčáková, CSc., SHMÚ

Mgr. Ľubica Prokopová, SHMÚ

Doc. RNDr. Dušan Závodský, CSc., SHMÚ

NÁRODNÝ KLIMATICKÝ PROGRAM SLOVENSKEJ REPUBLIKY
Zväzok 1

Vydáva:

Ministerstvo životného prostredia SR, Hlboká 2, 812 35 Bratislava
Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

Odborný redaktor: RNDr. M. Lapin, CSc.

Rediguje: Mgr. Ľ. Prokopová

Tlač: Reprografické pracovisko SHMÚ v roku 1994

Účelová publikácia, 120 s., 14 tab., 42 obr., náklad 400 výtlačkov

Trends of air temperature T and relative air humidity U means at Hurbanovo, south Slovakia, April-Septemb. 1901-1994

