



ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV  
CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE

# METEOROLOGICKÉ ZPRÁVY

METEOROLOGICAL BULLETIN

*Jaroslav Patúc:* Tvorba bleskových kanálov a priestorové vyrovnanie nábojov . . . 97

*Iva Hůnová – Pavel Kurfürst – Vojtěch Stráník – Miloslav Modlík:* Atmosférická depozice dusíku v českých lesích: změna poměru  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$  v atmosférických srážkách . . . . . 108

*Adéla Holubová Šmejkalová:* Vliv druhu a intenzity padajících srážek na množství celkových a podkorunových srážek na měřicí lokalitě Observatoř Košetice . . . . . 115

*Pavel Jůza:* Prostorová proměnlivost maximální a minimální teploty vzduchu v nižších polohách Ústeckého kraje . . . . . 121

<i>Jaroslav Patúc</i> : Creation of lightning channels and spatial settlement charges . . . . .	97
<i>Iva Hůnová – Pavel Kurfürst – Vojtěch Stráník – Miloslav Modlík</i> : Nitrogen deposition in Czech forests: Change in $N-NH_4^+/N-NO_3^-$ ratio in precipitation . . . . .	108
<i>Adéla Holubová Šmejkalová</i> : Influence of precipitation type and intensity on the amount of total and throughfall precipitation at the Košetice Observatory site . . . . .	115
<i>Pavel Jůza</i> : Spatial variability of maximum and minimum air temperatures at the lower elevations of the Ústí nad Labem Region . . . . .	121

### Abstracting and Indexing:

- Meteorological and Geostrophysical Abstracts

**Meteorologické Zprávy**, odborný recenzovaný časopis se zaměřením na meteorologii, klimatologii, čistotu ovzduší a hydrologii. Dvuměsíčník

**Meteorological Bulletin**, reviewed journal specialized in meteorology, climatology, air quality and hydrology. Bi-monthly

#### Vedoucí redaktor – Chief Editor

R. Tolasz, Český hydrometeorologický ústav, Ostrava, Česká republika

#### Redaktoři – Assistant Editors

O. Šuvarinová, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

H. Stehlíková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

#### Redakční rada – Editorial Board

J. Bednář, Univerzita Karlova, Praha, Česká republika

J. Brechler, Univerzita Karlova, Praha, Česká republika

R. Brožková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

R. Čekal, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

Z. Horký, Praha, Česká republika

F. Hudec, Univerzita obrany, Brno, Česká republika

I. Hůnová, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

M. Kučerová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

K. Krška, Brno, Česká republika

M. Lapin, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovenská republika

F. Neuwirth, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Austria

L. Němec, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

V. Pastířčák, Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, Slovenská republika

D. Řezáčová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

M. Setvák, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

J. Strachota, Praha, Česká republika

J. Sulan, Český hydrometeorologický ústav, Plzeň, Česká republika

F. Šopko, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

A. Vizina, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Praha, Česká republika

H. Vondráčková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

V. Voženílek, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, Česká republika

#### Vydavatel (redakce) – Publishers

● Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, telefon 244 032 722, 244 032 725, e-mail: suvarinova@chmi.cz. Sazba a tisk: Ing. Jiří Šilar DTP. Rozšiřuje a informace o předplatném podává a objednávky přijímá Český hydrometeorologický ústav, SIS, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, iva.sieglerova@chmi.cz. Cena jednotlivého čísla 25,- Kč, roční předplatné 240,- Kč, včetně poštovného. Registrační číslo MK ČR E 5107.

© Meteorologické Zprávy, Český hydrometeorologický ústav

● Czech Hydrometeorological Institute, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, Phones: (+420) 244 032 722, (+420) 244 032 725, e-mail: suvarinova@chmi.cz. Printed in the Ing. Jiří Šilar DTP. Orders and enquiries: Please contact Czech Hydrometeorological Institute, SIS, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, Czech Republic, iva.sieglerova@chmi.cz. Annual subscription: 48,- EUR (6 issues)

● ISSN 0026-1173

## TVORBA BLESKOVÝCH KANÁLOV A PRIESTOROVÉ VYROVNANIE NÁBOJOV

Jaroslav Patúc, Žilina, Slovenská republika, jaropat@gmail.com

**Creation of lightning channels and spatial settlement charges.** The aim of this analysis is to provide a conceptual basis for the numerical calculation of the planetary circulation of electrical charges from a position of electrodynamics, plasma physics and atmospheric physics of lightning structure. The sole task of lightning structure analysis is to analyse the spatial equalization (compensation) electric charge and thus the electrical potential difference between two regions of space. For creating the electrical potential difference, other processes may be used, in our case „Atmospheric Dynamics“. This analysis deals with the physical mechanisms for the initialization of lightning inside thunderclouds and after reaching a sufficient size of the electric field (electric voltage background), its visibility, and its spread for many tens of kilometres. Although the mechanism of the Transient Luminous Events (TLEs) applies, the same rules also apply to electrodynamics in an environment of the increasing ionization of air as height increases.

**KLÚČOVÉ SLOVÁ:** balík bleskov (koherentná množina elektrických výbojov) – mechanizmus kompenzačný – inicializácia balíka bleskov – kanál blesku iónový – vzdialenosť iskry preskoková – blesk temný – elektrické napätie pozadia – ohnisko blesku

**KEYWORDS:** Package flashes (coherent set of electrical discharges) – compensation mechanism – initialization package of lightning – lightning ion channel – flashover distance sparks – dark lightning – electrical voltage background – lightning-centre

### 1. ZÁKLADNÝ PRINCÍP ANALÝZY, KOMPENZAČNÝ MECHANIZMUS

Vedecký záujem o blesky, a s tým spojený výskum sa začal omnoho skôr než v polovici 20. storočia. T. S. Townsend (1915) vykonal pokusy so vzduchovým kondenzátorom. Po preskoku elektrickej iskry dôjde k vyrovnaniu, kompenzácii elektrických nábojov na platniach kondenzátora a bývalý plazmový kanál sa skladá z neutrálnych molekúl, teda už po rekombinácii nábojov neexistuje. Inak je to v ovzduší pri preskoku elektrickej iskry medzi dvoma oblasťami rozdielnych nábojov. Tu, po rozpade plazmového kanálu iskry, funkciu vyrovnania elektrických nábojov plní kompenzačný mechanizmus (kap. 2.3), usporiadanie aniónov a katiónov pozdĺž kanálu iskry podľa zákonov elektrodynamiky (Červeň 2005; Jirků 2010). Možno konštatovať, že kanálom výboja sa v zlomku sekundy premiestnia kompenzačné elektrické náboje bez praktickej zmeny polohy molekúl vzduchu. Spotrebuje sa energia, ktorú vykonal do tej chvíle pohyb vzduchu (atmosférická dynamika (Bařka 2014)) pri premiestňovaní elektrických nábojov, molekúl vzduchu. Tieto nové náboje sa stanú

predmetom triediaceho mechanizmu pri inicializácii blesku (kap. 3.1) a vzniku podmienky preskoku ďalších iskier (kap. 2.2). Tak vzrastá množstvo nábojov a pri búrke dôjde k vzniku rozsiahlej viditeľnej bleskovej aktivity na oblohe (kap. 3.2), aby sa vyrovnal priestorový náboj (kap. 3.6).

Proces na zrušenie elektrických nábojov v ovzduší sa odohráva medzi dvoma oblasťami v oblaku s rozdielnymi nábojmi, ktoré pôsobia na seba silovo (Gaussov a Coulombov zákon) (Červeň 2005). Vlastnosti molekulárneho sveta sa stávajú zrejmy pri sledovaní pohybu elektrických nábojov. Kladné a záporné náboje (ióny) sa prejavujú elektrickým potenciálom  $U_{1pn}$  a  $U_{2pn}$  v bodoch priestoru 1 a 2 (princíp superpozície) a potenciálnou energiou  $W_{ppn}$ . Rozdiel elektrických potenciálov, vektor  $U_{pn}$  medzi bodmi 1 a 2 pre budúci  $n$ -tý preskok iskry (6) a potenciálny (náhradný) elektrický náboj  $Q_{ppn}$  (náhrádza silový účinok bodových nábojov  $Q_j$ ,  $Q_m$ ) je:

$$U_{pn} = U_{1pn} - U_{2pn} = \sum k_m \cdot (Q_m / R_{1m}) \cdot r_{1m} - \sum k_m \cdot (Q_m / R_{2m}) \cdot r_{2m}, \quad (1)$$

$$W_{ppn} = (\sum \sum k_m \cdot ((Q_j \cdot Q_m) / R_{jm})) / 2, \\ \text{pričom } j \leq m \\ \text{a } j! = m, \quad (2)$$

$$W_{ppn} = |U_{pn}| \cdot Q_{ppn}, \\ \text{potom } Q_{ppn} = W_{ppn} / |U_{pn}|, \quad (3)$$

kde  $k_m$  je konštanta úmernosti v prostredí, v ktorom sa náboj  $Q_m$  nachádza;  $r_{1m}$  a  $r_{2m}$  sú jednotkové vektory v bodoch 1 a 2 smerujúce podľa znamienka od náboja  $Q_m$ ;  $R_{1m}$  je vzdialenosť náboja  $Q_m$  od bodu 1 a  $R_{2m}$  od bodu 2;  $R_{jm}$  je vzájomná vzdialenosť medzi nábojmi  $Q_m$  a  $Q_j$ ,

Elektrická pevnosť  $E_{pn}$  alebo dielektrická pevnosť je fyzikálny pojem vyjadrujúci odolnosť materiálu, v našom prípade vzduchu, voči elektrickému poľu. Preskok elektrickej iskry priamo závisí na nehomogenite priestorových nábojov  $Q_m$ , intenzite elektrického poľa, rozdielu elektrických potenciálov (1) medzi bodmi 1 a 2. Po splnení podmienky (6) a preskoku iskry, premiestňujú sa, kmitajú prúdy elektrónov (nábojov) pozdĺž plazmového kanálu iskry. V tom rytme sa mení aj intenzita elektrického a magnetického poľa v okolí, čo môže evokovať vytváranie ďalších paralelných alebo vetvených kanálov iskier. Rozpadom plazmového kanálu iskry na iónový (kap. 2.3), náboj  $Q_{pne}$  (10) sa stane prírastkom v bodoch priestoru 1 a 2 nábojov  $Q_m$  a zruší sa tým silové pôsobenie nábojov v bodoch 1 a 2 (kompenzačný mechanizmus).

Uvedené boli základné vzťahy z elektrodynamiky pre tvorbu bleskových kanálov v elektricky nehomogénnom atmosférickom prostredí. Zostáva rozpracovať a určiť (zistiť) zjednodušujúce okrajové podmienky riešenia a vytvoriť nástroje pre spracovanie vytvorených modelov (obr. 1). Takou okrajovou podmienkou, pri vzdialenosti  $d_{12}$  bodov 1 a 2 v priestore pre výber množiny nábojov  $Q_m$  (1) a (2) je:

$$R_{1m} \gg d_{12} \text{ alebo } R_{2m} \gg d_{12}, \\ \text{alebo } |R_{1m} - R_{2m}| \ll d_{12}. \quad (4)$$

Vplyv takýchto nábojov na potenciály  $U_{1pn}$  a  $U_{2pn}$  je prakticky rovnaký, takže ich môžeme z množiny nábojov  $Q_m$  vyradiť.

Ako je napísané v mnohých prácach, napr. Ondrášková et al. (2008), búrková činnosť je batériou, ktorá zabezpečuje funkciu „globálneho zemského kondenzátora“. Sú to blesky udierajúce do zeme a nadoblačné elektrické výboje, ktoré sú tiež súčasťou balíka bleskov. Planetárna cirkulácia elektrických nábojov je takto umožnená dvoma javmi: vertikálnou zmenou elektrickej vodivosti atmosféry a búrkovými zdrojmi. Vyjadrením toho („Ohmového zákona na oblohe“) je blokovaná multi schéma na obr. 1.

Na obr. 1 je náhradný elektrický obvod, multi schéma (1 až k časovo nesúvisiacich balíkov bleskov, prebiehajúcich v atmosfére v rôznych oblastiach zeme), budiacimi zdrojmi napätia  $U_z$ , experimentálne určenými a plávajúcimi voči zemi a globálnym napätím sférického zemského kondenzátora  $U_g$  (kap. 4). Pre účely programovania a simulácie na počítači (kap. 5) je potrebné sa pozeráť na jednotlivé prvky obvodu ako na bloky, v ktorých sa odohrávajú jednotlivé dynamické procesy v atmosfére Zeme a v časových okamžikoch je na výstupe bloku reálna hodnota prvku jednotlivého dynamického procesu.

Virtuálny kondenzátor  $C_p$  sa nabíja cez impedancie  $Z_{c1}$  (kladný náboj) a  $Z_{c2}$  (záporný náboj) zo zdroja  $U_z$  (kap. 3.1). Energiou zdroja  $U_z$  je mohutné vertikálne prúdenie vzduchu pri tvorbe búrkových oblakov, ktoré spôsobuje vznik iónov

a ich triedenie podľa polarít. Napätie  $|U_{pl}|$  vektora elektrického napätia pozadia  $U_p$  medzi platňami kondenzátora  $C_p$  je plávajúce voči zemi. Kondenzátor  $C_p$  sa počas preskoku iskry vybíja cez impedanciu  $Z_{cc}$ , ktorá simuluje prostredie pre vnútro-oblačné blesky (CID) (kap. 3.2 a 3.3). Počas balíka bleskov sa sférický zemský kondenzátor nabíja cez impedancie  $Z_{cg}$  a  $Z_{tle}$  a neustále vybíja cez impedanciu  $Z_{gg}$ . Impedancia  $Z_{cg}$  simuluje prostredie pre blesky oblak – zem (kap. 3.4) a  $Z_{tle}$  pre nadoblačné blesky (kap. 3.5).

Pri napätí  $|U_{pl}| \geq U_{pi}$  (5) na kondenzátore  $C_p$  dôjde k preskoku iskry (kap. 5.1). Toto je príklad pre vyrovnanie nábojov medzi platňami virtuálneho kondenzátora  $C_p$ . Nabíjanie kondenzátora cez impedancie  $Z_{c1}$  a  $Z_{c2}$  znovu pokračuje a do preskočenia ďalšej iskry sa stihnú katióny a anióny medzi platňami kondenzátora  $C_p$  rekombinovať, alebo prúdením vzduchu roztriediť podľa polarít (kap. 3.1). Vplyvom prúdenia vzduchu sa rozpadajú predchádzajúce výbojové kanály iskry a vznikajú nové. V príklade je uvedené, že impedancia simuluje prostredie pre preskok iskry (blesku). Táto možnosť vychádza z doterajších laboratórnych zistení chovania sa molekúl plynu medzi elektródami v prostredí pri rôznych napätiach, tlakoch, teplote a žiarení pozadia (Hippel 1963).

## 2. BALÍK BLESKOV

### 2.1 Inicializácia balíka bleskov

Vybudovanie vetveného iónového kanálu tzv. temného blesku (Rozhlas 2013a) (vizuálne nepostrehnuteľného) môže nastať, ak hodnota elektrického napätia pozadia  $|U_{pl}|$  vektora  $U_p$  (1) medzi koncovými bodmi budúceho kanálu spätného výboja je väčšia ako kritické (inicializačné) elektrické napätie pozadia  $U_{pi}$ :

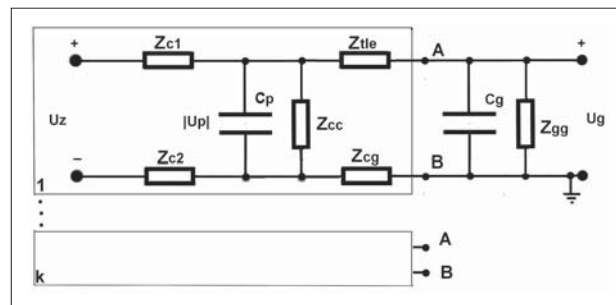
$$|U_{pl}| > U_{pi}. \quad (5)$$

### 2.2 Preskok elektrickej iskry v priestore

Otázkou je, aký fyzikálny mechanizmus ovláda rôzne typy vodcovských výbojov (leaders) šíriaceho sa blesku (Dwyer, Uman 2014) (negative stepped, first positive, negative dart, negative dart-stepped, negative dart-chaotic) medzi oblakom a zemou, medzi oblakom a ionosférou a vnútri oblaku.

Elektrická pevnosť suchého vzduchu je asi  $30 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  (pri zemi) a klesá s výškou. Potom pri rovnakom lokálnom napätí pozadia  $|U_{pn}|$  vzniká dlhšia iskra (6), a tým väčšie periodické prepätie (kladné alebo záporné) na koncoch kanálu iskry voči okoliu. Pri väčšom množstve voľných pozdĺžne kmitajúcich elektrónov, a možnosť, i keď spočiatku chaotickeho a dočasného (kap. 3.1) spájania (vetvenia) nových kanálov iskry (blesku).

Preskok začínajúci od kladnejšej nehomogenity smerom k zápornejšiemu čelu blesku pri vytváraní novej vetvy blesku



Obr. 1 Planetárna cirkulácia elektrických nábojov.

Fig. 1. The planetary circulation of electrical charges.

sa označuje ako „ústreťový výboj“ (opposite-moving discharge, od zeme „upward-moving discharge“). Preskok pri existujúcom iónovom kanáli sa označuje „tmavý výboj“ (dart discharge) a pri plazmovom kanáli „spätňý výboj“ (return discharge). Pri vetvení bleskových kanálov sa používa označenie „záporný postupujúci vodca“ (negative stepped leader), ktorý pozostáva z následných udalostí: tmavý výboj + spätňý výboj + ústreťový výboj. Preskok začínajúci od kladnejšieho čela vetvy blesku (záporný náboj je na opačnom konci vetvy) smerom k zápornejšej nehomogenite, pri vytváraní novej vetvy blesku, sa označuje ako „kladný postupujúci vodca“ (positive stepped leader). Tento preskok je skôr predlžovanie existujúceho kanálu iskry pri pozdĺžnom kmitaní elektrónov v kanáli iskry.

Aká môže byť maximálna hodnota napätia pozadia  $|U_{pn}|$ , rozdielu elektrických potenciálov vektora  $U_{pn}$  medzi dvoma oblasťami, bodmi v priestore (1)? Dané je to preskokovou vzdialenosťou  $D$  elektrickej iskry (ústreťového výboja), závislej na elektrickej pevnosti  $E_{pn}$  v danom mieste prostredia:

$$|U_{pn}| > E_{pn} \cdot D. \quad (6)$$

Po splnení podmienky pre preskok iskry sa začne vytvárať plazmový kanál iskry. Novovytvorená elektrická iskra (výboj) v priestore je v podobe elektrického dipólu so získanou počítačnou energiou  $W_{ppn}$  úmernou hodnote dostatočnému spádu elektrického potenciálu  $|U_{pn}|$  pre preskok elektrickej iskry pri elektrickom náboji  $Q_{ppn}$  (3), ktorý sa presunie budúcim kanálom iskry:

$$W_{ppn} = Q_{ppn} \cdot |U_{pn}|. \quad (7)$$

Vytvorenie elektrickej iskry v priestore prebehne lavínovou premenou statickej energie  $W_{ppn}$  na dynamickú  $W_{ppn}$  pri veľkej nadobudnutej rýchlosti elektrónov (porovnanie výstrelu po uvoľnení praku) vo vytvorenom plazmovom kanáli elektrického dipólu. Tento prechodový jav je sprevádzaný vyžarovaním vysokofrekvenčnej energie v podobe X alebo dokonca gama žiarenia (Rozhlas 2013a; Dwyer, Uman 2014).

Pred preskokom iskry pri iónovom kanáli je medzi koncami kanálu napätie  $U_{jn}$ . Energia  $W_{ppn}$  (7) pri napätí  $|U_{jn}|$  pred preskokom tmavého výboja v iónovom kanáli sa rovná energii  $W_{pn}$  (10):

$$Q_{ppn} \cdot |U_{jn}| = Q_{pne} \cdot |U_{kn}|.$$

Potom pri následnom spätňom výboji sa prenesie v plazmovom kanáli príspevkový náboj  $Q_{pnn}$ :

$$Q_{pnn} = (|U_{kn}| / |U_{jn}|) \cdot Q_{pne} = G_{jn} \cdot Q_{pne}. \quad (8)$$

$G_{jn}$  je stupeň ionizácie  $n$ -tého iónového kanálu iskry, definovaného:  $G_{jn} = E_{pn} / E_{jn}$ , kde  $E_{jn}$  je elektrická pevnosť samotného iónového kanála a  $E_{pn}$  je elektrická pevnosť prostredia v okolí iónového kanála. Pri predpoklade, že  $E_{pn} \gg E_{jn}$ , značne sa zvýši príspevkový náboj  $Q_{pnn}$  v plazmovom kanáli tmavého a spätňého výboja oproti náboju  $Q_{pnn}$  pri tvorbe pôvodného kanálu ústreťového výboja.

### 2.3 Kompenzačný mechanizmus, spôsob rozpadu plazmového kanálu výboja

Elektrický dipól po preskoku iskry je silne vodivý plazmový kanál elektrického výboja, v ktorom prebieha tlmený kmitavý pohyb elektrónov spočiatku medzi oboma koncami dipólu. Plazmový kanál sa mení na iónový zo strany zápornejšieho elektrického potenciálu  $U_{pn}$  pozadia (elektrónový oblak v plazmovom kanáli je priťahovaný viac na stranu

kladného napätia  $U_{pn}$  pozadia). Nakoniec vznikne neviditeľný iónový kanál elektrického výboja, kde sú anióny a katióny usporiadané pozdĺž kanálu tak, aby kompenzovali pôvodné napätie  $U_{pn}$  pozadia elektrického dipólu pred preskokom elektrickej iskry, teda zápornejší bude koniec kanálu na strane kladnejšieho elektrického potenciálu  $U_{pn}$  pozadia.

Pri iónovom kanáli môžeme matematicky vyjadriť napätie  $U_{sn}$  na elektrickom dipóle ako rozdiel dĺžok vektorov, ktoré majú navzájom opačný smer:

$$U_{sn} = |U_{pn}| - |U_{kn}|, \quad (9)$$

kde  $|U_{kn}|$  je hodnota kompenzačného napätia v iónovom kanáli. Presunutý ekvivalentný náboj  $Q_{pne}$  v kanáli výboja vytvoril kompenzačné napätie  $U_{kn}$ . Spotrebovala sa pritom kompenzačná energia  $W_{pn}$  pri napätí  $|U_{kn}|$ :

$$W_{pn} = Q_{pne} \cdot |U_{kn}|. \quad (10)$$

Ekvivalentný náboj  $Q_{pne}$  nahrádza náboj  $Q_{pn}$ , ktorý sa rozložil pozdĺž iónového kanálu iskry tak, že poloha jednotlivých nábojov je funkciou intenzity elektrického poľa pozadia medzi koncami kanálu.

V kanáli iskry sa rekombinoval náboj  $Q_{pnr} = (Q_{ppn} - Q_{pn})$  a zostal náboj  $Q_{pn}$ , kde

$$\begin{aligned} \text{množstvo kladného náboja} &= \\ &= \text{množstvo záporného náboja} = Q_{pn} / 2. \end{aligned} \quad (11)$$

Počas prechodového javu pri preskoku iskry a potom pri tlmenom kmitaní elektrónov v elektrickom dipóle sa uvoľnila energia

$$W_{pnd} = W_{ppn} - W_{pn}, \quad (12)$$

vo forme elektromagnetického žiarenia (patrí sem aj svetelný prejav), tepelného a mechanického (akustického) procesu a relativistických (vysoko energetických) procesov (uvoľnenie elektrónov, X a gama žiarenie), napr. Dwyer, Uman (2014).

### 2.4 Podmienka pre ukončenie balíka bleskov

Spätňý výboj vo vybudovanom iónovom kanáli výboja nemôže nastať, ak hodnota elektrického napätia pozadia  $|U_{pl}|$  medzi koncovými bodmi kanálu elektrického výboja poklesne pod dolnú medznú hodnotu elektrického napätia pozadia  $U_{pf}$

$$|U_{pl}| < U_{pf}. \quad (13)$$

## 3. FÁZY BALÍKA BLESKOV

### 3.1 Inicializácia procesu balíka bleskov

V práci Hippela (1963) sú popisované „Lichtenbergove obrazce“, ktoré vznikajú pri určitej hodnote priestorového náboja a ionizácii prostredia. Podmienkou pre vznik vetvených výbojových kanálov blesku v atmosfére je dostatočne nehomogénne elektrické pole, ktoré sa vytvára v ovzduší postupom nabitých častíc (vodné kvapky, ľadové kryštáliky, prachové častice...). Otázke inicializácie sa venuje tiež kniha autorov Rakov a Uman (2003).

Ako sa vytvárajú v priestore náboje (malé ióny), ktoré sa potom zachytia na hore spomenutých časticiach? Podľa V. F. Hess (1912) vznikajú katióny a anióny mimo iného aj pôsobením spršky kozmického žiarenia na molekuly vzduchu. Výsledná koncentrácia elektrického poľa (elektrické napätie pozadia  $U_p$  podľa (5)) je asi desatina toho, čo by bolo potrebné na vznik viditeľnej bleskovej činnosti na oblohe (myslí sa homogénne elektrické pole v ovzduší bez ionizovaných pries-



torov). Pôsobením kozmického žiarenia sa zvyšuje lokálne ionizácia prostredia. V iónovom kanáli sú kladné a záporné ióny v podstate vedľa seba a takmer okamžite by sa rekombinovali. Znížená elektrická pevnosť prostredia dáva podnet k preskoku krátkeho bleskového výboja s novým usporiadaním aniónov a katiónov v iónovom kanáli podľa kap. 2.3. Zdá sa, že kozmické žiarenie zohráva rozhodujúcu úlohu pri sfomovaní viditeľného blesku v závere inicializačného procesu blesku.

Pri silnejších pohyboch vertikálnych vzdušných prúdov vodné kvapky a ľadové kryštáliky do seba narážajú, spájajú sa alebo triešia na menšie čiastočky. Pri tejto situácii vznikajú trením kladné a záporné náboje, začiatok vzniku rozdielu elektrických potenciálov (1) a podmienky pre preskok krátkej iskry. Každý preskok iskry, vizuálne nepostrehnuteľnej, zvyšuje v priestore v dôsledku kompenzačného mechanizmu (kap. 2.3) prírastok elektrického náboja  $Q_{pn}$  (11), čo je veľmi dôležité, ale súčasne miestne znižuje intenzitu elektrického poľa (9) a spotrebúva sa časť práce prúdenia vzduchu. Množstvo  $m$  iónov náboja  $Q_i$ , ktoré unáša vietor prostredím (Bařka 2014) pri inicializácii balíka bleskov možno vyjadriť:

$$m = ((Q_z + Q_t + \Sigma Q_{pn}) - Q_r)/Q_0, \quad (14)$$

kde  $Q_0$  je jednotkový náboj ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C),  $Q_t$  je náboj vznikajúci vzájomným trením pevných a kvapalných čiastočiek vo vzduchu,  $Q_z$  kozmickým žiarením a  $Q_r$  zanikajúci rekombináciou.

Pohyb vzduchu unáša a triedi jednotlivé náboje  $Q_i$  a mení svoju kinetickú energiu  $W_{pic}$  na elektrostatickú (2). Bodové náboje  $Q_m$  pôsobia silovo v bodoch priestoru 1 a 2 a vytvárajú napätie pozadia  $U_p$  (1) pri použití okrajových podmienok (4). Do splnenia podmienky (5) sa rozpadne vplyvom prúdenia vzduchu veľký počet iónových kanálov iskier a zvyšuje sa nehomogenita prostredia. Malé kladné a záporné ióny s dĺžkou života do 60 s sa viažu na kvapky vody, ľadové krúčky a iné nečistoty, čím vznikajú veľké a pomalšie (Langvinove) ióny s dĺžkou života až do  $10^3$  (Hippel 1963). Dôležitou vlastnosťou pevných a kvapalných čiastočiek je schopnosť viazať a aj udržať čím väčšie množstvo elektrického náboja rovnakej polarítity. Triediaci mechanizmus nábojov v oblaku podľa myšlienky C. T. R. Wilsona (1929) je taký, že malé kladné ióny sa viažu pravdepodobne na kvapky vody, ktoré unáša vzduch hore (horný kladný náboj) a záporné malé ióny na zmrznuté zrážky v oblaku padajúce k zemi (spodný záporný náboj), i keď tekuté zrážky pri zemi sú zväčša nabitie kladne (elektróny sú odovzdávané v spodnej časti oblaku, alebo sťahované do zeme pri páde kvapky na zem).

V prípade prehánky, frontálnej oblačnosti, ale aj v pred búrkovom kumulonimbe sa udržuje dynamická rovnováha (14) medzi množstvom vznikajúcich elektrických nábojov a ich rekombináciou (silové pôsobenie nábojov  $Q_i$  v bodoch priestoru 1 a 2 a aj napätie pozadia  $U_p$  sa v čase podstate nemení).

Pri mohutných pohyboch vzduchu v búrkovom oblaku stúpa množstvo nábojov  $Q_i$  a tým aj hodnota napätia pozadia  $U_{pl}$ . Vplyvom triediaceho mechanizmu nábojov vznikajú v priestore nehomogenity elektrického poľa (oblasti s rozdielnym rozdelením priestorového náboja), ktoré sú podmienkou pre spájanie iónových kanálov a ich vetvenie. Až pri splnení podmienky (5) možno hovoriť o preskoku prvej („zápalnej“) iskry a ďalšom vytváraní nových kanálov (vetiev) tzv. temného blesku (Rozhlas 2013a). V novom kanáli vetvy kmitavý pohyb elektrónov pozdĺž plazmového kanálu mení rozdiel

elektrického potenciálu voči okolitým bodom v priestore. Ak je tento rozdiel dostatočne zápornejší voči blízkej kladnejšej nehomogenite prostredia (kap. 2.2), spustí sa z kladnejšej oblasti ústretový výboj a spojí sa so zápornejším čelom (vodcom) vetvy. Nové čelo vetvy vznikne v mieste začiatku ústretového výboja. Vetvenie prebieha lavínovite zo smeru kladnejšieho priestorového rozloženia elektrického náboja.

