

cirkulaci vzduchu v přízemní vrstvě ovzduší. Špičkové naměřené koncentrace i v této čisté oblasti přesahují doporučenou nejvyšší přípustnou koncentraci ozónu v ovzduší $160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Literatura

[1] BÖHM, B. a kol.: Výzkum nových metod monitorování a hodnocení dálkového přenosu znečištění

ovzduší (EMEP, GEMS). Výzkumná zpráva ČHMÚ, Praha.

- [2] VANÍČEK, K.: Měření UV slunečního záření pomocí UV-dozimetru. Meteorologické zprávy 42, 14, 1989.
- [3] ZÁVODSKÁ, E. — ZÁVODSKÝ, D.: Súčasná zmena atmosférického ozónu a ich potenciálne ekologické následky. Meteorologické zprávy 43, 5, 1990.

Změny chemického složení sněhu v důsledku redistribuce sněhové pokrývky větrem

Ing. Zbyněk Zeman

Ústav krajinné ekologie ČSAV — pracoviště Most

John W. Pomeroy PhD

National Hydrology Research Institute — Saskatoon, Kanada

Trevor D. Davies PhD

University of East Anglia — Norwich

Martyn Tranter PhD

Southampton University — Southampton

1. Úvod

V oblastech s výskytem déletrvajících sněhové pokrývky může docházet k akumulaci znečišťujících látek ve sněhu