Hodnota napätia pozadia  $|U_p|$  a úmerne aj hodnoty miestnych napätí iónových kanálov  $|U_{pn}|$  (kap. 2.3) sa postupným posúvaním záporných nábojov v kanáloch výbojov do kladnejšej oblasti znižujú. Keďže hodnoty miestnych kompenzačných napätí  $|U_{kn}|$  v jednotlivých iónových kanáloch sa vkrátkom časovom intervale skoro nemenia (pohyb vzduchu nenaruší iónový kanál), tak vzrast zápornej hodnoty miestneho napätia  $U_{sn}$  (9) a jeho dostatočná veľkosť  $|U_{sn}|$  na preskok iskry v opačnom smere spôsobí, že priestorová sústava predtým vybudovaných iónových kanálov sa stáva nestabilnou. Potrebná absolútna veľkosť napätia  $|U_{sn}|$  bude zrejme už pri iónovom kanáli ďaleko menšia, ako bola hodnota napätia  $|U_{pn}|$  pri inicializácii kanálu iskry (ústretového výboja). K nestabilite prispievajú aj dočasné vzájomné rezonančné väzby medzi kmitajúcimi elektrickými dipólmi resp. iónovými kanálmi, čo môže zvýšiť absolútnu hodnotu miestneho preskokového napätia  $|U_{sn}|$ .

### 3.2 Začiatok balíka bleskov

Nórski vedci (Rozhlas 2013a) podrobili dôkladnému pozorovaniu a analýze rad bleskov a zistili, že pred vlastným viditeľným zábleskom možno v bleskovom epicentre niekedy rozoznať ešte dve ďalšie fázy. V prvej fáze (kap. 3.1 inicializácia) tu dôjde len k slabému pulzu rádiového žiarenia. V druhej fáze (kap. 2.2 tmavý výboj) sa náhle objaví prudký záblesk vysoko energetického žiarenia gamma, sprevádzaný tiež viac silnejším rádiovým pulzom. Až v tretej fáze (kap. 2.2 spätný výboj) je silný optický záblesk s ďalším silným rádiovým pulzom, ktorý vidíme vlastnými očami a hovoríme mu blesk. To všetko netrvá spravidla dlhšie než jednu stotinu sekundy. Pred rokom 1991 tento fakt nebol vôbec známy.

Spätný výboj prebehne pozdĺž všetkých vetvených kanálov „temného blesku“ a do ohniska blesku (miesta, kde začalo spojitie vetvenie) sa presunie celkový náboj  $Q_{st}$ , skladajúci sa z jednotlivých príspevkových nábojov (8):

$$Q_{st} = Q_{pn_1} + Q_{pn_2} + \dots + Q_{pnn} + \dots \quad (15)$$

Dozvedáme sa, že vodivý (plazmový) kanál bol na začiatku vizuálne nepostrehnuteľný temný blesk. Môžeme zhrnúť, že temný blesk, prvotné vytváranie iónového kanálu postupným lavínovým spájaním kanálov jednotlivých preskokov – elektrických dipólov v nehomogénnom elektrickom prostredí, je základom vzniku (inicializácie) a šírenia (vetvenia) blesku a začiatkom balíka bleskov.

Zistenie, že najskôr je fáza temného blesku, vyplýva aj z doterajšieho spôsobu simulovania blesku v laboratórnych podmienkach (Hippel 1963). „Negatívna iskra“ tu zodpovedá procesu fázy temného blesku a „pozitívna iskra“, ak elektrické napätie pozadia prekročilo hodnotu „inicializačného elektrického napätia pozadia“ (5), ten silný optický záblesk, ktorý už vidíme na oblohe.

### 3.3 Vnútro-oblačné blesky CID (compact intra-cloud discharges)

Predtým vytvorené miestne iónové kanály (temná fáza blesku) sa stanú ďalším postupným vetvením rôznymi smermi spojenými „žiaricami“ plazmovými kanálmi „nesymetrické-

ho elektrického multipólu“, sústavy dipólov pospájaných do nejakého celku, s dominanciou jedného alebo viacerých dipólov, ktoré zaberajú veľkú časť oblohy v smere vertikálnom a horizontálnom. Rozvetvené kanály blesku CID sa zbiehajú z kladnejšej oblasti oblaku do ohniska (prípadne do viac ohnísk) blesku v zápornejšej časti oblaku. Ohnisko blesku je silne ionizovaný plazmový priestor, do ktorého sa pri periodickej prílive elektrónov sústreďuje veľké množstvo voľného záporného náboja, ktorý zvyšuje spád elektrického potenciálu voči okoliu, s možným pokračovaním rozvoja vetiev čiarového blesku k zemi. Nasledujúce fotografia je toho príkladom, i keď nevidíme celú sústavu blesku ukrytú vo vyšších častiach oblaku (ukazy.astro.cz).

- Počas rozvíjajúceho sa procesu, prúdy elektrónov sa sťahujú do ohniska blesku a následne sa pumpujú znovu do všetkých koncov vetiev, kde zvyšujú spád elektrického potenciálu, ktorý ak je dostatočný, evokuje vytváranie ústretových výbojov (ďalších elektrických dipólov) z blízkej kladnejšej nehomogenity elektrického poľa a vzrast celkového náboja  $Q_{st}$  (15). Tento proces môžeme porovnať napríklad krvnému obehu u človeka, kde srdce je pumpou. Frekvencia tohto procesu sa rozrastaním výboja znižuje, pretože sa predlžuje dráha, ktorú musí prúd elektrónov prekonať. Pri určitej dĺžke už treba rátať s rušivým vplyvom prúdenia vzduchu, ktoré je vírivé a časti vetiev výboja sa môžu „oddeľovať“ od celku.
- Elektrický výbojový dipól sa správa ako anténa, ktorá vyžaruje elektromagnetické vlny o vlnovej dĺžke zodpovedajúcej dĺžke dipólu. Zo spomalených videozáznamov rozvoja bleskových kanálov (film Univerzum: Blesky plné energie) môžeme vypožorovať vytváranie izolovaných elektrických bleskových dipólov (kanálov) aj mimo nesymetrického multipólu. Je to aj dôsledok spomínanej vyžarovanej elektromagnetickej energie, ktorá indukuje (zvyšuje) rozdiel elektrických potenciálov v izolovaných oblastiach s rozdielnym elektrickým nábojom. Elektromagnetické žiarenie takto napomáha k rozširovaniu bleskových kanálov na oblohe v závislosti na frekvencii a veľkosti elektrických prúdov, ktoré pretekajú nesymetrickým elektrickým multipólom.
- Elektrický výbojový dipól sa správa ako prúdový zdroj. Pri prerušení tohto zdroja, v dôsledku nárazového prudkého zvýšenia elektrického odporu prostredia v ceste prúdu elektrónov, sa následne uvoľní energia. Prejavuje sa to hlavne svetelnými efektmi, ktoré sa dajú pozorovať na oblohe. Nárazovým javom je pritom utvorenie ionizovaného plazmového priestoru s prebytkom elektrónov a jeho možné uzatvorenie sa do guľového útvaru s prudkým zvýšením spádu elektrického potenciálu voči okoliu. Minimálne dôjde k opätovnému spojeniu prerušeného kanálu prúdového zdroja, no hlavne môžu sa vytvárať aj nové vetvy blesku, a to aj smerom k zemi.
- Proces na udržanie plazmových bleskových kanálov na oblohe končí vtedy, keď sa prestanú tvoriť ústretové výboje (kanály nových vetiev), a tým prestane vzrast celkového náboja  $Q_{st}$  (15). Je to možno (hlavne) kvôli úbytku záporného náboja, ktorý sa presunul pri údere blesku do zeme (pozri kap. 3.4.1., viacnásobný výboj v hlavnom kanáli blesku) a nad oblaky. Systém balíka bleskov je závislý od rozdielu potenciálov elektrostatických polí (elektrické napätie pozadia  $U_p$ ). Začne prebiehať usporiadanie nábojov pozdĺž kanálov jednotlivých výbojov (kap. 2.3), kde záporné ióny sa sústreďujú viac na stranu kladnej-

šieho pólu priestorového elektrického napätia pozadia  $U_p$  a kladné na opačnú stranu. Vrástá hodnota  $|U_{sml}|$  (9) pre ďalší spätný výboj.

- Výboje vnútri oblaku sa môžu zopakovať viackrát, pokiaľ podmienka pre spätný výboj v kanáli blesku nezankla (13). Spätný výboj prebehne pozdĺž predchádzajúceho iónového kanálu blesku a do ohniska (ohnísk) blesku sa presunie spolu celkový náboj  $Q_{st}$  (15), ktorý je menší, pretože pri nižšej hodnote elektrického napätia pozadia  $|U_p|$  sa neaktivovali všetky predchádzajúce iónové kanály bleskov. Nové dráhy bleskových kanálov nemusia znovu kopírovať predchádzajúce dráhy kanálov.

### 3.4 Blesky oblak – zem (CG)

#### 3.4.1. Blesky typu C–G+

Už počas inicializácie bleskovej činnosti (kap. 3.1) sa začal vytvárať rozdiel elektrických potenciálov (statickej elektriny) medzi spodnou časťou oblaku (hromadenie záporného náboja) a zemským povrchom. Dôsledkom sú prírodné javy, ako sršanie z vyvýšených bodov v teréne a niekedy aj tzv. Eliášov oheň. Taktiež aj záporne nabitú kvapku dažďa strácajú náboj. V tom čase sa pri zemi zvyšuje nehomogenita elektrického poľa, vytváranie kladných iónov v dôsledku sťahovania elektrónov do zeme vodivými vyvýšenými bodmi v teréne. Tieto kladné ióny (v podstate sa nemajú s čím rekombinovať, okrem so zápornými iónmi padajúcich zrážok) vynášajú hore vzostupné prúdy vzduchu. Vznikajú nehomogenity kladných nábojov v priestore medzi oblakom a zemou, ktoré sú podmienkou pre spájanie výbojových kanálov a ich vetvenie (Hippel 1963).

Vetvenie blesku v nehomogénom elektrickom poli postupuje od ohniska blesku elektrického multipólu na oblohe (CID kap. 3.3) k zemi. Vetvený blesk šíriaci sa k zemi zväčšuje pritom množstvo vlastného voľného záporného náboja, ktorý „priteká“ v opačnej fáze do ohniska blesku. Toto množstvo je výrazne menšie ako množstvo záporného náboja periodicke pritekajúceho do ohniska blesku v rámci CID.

- Príliv záporného náboja do ohniska blesku zapríčiní, že ohnisko sa stane zápornejším voči čelu vetví blesku šíriacich sa k zemi. V iónových kanáloch vetiev nastane najskôr tmavý a potom spätný výboj (kap. 2.2) a stanú sa plazmovými a viditeľnými. Ak čelo vetvy je dostatočne zápornejšie voči blízkej kladnejšej nehomogenite prostredia, spustí sa z kladnejšej oblasti ústretový výboj a spojí sa so záporným čelom (vodcom) prichádzajúcej vetvy. Nové čelo vetvy vznikne v mieste začiatku ústretového výboja. Celý tento mechanizmus sa nazýva „postupujúci vodca“ (stepped leader). Týchto ústretových výbojov môže byť aj viac a počet vetiev sa zväčší. V blízkosti zeme ústretové výboje (upward-moving discharges) prídu zväčša od viac vyvýšených bodov na zemi.
- Odliv záporného náboja z ohniska blesku zapríčiní, že ohnisko blesku sa stane kladnejším voči čelu vetví blesku šíriacich sa k zemi. Do opätovného prílivu záporného náboja do ohniska blesku sa uskutočňuje usporiadanie nábojov pozdĺž kanálov vetví (kap. 2.3), ktoré sa stávajú iónovými (neviditeľnými) kanálmi. Javí sa to ako chvíľkové zastavenie šírenia vetiev blesku.
- Ak niektorá vetva blesku dosiahne vodivé spojenie so zemou, medzi ohniskom blesku v oblaku a zemou vznikne vodivé spojenie, najskôr tmavý a potom spätný výboj. Prejaví sa to rozžiaraním ohniska blesku a aj kanálu blesku (Patúc 2009). Elektróny v kanáli môžu dosiahnuť rých-

lost skoro polovice rýchlosti svetla. Veľkosť prúdu v kanáli blesku, mohutnosť úderu, závisí na vodivosti zvodu do zeme. Vetva, ktorá vytvorí so zemou najvodivejšie spojenie, stane sa hlavným kanálom blesku. V jednotlivých bodoch vodičej cesty vzniká úbytok napätia podľa Ohmového zákona. Zmena elektrického potenciálu v miestach vetvenia blesku je možnou príčinou zastavenia šírenia vetiev, ktoré nedosiahli zem, pretože spád potenciálu sa zníži pod prahovú (dostatočnú) úroveň preskoku elektrickej iskry vo vzduchu. Dokonca prichádza k zmene smeru toku prúdu vo vetve a záporný náboj (elektróny) sa z vetvy presunie do hlavného kanála a ďalej do zeme. Časť voľného záporného náboja z ohniska blesku rýchlo pretečie hlavným kanálom do zeme. To spôsobí ukončenie



Obr. 2 Vetvený kladne nabitý CG blesk. Foto: Z. Černoch.

Fig. 2. Branched, positively charged CG lightning. Photo: Z. Černoch.

plazmového stavu hlavného kanála (aj kanálov všetkých vetví, ktoré ešte nezanikli). Zostane len iónový hlavný kanál, pokiaľ ho pohyb vzduchu nerozptýli.

- Detailný a veľmi zaujímavý pohľad (čas 7:32) na kanál blesku, umelo vyvolaný pre výskum, je v filme *Universum: Blesky plné energie*.
- Všetky vetvy blesku pred dopadom na zem sú slabé výboje a aj silnejší dominantnejší výbojový kanál nemusí dosiahnuť zem. Zem dosiahne v priemere ešte asi 5 % slabých vedľajších úderov blesku v spáde elektrického potenciálu zväčša na hranici dostatočnosti (Méry 2007). Aj tu dôjde k zvýšeniu prúdu v ich kanáli, spätný výboj s obmedzeným prúdom oproti prúdu hlavným kanálom. Výbojový kanál vedľajšej vetvy s prúdom len niekoľko kA môže mať matnú a načervenanú farbu, červene zafarbený blesk so širokým výbojovým kanálom.
- Aká je situácia, keď napätie pozadia má hodnotu medzi hodnotami  $U_{pi}$  (5) a  $U_{pf}$  (13) z pohľadu pozorovateľa zo zeme? V sústave kanálov blesku na oblohe sa periodicky znova vytvorí podmienka pre nové naplnenie ohniska blesku záporným elektrickým nábojom (kap. 3.3). Ohnisko blesku sa stane dostatočne zápornejšie voči zemi pre tmavý výboj (dart discharge) zo zeme v ešte existujúcom bývalom iónovom kanáli hlavného kanála blesku. Opakuje sa proces blesku typu C–G+, ale s tým rozdielom, že už nie sú podmienky pre vznik vedľajších vetví a spätný výboj prebehne jedným krokom medzi ohniskom blesku na oblohe a zemou a časť záporného náboja z ohniska sa vyprázdni do zeme. Takýchto elektrických výbojov cez hlavný kanál blesku do zeme môže vzniknúť za sebou údajne aj 50. Najčastejšie bývajú 2 až 3 výboje. Čas medzi výbojmi je krátky v rozmedzí stotina až desatina sekundy. Rozdielne údaje by sa mohli dať vysvetliť vlastnosťou ohniska blesku, nádrže voľného záporného elektrického náboja a frekvenciou kmitania elektrónov pozdĺž kanálov nesympetrického elektrického multipólu, stále existujúceho a slabného dominantného kanálu na oblohe.

Naše oko nie je schopné rozoznať fázy blesku. Vidíme len mihotanie blesku pri viacnásobnom výboji. Príkladom rozdielneho opakovania výboja v hlavnom kanáli blesku je video (Patúc 2009) so spomalením desetinásobným. Sú tu dva prípady časovo rozdielneho opakovania výboja v hlavnom kanáli blesku. Na zamyslenie je druhý prípad, kedy pri počiatkovom údere blesku sa hlavný kanál silne rozžiaril (dobrý zvod bleskového prúdu do zeme).

V literatúre je často zmienka o ružencovom (perlovom) blesku, napríklad Štoll (1988): je typom blesku u ktorého možno pozdĺž hlavného kanálu blesku pozorovať rad svetelných guľičiek. Tieto guľičky môžu byť niekedy pozorovateľné i krátku dobu (1 až 2 s) po skončení vlastného výboja. Usudzuje sa, že guľičky tvoria rad oblúkových výbojov, určitým spôsobom podobných guľovému blesku, pri rozpade mnohonásobného výboja v hlavnom kanáli blesku v závere opakovania výbojov. Pri predpoklade, že okolité elektrické pole pozdĺž hlavného kanálu je pravidelne rozvrstvené (nehomogénne) a zvýraznené (napätie pozadia sa blíži k svojej dolnej hodnote  $U_{pf}$ ), tak je možný rozpad hlavného kanálu vo vrstvách elektricky nehomogénneho prostredia, keď široké úseky hlavného kanálu majú nedostatok elektrónov na rekombináciu kladných iónov. Padajúce kvapky dažďa nesú záporný náboj (kap. 3.1) a ich rozklad a rekombinácia nábojov môže vyvolávať svetelné a zvukové efekty v plazmových úsekoch kanálu.

#### 3.4.2. Blesky typu C+G–

Kladný blesk C+G– možno zaradiť do samostatného balíka bleskov. Za búrkou má nákovu oblaku veľkú prevahu kladných iónov a pri povrchu zeme sa indukciou z vyvýšených bodov sršaním uvoľňujú záporné ióny. Zvyšuje sa tak zápornejší elektrický potenciál voči nákovu. Zostupné prúdenie vzduchu zanáša vo vrstvách molekuly kladných iónov zo zadnej strany búrkového oblaku do nižších hladín ovzdušia a zvyšuje sa nehomogenita elektrického poľa. Ak rozdiel potenciálov elektrického napätia medzi vyvýšeným bodom



na zemi (ohniskom blesku) a najbližšou vrstvou kladných iónov je dostatočný na preskok iskry, môže sa začať lavínové vetvenie kanálov blesku smerom ku nárove. Pokiaľ za búrkou už nie sú nižšie vrstvy oblačnosti alebo je jasná obloha, zväčša mohutný ohlušujúci úder blesku sa javí ako „blesk z jasného neba“, zvlášť keď dominantný kanál blesku má šikmý smer. Pozri blesk od Kane Quinnell (Gembec 2005). Keď kladný blesk dosiahne dobrý zvod do zeme, vzniká zvlášť mohutný spätný výboj s elektrickým prúdom v kanáli blesku aj nad 200 kA, ktorý môže mať vplyv na vznik nadoblačných výbojov. Časť záporného náboja (elektróny), pretečie zvodom do zeme. Zvýši sa podiel kladného náboja (kladné ióny) pri zemi voči nárove v dôsledku kompenzačného mechanizmu (kap. 2.3).

### 3.4.3. Gulové blesky

Inšpiráciou pre popis gulového blesku je kniha Štoll (1988).

K objasneniu tajomstva gulového blesku prispel aj záznam čínskych vedcov (Novinky 2014): Podarilo sa im urobiť digitálny záznam zrodu gulového blesku s vysokým rozlíšením a s pomocou spektroskopie a ďalších analýz rozobrať podmienky jeho vzniku. Potvrdili mimo iného predpoklad, že gulový blesk vzniká pri spaľovaní pôdy pri určitom zložení minerálov.

Elektrické výbojové dipóly v bleskových kanáloch sa správajú ako prúdové zdroje (kap. 3.3). Pri prerušení tohto zdroja v dôsledku nárazového prudkého zvýšenia elektrického odporu prostredia v ceste prúdu, sa následne uvoľní energia.

Slabý blesk môže udrieť do pôdy, kde nemá dobrý zvod do zeme. Záporný náboj výboja (elektróny) sa nemôže „rozlítať“ (prudká zmena elektrického prostredia) a sústreďuje sa do uzavretej plazmovej gule s prebytkom elektrónov, ktorá potom akoby vystúpila zo zeme. Plazmová guľa, „obohatená“ chemickými reakciami z materiálu pôdy, má zásadný vplyv na životnosť gulového blesku (možno aj niekoľko sekúnd) a jeho farby. Plazma, tzv. štvrté skupenstvo hmoty, má niekoľko prírodných i umelých foriem (Vaňura 2009). Tvorí ju zhuk voľných elektrónov a iónov. Rotáciou získava plazma sféroidný, najčastejšie gulový tvar a magnetický „obal“. Rotujúcim plazmoidom je Slnko, na rozdiel od gulového blesku s prebytkom kladného náboja.

Smer a rýchlosť pohybu gulového blesku je daný tzv. výsledným spádom elektrického potenciálu medzi statickým elektrickým potenciálom gule a okolím. Ak sa stane výsledný spád potenciálu dostatočný (napríklad v blízkosti kovového zvodu do zeme), premení sa gulový blesk na obyčajný slabý čiarový výboj s deštruktívnymi účinkami.

Pri svojom pohybe gulový blesk prechádza cez nehomogénne elektrické prostredie, sprevádzané rekombináciou nábojov ústretovými výbojmi (iskrami) z tohto prostredia (kompenzačný mechanizmus kap. 2.3). Prebytok záporného náboja v gulovom blesku sa znižuje a nakoniec, pri nejakej kriticko-nej hodnote, gulový blesk ticho zanikne a zostane zápach po chemických procesoch počas jeho trvania.

## 3.5 Nadoblačné výboje

Sprajty sú súčasťou širokej a neustále sa rozširujúcej „rodiny“ tranzientných luminozných javov (TLE). Ich viacmenej náhodný experimentálny objav na počiatku 90. rokov 20. storočia bol potvrdením teoretických predpovedí ich existencie v prácach škótskeho nositeľa Nobelovej ceny za fyziku C. T. R. Wilsona.

Výskum všetkých týchto javov je na začiatku (Popek, Bednář 2012). Je zrejme, že najvyššie vrstvy atmosféry sú dejiskom búrlivej súhry elektrických, svetelných a chemických dejov, ktoré musíme dôkladnejšie spoznať. Môžu ovplyvňovať nielen našu techniku, spoje a navigácie, ale priamo i náš život, ktorý je na stavu našej tenkej vrstvičky atmosféry osudovo závislý.

Informácie pre štúdium vzácnych výbojov v hornej atmosfére (nadoblačné výboje) ako je červené halo (Elves), červení škriatkovia (Red Sprites) a modrý záblesk (Gnome) sú v (Popek, Bednář 2012; Sky-fite.tv 2015; Lyons 2000; Popek 2014; Ondrášková et al 2008). V oblasti elektrických výbojov a elektrických polí nad hornými časťami kumulonimbov, resp. búrkových buniek, asi treba hľadať reálne väzby a „spojovacie mostíky“ medzi troposférickou búrkovou elektrinou a úkazmi TLE, vyskytujúcimi sa niekedy už vo stratosfére, ale častejšie ešte vo vyšších hladinách atmosféry. Elektrické výboje vyvolávajú v okolitom elektrickom poli pulzné zmeny a podľa polarít týchto zmien v závislosti na vzdialenosti od zdrojevého blesku možno rozlišovať druhy bleskov (vnútorný blesk, záporný alebo kladný blesk do zeme, elektrické výboje smerujúce z hornej časti búrkových oblakov hore a pod.).

Ako je uvedené vyššie, elektrické výboje vnútri búrkového oblaku vyvolávajú v elektrickom poli pulzné zmeny. Búrkový oblak sa nachádza medzi dvoma „platňami zemského kondenzátora“ (kap. 4). Elektrické potenciály v samotnom búrkovom oblaku akoby plávali voči platňam zemského kondenzátora. Pri údere blesku z oblaku do zeme (dolnej platne zemského kondenzátora) sa presúva záporný náboj (elektróny) do zeme a dochádza k zníženiu rozdielu elektrického potenciálu medzi oblakom a zemou. Podľa Ohmového zákona toto zas zapríčiní zvýšenie rozdielu potenciálu medzi oblakom a ionosférou (hornou platňou zemského kondenzátora). Tento zvýšený rozdiel elektrického potenciálu medzi oblakom a ionosférou s nepatrným časovým oneskorením vyrovnávajú (znižujú) nadoblačné blesky. Elektrický obvod medzi dvoma platňami zemského kondenzátora sa takto uzatvára.

Napätie medzi ionosférou a zemským povrchom kolíše v dennom chode nezávislom na polohe na zemi (Ondrášková et al. 2008), tak aj hodnotu zvýšenia rozdielu potenciálu medzi búrkovým oblakom a ionosférou ovplyvňuje denný chod. Potom je možné, že výskyt „škriatka“ je častejší pri nižšej a „modrého záblesku“ zas pri vyššej hodnote napätia medzi ionosférou a zemským povrchom.

Prípady vzniku nadoblačných bleskov vzhľadom ku smeru prúdu elektrónov v bleskových kanáloch vnútri búrkového oblaku:

- Odliv prúdu elektrónov z koncov vetiev výboja v hornej časti búrkového oblaku (zvyšuje sa podiel kladného náboja vo vrchnej časti oblaku) vytvára spád elektrického potenciálu, ktorý ak je dostatočný, evokuje vytváranie vetvených výbojových kanálov (ďalších elektrických dipólov tzv. tendrils) vo zvislom smere v blízkej zápornejšej nehomogenite elektrického poľa nad búrkovým oblakom, a to nadoblačný červený škriatok (Red Sprites). Šírka výbojového kanálu sa s nadmorskou výškou v dôsledku znižujúcej sa elektrickej pevnosti prostredia náhle zväčšuje a červený škriatok nadobúda tvar medúzy. Tlmené kmitanie elektrónov vo výbojovom kanáli spôsobuje vyhasínanie „hlavy medúzy“. Vyzerá to, akoby sa červený škriatok pohyboval smerom dolu. Načervenavé sfarbenie fenoménu je od ionizovaných molekúl vodíka pri prechode elektrického prúdu (TV Spektrum, Vesmír III).

- Počas doby trvania červeného škriatka (škriatok) sa vytvára pri tlmenom kmitaní elektrónov vo výbojových kanáloch červeného škriatka nad búrkovým oblakom v dôsledku usporiadania elektrických nábojov v kanáli (kap. 2.3) oblasť záporného náboja (dolná hranica škriatka) a pod hranicou asi 75 km (horná hranica škriatka) oblasť kladného náboja. Ak sa stane táto oblasť dostatočne elektricky kladnejšia ako oblasť globálneho zemského kondenzátora v ionosfére (kap. 4), vytvorí sa „Spirites halo“, cez ktoré dôjde k presunu záporného náboja (elektrónov) z ionosféry do spodnej časti „Spirites halo“ a elektrické potenciály sa tým vyrovnávajú, čo ohraničuje dobu trvania hala.
- Príliv prúdu elektrónov do koncov vetiev výboja v hornej časti búrkového oblaku (zvyšuje sa tam podiel záporného náboja) vytvára spád elektrického potenciálu, ktorý ak je dostatočný, evokuje vytváranie výbojových kanálov (ďalších elektrických dipólov) vo zvislom smere v blízkej kladnejšej nehomogenite elektrického poľa nad búrkovým oblakom, a to nadoblačný modrý záblesk (Gnome) alebo modrý výtrysk (Blue jet). Vyzerá to, akoby niektorá vetva vnútro-oblačného blesku pokračovala vo vetvení aj nad búrkovým oblakom. Následne, v dôsledku usporiadania elektrických nábojov v kanáli (kap. 2.3), sa vytvára vyššie nad oblakmi oblasť záporného náboja. Vzniká otázka, či aj tu nevzniká nejaké „Spirites halo“. Modré sfarbenie fenoménu je od ionizovaných molekúl dusíka pri prechode elektrického prúdu.
- Pulzné zmeny v elektrickom poli, v dôsledku kmitavých zmien elektrických prúdov vo výbojových kanáloch v búrkovom oblaku pod a nad ním, indukujú v ionosfére (okolo 100 km) pulzné elektrické napätie – zmenu spádu elektrického potenciálu a ďalšiu ionizáciu vzduchu vo vodorovnom smere. Ak je spád dostatočný, produkuje červené halo (Elves) v tvare kruhov. Dĺžka trvania červeného hala je menšia ako trvanie ostatných nadoblačných javov. Príčinou je postupné slabnutie elektromagnetického poľa pri tlmenom kmitaní v kanáloch bleskov. Príkladom opakovania elektrického výboja je (Popek 2012): Red spirites vznikajú často v rade za sebou, pripomína to mnohonásobný výboj v hlavnom kanáli blesku, ale tento krát opačne hore od vrchu oblakov (vizuálne tancujúci alebo pulzujúci červený škriatok). Existuje synchronizácia medzi opakovaním výbojov pod a nad búrkovým oblakom.

### 3.6 Ukončenie balíka bleskov

Počas „temného blesku“ a trvania balíka bleskov (kap. 3.2 až 3.5) bolo na oblohe vytvorené veľké množstvo nových (ústretových) kanálov elektrických výbojov. Celková statická energia  $W_{pic}$  sa zmenila na dynamickú –  $W_{pic}$  a preniesol sa celkovo náboj  $Q_{ppc}$  (7):

$$W_{pic} = W_{pp1} + W_{pp2} + \dots + W_{ppn} + \dots, \quad (16)$$

$$Q_{ppc} = Q_{pp1} + Q_{pp2} + \dots + Q_{ppn} + \dots. \quad (17)$$

Premiestnil sa celkový kompenzačný ekvivalentný náboj  $Q_{pce}$  (10)

$$Q_{pce} = Q_{p1e} + Q_{p2e} + \dots + Q_{pne} + \dots, \quad (18)$$

a zabezpečil v búrkovom oblaku v zlomku sekundy proces pre priestorové vyrovnanie (vybitie) nábojov, a to usporiadaním aniónov a katiónov pozdĺž každého  $n$ -tého kanálu blesku (kap. 2.3). Do ohniska blesku (miesta, kde začalo spojité vetvenie) sa presunul celkový náboj  $Q_{st}$  (15). Uvoľnila sa energia hlavne vo viditeľnej, tepelnej a akustickej forme

v podstate prechodom náboja  $Q_{st}$  ( $Q_{st} \gg Q_{pce}$ ) kanálmi blesku.

Pri poklese hodnoty elektrického napätia pozadia  $U_{pl}$  pod určitú prahovú úroveň  $U_{pf}$  (13) všetky vybudované iónové kanály výboja v búrkovom oblaku sa rozpadnú v dôsledku pohybu vzduchu.

Prebehol pohyb elektrických nábojov. Pri údere blesku do zeme sa presunula časť záporného náboja z oblaku do zeme a časť záporného náboja počas nadoblačných bleskov z ionosféry do priestoru nad vrchnou časťou búrkového oblaku. Oblasť bývalého ohniska blesku v spodnej časti búrkového oblaku sa v dôsledku kompenzačného mechanizmu stala relatívne kladnejšou voči nárove a aj voči okolitej spodnej časti búrkového oblaku.

Vybudovanie nových iónových kanálov temného blesku a viditeľnej bleskovej činnosti môže nastať až po novom dosiahnutí hodnoty elektrického napätia pozadia, a to hodnoty inicializačného napätia  $U_{pi}$  (5). To je už začiatok nového balíka bleskov (kap. 3.2).

## 4. GLOBÁLNY ZEMSKÝ KONDENZÁTOR

Zemský povrch (Ondrášková 2008) tvorený prevažne výborne vodivou morskou vodou a ionosféra predstavujú dve sústredné guľové plochy, ktoré tvoria elektródy obrovského sférického kondenzátora a z hľadiska šírenia elektromagnetických vln vlastne aj sférický vlnovod. Sústavu Zem–ionosféra možno približne simulovať najjednoduchším náhradným obvodom, tvoreným paralelnou kombináciou kapacity 0.05 F a rezistencie 150  $\Omega$  (impedancia  $Z_{gg}$  obr. 1.1). Pokiaľ by neelektrické mechanizmy separácie nábojov (prevažne v troposfére), a tým aj búrková činnosť, prestali fungovať, behom charakteristického času rádu minút by akákoľvek elektrická aktivita ustala. Napätie medzi ionosférou a zemským povrchom kolíše medzi 150 a 400 kV (napätie  $U_g$  obr. 1.1) v denom chode nezávislom na polohe na zemi. Ionosféra je pri tom v neustálom pohybe, pôsobia na ňu kozmické vplyvy, vane v nej ionosférický vietor a tento jej nepokoj sa prejavuje rádiovými signálmi a poruchami šírenia rádiových vln. Na celej zemeguli prebehne za rok do 80 miliónov búrok, teda asi 200 000 denne. Pri výboji bleskov vznikajú tiež elektromagnetické vlny, ktoré sa prejavujú ako atmosférické poruchy pri rádiovom prenose. Tieto atmosférické poruchy môžu nastať i v prípade dažďa bez výskytu bleskov.

Vodivosť vzduchu (Hippel 1963) sa mení silne s výškou. Zhruba je o 2 rády väčšia vo výške 30 000 m oproti zemi, aby tiekol priemerný konštantný vertikálny prúd medzi ionosférou a zemou v oblasti búrok na zemeguli. Oproti minulosti vieme, že sú to nadoblačné elektrické výboje, ktoré sa podieľajú na zvýšenej priemernej elektrickej vodivosti vzduchu nad búrkovými oblakmi.

Podľa Kirchoffových zákonov priemerná hodnota prúdu (asi 1.5 kA), ktorým sa „zemský kondenzátor“ vybíja, musí sa rovnať priemernému prúdu, ktorým sa „zemský kondenzátor“ dobíja pri búrkovej činnosti na celej zemeguli. Tak to sú súčasťou „globálneho atmosférického elektrického obvodu“ nadoblačné elektrické výboje, výboje v búrkových oblakoch a obvod uzatvárajú úder bleskov do zeme.

V knihe Hippel (1963) je tiež zmienka, že príspevok prúdov bleskov udierajúcich do zeme je menší k priemernej hodnote prúdu, ktorým sa „zemský kondenzátor“ dobíja pri búrkovej činnosti na celej zemeguli. Možno konštatovať, že počas búrok a možno v slabšej miere aj počas preháňok a tiež aj pri frontálnych oblakoch, kde sa pri vertikálnych pohyboch

vzduchu zosiluje spád elektrického poľa, dajú sa pozorovať na povrchu zeme javy ako sršanie a niekedy aj tzv. Eliášov oheň, stahovanie elektrónov (záporného náboja) do zeme vodivými vyvýšenými bodmi v teréne a pritom vznik kladných iónov unášaných vetrom.

Počas búrky, vplyvom nadoblačných elektrických výbojov, vytvára sa nad oblakmi samostatná oblasť záporného elektrického náboja (kap. 3.5) a v nárove búrkového oblaku samostatná oblasť kladného elektrického náboja (kap. 3.4), z ktorej sa tiež po skončení búrky vybíja zemský kondenzátor.

Pri peknom počasí a aj hneď za búrkou sa globálny zemský kondenzátor vybíja. Nad vyvýšenými záporne nabitými bodmi na zemskom povrchu vznikajú a uvoľňujú sa záporné ióny. Mikro-preskokmi, pri riadiacom napätí  $U_g$  a aj v menšej miere podporou zostupného prúdenia vzduchu (posuvný prúd), kladný náboj sa presúva smerom k zemi. V okolí sa rekombináciou nábojov zvyšuje homogenita elektrického poľa.

## 5. MERANIE A SIMULÁCIA BALÍKA BLESKOV

Výbojová dráha (kanál blesku) predstavuje elektrický dipól, anténu, aj keď v trvaní zlomku sekundy, ktorá vyžaruje elektromagnetickú energiu (Ondrášková et al. 2008; Jirků 2010). Pre popisovanie a meranie vlastností takejto antény je možné použiť dostupnú literatúru – učebnicu, ako je Hottmar, Adamec (2014). Bleskové výboje v troposfére sú zdrojom rádiových vln zvukových frekvencií. V izolovaných elektricky vodivých sústavách (Bélai 2006) elektromagnetické pole indukuje napätia rádovo desiatky až stovky kV. Najviac energie sa vyžiarí na nízkych frekvenciách v oblasti veľmi dlhých a dlhých vln v závislosti na dĺžke viditeľných žiariacich bleskových kanálov na oblohe. Aj počas inicializácie blesku vnútri oblaku (kap. 3.1) sa generuje žiarenie predovšetkým na výrazne vyšších frekvenciách v oblasti VKV (rádovo stovky MHz). Z uvedeného možno usudzovať, aká je dostatočná vzdialenosť  $D$  (6), budúca dĺžka elektrického dipólu, na preskok lokálneho elektrického výboja pri budovaní bleskových kanálov. Takto možno frekvenčne mapovať oblasti búrkovej činnosti, ale aj oblasti s relatívne pekným počasím (Ondrášková et al. 2008; Chum 2004). Balík bleskov začína lavínovou tvorbou krátkych bleskových kanálov temného blesku (Rozhlas 2013a). Viditeľný blesk na oblohe má aj niekoľko km. Každý balík bleskov vymedzuje začiatok (5) a koniec (13). U každého balíka bleskov môže prebiehať viacnásobný výboj v hlavnom (dominantnom) bleskovom kanáli a periodické elektromagnetické žiarenie na veľmi dlhých vlnách, ktorého dĺžka sa postupne skraca (kap. 2.3 tlmené kmitanie elektrónov pozdĺž plazmového kanálu výboja).

Novým pokrokom je analýza rádiových vln vytvorených kozmickým žiarením, prechádzajúcim oblasťou búrky (Ball 2015). Poskytuje nebyvalý pohľad na rozloženie a silu elektrického poľa v búrke

Ako predpokladal už W. O. Schumann (Ondrášková et al. 2008), zdroj energie pre vlastné kmity v rezonátore Zem-ionosféra, predstavuje globálna búrková činnosť (náhodné a nekoherentné atmosférické výboje). Výbojová dráha (kanál blesku) predstavuje elektrický dipól, anténu. Vždy je pravdepodobnosť, že nastane rezonancia, kmitanie nejakého dipólu na frekvencii zo schumannovského pásma frekvencií, príjem alebo odovzdávanie energie v oblasti rezonátora Zem-ionosféra a udržanie dipólu dlhšie pri živote i po skončení balíka bleskov. Otázkou je, ako by taký dipól (blesk) vyze-

ral na oblohe. Získanie energie z rezonátora Zem-ionosféra pre ľudstvo je problematické. Maximum elektromagnetickej energie výboje vyžarujú na frekvenciách 20 až 100 kHz, teda na schumannovské pásmo (ELF) pripadá nepatrná časť.

### 5.1 Priebeh procesu balíka bleskov

Pre budúcu simuláciu elektrického obvodu balíka bleskov na počítači vychádzame z obr. 1.1 a z údajov meraní a simulácie správania sa molekúl plynu, iónov v premenlivom elektrickom poli (Hippel 1963; Červeň 2005; Rakov, Uman 2003) v prostredí búrlivého pohybu vzduchu (Bařka 2014).

#### 5.1.1. Pred preskokom iskry, inicializácia blesku

„Platne“ virtuálneho kondenzátora  $C_p$  sa nabíjajú triedeným priestorovým nábojom  $Q_{ie}$  (kap. 3.1) v equivalentnom obvode (obr. 1):  $W_{pic} = (U_z - |U_p|) \cdot i \cdot t$ , kde  $i$  je prúd, ktorým sa nabíja kondenzátor  $C_p$  a  $t$  je čas nabíjania kondenzátora  $C_p$  do preskoku iskry. Pri jednoduchom predpoklade  $U_z \gg |U_p|$ ,  $|Z_{cc}| \gg (|Z_{c1} + Z_{c2}|)$  a  $(|Z_{c1} + Z_{c2}|)$  je konštantna, nabíjací prúd  $i$  možno pokladať za nekonštantný:  $W_{pic} = (U_z^2 / (|Z_{c1} + Z_{c2}|)) \cdot t$  ale aj  $W_{pic} = i^2 \cdot (|Z_{c1} + Z_{c2}|) \cdot t$

Prúd  $i$ , odvodený z množstva nábojov, ktoré pretekajú prostredím (14) za jednotku času ( $i = dQ_{ie} / dt$ ), predstavuje tzv. prúd posuvný (Jirků 2010). Jeho šírenie je podstatne menšie ako rýchlosť šírenia elektriny (vodivého prúdu) vo vodiči ako aj v plazmovom kanáli blesku.

#### 5.1.2. Po preskoku iskry

Po preskoku iskry (preskok iskry riadi premenlivá hodnota impedancie  $Z_{cc}$ ), pôvodné napätie pozadia  $U_p$ , kde  $|U_p| = U_{pi}$  sa kompenzovalo napätím  $U_{kp}$ , kde  $|U_{kp}| = U_{pf}$ , aby sa iskra skončila (10). Prebehol mechanizmus „vybitia“ ekvivalentného množstva náboja o veľkosti  $Q_{pe}$  v oblasti oblaku patriaceho balíku bleskov, kde  $Q_{pe}$  je časť náboja z  $Q_{ie}$ , ktorým sa predtým nabila oblasť balíka bleskov počas inicializácie (kap. 3.1) na inicializačné napätie pozadia  $|U_p| = U_{pi}$  pri premiestňovaní molekúl nábojov aniónov a katiónov prúdením vzduchu v equivalentnom (náhradnom) obvode balíka bleskov s prírastkovou energiou:

$$W_{pic} = Q_{ie} \cdot U_{pi},$$

pozri (16) a (17), potom  $Q_{ppc} = Q_{ie}$ .

Podľa (10) možno písať:

$$W_{pie} = Q_{pe} \cdot U_{pf},$$

pozri (18), potom  $Q_{pce} = Q_{pe}$ .

V plazmovom kanáli spätného výboja sa vyžiarila energia  $W_{pie}$  a pretiekol náboj (8):  $Q_{st} = G_j \cdot Q_{pe}$ .

#### 5.1.3. Ideový podklad pre numerický výpočet, príklad

Nabitie fiktívneho kondenzátora  $C_p$  triedeným nábojom  $Q_{ie}$  na napätie  $U_{pi}$  počas inicializácie (kap. 3.1) prebehlo za dobu  $T_i$  priemerným posuvným prúdom  $I_{ep} = Q_{ie} / T_i$ . Pri skončení balíka bleskov (kap. 3.6), stúplo množstvo celkového náboja  $Q_i$  o kompenzačné náboje  $Q_{pnc} = \Sigma Q_{pn}$  (11) a kleslo množstvo triedeného náboja  $Q_{ie}$ :  $Q_{ie} = Q_{ie} - 2 \cdot Q_{pnc}$ , pri priestorovej kompenzácii náboja (18). Tento pokles sa javí ako veľká pila na priebehu triedeného náboja  $Q_{ie}$  počas inicializácie.

Pri náboji  $Q_{ie}$  na kondenzátore  $C_p$ , pri preskoku iskry približne platí:  $Q_{ie} = Q_{st} / G_j = T_d \cdot I_{st} / G_j$ , kde  $T_d$  je doba trvania výboja blesku na oblohe,  $I_{st}$  je priemerný bleskový prúd, ktorý pritečie do ohniska blesku počas doby  $T_d$ . Ako



príklad môžeme uviesť: po dosadení  $I_{st} = 200$  kA,  $G_j = 10$ ,  $T_d = 10^{-4}$  s a  $T_i = 120$  s, dostaneme  $Q_{ie} = 2$  C. To znamená, že počas doby inicializácie blesku (kap. 3.1) sa musí kondenzátor  $C_p$  nabíť nábojom 2 C, aby do ohniska blesku na oblohe (kap. 3.2) mohol tiecť prúd 200 kA v čase  $10^{-4}$  s, teda náboj 20 C. V našom zjednodušení je náboj  $Q_{ie}$  sústredený v 2 bodoch priestoru a kondenzátor  $C_p$  sa nabíjal priemerným posuvným prúdom 17 mA počas 2 minút. V príklade bol hrubo odhadnutý stupeň ionizácie iónového kanálu iskry  $G_j$ . Na presnosti tak dôležitého údaju záleží.

Skutočný výpočet priestorového triedeného náboja  $Q_{ie}$  (prúdu  $i$ ) je nutné urobiť v zmysle atmosférickej dynamiky a elektrodynamiky (kap. 3.1 a 3.6). Priestor búrkového oblaku je možné rozdeliť na dostatočne malé, nábojovo homogénne objemové oblasti veľkosti  $M_h$  [ $m^3$ ] s nábojom  $Q_{ih}$ . Potom (14) možno napísať:

$$Q_i + Q_r(Q_i) = \sum_h (Q_{ih} + Q_r(Q_{ih})) = Q_t + Q_k, \quad (19)$$

kde sa v časových intervaloch sleduje pohyb množstva nábojov  $Q_t$  a  $Q_k$  z oblasti do oblasti a úbytok náboja rekombináciou  $Q_r(Q_{ih})$  v každej objemovej oblasti. Vo zvolenom okamžiku sa robí výpočet hustoty kladného  $Q_{ih+}$  a záporného  $Q_{ih-}$  náboja [ $C/m^3$ ], pričom pre objemové množstva nábojov  $Q_{ih}$  a triedeného  $Q_{eh}$  platí:

$$\begin{aligned} Q_{ih} &= (|Q_{ih+}| + |Q_{ih-}|) \cdot M_h \text{ a } Q_{eh} = \\ &= (|Q_{ih+}| - |Q_{ih-}|) \cdot M_h. \end{aligned} \quad (20)$$

Pre hodnotenie triediaceho mechanizmu nábojov (kap. 3.1) je celkové množstvo náboja  $Q_i = \sum_h Q_{ih}$  a triedeného  $Q_{ie} = \sum_h |Q_{eh}|$ . Celý triedený náboj  $Q_{eh}$  sústredíme do stredy objemovej oblasti a pokračujeme podľa (1) až (4). Množstvo triedeného objemového náboja  $Q_{eh}$  je príslušne znižované, kompenzované (10) a objemové množstvo náboja  $Q_{ih}$  príslušne zvyšované (11) v priestore, kde sa vyskytne preskok elektrickej iskry.

Pre takto zavedený teoretický model urobiť postupne s poznatkami tejto analýzy a (Rakov, Uman 2003), parametrizácie pri rôznych meteorologických stavoch (Batka 2014), komparácie a overenie modelu s reálnymi (nameranými alebo modelovanými) parametrami bleskového výboja. Účelom výpočtu je aj zistiť potrebné množstvo celkového náboja  $Q_i$  na spustenie balíka bleskov a v akom pomere sú množstvá nábojov vytvorené trením  $Q_t$  a preskokmi iskier  $Q_k$  na celkovom náboji  $Q_i$  počas inicializácie balíka bleskov.

Overený numerický model prispeje k včasnému varovaniu pred búrkami vo vybudovanom systéme detekcie a lokalizácie bleskov (Řezáčová et al. 2007). Doteraz známe modely (Rakov, Uman 2003) trpia nedostatkom spoľahlivých informácií, hlavne pri inicializácii blesku.

## 6. VÍZIA K OCHRANE ČLOVEKA A MAJETKU PRED BLESKOM

Blesky sú nebezpečným javom pre spoločnosť, sú zodpovedné za množstvo úmrtí a za ekonomické škody. Pohľad na fotografie rozvetvených bleskov (napríklad galerie.bourky.com) je zaujímavý. Na niektorých je vidieť neuveriteľné množstvo slabých bleskov, ktoré udierajú do zeme. Môžeme vysloviť predpoklad, že počet slabých úderov vetiev blesku dosahujúcich zem v rovine úderu hlavného výboja je:

- priamo úmerný nehomogenite elektrického poľa, hlavne pri zemi, znížená hodnota dostatočného spádu elektrického potenciálu v dôsledku lokálnych ionizovaných priestorov,

- priamo úmerný veľkosti voľného elektrického náboja v ohnisku blesku a
- nepriamo úmerný vodivosti zvodu do zeme hlavného bleskového kanála.

Vodivosť zvodu hlavného bleskového kanála závisí od kvality uzemnenia budovy, no často je to úder do voľnej prírody, čo nemôžeme ovplyvniť.

Miesta, ktoré sú vo vyššej nadmorskej výške ako miesto úderu hlavného výboja, sú viac vystavené úderu vetvy slabého blesku, pretože sa nachádzajú vo vnútri „expandujúcej gule“ vetiev blesku, ktoré smerujú k zemi. Takáto situácia nastáva preto, lebo na hrebeni pohoria je povrch zväčša kamenistý, a tak je to zlý zvod pre blesk do zeme. Je to výstraha, aby sme sa nezdržovali na hrebeni hôr počas búry.

Miesta, ktoré sú nižšie položené ako pravdepodobné miesta úderom hlavného výboja, sú pomerne dobre zabezpečené pred úderom nejakého i keď slabého blesku. Nachádzajú sa pod „expandujúcou guľou“ rozvoja vetiev blesku. Toto expandovanie končí v okamihu vytvorenia hlavného kanála blesku. Možno povedať, že aj okolie veľmi dobre chránených výškových budov je tiež chránené zo strany výškovej budovy. Ak sú tie budovy rozostavené vhodným spôsobom, tak je to inšpirujúce.

Podnetná je úvaha súvisiaca s ochranou majetku a ľudí pred bleskom. Francúzski vedci zistili (Rozhlas 2013b), že pomocou impulzov laserových lúčov dokážu blesk nielen vyvolať, ale ho aj nasmerovať na určité miesto. To určité miesto nie je oblasť chráneného objektu, pretože by ho zvädzaný blesk do zeme kvôli vetveniu blesku pri zemi mohol poškodiť. Chránená oblasť pri laserovom lúči bude ďaleko väčšia, ako sa deklaruje pri klasickom bleskozvode, lebo umelo vytvorený kanál blesku zabráni vzniku vedľajších vetiev blesku vyššie nad zemou, ktoré by s určitou pravdepodobnosťou zasiahli vzdialenejšie objekty. Meraním gradientu elektrického poľa v mieste objektu sa určí, kedy laserový lúč vyslať. Tak, ako pri kozmickom žiarení, aj pri laserovom lúči vzniká iónový kanál, kde sú kladné a záporné ióny v podstate vedľa seba a takmer okamžite by sa rekombinovali. Len dostatočná veľkosť napätia  $|U_{jn}|$  (8) dáva podnet k preskoku spätného výboja s novým kompenzačným usporiadaním iónov v iónovom kanáli (kap. 2.3). Dlhšia doba života iónového kanála môže „stihnúť“ jeho spojenie s ohniskom blesku v búrkovom oblaku.

Pred úderom blesku (kap. 3.4) sa nad zemou vytvárajú rôzne ionizované vrstvy, vlákna iónov (možno vytvorenými kozmickými časticami, špekulatívne mobilom) unášané vetrom. Tak sa môže stať, že slabý výboj udrie do nižších položených častí budovy (Patúc 2012) alebo v otvorenej prírode aj v rovine hlavného úderu. Vieme, že bleskové kanály sa chovajú ako silné zdroje elektromagnetického žiarenia (Bélaï 2006), a že v neuzemnených vodivých sústavách dokážu naindukovať stovky kV napätia aj do vzdialenosti 2 km a zmeniť miesto úderu blesku.

## 7. ZÁVER

Napriek tomu, že je jedným z najviac známych a uznávaných prírodných javov, blesk zostáva stále pomerne nevyriešeným (Dwyer, Uman 2014; Popek, Bednář 2012). Pokrok je brzdený ťažkosťami pri implementácii priamych meraní vnútri búrok (Ball 2015). Okrem iného zostáva otázkou fyzikálny mechanizmus inicializácie blesku a priestorového vyrovnávania nábojov. Cieľom tejto analýzy je prispieť určitým spôsobom k riešeniu tejto otázky, fyziky blesku, pre mnohých príliš tajomného javu. Je to zaujímavý pohľad z pozície atmo-



sférickej dynamiky (Bařka 2014), elektrodynamiky (Červeň 2005), plazmovej a molekulej fyziky (Hippel 1963) na vznik a štruktúru bleskových výbojov.

Veľké množstvo údajov z meraní, podkladov vhodných pre numerický model výpočtu planetárnej cirkulácie elektrických nábojov, sa podarilo vedcom z Floridy (Rakov, Uman 2003; Universum: Blesky plné energie), ktorí sa zaoberajú ochranou pred bleskom. Sú tam rampy na vypúšťanie kozmických objektov, a tak sa zdá, že Florida je centrom výskumu a zhromažďovania údajov o bleskoch z celej zemegule.

*Podakovanie:*

Ďakujem J. Bednařovi a V. Hottmarovi za cenné rady a pripomienky.

*Literatúra:*

- BALL, P., 2015. Focus: Cosmic Rays as Thunderstorm Probes. *Physics*, Vol. 37, Issue 8. Dostupné také z WWW: <https://physics.aps.org/articles/v8/37>.
- BĚLAI, I., 2006. Priemyselné komunikačné systémy. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Slovenská technická univerzita v Bratislave. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/Materi%C3%A1ly%20pre%20techniku%20VN/Texty%20MTVN/05%20Prep%C3%A4tia/Prev%C3%A1dzkov%C3%A9%20prep%C3%A4tia/ochrana%20koncov%C3%BDch%20zariadeni.pdf>.
- BAŘKA, M., 2014. Předpověď vývoje atmosféry objektivními metodami. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta university Karlovy. Dostupné také z WWW: <http://kfa.mff.cuni.cz/wp-content/uploads/2015/03/kniha.pdf>.
- ČERVEŇ, I., 2005. Fyzika po kapitolách, elektrostatické pole. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Slovenská technická univerzita v Bratislave. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: [http://files.gamepub.sk/Bakalar/F2/F2%20z%20feinomore/Cerven/elektrostaticke\\_pole.pdf](http://files.gamepub.sk/Bakalar/F2/F2%20z%20feinomore/Cerven/elektrostaticke_pole.pdf).
- DWYER, J., UMAN, M., 2014. The physics of lightning. *Physics Reports*, Vol. 534, Issue 4, s. 147–241.
- GEMBEK, M., 2005. Bouře s kroupami 30. 5. 2005. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://udalosti.astronomy.cz/backup/boure20050530.htm>.
- HIPPEL, A. R., 1963. Molekulová fyzika hmoty. Edice: Teoretická knižnice inženýra. Praha: SNKL. 674 s.
- HOTTMAR, V., ADAMEK, B., 2014. Úvod do teórie šírenia elektromagnetických vln, antén a rádiových prijímačov. Žilina: Vydavateľstvá EDIS. 315 s. ISBN 978-80-5540-821-7.
- CHUM, J., 2004. Šírení vln v zemské magnetosféře. Dizertační práce. Praha: České vysoké učení technické. Elektrotechnická fakulta. Katedra fyziky.
- JIRKŮ, J., 2010. Vlnové pojetí elektromagnetického pole. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://free-energy.xf.cz/teorie/vlna.pdf>.
- LYONS, W. L., 2000. Sprite chasing from the back porch [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://www.fma-research.com/Papers&presentations/spr-view-1.html>.
- MĚRY, L., 2007. Prvotné spracovanie údajov z detekčného systému SAFIR využitím algoritmu TOA. Bratislava, 2007. Diplomová práca. Univerzita Komenského v Bratislave. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky. Vedoucí práce: Mgr. Marián Jurašek [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: <http://diplomovka.sme.sk/zdroj/3194.pdf>.
- NOVINKY.CZ, 2014. Kulový blesk přišel o velkou část svého tajemství. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://novinky.cz/veda-skoly/324654-kulovy-blesk-prisel-o-velkou-cast-sveho-tajemstvi.html>.
- ONDRÁŠKOVÁ, A., ŠEVČÍK, S., ROSENBERG, L., KOSTECKÝ, P., 2008. Schumannove rezonance – Elektromagnetické „zvonenie Zeme (1. časť: História a teória). *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 53, No. 2, s. 89–104. Dostupné také z WWW: <http://dml.cz/dmlcz/141712>.
- PATÚC, J., 2009. Búrka 26. 6. 2009 Žilina. [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: <https://www.youtube.com/watch?v=OnYbKsG5kD8>.
- PATÚC, J., 2012. Rozbor jednoho úderu blesku do panelového domu. [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné z WWW: <http://zdroje.elektrika.cz/book/rozbor-jednoho-uderu-blesku-do-paneloveho-domu/>.
- POPEK, M., 2012. Pozorování nadoblačných blesků v roce 2012. [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: <http://www.astro.cz/clanky/ukazy/pozorovani-nadoblacnych-blesku-v-roce-2012.html>.
- POPEK, M., 2014. Pozorování blesku v horních vrstvách atmosféry. [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: <http://www.astro.cz/clanky/ukazy/pozorovani-blesku-v-hornich-vrstvach-atmosfery.html>.
- POPEK, M., BEDNAŘ, J., 2012. Přechodné světelné úkazy související s bouřkovou činností. *Meteorologické zprávy*, roč. 65, č. 6, s. 168–173. ISSN 0026-1173. Dostupné také z WWW: [http://www.amaterskameteorologie.cz/files/popek\\_bednar\\_1.pdf](http://www.amaterskameteorologie.cz/files/popek_bednar_1.pdf).
- RAKOV, V. A., UMAN, M. A., 2003. Lightning: Physics and Effects. Cambridge: Cambridge Univerzity Press [online]. [cit. 10. 10. 2015] Dostupné také z WWW: [https://books.google.sk/books?id=TuMa51Aa3RAC&printsec=frontcover&hl=sk&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r#v=onepage&q&f=false](https://books.google.sk/books?id=TuMa51Aa3RAC&printsec=frontcover&hl=sk&source=gbs_ge_summary_r#v=onepage&q&f=false).
- ROZHLAS.CZ, 2013a. Temný blesk předchází viditelnému. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: [http://www.rozhlas.cz/leonardo/zpravy/\\_zprava/temny-blesk-predchazi-viditelnemu--1206072](http://www.rozhlas.cz/leonardo/zpravy/_zprava/temny-blesk-predchazi-viditelnemu--1206072).
- ROZHLAS.CZ, 2013b. Laser ukáže cestu bleskům. [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: [http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/\\_zprava/laser-ukaze-cestu-bleskum--1040361](http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/laser-ukaze-cestu-bleskum--1040361).
- ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M., SETVÁK, M., 2007. Fyzika oblaků a srážek. Praha: Academia. ISBN 978-80-200-1505-1.
- SKY-FIRE.TV, 2015. Sprites, Blue Jets, Elves and Superbolts [online]. [cit. 10. 10. 2015]. Dostupné z WWW: <http://sky-fire.tv/index.cgi/spritesbluejetselves.html>.
- ŠTOLL, I., 1988. Tajemství kulového blesku. Praha: Horizont. 192 s. ISBN 40-033-88.
- UKAZY.ASTRO.CZ. 20110526Humlnet\_Blesky-trutnov-2336 selc.jpg [fotografie]. Dostupné z WWW: [http://ukazy.astro.cz/upload/20110526Humlnet\\_Blesky-trutnov-2336selc.jpg](http://ukazy.astro.cz/upload/20110526Humlnet_Blesky-trutnov-2336selc.jpg). Formát: 1 200 × 900.
- Universum: Blesky plné energie [Universum: Lightning reloaded] [dokumentární film]. Režie Alfred Vendl. Rakousko, 2010.
- VAŇURA, J., 2009. Plazmový výboje zimní, letní, v těle člověka a kulový blesk. [online]. [cit. 10. 10. 2014]. Dostupné z WWW: <http://www.wmmagazin.cz/view.php?cislocianku=2009070003>.

*Lektoři (Reviewers): Ing. Jan Mikeš, Ph.D., prof. RNDr. Jan Bednař, CSc.*

# ATMOSFÉRICKÁ DEPOZICE DUSÍKU V ČESKÝCH LESÍCH: ZMĚNA POMĚRU $N-NH_4^+/N-NO_3^-$ V ATMOSFÉRICKÝCH SRÁŽKÁCH

Iva Hůnová, Pavel Kurfürst, Vojtěch Stráník, Miloslav Modlák, Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 412-Komořany, hunova@chmi.cz

**Nitrogen deposition in Czech forests: Change in  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$  ratio in precipitation.** We present the time trends and spatial changes in the  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$  ratio in precipitation reflecting changing atmospheric chemistry due to shifts in the relative contributions of  $NO_x$  and  $NH_3$  emissions. The time trends at the individual measuring sites were assessed using the Mann-Kendal test. Our results indicate that the  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$  ratio in precipitation has been slowly changing in favour of  $NH_4^+$  as in many other regions. This may have implications for ecosystems as, according to the latest knowledge, it is not the nitrogen load but rather its form, whether reduced or oxidized, that matters most.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** depozice atmosférická – dusík anorganický – dusík reaktivní – srážky atmosférické

**KEYWORDS:** atmospheric deposition – inorganic nitrogen – reactive nitrogen – precipitation

## 1. ÚVOD

V přírodě je dusík velmi hojným prvkem, většina jeho zásob se však vyskytuje v chemicky stabilní, nereaktivní, nevyužitelné formě, jako plynný  $N_2$ , tvořící 78 % atmosféry. Za reaktivní dusík ( $N_r$ ) se pokládají všechny jeho biologicky, radiačně a/nebo fotochemicky aktivní formy (Galloway et al. 1995). Nejdůležitější jsou:

- (1) oxidy dusíku ( $NO_x$ ) a amoniak ( $NH_3$ ), hrající významnou úlohu v chemii troposféry;
- (2) nitráty ( $NO_3^-$ ) a amonné ionty ( $NH_4^+$ ), převládající formy N, které jsou využívány organizmy;
- (3) oxid dusný ( $N_2O$ ), důležitý skleníkový plyn, který je ve stratosféře katalyzátorem destrukce  $O_3$ ;
- (4) kyselina dusičná ( $HNO_3$ ), zejména tam, kde je suché klima (Paoletti et al. 2013).

Dusík je základní živinou a nepostradatelným prvkem účastnícím se mnoha reakcí v živých buňkách (Bruce et al. 2014; Canfield et al. 2010). Jako součást aminokyselin a bílkovin je základním stavebním kamenem živé hmoty a prostřednictvím DNA se podílí na přenosu dědičné informace. Jeho přeměra v prostředí však může být stejně problematická jako jeho nedostatek. Z řady studií je známo, že nadbytek  $N_r$  vede k eutrofizaci, acidifikaci a ztrátě biodiverzity (Bobbink et al. 2010; Dirnböck et al. 2014). V mnoha ekosystémech jsou totiž druhy adaptovány na nízkou dostupnost  $N_r$ , a mohou tedy dobře prosperovat pouze tehdy, pokud je jeho depozice nízká (Aerts, Chapin 2000). Antropogenní činnosti je dnes do ovzduší uvolňováno množství reaktivního dusíku srovnatelné s přírodními zdroji a odhaduje se, že globální cyklus  $N_r$  se oproti minulosti více než zdvojnásobil (Sutton et al. 2011).  $N_r$  je velmi mobilní, a protože jeho vznik je rychlejší než přeměna na nereaktivní formu  $N_2$ , kumuluje se v prostředí v mnoha oblastech (Erismann et al. 2013). V biogeochemii lesa má  $N_r$  významnou úlohu (Galloway et al. 2004; 2008).

Zvýšení atmosférické depozice dusíku je nejvýraznější v rozvinutých regionech severní polokoule. Evropu i kontinentální USA ovlivňují chronické a stále se zvyšující dávky  $N_r$  již od doby průmyslové revoluce (Holland et al. 2005). To vede k rozsáhlému narušení globálního cyklu dusíku (Elser 2011) se zřejmým přesahem a následky do budoucnosti (Canfield et al. 2010). Dávky  $N_r$  zůstávají v Evropě vysoké (Lorenz et al. 2008), depozice dusíku v lesních porostech se pohybuje v rozmezí  $0,5-6,0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{r}^{-1}$  a je asi dvakrát vyšší než depozice v otevřené krajině, protože koruny stromů

účinně „vyčesávají“ z ovzduší částice i plyny (Fowler et al. 1989; Pilegaard 2013). V současnosti je pozorována extrémně vysoká depozice dusíku v jihovýchodní Asii, zejména v Číně a Indii, v souvislosti s rychlým nárůstem počtu obyvatelstva, intenzitou zemědělství, průmyslu a dopravy (Lü, Tian 2007; Vet et al. 2014).

Kvantifikace depozice dusíku je z řady důvodů poměrně obtížnou záležitostí (Sutton et al. 2007):

- (1) některé sloučeniny dusíku jsou jak emitovány, tak deponovány v obousměrném výměnném procesu, přičemž převládající čistý depoziční tok je dán relativní koncentrací dané látky v porostu a v ovzduší nad porostem (Fowler et al. 2013);
- (2) pouze některé sloučeniny dusíku jsou pravidelně měřeny;
- (3) na rozdíl od síry (Hůnová et al. 2011), je odběr typu throughfall, ač se někdy používá jako spodní odhad depozice dusíku do porostu (Lovett, Lindberg 1993), pokládán za nerelevantní pro odhad celkové depozice dusíku z důvodu komplikované výměny dusíku mezi korunami stromů, podrostem a ovzduším (Flechard et al. 2013; Simpson et al. 2011).

Nejsnadněji je možné kvantifikovat depozici mokrou, která je spojena s padajícími srážkami, tedy deštěm a sněhem. Na mokré atmosférické depozici dusíku se podílejí jednak dusičnany neboli nitráty (dále  $NO_3^-$ ) a amonné ionty (dále  $NH_4^+$ ), vznikající z prekursorů oxidů dusíku ( $NO_x$ ), resp. amoniaku ( $NH_3$ ). Zatímco hlavním emisním zdrojem oxidovaných forem  $N_r$  jsou veškeré spalovací procesy, emisním zdrojem redukovaných forem je především zemědělská činnost. Poměr  $NH_4^+/NO_3^-$  v atmosférických srážkách je důležitým indikátorem atmosférické chemie určitého regionu, odráží zastoupení emisních zdrojů (Du et al. 2014) a v neposlední řadě přináší i zajímavou informaci o environmentálních vlivech  $N_r$ . V poslední době se totiž ukazuje, že nezávisle na absolutní dávce  $N_r$  mají redukované a oxidované formy dusíku na vegetaci odlišný vliv (Britto, Konzucker 2013; Paulissen et al. 2016; van den Berg et al. 2016). Depozice  $NH_4^+$  ve srovnání s depozicí  $NO_3^-$  více ovlivňuje snižování biodiverzity a více vegetaci poškozuje (Erismann et al. 2007). Z výše uvedených důvodů je tedy žádoucí se poměrem  $NH_4^+/NO_3^-$  zabývat.

Pro sledování mokré atmosférické depozice, v níž se kromě řady jiných parametrů sledují i koncentrace  $NH_4^+$  a  $NO_3^-$ , byly zřízeny v souvislosti se sledováním acidifikace ekosystémů již v sedmdesátých letech 20. století monitorovací sítě na

různých úrovních. Na národní úrovni se monitoringem chemického složení srážek zabývají snad všechny vyspělé státy. Příkladem regionální sítě může být např. v Evropě síť v rámci programu EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), v USA pak NADP/NTN (National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network) či CANSAP (Canadian Network for Sampling Precipitation) v Kanadě. V celosvětovém měřítku působí síť BAPMON (Background Air Pollution Monitoring Network) pro sledování pozadového znečištění ovzduší.

V České republice se sleduje složení atmosférických srážek dlouhodobě a na základě naměřených dat se hodnotí časové trendy a prostorové rozložení atmosférické depozice (Hůnová et al. 2004; 2014; Maznová, Hůnová 2010). Ačkoliv se pravidelně měří poměrně široké spektrum látek ve srážkách (ČHMÚ 2015), hodnocení bývá zaměřeno zejména na dvě z nich, a to síru a dusík. Důvodem je fakt, že se jedná o acidifikující látky, v případě dusíku pak o látku vedoucí k eutrofizaci a změně druhového složení ekosystémů. Cílem předložené práce je zhodnotit časový trend a prostorové rozložení poměru  $N-NH_4^+$ / $N-NO_3^-$  v atmosférických srážkách v českých lesích s využitím výsledků měření na stanicích ČHMÚ a zjistit, ve kterých oblastech dominuje  $N-NH_4^+$  a kde naopak  $N-NO_3^-$ .

## 2. METODIKA

Analýza byla provedena pro lesy ČR, které zaujímají rozlohu 26 664 km<sup>2</sup>, což odpovídá přibližně 34 % území ČR. Co se týká druhového zastoupení, dominantní dřevinou je stále smrk ztepilý (*Picea abies*) pokrývající 51 % zalesněného území, následuje borovice (*Pinus spp.*) se 17 %, buk lesní (*Fagus sylvatica*) s 8 % a dub (*Quercus spp.*) se 7 % (MZe ČR 2015).

### 2.1 Odběry vzorků

Pro hodnocení trendů na individuálních stanicích byly použity vzorky typu „wet-only“ odebírané na stanicích ČHMÚ (tab. 1). Jedná se o tzv. čisté srážky neobsahující suchou depozici, které byly analyzovány v Centrální laboratoři imisí ČHMÚ v Praze-Libuši. Koncentrace  $NO_3^-$  se zjišťuje metodou iontové chromatografie, koncentrace  $NH_4^+$  metodou spektrofotometrie za využití Berthelotovy reakce. Detailnější popis odběrů mokré depozice je uveden v práci Maznové a Hůnové (2010).

### 2.2 Příprava map

Mapy byly připraveny podle metodiky podrobně uvedené v publikacích ČHMÚ (2015) a Hůnové et al. (2014). Bylo využito všech stanic, jejichž výsledky měření jsou uloženy v databázi ISKO, tedy kromě vlastních stanic ČHMÚ i stanic ČGS, VÚLHM a AV ČR. Finální mapa mokré depozice dusíku vzniká jako součet map depozice  $N-NO_3^-$  a  $N-NH_4^+$  vytvořených na základě měřených koncentrací iontů, a mapy srážkových úhrnů. Pro mapy koncentrací iontů se používá

Tab. 1 Stanice sledující chemické složení atmosférických srážek provozované ČHMÚ (stanice jsou řazeny dle stoupající nadmořské výšky).

Table 1. Measuring sites for precipitation chemistry run by the CHMI (ranked according to increasing altitude).

Stanice	Kraj	Klasifikace	Nadmořská výška [m]
Ostrava-Poruba	Moravskoslezský	B/S/R	242
Hradec Králové-observatoř	Královéhradecký	B/S/R	276
Praha 4-Libuš	Hlavní město Praha	B/S/R	301
Kuchařovice	Jihomoravský	B/R/N-NCI	334
Ústí nad Labem-Kočkov	Ústecký	B/S/RN	367
Kocelovice	Jihočeský	B/R/N-NCI	519
Košetice	Vysočina	B/R/N-REG	535
Svratouch	Pardubický	B/R/N-REG	735
Přímada	Plzeňský	B/R/N-REG	740
Červená	Moravskoslezský	B/R/N-REG	749
Souš	Liberecký	B/R/N-REG	771
Rudolice v Horách	Ústecký	B/R/N-REG	840
Luisino údolí	Královéhradecký	B/R/N-REG	875
Bílý Kříž	Moravskoslezský	B/R/N-REG	890
Krkonoše-Rýchory	Královéhradecký	B/R/N-REG	1001

Pozn.: Použitá klasifikace stanic je dle Rozhodnutí Rady 97/101/EC o výměně informací (Eol) / (EC 1997):

B/S/R – pozadová/předměstská/obytná

B/S/RN – pozadová/předměstská/obytná, přírodní

B/R/N-NCI – pozadová/venkovská/zemědělská/příměstská

B/R/N-REG – pozadová/venkovská/přírodní/regionální

Tab. 2 Statistická charakteristika iontů  $NH_4^+$  a  $NO_3^-$  na jednotlivých stanicích ČHMÚ v období 1990 až 2014.

Table 2. Simple statistics for  $NH_4^+$  and  $NO_3^-$  ions at the CHMI sites from 1990–2014.

Stanice	VWA $NH_4^+$ [ $\mu g.l^{-1}$ ]		VWA $NO_3^-$ [ $\mu g.l^{-1}$ ]		Poměr $N-NH_4^+/N-NO_3^-$	
	1990–2001	2002–2014	1990–2001	2002–2014	1990–2001	2002–2014
Ostrava-Poruba	944	1 105	2 048	2 284	1,59	1,67
Hradec Králové-observatoř	1 009	902	2 607	2 267	1,33	1,37
Praha 4-Libuš	1 167	791	3 253	2 170	1,23	1,30
Kuchařovice		1 020		2 896		1,43
Ústí nad Labem-Kočkov	991	927	2 935	2 423	1,16	1,32
Kocelovice	649	902	1 997	1 976	1,12	1,55
Košetice	792	671	2 268	1 732	1,21	1,35
Svratouch	1 324	759	2 474	1 922	1,87	1,36
Přímada	1 128	696	2 477	2 007	1,48	1,20
Červená		725		1 884		1,33
Souš	626	589	2 219	2 001	0,98	0,99
Rudolice v Horách	961	1 015	2 779	2 721	1,19	1,29
Luisino údolí		892		2 109		1,48
Bílý Kříž		601		1 673		1,24
Krkonoše-Rýchory		764		2 053		1,32

Pozn.: VWA (Volume Weighted Average) – roční průměrná koncentrace vážená srážkovým úhrnem.

Podtržené jsou hodnoty u stanic, kde byl k dispozici pouze jediný rok měření v daném období, a jsou tedy zařazeny pouze jako orientační.



Tab. 3 Trendy koncentrací  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  a poměru  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  v atmosférických srážkách na jednotlivých stanicích ČHMÚ v období 1990 až 2014; výsledky Mann-Kendallova testu.

Table 3. Trends in  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  ratio in precipitation at the CHMI sites from 1990–2014 (Mann-Kendall test results).

Stanice	Období	$\text{NH}_4^+$ [ $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ]	$\text{NO}_3^-$ [ $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ]	Poměr $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$
Ostrava-Poruba	2002–2011			
Hradec Králové- -observatoř	1991–2010		K*	
Praha 4-Libuš	1993–2014	K***	K***	S*
Kuchařovice	2002–2010	K*		K**
Ústí nad Labem- -Kočkov	1996–2010		K*	S+
Kocelovice	2001–2014		K*	
Košetice	1990–2014	K**	K***	S*
Svratouch	1996–2014	K*	K*	
Přimda	1994–2014		K*	
Červená	2002–2014	K*	K**	
Souš	1996–2014		K*	S**
Rudolice v Horách	1997–2014			S*
Luisino údolí	2003–2014		K**	
Bílý Kříž	2002–2014		K**	
Krkonoše- -Rýchory	2005–2014		K*	

Pozn.: S – trend stoupající, K – trend klesající, p – hladina významnosti, +  $p < 0,1$ , \*  $p < 0,05$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*\*\*  $p < 0,001$

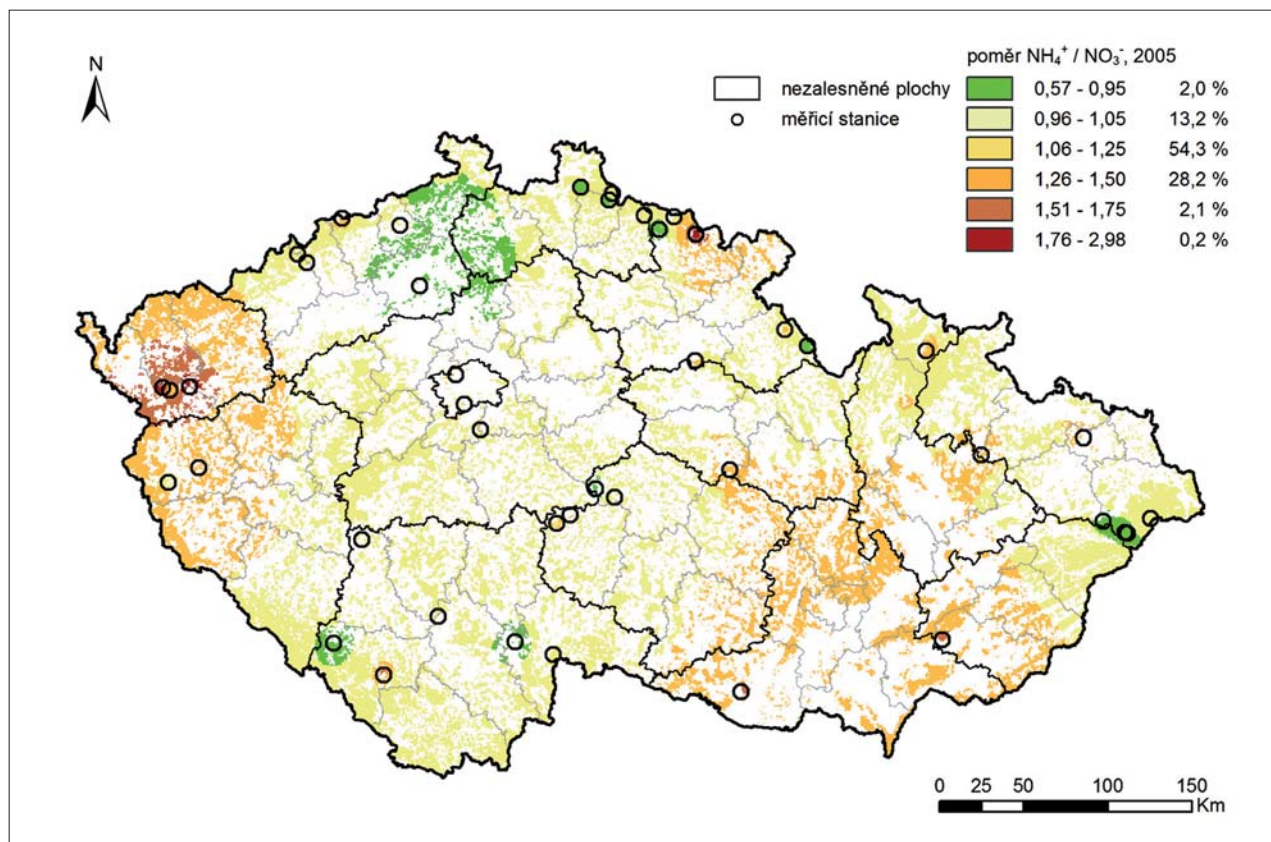
Tab. 4 Poměr  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$ : změny v příspěvku  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$  k mokré depozici  $\text{N}_p$ , 2005–2014; vyjádřeno jako % zalesněné plochy ČR v kategoriích.

Table 4.  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  ratio: Changes in  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  contributions to wet  $\text{N}_p$  deposition (expressed as a percentage of the Czech forested area in categories).

$\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$	2005	2006	2008	2010	2011	2014
<0,95	2,0	1,2	8,2	3,3	0,2	0,3
0,96–1,05	13,2	5,0	12,1	6,0	0,3	0,2
1,06–1,25	54,3	50,0	62,9	52,9	8,7	8,6
1,26–1,50	28,2	41,5	16,8	37,1	75,8	73,6
1,51–1,75	2,1	1,7	0,05	0,7	14,3	17,0
>1,76	0,2	0,5	0,004	0,008	0,7	0,3

jednoduchá interpolační metoda IDW, Inverse Distance Weighted (Isaaks, Srivastava 1989). Měřicí síť je pro interpolaci velmi řídká, proto se interpolace provádí ve dvou krocích. Nejdříve jsou interpolované hodnoty vyexportovány do pravidelné sítě  $20 \times 20$  km, a následně je provedeno vyhlazení do sítě  $1 \times 1$  km. Mapa srážkových úhrnů vychází z mnohem hustší sítě 750 měřicích stanic ČHMÚ, a je tedy možné využít pro interpolaci pokročilejší metodu kriging, s využitím závislosti srážek na nadmořské výšce (Tolasz et al. 2007), což zvyšuje spolehlivost mapy (Lloyd 2005). Mokrá depozice je součinem koncentrací vážených srážkovým úhrnem (VWA) a srážkových úhrnů. Srážkové úhrny v ČR vykazují větší variabilitu než koncentrace iontů ve srážkách.

Mokrá depozice byla promítnuta do digitální vrstvy lesů vytvořené na základě evropské digitální mapy využití půdy (Corine land cover, 2000, <http://etc-lusi.eionet.europa.eu/CLC2000>). Mapy byly připraveny na platformě GIS za použití



Obr. 1 Poměr  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  v mokré atmosférické depozici v lesích ČR, 2005.

Fig. 1.  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  ratio in wet atmospheric deposition in Czech forests, 2005.



ArcGIS Geostatistical Analyst (Johnston et al. 2001) v podrobném gridu  $1 \times 1$  km. Všechny mapy byly připraveny stejnou metodikou, od odběru až po zpracování GIS, jsou tedy srovnatelné, a lze je bez problémů pro analýzu využít.

### 2.3 Statistická analýza

Pro zjištění trendů byl využit Mann-Kendallův test pro zkoumání přítomnosti lineárního rostoucího nebo klesajícího trendu. Jedná se o neparametrický test používaný pro zjištění monotónního trendu v časové řadě, která nevykazuje žádné sezónní variace nebo cykly. Vzhledem ke skutečnosti, že data znečišťujících látek v ovzduší sezonnost vykazují, aplikuje se test na roční hodnoty, aby se problém sezonnosti a autokorelace vyřešil. Mann-Kendallův test je doporučován Světovou meteorologickou organizací a často se používá k hodnocení ovzduší a chemického složení srážek (Maznová, Hůnová 2010; Salmi 2002; Walna 2013). Pro výpočet byl použit software vytvořený Finským meteorologickým ústavem (Määttä et al. 2002).

### 3. VÝSLEDKY

Jednoduchá popisná statistika pro sledované ionty v atmosférických srážkách je uvedena v tab. 2. Vzhledem k časovým trendům koncentrací jsou uvedeny charakteristiky zvláště pro dvě období: od počátku měření na jednotlivých stanicích až do r. 2001 a od r. 2002 dosud. Důvodem tohoto rozdělení je fakt, že na řadě stanic se začalo měřit teprve od r. 2002. Z výsledků je patrné, že v období po r. 2002 došlo na většině stanic, s výjimkou Ostravy-Poruby, Kocelovic a Rudolic v Horách, k poklesu VWA (průměr vážený srážkovým úhrnem) u  $\text{NH}_4^+$  ve srážkách, u  $\text{NO}_3^-$  ve srážkách pokles nastal všude s výjimkou Ostravy-Poruby. U Ostravy-Poruby a Kocelovic je patrné důvodem fakt,

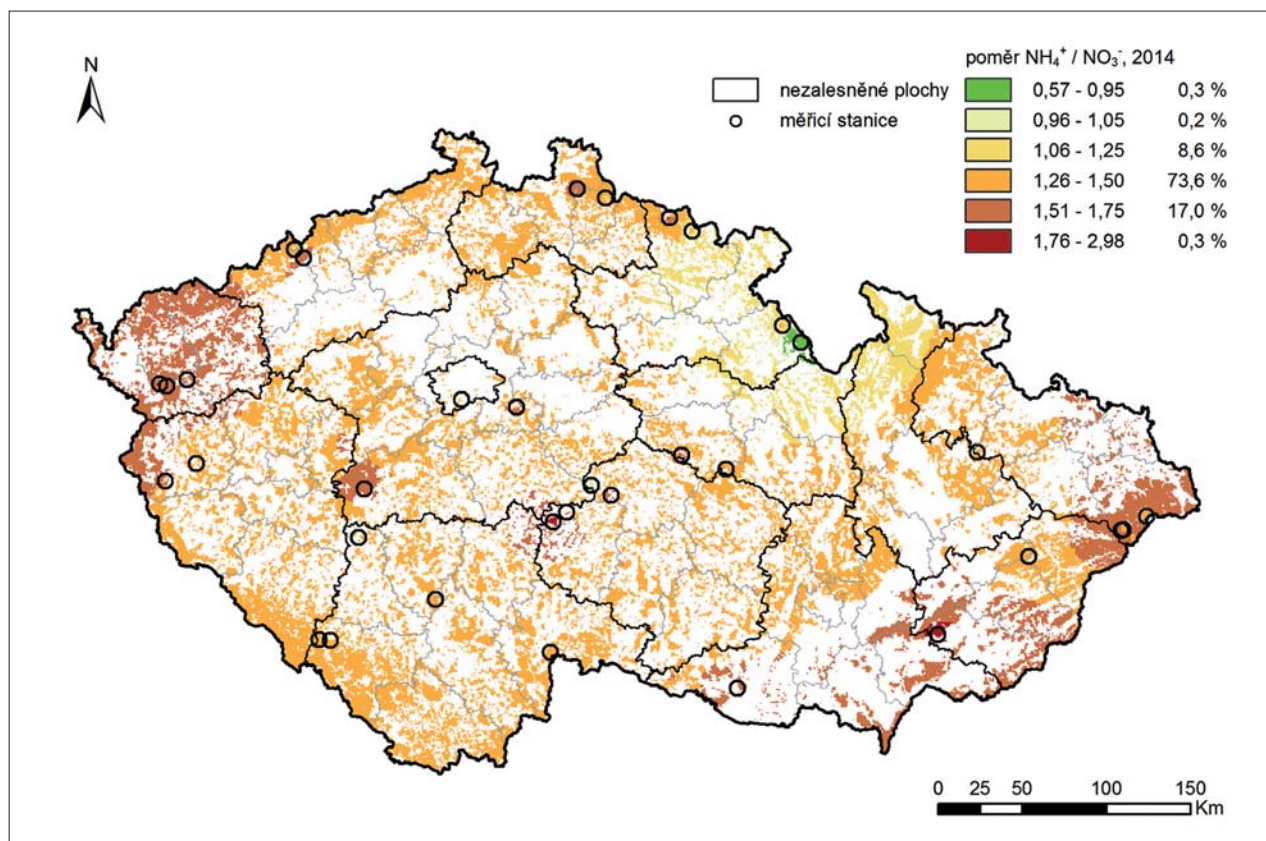
že pro období před rokem 2002 jsou k dispozici hodnoty pouze z jediného roku.

Výsledky Mann-Kendalova testu (tab. 3) ukazují, že ke statisticky významnému poklesu koncentrací  $\text{NO}_3^-$  v atmosférických srážkách došlo na 12 z celkem 15 stanic; v Ostravě-Porubě, Kuchařovicích a Rudolicích v Horách tento statisticky významný pokles zaznamenaný nebyl. Naproti tomu u koncentrací  $\text{NH}_4^+$  byl statisticky významný klesající trend zaznamenaný pouze na pěti stanicích (Praha 4-Libuš, Kuchařovice, Košetice, Svratouch a Červená). Statisticky významně rostoucí trend poměru koncentrací  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  pak byl zjištěn celkem na pěti stanicích (Praha 4-Libuš, Ústí nad Labem-Kočkov, Kuchařovice, Košetice, Souš a Rudolice v Horách), na jedné stanici (Kuchařovice) naopak klesající.

Atmosférické srážky odrážejí imisní poměry, a tedy i zastoupení emisních zdrojů. Poměr redukovaných forem dusíku ( $\text{NH}_4^+$ ) k formám oxidovaným ( $\text{NO}_3^-$ ) se v atmosférických srážkách v průběhu let mění. Je patrné, že dochází k jeho pomalému nárůstu jak přímo ve srážkách, tak i v atmosférické depozici (obr. 1 a 2, tab. 4). Zatímco v r. 2005 se na 15 % zalesněného území větší měrou podílely na depozici dusíku nitráty, v současné době prakticky na celém zalesněném území ČR, s výjimkou 0,5 % plochy, převládají amonné ionty. Mírně rostoucí trend poměru  $\text{NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  ve srážkách je patrný pro zalesněné území i pro celou ČR (obr. 3). Obdobná změna poměru redukovaného a oxidovaného N se projevuje i v emisích (obr. 4) a je důsledkem mnohem strmějšího poklesu emisí  $\text{NO}_x$  ve srovnání s emisemi  $\text{NH}_3$  (obr. 5).

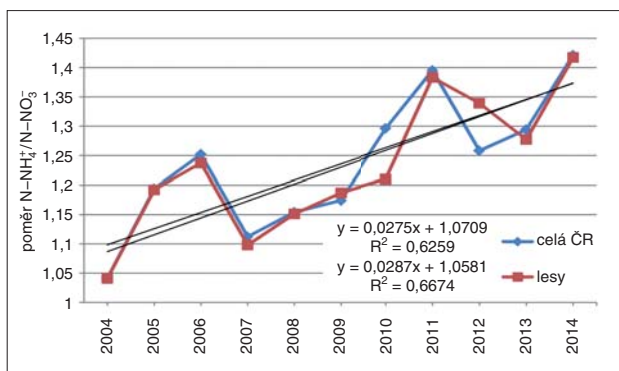
### 4. DISKUSE

Lesy jsou již dlouho pokládány za výrazný propad (sink) znečišťujících látek z atmosféry (Fowler et al. 1989). Změna



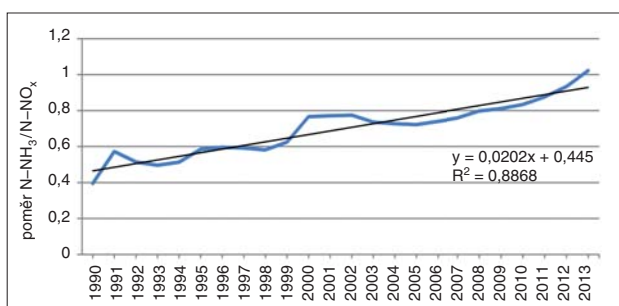
Obr. 2 Poměr  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  v mokré atmosférické depozici v lesích ČR, 2014.

Fig. 2.  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  ratio in wet atmospheric deposition in Czech forests, 2014.



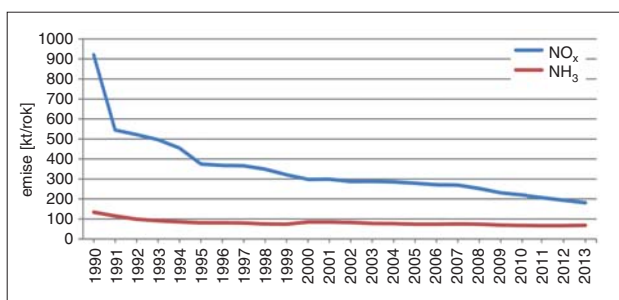
Obr. 3 Trend poměru  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$  v mokré atmosférické depozici pro celou ČR a pro lesy v období 2004–2014, spočteno v GIS.

Fig. 3. Trend in the wet atmospheric deposition of the  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$  ratio over the entire territory and over the forested area of the Czech Republic from 2004–2014, calculated on the GIS platform.



Obr. 4 Poměr celkových emisí  $N-NH_3/N-NO_x$  pro ČR.

Fig. 4. Ratio of  $N-NH_3/N-NO_x$  total emissions in the Czech Republic.



Obr. 5 Celkové emise  $NH_3$  a  $NO_x$  pro Českou republiku za období 1990 až 2013.

Fig. 5. Overall  $NH_3$  and  $NO_x$  emissions in the Czech Republic from 1990–2013.

poměru koncentrací některých iontů v atmosférických srážkách odráží trendy a mění se podíly emisí ze zdrojů znečišťujících látek a změny v chemickém klimatu Země. Obdobně jako roste poměr  $NO_3^-/SO_4^{2-}$  ve srážkách v ČR (Hůnová et al. 2014) i v Evropě (Waldner et al. 2014) vzhledem k razantnímu snížení emisí  $SO_2$ , naše výsledky ukazují na rostoucí trend poměru  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$ . Od devadesátých let dvacátého století poměr  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$  v atmosférické depozici v Evropě roste (Fagerli, Aas 2008) a to, že se i v mnoha dalších regionech světa u anorganických iontů N zvyšuje význam  $NH_4^+$  ve srážkách, potvrzují ve své rozsáhlé studii např. Vet et al. (2014). Tato skutečnost souvisí v globálním měřítku s určitým poklesem emisí  $NO_x$ , zatímco emise  $NH_3$  se významně nesnížily, naopak v některých oblastech dokonce vzrostly (Vet et al. 2014). V kontextu poškození ekosystémů se  $NO_x$  i  $NH_3$  udávají, kromě  $O_3$ , jako neškodlivější polutanty v Evropě (EEA 2015).

Zhodnotit prostorové a časové rozložení poměru  $N-NH_4^+/N-NO_3^-$  v českých lesích v kontextu emisí je velice obtížné, protože závisí na mnoha parametrech. Nejdůležitější z nich jsou rozptylové podmínky a další klimatologické charakteristiky během roku, prostorové rozmístění zdrojů, výšková hladina vypouštění emisí a nejistota emisních inventur. V roce 2013 se na celkových emisích  $NO_x$  nevíce podílela veřejná energetika a výroba tepla 32,8 %, silniční doprava 19,7 %, nesilniční zemědělské a lesní stroje 19,3 % (ČHMÚ 2015). K největšímu snížení emisí  $NO_x$  mezi roky 1990–2000 došlo vlivem zavedení emisních limitů, které vstoupily v platnost v roce 1998. Klesající trend emisí  $NO_x$  pokračoval i po roce 2000. Mezi roky 1990 a 2013 poklesly emise  $NO_x$  o 80,3 % (obr. 5). Klesající trend emisí  $NO_x$  je očekáván i v následujících letech díky dalšímu zpřísnění emisních limitů a postupné obnově vozového parku. Prostorové rozložení emisí  $NO_x$  ze silniční dopravy je soustředěno podél dálnic, dalších významnějších dopravních komunikací a ve velkých městech. Emise  $NO_x$  z těchto zdrojů ovlivňují receptory ve svém nejbližším okolí. Emise  $NO_x$  z veřejné energetiky a výroby tepla jsou oproti tomu koncentrovány v několika desítkách významnějších energetických výroben, které se nacházejí zejména v Ústeckém a Moravskoslezském kraji. Emise  $NO_x$  z těchto zdrojů jsou do ovzduší vnášeny ve vyšších výškových hladinách (do 300 m) a podílejí se především na dálkovém přenosu znečištění.

V roce 2013 se na celkových emisích  $NH_3$  podílely chovy hospodářských zvířat 70,3 %, aplikace minerálních dusíkatých hnojiv 26,1 % a silniční automobilová doprava 3,0 % (ČHMÚ 2015). Snížení emisí  $NH_3$  ve srovnání s  $NO_x$  nebylo v předchozích letech tak výrazné. K největšímu poklesu emisí  $NH_3$  došlo v letech 1990–1994 vlivem výrazného útlumu zemědělské výroby. Proti klesajícímu trendu emisí z chovů hospodářských zvířat, který byl způsoben účinnými legislativními opatřeními a dalším poklesem výroby, působil mírný nárůst emisí  $NH_3$  z aplikace minerálních dusíkatých hnojiv. Emise  $NH_3$  mezi roky 1990 a 2013 klesly o 57,9 % (obr. 5). V následujících letech je očekáván mírný nárůst emisí  $NH_3$  vlivem zvýšení počtu chovaných zvířat, který je dnes na historickém minimu (Dědina, 2013). Nárůst emisí  $NH_3$  může ovlivnit i zvyšování počtu motorových vozidel s katalyzátory a aplikace denitrifikačních technologií u stacionárních zdrojů. Prostorové rozložení emisí  $NH_3$  je v porovnání s emisemi  $NO_x$  rovnoměrnější. Vyšší emisní toky  $NH_3$  jsou soustředěny v lokalitách, kde se nacházejí zemědělské velkochovy, zejména na Vysočině, v Jihomoravském kraji a v Pardubickém kraji (Maršák et al. 2015). Emise  $NH_3$  jsou na rozdíl od  $NO_x$  převážně fugitivního charakteru a ovlivňují receptory v blízkém okolí zdroje.

Odhad emisí je obecně zatížen řadou nejistot (Reis et al. 2009). Výsledky inventarizace celkových emisí  $NH_3$  jsou v porovnání s emisemi  $NO_x$  zatíženy vyšší nejistotou, která se může pohybovat v intervalu 50–200 %. Vysoká nejistota inventury je způsobena tím, že emise  $NH_3$  ze sektoru zemědělství jsou zjišťovány výhradně prostřednictvím statistických údajů a emisních faktorů, které byly získány na základě omezeného počtu provedených měření. Metodika inventarizace emisí  $NO_x$  z vyjmenovaných stacionárních spalovacích zdrojů, které v roce 2013 představovaly 53,4 % celkových emisí  $NO_x$ , vychází z výsledků kontinuálních měření nebo měření jednorázových, které se pravidelně opakují. Z toho důvodu jsou celkové emise  $NO_x$  zatíženy nižší nejistotou, která se může pohybovat v intervalu 10–40 %.

Výše uvedené emise jsou antropogenního původu. Emise z přírodních zdrojů nemohou být zohledněny z důvodu nedo-



statku informací. Nicméně na základě dostupných publikací z jiných regionů nemusí být přírodní zdroje  $\text{NH}_3$  zanedbatelné (Sapek 2013; Sutton et al. 2000). Pro Anglii se např. uvažuje asi 10% podíl přírodních emisních zdrojů  $\text{NH}_3$  (Sutton et al. 2000). Ty sice nemusejí hrát roli v celkové bilanci N, ale v lokálním měřítku, zejména v čistých oblastech, kde antropogenní zdroje prakticky chybějí, svůj význam mít mohou.

V úvahu byly vzaty pouze emise ze zdrojů v ČR, ačkoliv jsme si vědomi toho, že pro depozici na našem území mají význam i emisní zdroje situované mimo území ČR. Podle modelu EMEP s meteorologickými a emisními vstupy pro rok 2010 mají domácí zdroje na depozici oxidovaného  $\text{N}_r$  v ČR pouze 15% podíl, zdroje německé přispívají 25 %, polské 14 %, rakouské 6 %, francouzské 5 %, maďarské 4 % a ostatní 32 %. U redukčního  $\text{N}_r$  je podíl českých zdrojů větší, činí plných 40 %, německé zdroje přispívají 25 %, polské 7 %, rakouské 7 %, maďarské 3 %, francouzské 2 % a ostatní 16 % (Gauss et al. 2012).

Je dobře známo, že pro řadu ekosystémů je škodlivá vysoká depozice  $\text{N}_r$ , ale na skutečnost, že záleží na poměru oxidovaných a redukovaných složek se začalo upozorňovat teprve nedávno (BassiriRad 2015). Některé práce dokonce uvádějí, že relativní zastoupení anorganických forem  $\text{N}_r$  ve srážkách může mít závažnější důsledky než absolutní množství  $\text{N}_r$  (van den Berg et al. 2016).

Prezentovaná studie je příkladem analýzy, kterou by nebylo možné provést bez spolehlivých dat z dlouhodobého monitoringu. Data chemického složení atmosférických srážek jsou na našem území dlouhodobě pravidelně sledována. Výsledky měření ČHMÚ i dalších organizací (ČGS, VÚLHM, AV ČR) jsou shromažďovány v databázi Informačního systému kvality ovzduší (ISKO) ČHMÚ (ČHMÚ 2015). Po verifikaci slouží jako cenný zdroj informací o časových trendech a změnách v prostorovém rozložení, odrážejících měnící se chemické klima a změny v absolutním množství emisí i v relativním zastoupení emitovaných látek. Změny v biogeochemickém cyklu dusíku je žádoucí studovat zejména v kontextu postupující klimatické změny a v souvislosti s jinými látkami, zejména s uhlíkem (Hungate et al. 2003).

## 5. ZÁVĚR

Článek předkládá výsledky analýzy trendu redukovaných ( $\text{NH}_4^+$ ) a oxidovaných ( $\text{NO}_3^-$ ) forem dusíku v atmosférických srážkách a depozice v českých lesích za období 1990 až 2014. Statisticky významný pokles u  $\text{NO}_3^-$  byl zjištěn na dvanácti, u  $\text{NH}_4^+$  na pěti, pokles poměru  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  na jedné a naopak statisticky významný nárůst poměru  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  na pěti z celkem patnácti stanic ČHMÚ. Vezmeme-li v úvahu časový trend územního poměru  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  je zřejmé, že dochází k pozvolnému, ale přesvědčivému nárůstu od 1,05 v r. 2004 k 1,42 v r. 2014, a to obdobně v českých lesích i na celém území ČR.

Naše výsledky ukazují, že stejně tak jako v řadě jiných regionů světa se poměr redukovaných a oxidovaných forem anorganických iontů N ve srážkách postupně mění ve prospěch  $\text{NH}_4^+$ . Růst poměru  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  v atmosférických srážkách i v mokré atmosférické depozici v lesích ČR může mít v budoucnu závažné implikace pro ekosystémy, a je potřeba se touto problematikou zabývat. Z tohoto hlediska se jeví jako zajímavý námět pro další studium mezioborová syntéza poznatků o měnícím se chemickém složení srážek a výsledků geobotanických šetření zabývajících se změnami rozšíření rostlinných druhů.

## Poděkování:

Tato studie byla podpořena Grantovou agenturou České republiky (projekt 14-12262S). Vstupní data byla poskytnuta Českým hydro-meteorologickým ústavem. Pro vytvoření map byla kromě vlastních dat ČHMÚ použita i data z měření ČGS, VÚLHM a AV ČR uložená v národní databázi ISKO ČHMÚ. Autoři děkují oběma recenzentům za podnětné připomínky, které přispěly ke zkvalitnění rukopisu.

## Literatura:

- AERTS, R., CHAPIN, F. S., III., 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, Vol. **30**, s. 1–67.
- BASSIRIRAD, H., 2015. Consequences of atmospheric nitrogen deposition in terrestrial ecosystems: old questions, new perspectives. *Oecologia*, Vol. **177**, s. 1–3.
- BOBBINK, R., HICKS, K., GALLOWAY, J., SPRANGER, T., ALKEMADE, R. et al., 2010. Global Assessment of Nitrogen Deposition Effects on Terrestrial Plant Diversity: a Synthesis. *Ecological Applications*, Vol. **20**, s. 30–59.
- BRITTO, D. T., KRONZUCKER, H. J., 2013. Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. *Annals of Botany*, Vol. **112**, s. 957–963.
- BRUCE, A., BRAY, D., HOPKIN, K., JOHNSON, A., LEWIS, J. et al., 2014. *Essential Cell Biology*. New York: Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC.
- CANFIELD, D. E., GLAZER, A. N., FALKOWSKI, P. G., 2010. The Evolution and future of Earth's Nitrogen Cycle. *Science*, Vol. **330**, s. 192–196.
- ČHMÚ, 2015. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2014. Praha: ČHMÚ.
- DĚDINA, M., 2013. Vývoj prachových částic ze zemědělství do roku 2020 a roku 2040. Výzkumná zpráva pro TA ČR TA01020500 Podrobný emisně-imisní model ČR pro současný stav a výhled do roku 2030 a nástroje pro podporu rozhodování v oblasti ochrany ovzduší. Praha: VÚZT.
- DIRNBÖCK, T., GRANDIN, U., BERNHARDT-RÖMERMANN, M., BEUDERT, B., CANULLO, R. et al., 2014. Forest floor vegetation response to nitrogen deposition in Europe. *Global Change Biology*, Vol. **20**, s. 429–440.
- DU, E., DE VRIES, W., GALLOWAY, J. N., HU, X., FANG, J., 2014. Changes in wet nitrogen deposition in the United States between 1985 and 2012. *Environmental Research Letters*, Vol. **9**, 095004.
- EC, 1997. 97/101/EC: Council Decision of 27 January 1997 establishing a reciprocal exchange of information and data from networks and individual stations measuring ambient air pollution within the Member States. *Official Journal of European Communities L 035*, 05/02/1997, s. 0014–0022.
- EEA, 2015. Air quality in Europe. EEA Report No. 5/2015. Copenhagen: European Environment Agency.
- ELSER, J. J., 2011. A World Awash with Nitrogen. *Science*, Vol. **334**, s. 1504–1505.
- ERISMAN, J. W., BLEEKER, A., GALLOWAY, J. N., SUTTON, M. S., 2007. Reduced nitrogen in ecology and the environment. *Environmental Pollution*, Vol. **150**, s. 140–149.
- ERISMAN, J. W., GALLOWAY, J. N., SEITZINGER, S., BLEEKER, A., DISE, N. B. et al., 2013. Consequences of human modification of global nitrogen cycle. *Philosophical transactions of the Royal Society B*, Vol. **368**, 20130116.
- FAGERLI, H., AAS, W., 2008. Trends in nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe, 1980–2003. *Environmental Pollution*, Vol. **154**, s. 448–461.
- FLECHARD, C. R., MASSAD, R.-S., LOUBER, B., PERSSONNE, E., SIMPSON, D. et al., 2013. Advances in understanding, models and parameterizations of biosphere-atmosphere ammonia exchange. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. **10**, s. 5183–5225.

- FOWLER, D., CAPE, J. N., UNSWORTH, M. H., 1989. Deposition of atmospheric pollutants on forests. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, Vol. **324**, s. 247–265.
- FOWLER, D., PYLE, J. A., RAVEN, J. A., SUTTON, M. A., 2013. The global nitrogen cycle in the twenty-first century: introduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. **368**, 20130165.
- GALLOWAY, J. N., SCHLESINGER, W. H., LEVY, H. V., LEVY II, V., MICHAELIS, A., SCHNOOR, J. L., 1995. Nitrogen fixation: anthropogenic enhancement – environmental response. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. **9**, s. 235–252.
- GALLOWAY, J. N., DENTENER, F. J., CAPONE, D. G., BOYER, E. W., HOWARTH, R. W. et al., 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, Vol. **70**, s. 153–226.
- GALLOWAY, J. N., TOWNSEND, A. R., ERISMAN, J. W., BEKUNDA, M., CAI, Z. et al. 2008. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions and potential solutions. *Science*, Vol. **320**, s. 889–892.
- GAUSS, M., NYÍRI, Á., STEENSEN, B. M., KLEIN, H., 2012. Transboundary air pollution by main pollutants (S, N, O<sub>3</sub>) and PM in 2010. Oslo: Meteorologisk Institutt, EMEP/MSC-W.
- HOLLAND, E. A., BRASWELL, B. H., SULZMAN, J., LAMARQUE, J.-F., 2005. Nitrogen Deposition onto the United States and Western Europe: Synthesis of Observations and Models. *Ecological Applications*, Vol. **15**, s. 38–57.
- HUNGATE, B. A., DUKES, J. S., SHAW, M. R., LUO, Y., FIELD, C. B. 2003. Nitrogen and Climate Change. *Science*, Vol. **302**, s. 1512–1513.
- HŮNOVÁ, I., KURFÜRST, P., MAZNOVÁ, J., COŇKOVÁ, M., 2011. Contribution of occult precipitation to sulphur deposition in the Czech Republic. *Erdkunde*, Vol. **65**, s. 247–259.
- HŮNOVÁ, I., MAZNOVÁ, J., KURFÜRST, P., 2014. Trends in atmospheric deposition fluxes of sulphur and nitrogen in Czech forests. *Environmental Pollution*, Vol. **184**, s. 668–675.
- HŮNOVÁ, I., ŠANTROCH, J., OSTATNICKÁ, J., 2004. Ambient Air Quality and Deposition Trends at Rural Stations in the Czech Republic during 1993–2001. *Atmospheric Environment*, Vol. **38**, s. 887–898.
- ISSAKS, E. H., SRIVASTAVA, R. M., 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press.
- JOHNSTON, K., VERHOEF, J., KRIVORUCHKO, K., LUCAS, N., 2001. Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Redlands: Environmental Systems Research Institute.
- LLOYD, C. D., 2005. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation on Great Britain. *Journal of Hydrology*, Vol. **308**, s. 128–150.
- LORENZ, M., NAGEL, H.-D., GRANKE, O., KRAFT, P., 2008. Critical loads and their exceedances at intensive forest monitoring sites in Europe. *Environmental Pollution*, Vol. **155**, s. 426–435.
- LOVETT, G. M., LINDBERG, S. E., 1993. Atmospheric Deposition and Canopy Interactions of Nitrogen in Forests. *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. **23**, s. 1603–1616.
- LÜ, C., TIAN, H., 2007. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. **112**, D22S05.
- MARŠÁK, J., HLAVATÝ, E., BUJALSKÝ, L., 2015. Souhrnná zpráva za rok 2013. Integrovaný registr znečišťování životního prostředí. Praha: MŽP.
- MAZNOVÁ, J., HŮNOVÁ, I., 2010. Trendy atmosférické depozice síry, dusíku a vodíkových iontů v České republice. *Meteorologické zprávy*, roč. **63**, s. 91–98. ISSN 0026-1173.
- MZe ČR, 2015. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2014. Praha: Ministerstvo zemědělství ČR.
- MÄÄTTÄ, A., SALMI, T., ANTILA, P., RUOHO-AIROLA, T., 2002. Excel template for calculation of trends statistics of annual time series. Helsinki: Finnish Meteorological Institute.
- PAOLETTI, E., DEVRIES, W., MIKKELSEN, T. N., IBROM, A., LARSEN, K. S. et al., 2013. Key Indicators of Air Pollution and Climate Change Impacts at Forest Supersites. In: Matyssek, R., Clarke, P., Cudlín, P., Mikkelsen, T.N., Tuovinen, J.-P. (eds.): Climate Change, Air Pollution and Global Challenges. *Developments in Environmental Sciences*, Vol. **13**. Amsterdam: Elsevier.
- PAULISSEN, M. P. C., BOBBINK, R., ROBAT, S. A., VERHOEVEN, J. T. A., 2016. Effects of reduced and oxidised nitrogen on rich-fen mosses: a 4-year field experiment. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. **227**, No. 18.
- PILEGAARD, K., 2013. Processes regulating nitric oxide emissions from soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. **368**, 20130126.
- REIS, S., PINDER, R. W., ZHANG, M., LIJIE, G., SUTTON, M. A., 2009. Reactive nitrogen in atmospheric emission inventories. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. **9**, s. 7657–7677.
- SALMI, T., 2002. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by Mann-Kendall test and Sen's slope estimates. Publication on Air Quality, No. 31. Helsinki: Finnish Meteorological Institute.
- SAPEK, A., 2013. Ammonia Emissions from Non-Agricultural Sources. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. **22**, s. 63–70.
- SIMPSON, D., AAS, W., BARTNICKI, J., BERGE, H., BLEEKER, A. et al., 2011. Atmospheric transport and deposition of reactive nitrogen in Europe. In: Sutton, M.A. et al. (Eds), The European Nitrogen Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, s. 298–316.
- SUTTON, M. A., DRAGOSITS, U., TANG, Y. S., FOWLER, D., 2000. Ammonia emissions from non-agricultural sources in the U. K. *Atmospheric Environment*, Vol. **34**, s. 855–869.
- SUTTON, M. A., NEMITZ, E., ERISMAN, J. W., BEIER, C., BUTTERBACH BAHL, K. et al., 2007. Challenges in quantifying biosphere-atmosphere exchange of nitrogen species. *Environmental Pollution*, Vol. **150**, s. 125–139.
- SUTTON, M. A., NEMITZ, E., SKIBA, U. M., BEIER, C., BUTTERBACH BAHL, K. et al., 2011. The Nitrogen Cycle and its Influence on the European Greenhouse Gas Balance. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology.
- TOLASZ, R. et al., 2007. Atlas podnebí Česka. Praha: ČHMÚ, Olomouc: Univerzita Palackého. 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1 (ČHMÚ). ISBN 978-80-244-1626-7 (UP).
- VAN DEN BERG, L. J. L., JONES, L., SHEPPARD, L. J., SMART, S. M., BOBBINK, R. et al., 2016. Evidence for differential effects of reduced and oxidized nitrogen deposition on vegetation independent of nitrogen load. *Environmental Pollution*, Vol. **208**, s. 890–897.
- VET, R., ARTZ, R. S., CAROU, S., SHAW, M., RO, CH.-U. et al., 2014. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulphur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, Vol. **93**, s. 3–100.
- WALDNER, P., MARCHETTO, A., THIMONIER, A., SCHMITT, M., ROGORA, M. et al., 2014. Detection of temporal trends in atmospheric deposition of inorganic nitrogen and sulphate to forests in Europe. *Atmospheric Environment*, Vol. **95**, s. 363–374.
- WALNA, B., 2013. Human impacts on atmospheric precipitation in a protected area in Western Poland. Results of long-term observations: Concentrations, deposition and trends. *Atmospheric Pollution Research*, Vol. **6**, s. 778–787.

Lektoři (Reviewers): prof. RNDr. Jan Bednář, CSc., RNDr. Pavel Sedláč, CSc.



# VLIV DRUHU A INTENZITY PADAJÍCÍCH SRÁŽEK NA MNOŽSTVÍ CELKOVÝCH A PODKORUNOVÝCH SRÁŽEK NA MĚŘICÍ LOKALITĚ OBSERVATOŘ KOŠETICE

Adéla Holubová Šmejkalová, Český hydrometeorologický ústav, Observatoř Košetice, 394 22 Košetice, adela.holubova@chmi.cz

**Influence of precipitation type and intensity on the amount of total and throughfall precipitation at the Košetice Observatory site.** The monitoring programme of the Košetice Observatory (operated by the Czech Hydrometeorological Institute) includes three main objectives – tracking ambient air quality, meteorological, and elemental flux measurements in a small forest ecosystem. The study presented focuses on the influence of meteorological precipitation phenomena on total and throughfall precipitation amounts. Ten years of precipitation amount measurements and phenomena type and intensity observations were evaluated. The most frequent phenomena types were rain (62 %) and snow (21 %), and the most observed intensity was light (62 %). The throughfall precipitation amount was significantly affected by the precipitation phenomena intensity, which was strongly linked to interception.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** úhrn srážek – srážky podkorunové – jevy srážkové

**KEYWORDS:** total precipitation – throughfall – precipitation phenomena

## 1. ÚVOD

Měřicí aktivity Observatoře Košetice, založené v roce 1988 a provozované Českým hydrometeorologickým ústavem, zahrnují množství oborů. Hlavním jejím cílem je zajišťovat dlouhodobé trendy koncentrací znečišťujících látek v ovzduší. Rovnocenným úkolem k monitorování čistoty ovzduší je měření profesionální meteorologické stanice. Do roku 1991 zde své důležité místo zaujímal také výzkum biologické složky v rámci zařazení v programu GEMS (Global Environment Monitoring System), se kterým bylo spojeno i měření na nedalekém povodí. Monitorování v povodí bylo až na některé změny zachováno a je provozováno v rámci programu Integrovaného monitoringu ICP-IM (International Cooperative Programme on Integrated Monitoring of Air Pollution Effects on Ecosystems) dodnes. Výzkumné aktivity v zalesněném povodí se kromě kvantitativního měření průtoku a úhrnů podkorunových srážek (*TF*) soustředí také na stanovení jejich chemického složení (Váňa, Dvorská 2014). Srážkový úhrn je kontinuálně měřen na pozemku meteorologické stanice. Kombinace měření *TF*, srážkových úhrnů na volné ploše a pozorování meteorologických jevů poskytuje vhodnou základnu pro zjišťování vzájemných vazeb. Zejména pro výzkum vegetace v lesním prostředí je informace o transformaci množství srážek přínosná. Studium redistribuce vody v lesním ekosystému, tedy sledování změn množství srážkové vody procházející lesním porostem, se věnují práce s hydrologickou tematikou (např. Keim et al. 2005; Staelens et al. 2006; Zimmeman et al. 2007). Mnoho studií se zabývá chemickým složením *TF* a jejich změnami v čase (např. Aguilhaume et al. 2016; Lindroos et al. 2006; Skeffington, Hill 2012). Krátkodobé studie, zahrnující epizodické nebo několikaleté měření *TF*, zkoumají vliv meteorologických podmínek, zejména dobu trvání a intenzitu srážek, na množství *TF* (např. Frasson et al. 2011; Marin et al. 2000; Rodrigo, Avila 2000).

Cílem předkládaného textu je získat odpověď na otázky:

- Jak ovlivňuje druh a intenzita padajících srážek podkorunové srážkové úhrny?
- Jaký je podíl srážkových jevů na celkových srážkách?

Na základě znalostí získaných ze studia literatury, byla vytvořena pracovní hypotéza s předpokladem, že největší vliv na množství srážek mají dešťové srážky s velkou intenzitou.

Pro následující hodnocení jsou použita data z posledních 10 let měření, tedy 2005–2014.

## 2. MATERIÁL A METODY

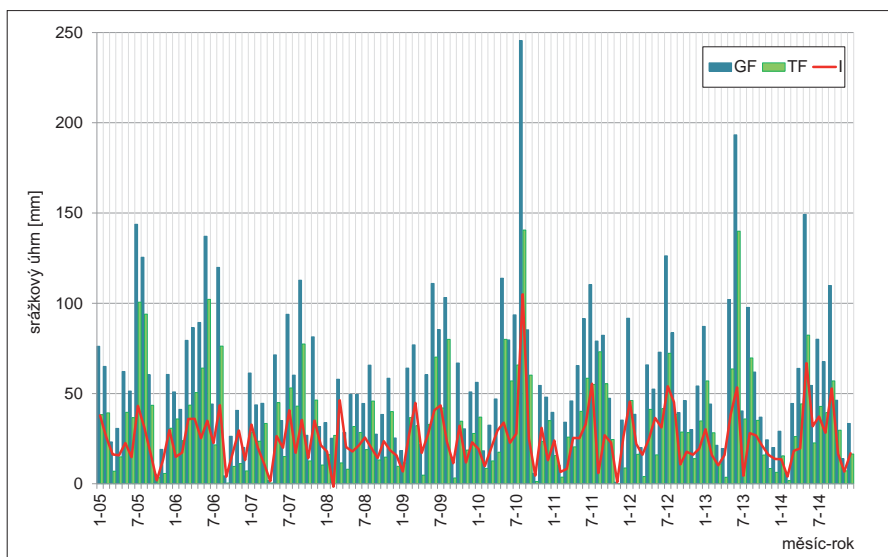
### 2.1 Popis oblasti

Malé lesní povodí, kde se realizuje odběr *TF*, se nachází necelý kilometr vzdušnou čarou od měření srážek na volné ploše umístěné na Observatoři Košetice (obr. 1). To umožňuje charakterizovat obě vzorkovací místa současně. Zájmové území leží na SZ okraji kraje Vysočina. Dle geomorfologického členění lze oblast zařadit do okrsku Hořepečnické pahorkatiny v podcelku Želivské pahorkatiny. Průměrná nadmořská výška dosahuje 481,8 m. Lokalita se nachází v klimatické oblasti MT5. Průměrná teplota za poslední normálové období (1961–1990) je 7,1 °C, průměrný roční úhrn srážek činí 621 mm. Měření *TF* probíhá v zalesněném povodí bezejmenného potoka o rozloze 0,285 ha, jenž je pravostranným přítokem Anenského potoka. Les je tvořen převážně smrkovými monokulturami, s příměsí borovice, buku a břízy (Váňa, Dvorská et al. 2014). Smrkové stromy na vzorkovací ploše *TF* a v přilehlém okolí jsou staré 85–95 let a dosahují výšky mezi 25 a 30 metry. Měření celkových srážek se provádí v areálu observatoře na mírně svažité volné ploše. Ta slouží jako meteorologická zahrádka a její charakter odpovídá předpisům pro meteorologická měření stanovená v návodu pro pozorovatele meteorologických stanic (Lipina, Židek 2014).



Obr. 1 Měřicí lokalita – Observatoř Košetice a přilehlé okolí.

Fig. 1. Monitoring site – Košetice Observatory and its surroundings.



Obr. 2 Měsíční sumy celkových a podkorunových srážek a intercepce na měřící lokalitě Observatoře Košetice (2005–2014).

Fig. 2. Monthly sum of total and throughfall precipitation and interception at the Košetice Observatory measurement locality (2005–2014).

## 2.2 Charakteristiky a způsob měření srážek

Celkové množství srážek (*GF*), které se zapojuje se do koloběhu vody v lesním ekosystému lze rozdělit na tři komponenty:

- podkorunové srážky (*TF*) – srážky propadající korunami stromů, které dosáhnou povrchu země,
- stok ze kmenů (*SF*) – srážky dosahující povrchu země prostřednictvím stékání po kmeni,
- intercepce (*I*) – srážky, zachytávané vegetací, které se buď v průběhu, nebo po srážce vypaří, nedosahují povrchu země (Crockford, Richardson 2000).

Základní bilanci srážek lze vyjádřit vztahem:

$$GF = TF + SF + I. \quad (1)$$

Množství *SF* na vzorkovací lesní ploše u Observatoře Košetice se neměří v souladu s doporučením manuálu pro integrovaný monitoring (IM). Manuál IM (1998) doporučuje měření *SF* zejména pro typy stromů s větvemi orientovanými vzhůru, např. buk lesní (*Fagus sylvatica*) s příspěvkem *SF* 10–40 % z celkových srážek, na rozdíl od stromů s větvemi orientovanými dolů, např. smrk ztepilý (*Picea abies*) s příspěvkem *SF* méně než 1 %. Příspěvek *SF* u smrku ztepilého menší než 1 % je uveden i v jiných pracích (Dohnal et al. 2014; Whelan et al. 1998), kde je objem *SF* taktéž zanedbán.

V letech 2005–2014 dosahoval na zájmové lokalitě průměrný roční úhrn *GF* 686,2 mm a *TF* 411,1 mm, průměrná intercepce tvořila 40 %. Ve studovaném období dosáhly měsíční úhrny *GF* průměrně hodnoty 58,1 mm a *TF* 34,2 mm. Nejvyšší měsíční úhrn byl změřen v srpnu 2010 a měsíční suma srážek na volné ploše činila 245,5 mm. Minimální srážkový úhrn 0,9 mm byl zaznamenán v listopadu 2011 (obr. 2).

### 2.2.1. Podkorunové srážky

Monitorování *TF* bylo zahájeno v roce 1990 dle metodických pokynů uvedených v manuálu pro integrovaný monitoring z roku 1989 (Váňa et al. 1995). I přes drobné změny během pravidelných revizí manuálu, probíhá měření *TF* v souladu s jeho předpisy dodnes. Plocha pod smrkovými korunami pro záchyt *TF* o rozloze 50 × 50 metrů je opatře-

na 20 stojany se vzorkovacími láhvemi (kolektory). Stojany jsou ve dvou protínajících se diagonálách (obr. 3a). Polyuretanové vzorkovací láhve jsou 42 cm vysoké a skládají se z trychtýře se záchytnou plochou 113,5 cm<sup>2</sup> a akumulací nádoby o objemu jeden litr. V místě spojení trychtýře a záchytné nádoby je umístěna separační textilie, sloužící k zadržení pevných částic, a stínící kroužek. Výjimku tvoří vzorkovací láhve určené na analýzu těžkých kovů ve srážce, ty jsou kvůli možné kontaminaci vzorku bez kovového stínícího kroužku. Vzorkovací láhve jsou do stojanu zasazeny tak, aby nedocházelo k průniku slunečních paprsků ke vzorku (obr. 3b). Tím je eliminováno odpařování vody a současně nedochází k degradaci vzorku.

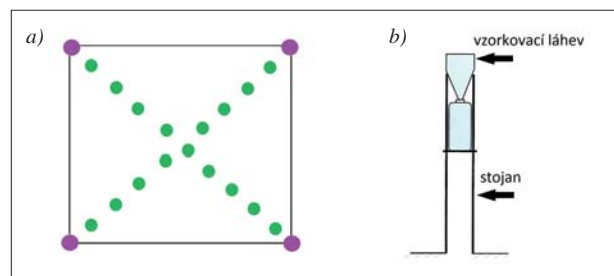
Dle doporučení manuálu IM jsou vzorky odebírány jedenkrát

měsíčně, zpravidla první den v měsíci. Pro stanovení srážkového úhrnu *TF* je použit výpočet (2), kdy z celkového počtu 20 kolektorů se používá objem srážkové vody pouze z 16, jelikož 4 vzorkovací láhve jsou určeny výhradně na analýzu těžkých kovů a jejich objem není součástí výpočtu:

$$\text{úhrn TF} = \frac{\text{množství srážky [l]}}{16 \times \text{záchytná plocha kolektoru [m}^2\text{]}} \cdot (2)$$

### 2.2.2. Srážky na volné ploše

Profesionální meteorologická stanice Košetice je vybavená nejmodernější měřící technikou. Od roku 2001 stanice změnila status z manuální stanice na stanici poloautomatickou, tedy stanici s automaticky měřícími čidly a senzory s lidskou obsluhou. Téhož roku byl na stanici umístěn a plně zprovozněn váhový srážkoměr MRW500, měřící s přesností 0,1 mm (Meteoservis 2008). Jako záložní srážkoměr, pro případ dlouhodobé poruchy, slouží člunkový srážkoměr MR3H (obr. 4). Úhrny srážek jsou dle předpisů manuálně přeměřovány dvakrát denně pozorovatelem na stanici (Lipina, Židek 2014). V rámci synoptického měření jsou také zaznamenávány meteorologické jevy a jejich intenzita.



Obr. 3 (a) Schéma rozložení kolektorů *TF* na měřící lokalitě Observatoře Košetice, plocha 50 × 50 m; zelená kolečka – normální odběr, fialová kolečka – odběr na analýzu těžkých kovů. (b) Ukázka designu odběrové soustavy pro *TF* (ICP Forests 2011).

Fig. 3. (a) Diagram of *TF* collectors arrangement at the Košetice Observatory measurement locality, plot area is 50 × 50 m; green circles – normal sampling, purple circles – heavy metals sampling. (b) Example of *TF* samplers design (ICP Forests 2011).



Obr. 4 Pohled na měřicí pozemek meteorologické stanice Košetice, váhový srážkoměr MRW500, člunkový srážkoměr MR3H a klasické srážkoměry pro manuální měření srážek.

Fig. 4. View of the Košetice meteorological site – MRW500 rain gauge, MR3H tipping rain gauge, and classic rain gauges for manual precipitation measurement.

Tab. 1 Zkratky zpracovávaných srážkových jevů, jejich význam a pozorovaná intenzita.

Table 1. List of abbreviations used for precipitation phenomena, their meaning and observed intensity.

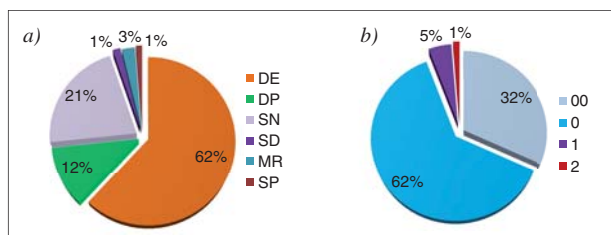
Zkratka	Význam	Pozorovaná intenzita
DE	Děšť	00, 0, 1, 2, 3
DP	Děšť, přeháňka	00, 0, 1, 2
MD	Mrznoucí děšť	0
MR	Mrholení	00, 0, 1
SD	Směšené srážky	00, 0, 1
SN	Sněžení	00, 0, 1, 2
SP	Sněžení, přeháňka	00, 0

V tomto příspěvku jsou označovány srážkové úhrny měřené dle návodu pro pozorovatele meteorologických stanic jako srážky na volné ploše nebo jako celkové srážky.

## 2.3 Metodika zpracování dat

### 2.3.1. Zpracování srážkových jevů

Ze srážkových jevů byly vybrány pouze jevy vyskytující se více než čtyřikrát během desetiletého období. Minimální hranice čtyř výskytů byla stanovena s ohledem na četnost ostatních jevů, která překračuje hodnotu více jak 10 výskytů za sledované období. Souhrn jevů použitých pro zpracování uvádí tab. 1. Zkrácenou charakteristiku intenzity jevů dle Lipiny, Židka (2014) shrnuje tab. 2. Srážkové úhrny ovlivňují i horizontální srážky, zejména mlha. Pro lokalitu Košetice je však pro účel tohoto porovnání příspěvek mlhy zanedbáván, podobně jako ve studii Dohnala et al. (2014). Jak uvádějí Tesař et al. (2004) v práci hodnotící usazené srážky na Šumavě, odhad příspěvku roční deponice z mlhy a větrem hnané nízké oblačnosti na vegetaci tvoří 10 % ročního úhrnu srážek. V období 2005–2014 dosahoval na šumavské stanici Churáňov



Obr. 5 Příspěvky srážkových jevů (a) (DE – děšť, DP – dešťová přeháňka, SN – sněžení, SD – smíšené srážky, MR – mrholení, SP – sněhová přeháňka) a jejich intenzit (b) (00 – velmi slabá, 0 – slabá, 1 – mírná, 2 – silná) k celkovému srážkovému úhrnu na měřicí lokalitě Observatoře Košetice (2005–2014).

Fig. 5. Contributions of the precipitation phenomena types (a) (DE – rain, DP – rain shower, SN – snow, SD – mixed precipitation, MR – drizzle, SP – snow shower) and intensities (b) (00 – very light, 0 – light, 1 – moderate, 2 – heavy) to the rainfall totals at the Košetice Observatory measurement locality (2005–2014).

průměrný roční počet dnů s mlhou hodnoty téměř 150. Stanici Košetice charakterizuje ve stejném časovém období průměrně pouze necelých 50 dní s mlhou v roce. Příspěvní mlhy k celkovému ročnímu úhrnu bylo na lokalitě Observatoře Košetice odhadnuto maximálně na třetinovou hodnotu příspěvku mlhy k ročnímu úhrnu uvedenému pro území Šumavy. Odhad příspěvku mlhy na méně než tři procenta je dán i odlišným typem lokality, protože se nejedná o horskou oblast. Detailním výzkumem mlhy a jejího vlivu na srážkové množství v porostech se zabýval také V. Krečmer. Jeho studie potvrzují v rámci této problematiky významnou roli mlhy v horských oblastech (Krečmer 1973; Krečmer et al. 1979).

V průběhu sledovaného období se nejčastěji vyskytují srážkové jevy slabé a velmi slabé intenzity. K nejfrekventovanějším jevům patří děšť, sněžení a dešťová přeháňka (obr. 5).

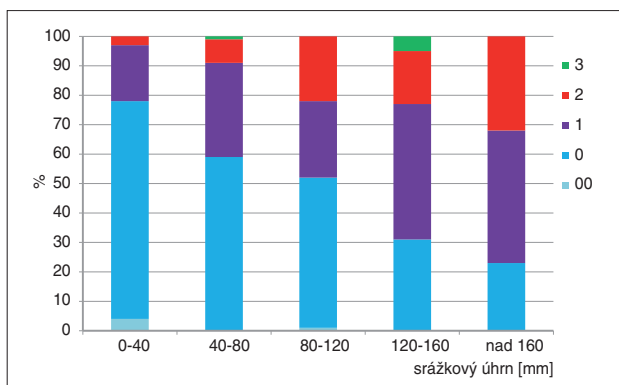
Aby bylo možné přiřadit k jednotlivým jevům odpovídající úhrn, byla data s jevy, zaznamenávaná s minutovou přesností začátku a konce výskytu, upravena na desetiminutové intervaly. Pro stanici Košetice jsou data z automatického měření srážkových úhrnů v desetiminutových intervalech

Tab. 2 Zkrácený slovní popis intenzity použitých jevů.

Table 2. Shortened description of the phenomena intensities used.

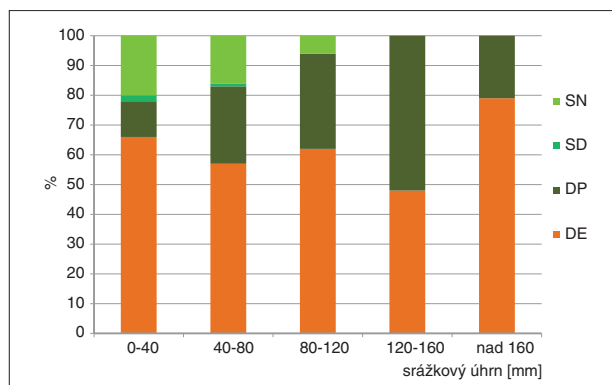
Jev	Kód intenzity	Význam kódu	Slovní popis
DE, DP, MD, SD	00	velmi slabý	Neměřitelné množství. Ojedinelé kapky, které nesmočí souvisle celý exponovaný povrch (země, chodníky, střechy apod.) bez ohledu na dobu trvání.
	0	slabý	0,1 až 2,5 mm.h <sup>-1</sup> . Jednotlivé kapky deště se dají snadno rozeznat, avšak neodrážejí se od dlaždic, střech apod.
	1	mírný	2,6 až 8,0 mm.h <sup>-1</sup> . Jednotlivé kapky se již nedají jasně rozeznat; nad střechami, dlaždicemi a podobným tvrdým povrchem vidíme odskakující kapky deště
	2	silný	8,1 až 40,0 mm.h <sup>-1</sup> . Dešť se zdá padat v pásech (vidíme pruhy deště, jednotlivé kapky nejsou rozeznatelné); kapky se odrážejí od mokřých dlaždic, střech a louží až do výšky několika centimetrů
MR	3	velmi silný	Více než 40,0 mm.h <sup>-1</sup> . Padající dešť tvoří souvislou vodní clonu; voda nestačí odtékat z vodorovného povrchu; dohlednost je velmi zhoršena.
	00	velmi slabé	Jednotlivé kapičky, množství neměřitelné bez ohledu na dobu trvání.
	0	slabé	Méně než 0,1 mm.h <sup>-1</sup> .
SN, SP	1	mírné	Od 0,1 do 0,2 mm.h <sup>-1</sup> .
	00	velmi slabé	Jednotlivé vločky, které nepokryjí exponovaný povrch bez ohledu na dobu trvání.
	0	slabé	Výška nově napadlého sněhu do 0,5 cm.h <sup>-1</sup> , neovlivňuje dohlednost.
	1	mírné	Výška nově napadlého sněhu od 0,6 do 4 cm.h <sup>-1</sup> , dohlednost již mírně zhoršena.
	2	silné	Výška nově napadlého sněhu více než 4 cm.h <sup>-1</sup> , dohlednost může být zhoršena až na 500 m.





Obr. 6 Procentuální podíl intenzity jevů na celkových srážkách na měřící lokalitě Observatoře Košetice 2005–2014 (3 – velmi silná, 2 – silná, 1 – mírná, 0 – slabá, 00 – velmi slabá intenzita).

Fig. 6. Share of differently intensive phenomena in total precipitation at the Košetice Observatory measurement locality 2005–2014 (3 – very heavy, 2 – heavy, 1 – moderate, 0 – light, 00 – very light).



Obr. 7 Procentuální podíl druhu jevu na celkových srážkách na měřící lokalitě Observatoře Košetice 2005–2014 (SN – sněžení, SD – smíšené srážky, DP – dešťová přeháňka, DE – déšť).

Fig. 7. Percentage share of phenomena types in total precipitation at the Košetice Observatory measurement locality 2005–2014 (SN – snow, SD – mixed precipitation, DP – rain shower, DE – rain).

k dispozici až od roku 2010. Z těchto důvodů byl soubor rozdělen na dvě pětiletá období: 2005–2009 a 2010–2014.

K jevům z let 2010–2014 byly přiřazeny srážkové úhrny naměřené v době výskytu (pozorování) jevu. Pro každý jev byly vypočteny měsíční sumy srážek, tedy množství, kterým daný jev přispěl k měsíčnímu úhrnu. Příspěvky jednotlivých jevů byly sečteny a výsledný měsíční úhrn srážek porovnán s reálným měsíčním úhrnem. Pokud se celkové úhrny lišily o více než  $\pm 30\%$  data byla z dalšího zpracování vyřazena.

### 2.3.2. Výpočet příspěvků srážkových jevů k měsíčnímu úhrnu pro období 2005–2009 a jejich ověření

Pro období 2005–2009 nejsou v klimatické databázi k dispozici srážkové úhrny s rozlišením podrobnějším než jedna hodina. Z toho důvodu nelze přesně přiřadit k jevům odpovídající srážkové množství na rozdíl od následujícího období. Výpočet množství srážek, kterým přispívají jevy k měsíčním úhrnům, probíhal v několika krocích. Nejprve byla z dat z druhého období (2010–2014) metodou lineární regrese vypočtena dosazením do vztahu (3) modelová data.

$$y = a + bx. \quad (3)$$

Závislá proměnná  $y$  je úhrn srážek, nezávislá proměnná  $x$  je počet výskytů daného jevu (Wilks 2006). Hodnoty koeficientů  $a$ ,  $b$  byly spočteny pro každé roční období zvlášť, aby lépe reflektovaly charakter srážek. Dále byla modelová a reálná data porovnána výpočtem korelačního koeficientu ( $r = 0,91$ ) a ověřena kalkulací parametrů Gamma funkce. Parametry Gamma funkce  $\alpha$  a  $\beta$ , jejíž distribuční funkce odpovídá rozdělení hodnot srážek, byly vypočteny dle vzorců (4), (5) a (6),

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{\frac{1+4D}{3}}}{4D}, \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}}, \quad (5)$$

$$D = \ln(x) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i), \quad (6)$$

kde  $D$  (6) je vzorkovací statistika,  $\bar{x}$  průměrná hodnota a  $x_i$  hodnota proměnné (Wilks 2006). Výsledky parametrů  $\alpha$  a  $\beta$  modelové řady jsou 0,48 a 18,3, hodnota parametrů reálné

řady je pro  $\alpha$  0,53 a pro  $\beta$  17,4. Shoda výsledků modelové a reálné řady potvrdila vhodnost použití lineární regrese pro výpočet množství srážek náležícího k danému druhu jevu pro období 2005–2009.

S využitím hodnot spočtených koeficientů  $a$ ,  $b$  společně s počtem výskytu daného jevu (proměnná  $x$ ) v období 2005 až 2009 byly vypočteny měsíční srážkové úhrny pro jednotlivé jevy. Data nespĺňující podmínku shody s reálné naměřenými úhrny popsané v části 2.3.1. nebyla do dalšího zpracování zařazena.

### 2.3.3. Úprava srážkových dat

Celkové měsíční úhrny, měřené na volné ploše, byly rozděleny do pěti kategorií po 40 mm. Poslední kategorie zahrnuje všechny měsíční úhrny nad 160 mm. Z podkorunových srážek byl vypočítán měsíční procentuální podíl na celkovém úhrnu (7):

$$\text{podíl TF} = \frac{TF}{GF} 100 [\%]. \quad (7)$$

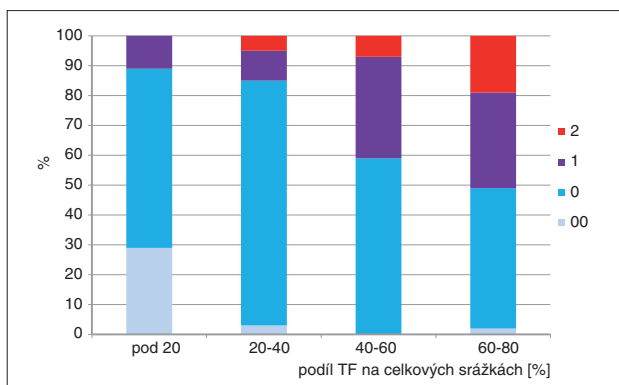
Procentuální podíly byly rozděleny také do pěti kategorií po 20 %. Měsíční úhrny společně s jevy byly členěny do popsaných kategorií. V každé kategorii byl vypočítán procentuální příspěvek srážkových jevů a jejich intenzit k celkovému množství srážek.

V následujících výsledcích jsou zohledněny pouze ty jevy, které přispěly k celkovému úhrnu více než jedním procentem. Poslední kategorie  $TF$  (80–100%) nebyla dostatečně reprezentativní, a byla proto z výsledného hodnocení vyřazena.

## 3. VÝSLEDKY

Kategorizace srážkových úhrnů poskytuje podrobný přehled o procentuálním příspěvku jevů i jejich intenzit k celkovému množství srážky. Nízké měsíční úhrny srážek jsou charakteristické vyšším podílem jevů slabé intenzity (např. úhrny do 40 mm tvoří téměř z 80 %). S nárůstem srážkového úhrnu postupně klesá příspěvek jevů slabé intenzity (ze 70 % na 23 %), a narůstá vliv srážek mírné (z 19 % na 45 %) a silné intenzity z 3 % na 32 % (obr. 6).

Zvyšující se množství srážek je spojeno s úbytkem počtu jevů podílejících se na srážce. Zatímco v kategoriích do 80 mm jsou srážky tvořeny všemi zpracovávanými jevy (déšť, dešťová přeháňka, sníh, smíšené srážky), kategorie nad 120 mm charakterizují příspěvky pouze deště a dešťových přeháňek (obr. 7).



Obr. 8 Procentuální podíl intenzity jevů na podkorunových srážkách na měřicí lokalitě Observatoře Košetice 2005–2014 (2 – silná, 1 – mírná, 0 – slabá, 00 – velmi slabá intenzita).

Fig. 8. Share of differently intensive phenomena in throughfall precipitation at the Košetice Observatory measurement locality 2005–2014 (2 – heavy, 1 – moderate, 0 – light, 00 – very light).

Na množství podkorunových srážek má intenzita srážek zásadní vliv. Nízké hodnoty *TF* úhrnů (kategorie pod 20 %) mají téměř 30% podíl jevů s velmi slabou intenzitou. Což znamená, že přítomnost nejméně intenzivních jevů zvyšuje zachyt srážek na povrchu stromů (intercepce). Naopak minimální intercepce je prokázána v případech výskytu jevů intenzity 1 a 2, které společně objasňují 50 % úhrnu *TF* (obr. 8).

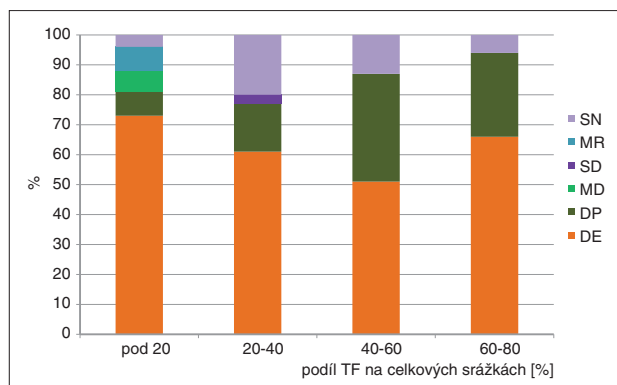
Druh jevů je pro *TF* významný hlavně v případech nízkého podílu na celkovém úhrnu (kategorie pod 20 %). Kromě deště se zde uplatňuje mrholení, mrznoucí déšť, dešťové přeháňky a sněžení (obr. 9). Mrholení má zajisté pozitivní vliv na zvýšení intercepce, protože je nejslabším srážkovým jevem (dosáhne-li mrholení intenzity 3, hodnotí se jako déšť).

Při celkovém pohledu na strukturu srážkových jevů ovlivňující *TF* (obr. 10) je zřejmé, že úhrnů blízkých srážkám na volné ploše je dosaženo v případech, kdy roste příspěvek deště a dešťové přeháňky s intenzitou 1 a 2 (DE1, DE2, DP1, DP2). V kategoriích od 20 do 60 % jsou významnými přispěvateli jevy s intenzitou 0 (DE0, DP0, SN0), které mají více jak 50% vliv na množství srážek.

#### 4. DISKUZE

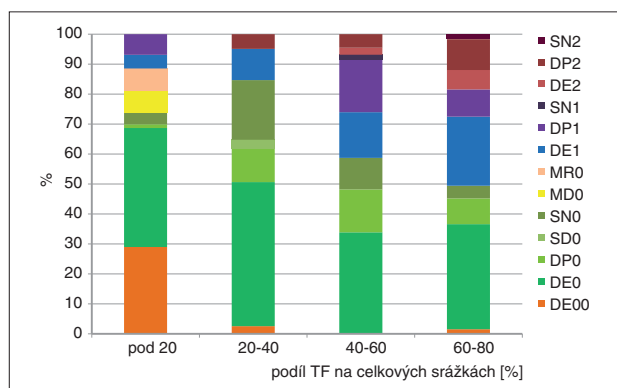
Ztráty vody způsobené zachytem vegetací ovlivňují celkovou vodní bilanci, a to nejen z hydrologického hlediska. Průměrná intercepce studované oblasti v období 2005–2014 dosahuje 40 % (viz kapitola 2.2). Tato hodnota představuje významný deficit vody, o který jsou ochuzeni další složky prostředí podílející se na koloběhu vody, např. půda, povrchová a podzemní voda.

Dominantní vliv dešťových srážek vysoké intenzity potvrzuje stanovenou pracovní hypotézu. Spojitost mezi intenzivními srážkami a klesající hodnotou intercepce je uvedena i v jiných pracích (např. Crockford, Richardson 2000; Dohnal et al. 2014; Klimánková et al. 2003; Krečmer 1973). Zachyt vody kolektory umístěnými pod korunami stromů může být ovlivněn jejich prostorovým uspořádáním. Různými aspekty plynoucími z rozmištění zachytných zařízení pro měření *TF* se zabývali již Krečmer a Fojt (1981). Zatímco některé studie používají pravidelné uspořádání vzorkovačů (např. Hopp et al. 2011; Lindroos et al. 2006; Ukonmaanaho et al. 2002), jiné realizují měření *TF* prostřednictvím náhodně umístěných odběrových soustav (Siegert et al. 2016; Skeffington et al. 2012). Právě tyto dva různé přístu-



Obr. 9 Procentuální podíl druhu jevů na podkorunových srážkách na měřicí lokalitě Observatoře Košetice 2005–2014 (SN – sněžení, MR – mrholení, SD – smíšené srážky, MD – mrznoucí déšť, DP – dešťová přeháňka, DE – déšť).

Fig. 9. Percentage share of phenomena types in throughfall precipitation at the Košetice Observatory measurement locality 2005–2014 (SN – snow, MR – drizzle, SD – mixed precipitation, MD – freezing rain, DP – rain shower, DE – rain).



Obr. 10 Procentuální příspěvky srážkových jevů k podkorunovým srážkám včetně intenzity jevu na měřicí lokalitě Observatoře Košetice 2005–2014 (SN2 – silné sněžení, DP2 – silná dešťová přeháňka, DE2 – silný déšť, SN1 – mírné sněžení, DP1 – mírná dešťová přeháňka, DE1 – mírný déšť, MR0 – slabé mrholení, MD0 – slabý mrznoucí déšť, SN0 – slabé sněžení, SD0 – slabé smíšené srážky, DP0 – slabá dešťová přeháňka, DE0 – slabý déšť, DE00 – velmi slabý déšť).

Fig. 10. Percentage share of precipitation phenomena in throughfall precipitation at the Košetice Observatory measurement locality 2005–2014 (SN2 – heavy snowfall, DP2 – heavy rain shower, DE2 – heavy rain, SN1 – moderate snowfall, DP1 – moderate rain shower, DE1 – moderate rain, MR0 – light drizzle, MD0 – light freezing rain, SN0 – light snowfall, SD0 – light mixed precipitation, DP0 – light rain shower, DE0 – light rain, DE00 – very light rain).

py podněcují k otestování vlivu uspořádání kolektorů na množství zachyceného úhrnu pod korunami stromů. Tento výzkum se pracovníci observatoře pokusí zrealizovat v nadcházejícím roce na vzorkovací ploše Observatoře Košetice, kde jsou kolektory rozmístěny pravidelně (viz podkapitola 2.3.1.). Dále stojí za úvahu uskutečnit experimentální měření *SF* na smrkových stromech rostoucích na monitorovací ploše *TF*. Hodnoty *SF* v celkovém množství srážek, které jsou ovlivněny druhem stromu, nejsou v publikovaných studiích udávány zcela jednotně. Např. Levia et al. (2011) uvádí příspěvek buku lesního pouze 6,4 %. V předchozí práci z roku 2003, která se zabývá i rozdíly *SF* během letní a zimní sezony, je uveden nárůst příspěvku *SF* u buku lesního v zimě až na 16 %. Zvýšený zimní příspěvek *SF* je ovlivněn ztrátou listů a snížením vypařování. Sezonní variabilita u jehličnatých stromů nebyla prokázána (Levia et al. 2003).

## 5. ZÁVĚR

Cílem předkládané práce bylo zjistit, jak se podílejí jednotlivé typy padajících srážek a jejich intenzita na srážkovém úhrnu na volné ploše a na množství podkorunových srážek. Výsledky ukazují, že dominující vliv na množství srážky má intenzita jevu ve srovnání s jeho druhem.

Rozdělení srážkových jevů na jednotlivé druhy neprokázalo jednoznačný vliv na srážkové množství. Nicméně podobný charakter mají kategorie nízkých srážkových úhrnů pro oba typy měření (*GF* i *TF*). Tyto kategorie jsou reprezentovány větším počtem jevů oproti kategoriím s vysokými úhrny.

Na volné ploše roste vliv intenzivnějších jevů společně se srážkovým úhrnem, a více se tak uplatňují mírné, silné a velmi silné jevy. V případě úhrnů do 120 mm tvoří jevy slabé intenzity alespoň polovinu přispívajících jevů. Množství *TF* je významně závislé na intercepci, celkový úhrn srážky dopadající na zem je prokazatelně ovlivněn hlavně intenzitou srážek. Při nízkých intenzitách srážek se výrazně projevuje záchyt vegetací a *TF* dosahují méně než 20 procent celkového úhrnu. Naopak zvýšení podílu mírných a silných srážek přispívá ke zvýšení úhrnů měřených pod korunami stromů.

### Literatura:

- AGUILLAUME, L., RODRIGO, A., AVILA, A., 2016. Long-term effects of changing atmospheric pollution on throughfall, bulk deposition and streamwaters in a Mediterranean forest. *Science of The Total Environment*. Vol. **544**, s. 919–928.
- CROCKFORD, R. H., RICHARDSON, D. P., 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrol. Process.*, Vol. **14**, s. 2903–2920.
- DOHNAL, M., ČERNÝ, T., VOTRUBOVÁ, J., TESAŘ, M., 2014. Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. Vol. **62**, s. 277–284.
- FRASSON, R. P. M., KRAJEWSKI, W. F., 2011. Characterization of the drop-size distribution and velocity-diameter relation of the throughfall under the maize canopy. *Agricultural and forest meteorology*. Vol. **151**, s. 1244–1251.
- HOPP, L., MCDONNELL, J. J., 2011. Examining the role of throughfall patterns on subsurface stormflow generation. *Journal of Hydrology*. Vol. **409**, s. 460–471. ISSN 0022-1694.
- ICP FORESTS, 2011. ICP Forests monitoring manual [online]. [cit. 4.11.2015]. Dostupné z WWW: [http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL\\_Depo.pdf](http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL_Depo.pdf)
- KEIM, R. F., SKAUGSET, A. E., WEILER, M., 2005. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. *Journal of Hydrology*. Vol. **314**, s. 263–274. ISSN 0022-1694.
- KLIMÁNKOVÁ, Z., POKORNÝ, R., KULHAVÝ, J., 2003. Vodní režim horské smrčiny – srážky, intercepce. Seminář „Mikroklima porostů“, Brno, 26. března 2003. [online]. [cit. 5. 5. 2016]. Dostupné z WWW: [http://www.cbks.cz/sbornik03/prispevky/Klimankova\\_Pokorny\\_Kulhavy.pdf](http://www.cbks.cz/sbornik03/prispevky/Klimankova_Pokorny_Kulhavy.pdf).
- KREČMER, V., 1973. Meteorologické podmínky výskytu kapalných srážek z mlhy a jejich význam pro intercepční proces ve středohorském lese. *Meteorologické zprávy*, roč. **27**, č. 1, s. 18–25. ISSN 0026-1173.
- KREČMER, V., FOJT, V., KŘEČEK, J., 1979. Horizontální srážky z mlhy v lesích jako položka vodní bilance v horské krajině. *Meteorologické zprávy*, roč. **32**, č. 3, s. 78–81. ISSN 0026-1173.
- KREČMER, V., FOJT, V., 1981. Kritické poznámky k metodologii měření kapalných podkorunových srážek. *Vodohospodářský časopis*, roč. **29**, č. 2, s. 148–164.
- LEVIA, D. F., FROST, E. E., 2003. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*. Vol. **274**, s. 1–29. ISSN 0022-1694.
- LEVIA, D. F., KEIM, R. F., CARLYLE-MOSES, D. E., FROST, E. E., 2011. Forest Hydrology and Biochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions. Throughfall and Stemflow in Wooded Ecosystems. Vol. **216**. e-ISBN 978-94-007-1363-5.
- LINDROOS, A. J. et al., 2006. Trends in sulphate deposition on the forests and forest floor and defoliation degree in 16 intensively studied forest stands in Finland during 1996–2003. *Boreal environment research*. Vol. **11**, s. 451–461.
- LIPINA, P., ŽIDEK, D., 2014. Návod pro pozorovatele meteorologických stanic ČHMÚ. Praha: ČHMÚ, 98 s. ISBN 978-80-87577-33-2.
- MANUAL IM, 1998. Manual for Integrated Monitoring. Helsinki: Finnish Environment Institute.
- MARIN, C. T., BOUTEN, W., SEVINK, J., 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*. Vol. **237**, s. 40–57. ISSN 0022-1694.
- METEOSERVIS, 2008. Srážkoměr MRW500 [online]. [cit. 4. 11. 2015]. Dostupné z WWW: [http://www.meteoservis.cz/fotky/fotos/\\_c\\_134MRW500\\_2015\\_2.pdf](http://www.meteoservis.cz/fotky/fotos/_c_134MRW500_2015_2.pdf)
- RODRIGO, A., AVILA, A., 2001. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests. *Journal of Hydrology*. Vol. **243**, s. 216–227. ISSN 0022-1694.
- SIEGERT, C. M. et al., 2016. Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest. *Forest Ecology and Management*. Vol. **359**, s. 109–117.
- SKEFFINGTON, R. A., HILL, T. J., 2012. The effects of a changing pollution climate on throughfall deposition and cycling in a forested area in southern England. *Science of the Total Environment*. Vol. **434**, s. 28–38.
- STAELENS, J. et al., 2006. Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. *Journal of Hydrology*. Vol. **330**, s. 651–662. ISSN 0022-1694.
- TESAŘ, M., ŠÍR M., FOTTOVÁ, D., 2004. Usazené srážky na Šumavě. Konference aktuality šumavského výzkumu II, Srní 4.–7. října 2004. [online]. [cit. 5. 5. 2016]. Dostupné z WWW: [www.npsumava.cz/storage/str79-83.pdf](http://www.npsumava.cz/storage/str79-83.pdf).
- UKONMAANAHO, L., STARR, M., 2002. Major nutrients and acidity: budgets and trends at four remote boreal stands in Finland during the 1990s. *Science of the Total Environment*, Vol. **297**, s. 21–41.
- VÁŇA, M. a kol., 1995. Kvalita přírodního prostředí České republiky na regionální úrovni. Praha: ČHMÚ, 88 s. ISBN 80-85813-20-3.
- VÁŇA, M., DVORSKÁ, A. et al., 2014. Košetice Observatory – 25 Years. Praha: ČHMÚ, 92 s. ISBN 978-80-87577-40-0.
- WHELAN, M. J. et al., 1998. Spatial patterns of throughfall and mineral ion deposition in a lowland Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale. *Atmospheric Environment*, Vol. **32**, s. 3493–3501.
- WILKS, D. S., 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences. Second edition. Academic press. ISBN 9780080456225.
- ZIMMERMANN, A., WILCKE, W., ELSENBEER, H., 2007. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology*. Vol. **343**, s. 80–96. ISSN 0022-1694.

Lektoři (Reviewers): doc. RNDr. Iva Hůnová, CSc.,  
Ing. Pavel Lipina



# PROSTOROVÁ PROMĚNLIVOST MAXIMÁLNÍ A MINIMÁLNÍ TEPLoty VZDUCHU V NIŽŠÍCH POLOHÁCH ÚSTECKÉHO KRAJE

Pavel Jůza, Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ústí nad Labem, Kočkovská 2699/18, poštovní schránka 2, 400 11 Ústí nad Labem-Kočkov, juzap@chmi.cz

**Spatial variability of maximum and minimum air temperatures at the lower elevations of the Ústí nad Labem Region.** Weather forecasts for the Czech Republic mostly indicate maximum and minimum air temperatures in a range of 4 °C. Due to the large elevation differences in the Czech Republic, these temperatures are indicated for lower elevations or for lower and middle elevations, and the temperature forecasts for mountains are indicated separately. In the case of larger regional differences, the forecast specifies a part of the area where the temperature will differ from the indicated range. To provide a more detailed specification, regional forecasts are issued for individual regions, which can capture regional differences in the weather in a particular region more accurately. This paper investigates how frequently the maximum or minimum temperatures at the lower elevations of one region fit into a four-level range. It shows that even in such a narrowly defined area, the measured maximum temperatures fit into the four-level range only in 66% of cases and the measured minimum temperatures only in 58% of cases. There are also cases where the minimum temperature range at the lower elevations of one region even exceeds 12 °C.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** předpověď počasí – teplota maximální – teplota minimální – rozdíl – rozmezí – prostorová variabilita  
**KEYWORDS:** Weather forecast – maximum temperature – minimum temperature – difference – range – spatial variability

## 1. ÚVOD

Ve všeobecných předpovědích počasí, které se vydávají pro území České republiky, se minimální a maximální teplota vzduchu uvádí zpravidla v rozmezí 4 °C (např. 14 až 18 °C). Vzhledem k vertikálnímu rozsahu území platí tato předpověď pro nižší polohy (do 400 m n. m.), ev. pro nižší a střední polohy (do 600 m n. m.), a předpověď pro hory se vydává zvlášť; v celostátní předpovědi se uvádí předpokládaná přibližná maximální teplota na horách ve výšce 1 000 m n. m. V případě očekávaných větších rozdílů v teplotě, např. při přechodu fronty, se předpověď doplňuje další hodnotou pro určitou část území (např.: „...na jihu až 20 °C...“). Pro lepší upřesnění předpovědi se vydávají regionální předpovědi pro jednotlivé kraje ČR, které mohou zpřesnit predikci vývoje počasí přímo v daném kraji.

Předložená práce se zabývá tím, zda a do jaké míry se skutečně naměřená teplota vejde do rozmezí 4 °C, které se v předpovědích počasí nejčastěji používá. Podíváme se, v jakém rozmezí se pohybují naměřená teplotní minima a teplotní maxima ve zvoleném kraji, v daném případě v kraji Ústeckém, a to pouze v nižších polohách tohoto kraje, tj. ve výškách do 400 m n. m. Jedná se o poměrně úzce vymezenou oblast, do které by se neměly zásadně promítnout jinak velké rozdíly mezi západními Čechami a východní Moravou nebo mezi nížinami a nejvyššími horskými vrcholy.

## 2. POUŽITÉ ÚDAJE

Pro zpracování byly použity údaje z databáze ČHMÚ, a to z meteorologických stanic v Ústeckém kraji, umístěných v nadmořské výšce do 400 m n. m. Bylo zpracováno desetileté období 2005 až 2014, mimo jiné proto, že v tomto období soubor stanic ve vymezené oblasti byl poměrně stálý. V říjnu 2005 začala měřit stanice Strojetic (U1STRJ01), následujících 9 let se stanice v nižších polohách Ústeckého kraje neměnily, až v srpnu 2014 začala měřit stanice Velké Chvojno (U7VCHV01). Stanice Strojetic tedy v prvních měsících sledovaného období chybí, stanice Velké Chvojno měřící na konci období do vyhodnocení zahrnuta nebyla, aby byla aspoň podle možností zachována kontinuita sledo-

vaného souboru stanic. Byly tedy použity údaje z následujících stanic: Doksany (U1DOKS01), Tušimice (U1KATU01), Kopisty (U1KOPI01), Smolnice (U1SMOL01), Strojetic (U1STRJ01), Teplice (U1TEPL01), Ústí nad Labem-Kočkov (U1ULKO01), Ústí nad Labem-Vaňov (U1ULMA01), Žatec (U1ZATE01), Děčín (U2DECI01) a Varnsdorf (U2VARN01). Z uvedených stanic byly pro jednotlivé dny sledovaného období zjištěny hodnoty maximální teploty a minimální teploty v klimatologickém období od 21 do 21 hodin a zvlášť u minimální a zvlášť u maximální teploty byl pro každý den stanoven rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou daného prvku, tj. nejvyšší a nejnižší hodnota maximální teploty a nejvyšší a nejnižší hodnota minimální teploty v rámci zkoumaných stanic. Z těchto teplotních rozmezí pak byly zjištěny průměrné a maximální hodnoty a také třídy četnosti. Tyto charakteristiky byly spočítány jak pro celé zkoumané období, tak pro jednotlivé měsíce v roce.

## 3. ZJIŠTĚNÉ VÝSLEDKY

Jak již bylo uvedeno, ve všeobecné předpovědi počasí pro ČR se většinou používá čtyřstuňové rozmezí teploty. Takové rozmezí však nemůže postihnout celé území, když např. rozdíl nadmořské výšky mezi Sněžkou a Hřenskem je bezmála 1 500 metrů, což při běžných vertikálních gradientech teploty samo znamená možný rozdíl teploty vysoko přes 10 °C. Proto se v předpovědích teploty základní teplotní rozmezí uvádí pro nižší polohy (do 400 m n. m.), příp. pro nižší a střední polohy (do 600 m n. m.), a k tomu se zvlášť doplňuje předpokládaná maximální teplota na horách ve výšce 1 000 metrů nad mořem. Při větším horizontálním gradientu teploty, například při přechodu front, dochází v rámci ČR rovněž k velkým rozdílům teploty, např. v létě, při pomalém přechodu zvláště studené fronty, není výjimkou, když na východě maximální teplota dosahuje přes 30 °C, a v západních Čechách nedosahuje ani 15 °C. Taková situace se v celostátní předpovědi řeší tím, že se uvede více hodnot pro jednotlivé části území a pro přesnější předpověď počasí v jednotlivých krajích se vydávají regionální předpovědi počasí pro jednotlivé kraje.

Tab. 1 Četnosti rozmezí denních teplotních minim v nižších polohách Ústeckého kraje.

Table 1. Frequencies of diurnal minimum temperature ranges at the lower elevations of the Ústí nad Labem Region.

Rozmezí teplotních minim [°C]	Absolutní četnost	Relativní četnost [%]
≤ 1	0	0,00
1,1–2	255	6,98
2,1–3	937	25,66
3,1–4	908	24,86
4,1–5	690	18,89
5,1–6	438	11,99
6,1–7	210	5,75
7,1–8	128	3,50
8,1–9	50	1,37
9,1–10	19	0,52
10,1–11	10	0,27
11,1–12	4	0,11
12,1–13	2	0,05
13,1–14	1	0,03
Celkem	3 652	

Tab. 2 Četnosti překročení jednotlivých hodnot rozmezí teplotních minim.

Table 2. Frequencies of exceedance of individual minimum temperature ranges.

Teplotní rozmezí [°C]	Počet překročení	Relativní četnost [%]
4	1 552	42,50
6	424	11,61
8	86	2,35
10	17	0,47
12	3	0,08

Jak již uvedli Vojvodík (1984, 1986, 1987, 1996) a Křivancová (1991), na některých místech, zejména v takzvaných horských mrazových kotlinách, dochází často k velkým výkyvům minimální teploty a ke značným rozdílům teploty mezi stanicemi. Prostorová proměnlivost se týká i maximální teploty, jak poukazuje například Kyselý (2006), který se zabývá prostorovou proměnlivostí maximální teploty v rámci celé ČR, a to zejména v období tzv. horkých vln. Jak se však ukazuje, i mimo hory, pouze v nižších polohách, jen v rámci jednoho kraje, a to na stanicích, z nichž žádná nemá vyhraněné vlastnosti mrazové kotliny, se také občas vyskytují značné teplotní rozdíly.

### 3.1 Celoroční výsledky

Za sledovaných 10 let od roku 2005 do roku 2014 jsou k dispozici údaje o denních teplotních minimech a maximech z 3 652 dnů. Bylo zpracováno celé uvedené období, přestože v prvních několika měsících ještě neměřila stanice Strojeticice.

Rozmezí minimální teploty za uvedené desetileté období na vymezeném souboru stanic dosáhlo průměrně 4,0 °C, se směrodatnou odchylkou 1,7 °C. Medián dosáhl 3,7 °C a nej-

Tab. 3 Četnosti rozmezí denních teplotních maxim v nižších polohách Ústeckého kraje.

Table 3. Frequencies of diurnal maximum temperature ranges at the lower elevations of the Ústí nad Labem Region.

Rozmezí teplotních maxim [°C]	Absolutní četnost	Relativní četnost [%]
≤ 1	0	0,00
1,1–2	52	1,42
2,1–3	810	22,18
3,1–4	1 531	41,92
4,1–5	839	22,97
5,1–6	258	7,06
6,1–7	104	2,85
7,1–8	37	1,01
8,1–9	12	0,33
9,1–10	3	0,52
10,1–11	4	0,27
11,1–12	2	0,11
Celkem	3 652	

Tab. 4 Četnosti překročení jednotlivých hodnot rozmezí teplotních maxim.

Table 4. Frequencies of exceedance of individual maximum temperature ranges.

Teplotní rozmezí [°C]	Počet překročení	Relativní četnost [%]
4	1 259	34,47
6	162	4,44
8	21	0,58
10	6	0,16

větší rozdíl mezi minimální teplotou nejteplejší a nejchladnější stanice ze sledovaného souboru byl 13,6 °C, a to 7. ledna 2009, kdy stanice Strojeticice naměřila minimum –8,8 °C a stanice Varnsdorf –22,4 °C. Druhý největší rozdíl byl o den dříve, 6. ledna 2009, kdy stanice Strojeticice naměřila rovněž –8,8 °C a stanice Doksany a Varnsdorf –21,3 °C. Třetí největší rozdíl dosáhl 12,1 °C, a to dne 29. ledna 2013, kdy minimální teplota dosáhla v Doksanech hodnoty –9,9 °C a v Tušimicích +2,2 °C. Do čtyřstupňového rozmezí se minimální denní teploty vešly v 2 100 dnech, což je 57,5 %. Ve zbývajících 1 552 dnech, tj. 42,5 % případů, byl rozdíl nejvyšší a nejnižší minimální teploty větší než 4 °C, z toho ve 424 dnech, tj. 11,61 % případů, přesáhl 6 °C, a v 86 dnech, tj. ve 2,35 % případů, přesáhl 8 °C.

Četnosti jednotlivých hodnot rozdílů mezi nejvyšším a nejnižším minimem v daný den ve vymezené oblasti jsou uvedeny v tab. 1. Četnosti případů překročení jednotlivých hodnot jsou uvedeny v tab. 2.

Rozmezí denních teplotních maxim za uvedené období ve sledované oblasti dosáhlo průměrně 3,9 °C se směrodatnou odchylkou 1,1 °C, medián 3,7 °C. Největší rozdíl mezi maximální teplotou nejteplejší a nejchladnější stanice činil 12,0 °C, a to 14. listopadu 2011, kdy maximální teplota dosáhla v Doksanech –1,2 °C a ve Varnsdorfu +10,8 °C. Druhý největší rozdíl 11,3 °C byl zaznamenán 20. října 2012, kdy maximální teplota byla ve Varnsdorfu 20,8 °C a v Ústí nad Labem-Kočkově 9,5 °C. V obou případech se jednalo o anticyklonální počasí se slabou jižní složkou proudění, kdy se ve Šluknovském výběžku přes den inverze rozpustila, zatímco v Polabí se udržela po celý den. V teplé polovině roku byl největší rozdíl 10,5 °C, a to 2. května 2014, kdy maximální teplota dosáhla v Doksanech 20,4 °C a ve Varnsdorfu 9,9 °C. Do čtyřstupňového rozmezí se maxima teploty vešla v 2 393 dnech, což je 65,53 % případů. Ve zbývajících 1 259 dnech, tj. ve 34,47 % případů, byl rozdíl nejvyššího a nejnižšího maxima ve vymezené oblasti větší než 4 °C, z toho ve 162 dnech, tj. 4,44 % případů, přesáhl 6 °C, a ve 21 dnech, tj. v 0,58 % případů, přesáhl 8 °C.

Četnosti jednotlivých hodnot rozdílů mezi nejvyšším a nejnižším maximem v daný den ve vymezené oblasti jsou uvedeny v tab. 3. Četnosti případů překročení jednotlivých hodnot jsou uvedeny v tab. 4. Relativní četnosti počtu dnů s příslušným rozmezím teplotních minim a maxim jsou zobrazeny na obr. 1.

V tab. 5 je uvedena průměrná a maximální roční hodnota

rozmezí maximální teploty a minimální teploty za jednotlivé kalendářní roky od roku 2005 do roku 2014. Tabulka ukazuje, že mezi hodnotami za jednotlivé roky nejsou nějaké zásadní nebo systematické rozdíly.

### 3.2 Výsledky za jednotlivé měsíce

Pro úplnost byly zpracovány údaje o rozmezí denních minim a maxim teploty i za jednotlivé měsíce v roce. Pro každý měsíc byl pro rozmezí minim i maxim v nižších polohách Ústeckého kraje spočítán průměr, medián i maximální hodnota, a také třídy četnosti a četnost překročení některých hodnot.

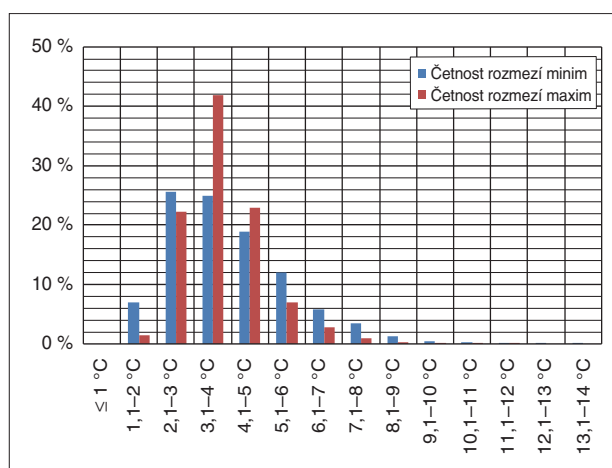
Průměr, medián a maximální hodnota pro jednotlivé měsíce jsou uvedeny v tab. 6. Z tabulky je vidět, že ve sledovaném desetiletí rozmezí denních minim teploty v nižších polohách Ústeckého kraje je v průměru o něco menší v letních měsících a největší v zimě a začátkem jara, největší průměrnou hodnotu má toto teplotní rozmezí v měsíci dubnu. Rozmezí denních maxim je v průběhu roku velmi vyrovnané, poněkud vyšší průměrná hodnota tohoto rozmezí je v říjnu a poněkud nižší v prosinci.

Četnosti překročení jednotlivých hodnot rozmezí minim a maxim jsou uvedeny v tab. 7. Největší četnost překročení teplotního rozmezí 4 °C byla zaznamenána v případě minim teploty v dubnu, kdy byla překročena v 58 % případů. Jinými slovy, v dubnu se v nadpoloviční většině dnů rozmezí denních teplotních minim nevejde do čtyřstupňového rozmezí. V zimním období až do dubna je i nezanedbatelná četnost dnů, kdy rozmezí denních teplotních minim přesahuje 8 °C, jedná se o cca 4 % dnů. U teplotních maxim není roční chod rozmezí příliš výrazný, z tab. 7 vidíme, že rozmezí teplotních maxim ve většině měsíců přesahuje 4 °C zhruba ve třetině případů, jen v říjnu o něco víc a naopak v listopadu a prosinci méně. Zajímavá situace je právě v listopadu, kdy četnost překročení teplotního rozmezí 4 °C je téměř nejnižší z celého roku, zatímco v četnosti překročení větších rozmezí denních teplotních maxim, 8 °C a 10 °C, patří listopad naopak mezi měsíce s největší četností. V letních měsících, jak ukazuje i tab. 6, rozmezí maximální teploty dosáhlo maximálně 6,5 °C. Celkově se dá říci, že roční chod teplotního rozmezí v rámci nižších poloh Ústeckého kraje je výraznější u teplotních minim než u maxim.

Roční chod relativní četnosti překročení rozmezí minim teploty 4 °C a 8 °C je zobrazen na obr. 2, roční chod relativní četnosti překročení rozmezí maxim teploty 4 °C a 8 °C je zobrazen na obr. 3.

### 3.3 Nejteplejší a nejchladnější stanice

Článek se zabývá teplotním rozmezím v rámci nižších poloh Ústeckého kraje, tedy rozdílem mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou teplotního minima a teplotního maxima v dané oblasti. V této souvislosti bude užitečné zjistit, zda a do jaké míry se v roli nejteplejší a nejchladnější stanice v oblasti opakují stejné stanice, nebo zda se střídají. Proto bylo zkoumáno, a to zvláště pro denní minimální teplotu a zvláště pro denní maximální teplotu, kolikrát za zkoumaných 10 let se která stanice stala za daný den nejteplejší stanicí a kolikrát nejchladnější. Výsledky jsou uvedeny v tab. 8. Posuzované stanice jsou zobrazeny na mapce na obr. 4, která je převzata z internetové stránky ČHMÚ, posuzované stanice jsou označeny modrým písmem. Neoznačené stanice jsou stanice ČHMÚ, kterých se toto zpracování netýká, tedy stanice ve větší výšce než 400 m n. m. a stanice umístěné mimo Ústecký kraj.



Obr. 1 Relativní četnosti počtu dnů s příslušným rozmezím teplotních minim a maxim.

Fig. 1. Relative frequencies of the number of days with a relevant minimum and maximum temperature range.

Z tabulky je vidět, že v roli nejteplejší i nejchladnější stanice se u maximální i minimální teploty vystřídalalo všech 11 sledovaných stanic z nižších poloh Ústeckého kraje. Některé stanice se do role nejteplejší či nejchladnější stanice dostávají častěji a některé méně často, ale není tam žádná stanice, která by byla vždy nejteplejší nebo vždy nejchladnější. Asi nejvyrovnanější výsledek je v případě nejteplejší stanice podle minimální teploty – nejčastěji měla nejvyšší minimum stanice Ústí nad Labem-Kočkov, a to v 781 dnech, nejméně často stanice Kopisty, ale i ta se prvenství v nejvyšším denním teplotním minimu dočkala v 90 dnech. Nejnížší denní minimum ze sledovaných stanic měla nejčastěji stanice Varnsdorf, a to v 1 065, a stanice Žatec v 988 dnech, nejméně často se prvenství v minimální teplotě dočkala stanice Teplice, a to v 19 dnech. V případě maximální teploty je četnost výrazněji rozložena podle nadmořské výšky. Nejnížší maximum se vyskytlo nejčastěji na stanici Varnsdorf, a to v 1 396 dnech, a u stanice Ústí nad Labem-Kočkov ve 1 111 dnech. Nejméně často měla nejnížší maximum stanice Děčín, a to v 19 dnech, a další stanice s nízkou nadmořskou výškou – Doksany,

Tab. 5 Roční průměrné a maximální hodnoty rozmezí teplotních minim a maxim v nižších polohách Ústeckého kraje.

Table 5. Annual average and maximum values of minimum and maximum temperature ranges at the lower elevations of the Ústí nad Labem Region.

Rok	Denní minima		Denní maxima	
	Průměrné rozmezí [°C]	Maximální rozmezí [°C]	Průměrné rozmezí [°C]	Maximální rozmezí [°C]
2005	4,3	11,2	3,5	7,6
2006	4,4	11,2	3,8	10,4
2007	3,9	10,0	3,5	7,2
2008	4,2	9,6	3,6	9,7
2009	3,8	13,6	3,8	8,0
2010	4,0	11,7	4,0	8,9
2011	3,8	10,1	4,1	12,0
2012	4,0	11,0	4,1	11,3
2013	3,7	12,1	4,0	10,2
2014	3,8	11,5	3,9	10,5



Tab. 6 Průměr, medián a maximální hodnota rozmezí teplotních minim a maxim v nižších polohách Ústeckého kraje v jednotlivých měsících v roce.

Table 6. Average, median and maximum values of minimum and maximum temperature ranges at the lower elevations of the Ústí nad Labem Region during individual months of the year.

Měsíc	Rozmezí denních teplotních minim [°C]			Rozmezí denních teplotních maxim [°C]		
	Průměr	Medián	Maximum	Průměr	Medián	Maximum
I.	4,2	3,7	13,6	3,8	3,4	9,6
II.	4,0	3,6	10,9	3,9	3,6	10,4
III.	4,3	3,9	11,5	3,9	3,8	7,2
IV.	4,8	4,5	11,2	3,8	3,7	8,0
V.	4,1	3,8	10,0	3,9	3,7	10,5
VI.	3,8	3,6	7,2	3,8	3,8	8,2
VII.	3,8	3,5	9,2	3,9	3,8	6,5
VIII.	3,6	3,5	8,6	3,9	3,8	6,5
IX.	4,1	3,7	11,2	3,8	3,6	6,4
X.	4,1	3,9	10,0	4,1	3,9	11,3
XI.	3,7	3,3	8,7	3,7	3,4	12,0
XII.	3,8	3,4	11,7	3,5	3,2	8,6

Tab. 7 Četnosti překročení hodnot rozmezí teplotních minim a maxim v jednotlivých měsících v roce.

Table 7. Frequencies of exceedance of the minimum and maximum temperature ranges during individual months of the year.

Měsíc	Relativní četnosti překročení rozmezí denních teplotních minim [%]				Relativní četnosti překročení rozmezí denních teplotních maxim [%]			
	4 °C	6 °C	8 °C	10 °C	4 °C	6 °C	8 °C	10 °C
I.	44,19	17,74	4,52	1,61	32,90	7,74	1,29	0,00
II.	45,04	11,70	2,84	0,35	34,04	6,03	1,06	0,35
III.	47,10	16,77	4,19	0,65	41,29	7,42	0,00	0,00
IV.	58,33	26,00	6,67	1,00	34,33	2,33	0,00	0,00
V.	43,87	11,61	2,58	0,00	33,55	4,19	0,65	0,65
VI.	39,67	6,00	0,00	0,00	37,67	1,67	0,33	0,00
VII.	36,45	6,77	0,65	0,00	40,97	1,29	0,00	0,00
VIII.	36,13	3,55	0,32	0,00	34,83	1,94	0,00	0,00
IX.	43,67	12,00	1,67	1,00	33,33	0,67	0,00	0,00
X.	46,45	11,61	1,29	0,00	43,23	9,35	0,97	0,32
XI.	33,33	6,00	0,67	0,00	23,67	5,33	1,67	0,67
XII.	36,13	9,68	2,90	0,97	23,55	5,16	0,97	0,00

Teplíce, Ústí nad Labem-Vaňov. A konečně nejvyšší maximum měly naopak nejčastěji stanice nízko položené – nejvíce Doksany v 1 390 dnech. Nejvyšší maximum se téměř vyhábná stanici Ústí nad Labem-Kočkov, tato stanice byla za 10 let pouze v 5 dnech nejteplejší ze sledovaných stanic z hlediska teplotního maxima, stanice Smolnice měla nejvyšší maximum ve 28 dnech.

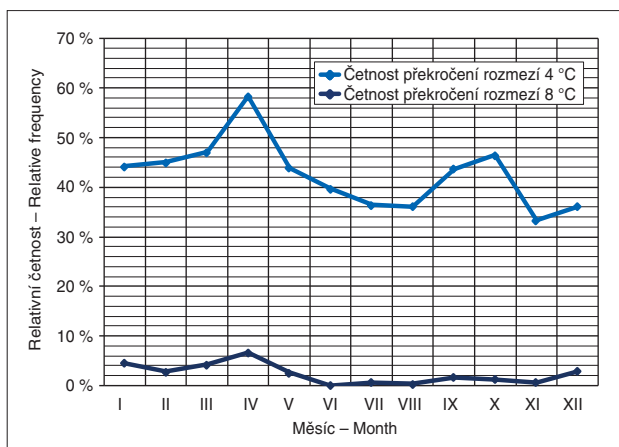
Výraznější místní rozdíly teploty podle všeho souvisí z větší části s výskytem teplotních inverzí, o čemž svědčí to, že rovnoměrnější zastoupení jak nejteplejší, tak nejchladnější teploty se vyskytuje u teplotních minim, která jsou častěji ovlivněna inverzí, zatímco u teplotních maxim je výskyt nejteplejších i nejchladnějších stanic více uspořádán zejména podle nadmořské výšky, a to hlavně v letní polovině roku, kdy se celodenní inverze téměř nevyskytují. Vytvoření a setrvání teplotní inverze záleží na orografii v kombinaci se směrem a rychlostí větru a v zimě také na výskytu sněhové pokrývky.

#### 4. MOŽNÉ PŘÍČINY TEPLŮTNÍCH ROZDÍLŮ

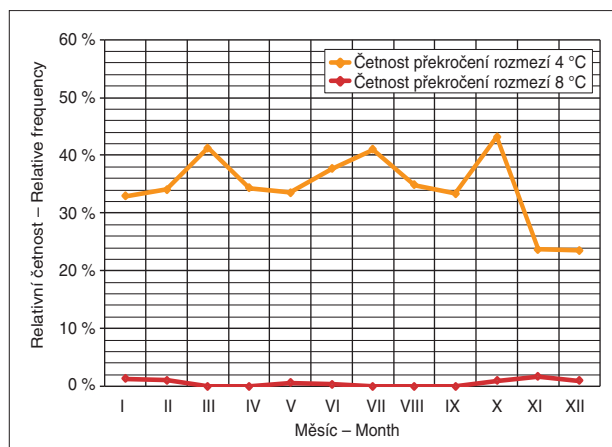
Jak již bylo uvedeno, největší rozdíl mezi minimální teplotou nejteplejší a nejchladnější stanice ze sledovaného souboru byl 13,6 °C, a to 7. ledna 2009, kdy stanice Strojeticke naměřila minimum -8,8 °C a stanice Varnsdorf -22,4 °C. Druhý největší rozdíl byl o den dříve, 6. ledna 2009, kdy stanice Strojeticke naměřila rovněž -8,8 °C a stanice Doksany a Varnsdorf -21,3 °C. Tyto dny ležel nad střední Evropou pás vysokého tlaku mezi Velkou Británií a Ukrajinou a postupně začínala teplá advekce od západu; teplotní rozdíly souvisely s teplotní inverzí a jejím nerovnoměrným rozpouštěním. Jak je vidět z mapky na obr. 4, stanice Varnsdorf leží východně od ostatních stanic za Lužickými horami, a při teplé advekci od západu se tam teplý vzduch od západu dostával pomaleji. Třetí největší rozdíl dosáhl 12,1 °C, a to dne 29. ledna 2013, toho dne minimální teplota dosáhla v Doksanech hodnoty -9,9 °C a v Tušimicích +2,2 °C. Tehdy, po předchozím studeném počasí, přecházel přes území ČR výrazný frontální systém od západu, který na některých místech již rozrušil teplotní inverzi, a jinde ještě ne. Výrazný rozdíl byl naměřen také například 16. 12. 2010, kdy minimální teplota na stanici Varnsdorf dosáhla -19,7 °C, na stanici Děčín -18,4 °C a na stanici Doksany -17,8 °C a naopak na stanici Strojeticke jen -8,0 °C a na stanici Tušimice -8,8 °C. I tehdy

šlo o anticyklonální inverzní situaci, do střední Evropy zasahoval od západu výběžek vyššího tlaku a postupně ustupoval k jihu, na jeho severní straně zesilovala teplá advekce od západu a teplý vzduch zřejmě nejdříve zasáhl stanice na západě kraje.

Největší rozdíl mezi maximální teplotou nejteplejší a nejchladnější stanice dosáhl 12,0 °C, a to 14. listopadu 2011, kdy maximální teplota byla v Doksanech -1,2 °C a ve Varnsdorfu +10,8 °C. Druhý největší rozdíl 11,3 °C byl zaznamenán 20. října 2012, kdy maximální teplota ve Varnsdorfu byla naměřena 20,8 °C a v Ústí nad Labem-Kočkově 9,5 °C. V obou případech se jednalo o anticyklonální počasí se slabou jižní složkou proudění, kdy ve Šluknovském výběžku se přes den inverze rozpustila, zatímco v Polabí se udržela po celý den. Při jižním nebo jihovýchodním proudění se často stává, že stanice Frýdlant a Hejnice ve Frýdlantském výběžku mají výrazně vyšší noční teplotu než jiné stanice, pravděpodobně v důsledku závětrných efektů za Jizerskými horami. Někdy se tento efekt do jisté míry projevuje i ve Šluknovském výběžku



Obr. 2 Roční chod četnosti překročení rozmezí teplotních minim.  
Fig. 2. Annual cycle of minimum temperature range exceedance frequency.



Obr. 3 Roční chod četnosti překročení rozmezí teplotních maxim.  
Fig. 3. Annual cycle of maximum temperature range exceedance frequency.

na severním závětrí Lužických hor. V teplé polovině roku byl zjištěn největší rozdíl teplotních maxim 10,5 °C, a to 2. května 2014, kdy maximální teplota dosáhla v Doksanech 20,4 °C a ve Varnsdorfu 9,9 °C. Tehdy přes území ČR velmi pomalu přecházela výrazná studená fronta od severu, takže severní část Ústeckého kraje, zejména Šluknovský výběžek, byla přes den již ve studeném vzduchu za frontou, a jižní část kraje ještě v teplém vzduchu před frontou.

Jak popisuje např. Beranová a Huth (2003), v Praze a okolí jsou teplotní rozdíly v rámci nepříliš velké oblasti způsobeny mimo jiné i tepelným ostrovem města. V Ústeckém kraji se nevyskytuje tak velké a koncentrované město jako Praha, ale jsou zde městské aglomerace a značná koncentrace průmyslu a povrchové těžby, takže na teplotní rozdíly mohou tyto skutečnosti také mít jistý vliv.

Jak již bylo zmíněno, jak v teplotních minimech, tak v teplotních maximech se v roli nejteplejší i nejchladnější stanice vystřídalo všech 11 zkoumaných stanic, i když s různou četností. Přitom v tab. 8 je vidět, že nejvyrovnanější je zastoupení jednotlivých stanic u nejvyššího minima. To je způsobeno tím, že právě u teplotních minim se nejvíce projevuje vliv teplotní inverze, ale při cyklonálním počasí naopak i vliv nadmořské výšky, takže v závislosti na tom, kde se v noci protrhá nebo udrží oblačnost, může nejteplejší stanicí být v zásadě kterákoli. Proto nejčastěji má nejvyšší minimum stanice Ústí nad Labem-Kočkov, která leží na kopci nad údolím Labe a velice často zůstává nad nejnvýraznější částí ranní inverze, ale hned na druhém místě je stanice Ústí nad Labem-Vaňov, která má ze všech sledovaných stanic nejnižší nadmořskou výšku, a zřejmě proto mívá nejvyšší minimum naopak při cyklonálním počasí, kdy se nevytváří inverze a teplota je rozložena podle nadmořské výšky. Ze stejného důvodu mají často nejvyšší minimum i další nízko položené stanice Teplice a Děčín.

V roli stanice s nejnižším minimem se rovněž vystřídaly všechny stanice, ale jejich zastoupe-

ní již není tak vyrovnané. Nejchladnější stanicí byl nejčastěji Varnsdorf, dále Žatec a Strojetic. Příčinou by mohlo být to, že ochlazení, ať už advektivní, nebo radiální s vyjasněním, často přichází od severovýchodu nebo jihozápadu, a nejdříve zasáhne tyto okrajově položené stanice. Nejméně často měly nejnižší minimum stanice Teplice a Ústí nad Labem-Vaňov ležící v nízké nadmořské výšce. Při cyklonálním počasí zůstávají teplé, a při anticyklonálním počasí se nejspíš na jiných stanicích ochlazuje rychleji. Případně by se na těchto stanicích mohl aspoň částečně projevit zmíněný tepelný ostrov města.

U maximální teploty se již projevuje velmi silná závislost na nadmořské výšce. Nejnižší maximum se nejčastěji vyskytuje ve stanici Varnsdorf, která má třetí nejvyšší nadmořskou výšku a leží nejdál na severovýchodě, a na stanici Ústí nad Labem-Kočkov, která má nejvyšší nadmořskou výšku. Nejvyšší maximum má zdaleka nejčastěji stanice Doksany, která má druhou nejnižší nadmořskou výšku, na druhém místě, ale se značným odstupem, je stanice Ústí nad Labem-Vaňov, která má sice nejnižší nadmořskou výšku, ale leží v úzkém labském údolí, takže proti stanici Doksany má menší možnosti slunečního svitu. Nicméně i na výskyt teplotních maxim mají vliv inverze, což se projevuje tím, že všech 11 stanic mělo jak nejvyšší, tak nejnižší maximum ze všech stanic v průběhu zkoumaných let. Celodenní inverze

Tab. 8 Četnosti dnů, kdy daná stanice je nejteplejší a nejchladnější ze zkoumaného výběru stanic.

Table 8. Frequencies of days when a particular station is the warmest and coldest of the selected survey stations.

Stanice	Nadmořská výška [m]	Nejnižší minimum	Nejvyšší minimum	Nejnižší maximum	Nejvyšší maximum
Doksany	158	289	327	24	1 390
Tušimice	322	59	166	263	60
Kopisty	240	292	90	50	393
Smolnice	345	174	279	393	28
Strojetic	372	659	170	549	115
Teplice	236	19	549	21	107
Ústí n. L.-Kočkov	375	278	781	1 111	5
Ústí n. L.-Vaňov	150	25	682	42	683
Žatec	210	988	167	47	350
Děčín	172	60	533	19	654
Varnsdorf	367	1 065	242	1396	165



se vyskytují hlavně v zimě, a proto závislost četnosti výskytu nejvyšších a nejnižších maxim je výraznější v letním období. Např. nejnižší položené stanice Doksany a Ústí nad Labem-Vaňov za letní období od dubna do září ani jednou nebyly nechladnější stanicí, zatímco v lednu měl Vaňov nejnižší maximum čtrnáctkrát a Doksany osmkrát. V červnu kromě těchto dvou stanic nikdy neměla nejnižší maximum ani stanice Kopisty, Teplice a Žatec. Naopak nejvyšší maximum od dubna až do července nikdy neměla stanice Tušimice, zatímco v zimě občas ano.

Na základě uvedených zjištění se dá konstatovat, že za teplotní rozdíly v nižších polohách Ústeckého kraje nejčastěji může výskyt teplotní inverze, která bývá ovlivněna konfigurací terénu, a to zejména u minimální teploty, a v menším, ale nezanedbatelném počtu případů také advekce a přechod fronty. V období bez inverze, tedy při výrazně cyklonálním počasí, se dá předpokládat, že teplota a její rozdíly závisejí zejména na nadmořské výšce.

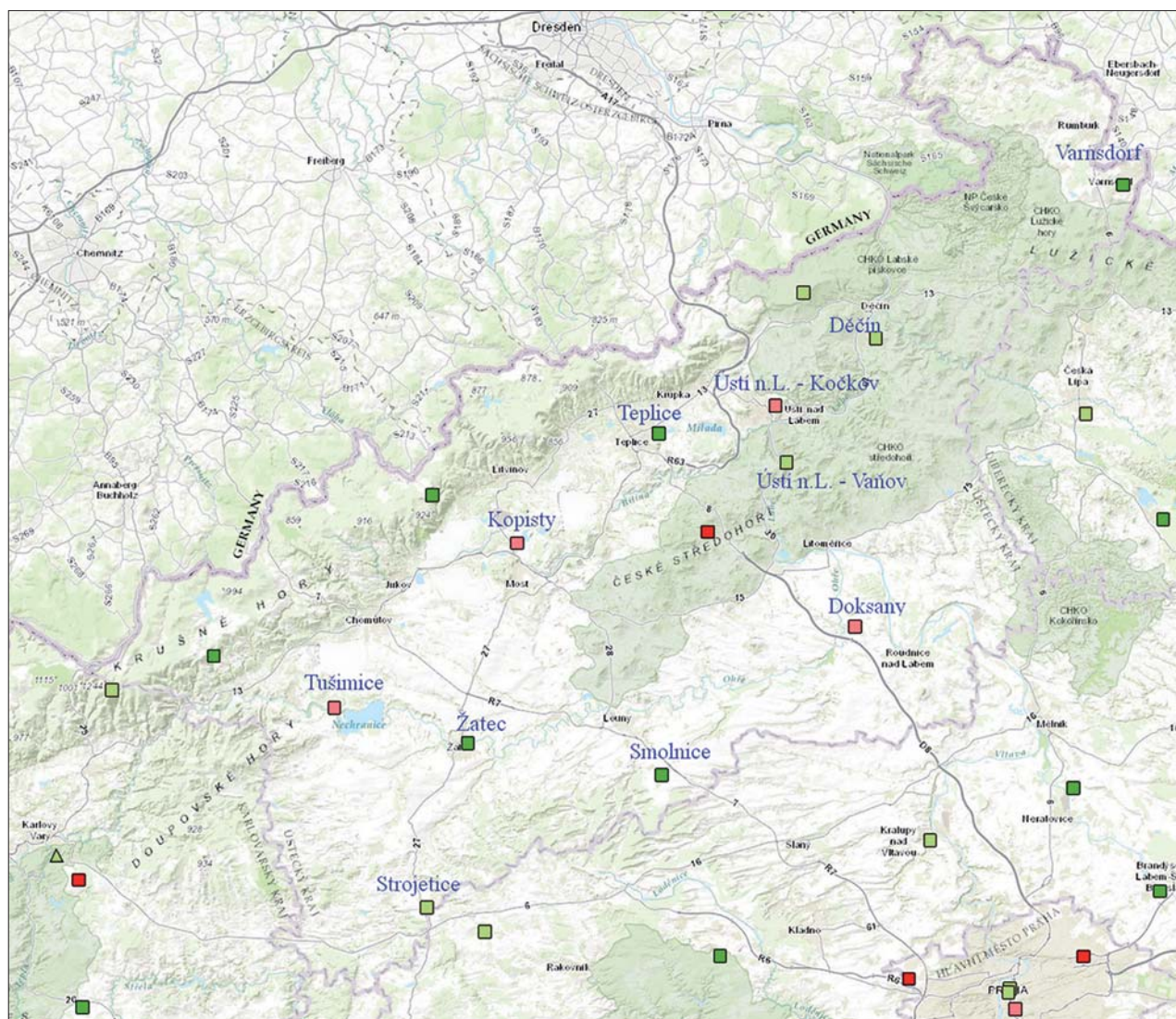
## 5. ZÁVĚR

Ve všeobecných předpovědích počasí se uvádí předpověď teploty vzduchu většinou ve čtyřstupňovém rozmezí.

Předpovídaná teplota může být dále upřesněna či rozčleněna podle nadmořské výšky nebo podle kraje a regionů, a to buď přímo v rámci celostátní předpovědi, nebo ve formě samostatně vydávaných regionálních předpovědí. Jak se však ukazuje, i při omezení zkoumané oblasti na pouze nižší polohy jediného kraje je nezdědka naměřené rozmezí teploty větší než uvedené čtyřstupňové. Když výběr stanic omezíme pouze na nižší polohy pouze Ústeckého kraje, pak rozmezí denních teplotních minim ve více než 40 % dnů je větší než 4 °C, a v měsíci dubnu dokonce ve více než polovině dnů (v 58 % dnů) rozmezí denních teplotních minim překračuje uvedené rozmezí 4 °C. Ve více než 2 % dnů se rozmezí denních teplotních minim nevejde ani do osmistupňového intervalu, a v průměru dvakrát do roka přesahuje 10 °C. V případě teplotních maxim je rozptýl hodnot menší, ale i u nich se ve více než třetině dnů rozmezí nevejde do čtyřstupňového intervalu.

Přitom se ukazuje, že jak u maxim, tak u minim se v roli nejteplejší i nejchladnější stanice vystřídaly všechny stanice ve výběru, takže se ani nedá říci, že by některá stanice měla nějakou trvalou systematickou odchylku od ostatních stanic.

Dá se tedy konstatovat, že rozmezí zejména denních teplotních minim, ale i teplotních maxim se ve významné části dnů



Obr. 4 Mapa rozmístění meteorologických stanic v nižších polohách Ústeckého kraje. Převzata z webu ČHMÚ.

Fig. 4. Map showing the locations of meteorological stations at the lower elevations of the Ústí nad Labem Region, as taken from the Czech Hydrometeorological Institute's website.



nevejde do čtyřstupňového rozmezí používaného v předpovědích ani v rámci pouze nižších poloh jediného kraje, kde další upřesnění či lokalizace „třetí hodnoty“ dost dobře nejde použít. Rozmezí teploty používané v předpovědích tedy nelze považovat za takové, ve kterém se naměřené hodnoty v daném území skutečně budou vyskytovat, ale spíše za orientační rozmezí, ve kterém se bude vyskytovat většina naměřených hodnot nebo průměr naměřených hodnot. V případě uvedení tzv. třetí hodnoty by většinou nebylo možné použít nějakou konkrétní specifikaci podle světové strany nebo nadmořské výšky, ale bylo by nutno uplatnit všeobecné výrazy „místy“ a „ojediněle“, v některých případech v souvislosti s vyjasněním nebo rozpuštěním mlh apod. Další věcí je, že teplota v místech, kde není žádná meteorologická stanice, ale kde také žijí lidé nebo jsou provozovány jejich aktivity (např. zemědělství), může v některých případech být i mimo rozmezí naměřené na meteorologických stanicích, což se sice nedá dokázat, ale je to dost pravděpodobné.

Příčinou velkých teplotních rozdílů je ve většině případů výskyt inverze, která se často vyskytuje v nočních a ranních hodinách a v zimním období i celodenně. Při inverzi závisí teplota na jednotlivých stanicích na tom, zda konkrétní stanice je nad inverzí nebo pod inverzí, což záleží například na výšce inverze, vytvoření a intenzita inverze pak může záviset například na směru větru ve vztahu ke směru údolí, k závětrné či návětrné poloze ve vztahu k blízkým i nevelkým kopcům, svou roli může hrát i koryto potoka či řeky nebo stav porostu v okolí a v zimním období i stav sněhové pokrývky. S výskytem inverzí souvisí např. fakt, že nejvyšší minimum bývá nejčastěji na stanicích Ústí nad Labem-Kočkov, která je umístěna na kopci nad městem, podrobnější rozbor tohoto jevu však bude předmětem jiné studie. V menším počtu případů jsou teplotní rozdíly způsobeny pomalu postupující nebo stacionární frontou, která může rozdělit charakter počasí nejen v rámci České republiky, ale i v rámci kraje. A v letním období může rozložení teploty ovlivnit i výskyt lokálních bouřek.

Skutečností zůstává, že i když v některých případech se velké rozdíly teploty dají předem odhadnout, ne vždy se dá

předpovědět, kde se vysoké nebo nízké hodnoty vyskytnou, ale i v takových případech to ne vždy lze do všeobecné předpovědi srozumitelně formulovat.

#### Literatura:

- BERANOVÁ, J., HUTH, R., 2003. Pražský tepelný ostrov za různých synoptických podmínek. *Meteorologické zprávy*, roč. **56**, č. 5, s. 137–142. ISSN 0026-1173.
- ČHMÚ, 2016. Základní meteorologická terminologie. [online]. [cit. 12. 5. 2016]. Dostupné z WWW: [http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal\\_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P3\\_0\\_Informace\\_pro\\_Vas/P3\\_11\\_Terminologie&last=false](http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P3_0_Informace_pro_Vas/P3_11_Terminologie&last=false).
- JŮZA, P., STAROSTOVÁ, M., SKLENÁŘ, K., 2011. Naměřená minima teploty vzduchu na vybraných horských stanicích v Čechách. *Meteorologické zprávy*, roč. **64**, č. 1, s. 10–17. ISSN 0026–1173.
- JŮZA, P., 2012. Denní minima teploty vzduchu v Jizerských horách. *Meteorologické zprávy*, roč. **65**, č. 4, s. 121–126. ISSN 0026-1173.
- KŘIVANCOVÁ, S., 1991. Teplotní zvláštnosti Šumavy. *Meteorologické zprávy*, roč. **44**, č. 5, s. 143–150. ISSN 0026-1173.
- KYSELÝ, J., 2006. Prostorová proměnlivost horkých vln v České republice a letní teplotní zvláštnost jihozápadních Čech. *Meteorologické zprávy*, roč. **59**, č. 6, s. 183–189. ISSN 0026-1173.
- TOLASZ, R. et al., 2007. Atlas podnebí Česka, Praha, Olomouc: Univerzita Palackého 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1 (ČHMÚ). ISBN 978-80-244-1626-7 (UP).
- VOJVODÍK, A., 1984. Teplotní kontrasty v létě 1983 na Šumavě. *Meteorologické zprávy*, roč. **37**, č. 3, s. 77. ISSN 0026-1173.
- VOJVODÍK, A., 1986. Nejnižší teploty naměřené letos na Šumavě. *Meteorologické zprávy*, roč. **39**, č. 4, s. 123–124. ISSN 0026-1173.
- VOJVODÍK, A., 1987. Léto 1986 na Šumavě. *Meteorologické zprávy*, roč. **40**, č. 3, s. 93. ISSN 0026-1173.
- VOJVODÍK, A., 1996. Zajímavosti léta 1996 na Šumavě. *Meteorologické zprávy*, roč. **49**, č. 6, s. 189. ISSN 0026-1173.

Lektoři (Reviewers): RNDr. František Šopko, RNDr. Luboš Němec

## INFORMACE – RECENZE

### SYMPOZIUM LIVING PLANET A 5. ČESKÉ UŽIVATELSKÉ FÓRUM COPERNICUS

Ve dnech 9. až 13. května 2016 se v Kongresovém centru v Praze konalo Sympozium Living Planet, což je nejrozsáhlejší akce Evropské kosmické agentury (ESA – European Space Agency) v oblasti pozorování Země. Sympozium se koná jednou za tři roky, předchozí ročníky proběhly v Montreaux (2007), Bergenu (2010) a Edinburgu (2013). Hlavním organizátorem symposia byla ESA, dalšími spoluorganizátory byla Ministerstvo dopravy, Ministerstvo životního prostředí a Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy.

Pozorování Země nachází uplatnění v čím dál širším spektru oborů, jedná se např. o monitoring využití a pokryvu území, zemědělství, sledování infrastruktury a zastavěných území, monitoring životního prostředí, sledování atmosféry, vývoje klimatu, monitoring mimořádných událostí, jako jsou povodně, lesní požáry, zemětřesení aj. Cílem symposia bylo představit výsledky misí ESA pro pozorování Země v nejrůznějších oborech.



Symposium Living Planet 2016 se konalo v Kongresovém centru v Praze. Zdroj: ESA/M. Akad, 2016.



Dr. Martin Možný z Observatoře Doksany reprezentoval na tomto sympoziu ČHMÚ s příspěvkem na téma „Možnosti využití družicových dat pro předpověď rizika požárů ve volné krajině“.

V rámci sympoza proběhlo 5. české uživatelské fórum Copernicus (10. května 2016) s tématickým zaměřením:

- využití družicových či leteckých dat (se zaměřením na data z družic Sentinel) v oblasti zemědělství a lesnictví,
- zpracování dat z družic Sentinel,
- využívání družicových dat ve státní správě a v projektech,
- využívání služeb Copernicus,
- implementace programu Copernicus v České republice,
- rozvoj uživatelské komunity, sběr požadavků uživatelů na data a služby programu Copernicus.

Jednání uživatelského fóra bylo rozděleno do čtyř sekcí:

- Sekce 1 – Copernicus v Evropském kontextu,
- Sekce 2 – Využití dat Sentinel v zemědělství,
- Sekce 3 – Data Sentinel pro sledování krajiny,
- Sekce 4 – Uživatelská praxe.

V sekcích byly prezentovány zajímavé příspěvky o možnostech využití družicových či leteckých dat v agrometeorologii a fenologii, hydrologii, klimatologii a dalších oborech, dále zde byly představeny firmy, které se zabývají zpracováním družicových snímků v České republice (např. firma GISAT – [www.gisat.cz](http://www.gisat.cz)).

Odkaz na konferenci a další zajímavé odkazy:

- <http://copernicus.gov.cz/5.-ceske-uzivatelske-forum-copernicus>
- <http://lps16.esa.int/>
- <http://land.copernicus.eu/global>
- <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>
- <http://landweb.nascom.nasa.gov/animation/>

Lenka Hájková, Martin Možný

## KONFERENCE O STATISTICKÉ KLIMATOLOGII

Ve dnech 6. 6. až 10. 6. 2016 se v Albertě v Kanadě, v městečku Canmore konalo již 13. setkání klimatologů, meteorologů a statistiků na konferenci The 13th International Meeting on Statistical Climatology (IMSC). Tyto akce jsou pořádány každé tři roky již od roku 1979 a dávají prostor pro debatu mezi statistiky na straně jedné a klimatology, meteorology, popř. dalšími vědci příbuzných oborů na straně druhé. Letošní konference byla organizována Výborem IMSC (IMSC Steering Committee) a podpořena několika dalšími organizacemi (Pacific Climate Impacts Consortium, World Climate Research Program, Canadian Statistical Sciences Institute a Environment and Climate Change Canada).

Příspěvky byly rozděleny do následujících 11 sekcí:

- The Attribution of Extreme Weather Events and their Impacts to External Drivers of Climate Change,
- Climate and Weather Model Evaluation,
- Nonlinear Methods for Climate Extremes,
- Climate Data Homogenization and Climate Trends/Variability Assessment,
- Understanding Climate Variability and its Teleconnections under Global Warming,
- Stochastic Analysis of the Hydrologic Cycle,
- Statistical Downscaling Methods for Seasonal to Centennial Predictions and Projections,
- The Detection and Attribution Model Intercomparison Project (DAMIP),
- WCRP Grand Challenge on Climate Extremes,
- Advanced Methods for Evaluating Weather and Climate Extremes in Climate Model Simulations,
- Extreme Value Theory and its Applications.

Po minulém setkání před 3 roky, které bylo hodně zaměřeno na výsledky související s podklady pro 5. hodnotící zprávu IPCC (Mezivládní panel o změně klimatu), byla tato konference více věnována aplikacím různých statistických metod na klimatologická a meteorologická data. Objevily se informace o nové generaci klimatických modelů CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), které budou využity pro potřeby IPCC, a projektech vázaných na vyhodnocování výsledků z těchto modelů. Byl představen projekt DAMIP (Detection and attribution model intercomparison project), který má ambice vytvořit nový statistický přístup pro detekci klimatické změny a jejích příčin na základě metody maximální věrohodnosti. V budoucnu se počítá s využitím tohoto přístupu k vyhodnocování výsledků modelů CMIP6.

Byla prezentována analýza náhodného výskytu (event coincidence analysis) jako nástroj pro kvantifikaci vztahů mezi různými datovými řadami (např. výbuchy sopek a teplota vzduchu) z klimatických modelů, mezi kterými mohou být i nelineární a nestacionární vztahy.

Velká pozornost byla věnována extrémům v současném i budoucím klimatu, a to s důrazem na jejich analýzu pomocí nelineárních metod. Například vyhodnocování extrémních srážek bylo věnováno velké množství příspěvků, a to jak v současném klimatu (množství extrémních srážek se v různých dostupných datasetech liší – problém gridování), tak ve výsledcích klimatických modelů (problém předpokladu stacionarity). Většina se však věnovala denním a vícedenním úhrnům.

Velkou výzvou zůstává korektní homogenizace dat, která by měla citlivě pracovat nejen s průměrnými hodnotami, ale právě i s extrémě.

Překvapivě velmi málo příspěvků bylo věnováno sezónním a dekadním výhledům. V Evropě uživatelé vycházejí z výsledků sezónních předpovědí ECMWF (Evropské centrum pro střednědobou předpověď počasí v Readingu) – Systém 4 (prezentována sezónní předpověď extrémních indexů pro Švýcarsko), ale vzhledem k velkým nejistotám je praktické využití těchto výhledů zatím omezené a diskutabilní.

Celkově lze hodnotit tuto konferenci, na které byly v drtivě většině předneseny kvalitní a inspirující příspěvky, velmi kladně.

Sborník abstraktů je v elektronické podobě k dispozici u účastníka konference. V dohledné době by se na stránkách konference měly objevit i celé příspěvky ústních prezentací a posterů.

Stanislava Kliegrová



## POKYNY PRO AUTORY

V časopisu Meteorologické zprávy jsou publikovány původní odborné a informativní články včetně recenzí. Za odborný obsah článků odpovídají autoři. O uveřejnění článků rozhoduje redakční rada, a to se zřetelem k lektorským posudkům i předpokladu praktického uplatnění.

### FORMÁLNÍ ÚPRAVA A ROZSAH RUKOPISŮ

Rukopis je předkládán v elektronické podobě (MS Word), věcně a jazykově správně. Rukopis musí být úplný, včetně všech příloh. Název, abstrakt, klíčová slova a popisky k obrázkům a tabulkám musí být v češtině i angličtině. Rozsah článků pro časopis se udává počtem normostran (normostrana je definována jako 1 800 znaků, včetně mezer). Odborné statě max. 10 normostran, informativní články max. 4 normostrany a osobní zprávy max. 2 normostrany.

### OBECNÉ INFORMACE

- Formát A4, nastavení okrajů 2,5 cm ve všech směrech
- Písmo Times New Roman, vel. 11, řádkování 1,5
- Členění textu do kapitol (maximálně dvě číslované úrovně)

### DOPORUČENÁ OSNOVA ČLÁNKŮ

- **Název práce** – výstižný a stručný, nemá přesahovat 90 znaků
- **Autoři** – celá jména autorů (bez titulů), název a adresa instituce, kde autoři působí
- **Abstrakt** – u časopisu maximálně 1 200 znaků (včetně mezer)
- **Klíčová slova** – slouží k indexaci dokumentu, max. 7 slov nebo sousloví (řazených abecedně)
- **Úvod** – obsahuje cíle práce, pracovní hypotézy, pracovní otázky
- **Metodika, vstupní data a způsob řešení**
- **Výsledky a jejich zhodnocení** – prezentace vlastních výsledků práce
- **Diskuze** – srovnání výsledků s výsledky obdobných prací tuzemských i zahraničních, zasazení výsledků do širšího kontextu, slabé stránky metodiky apod.
- **Závěr** – zobecnění výsledků, stručně a jasně vyjádření přínosu práce, možnost aplikace v praxi, náměty na další řešení problematiky
- **Bibliografické citace** – abecedně seřazeny dle příjmení prvního autora, bez číslování

### OBRÁZKY

Vyžadované jsou obrázky dodané přímo v digitální podobě s rozlišením nejméně 300 dpi při velikosti 1:1. Obrázky se odevzdávají v některém z běžných grafických formátů (EPS, JPEG, TIFF, PNG, WMF, BMP, AI, CDR); Grafy (XLS); pokud je třeba použít nějaký odlišný formát, je nutné tuto věc konzultovat předem s redakcí. Obrázky musí mít přesně označené osy příslušnými symboly veličiny. Jednotky jsou uváděny v popisu obrázku.

### ROVNICE

Rovnice v textu i na samostatných řádcích se píšou pomocí příslušného editoru rovnic v programu MS Word. Rovnice se číslují na pravém okraji, pod vzorcem nebo rovnicí se uvádí význam jednotlivých označení. Při zpracování na počítači je třeba věnovat zvláštní pozornost vyznačení indexů, exponentů a dalších znaků (např. °C). Ve vzorcích musí být přesně vyznačeny kurzíva, tučné písmo, verzálky, řecké písmo. Při používání matematického aparátu je nutné respektovat příslušné normy ISO nebo ČSN.





## CITACE LITERATURY

Jméno tvůrce a rok vydání citovaného zdroje jsou uvedeny v textu ve formě jméno, rok v kulatých závorkách. Pokud se jméno tvůrce vyskytuje přirozeně v textu, následuje pouze rok v kulatých závorkách. Pokud mají dva nebo více zdrojů stejného tvůrce i rok vydání, odlišují se malými písmeny abecedy přiřazenými k roku vydání. V takovém případě se písmena uvádí i v závěrečném soupisu bibliografických citací. Pokud je nutné uvést dva či více zdrojů, uvádějí se v jedné kulatých závorkách a oddělují se středníkem. V případě tří a více autorů se píše do závorky pouze první a doplňuje se zkratkou et al. V případě chybějícího autora se použije jméno vydavatele (řadí se chronologicky podle roku vydání).

### *Příklad citování:*

Úhrny jsou nižší zejména v zimním období (Vavruška 2011), což potvrzuje i Coufal (1973) a lze ověřit na portále ČHMÚ (ČHMÚ 2013). Více podrobností je uvedeno v první části hodnocení meteorologických prvků na výzkumné ploše Jizerka (Balcar et al. 2012) a dalších studiích (Balcar, Slodičák 2005; Vacek 2003).

### *Bibliografické citace*

- Seznam citované literatury se umísťuje na konci článku (publikace) pod název Literatura. Seznam je řazen abecedně a není číslován.
- Bibliografické citace se obvykle uvádějí ve formě: Příjmení autora/editora, rok vydání. Název: podnázev. Pořadí vydání. Název edice a číslování. Místo vydání: nakladatelství. Rozsah. Standardní identifikátor.
- Hlavní zásady: jména autorů jsou uváděna velkými písmeny (v případě většího počtu autorů se uvádí maximálně pět autorů, dále et al. nebo aj.). Názvy seriálových publikací, tj. časopisů, ročenek, sborníků apod., uvádíme v nezkrácené podobě v kurzívě, navíc se uvádí ISBN a ISSN. Stránkování se uvádí zkratkou s. Uvádění vydání je povinné pouze v případě, že se nejedná o první vydání. Počet stran se u celé publikace neuvádí. Pokud je např. kniha napsána ve více jazycích, a stejně tak jsou uvedeny i názvy, vypíšeme je všechny. Doporučujeme oddělení čárkou.

### *Monografie*

KRŠKA, K., ŠAMAJ, F., 2001. Dějiny meteorologie v českých zemích a na Slovensku. Praha: Nakladatelství Karolinum. ISBN 80-7184-951-0.

### *Seriálová publikace*

KŘIVANCOVÁ, S., VAVRUŠKA, F., 1997. Základní meteorologické prvky v jednotlivých povětrnostních situacích na území České republiky v období 1961–1990. *Národní klimatický program České republiky*, sv. 27. Praha: ČHMÚ. ISBN 80-85813-52-1, ISSN 1210-7565.

### *Seriálová publikace – časopis*

RACKO, S., SIMON, A., SOKOL, A., 2002. Niektoré z príčin búrok v zimnom období. *Meteorologické zprávy*, roč. 55, č. 3, s. 69–81. ISSN 0026-1173.

### *Elektronická citace*

SETVÁK, M., 1999. Tornáda na území České republiky a Slovenska [online]. Český hydrometeorologický ústav [cit. 30. 11. 2000]. Dostupné z WWW: <http://www.chmi.cz/meteo/sat/torn/>.

VÍCE NA [CASMZ.CHMI.CZ](http://CASMZ.CHMI.CZ)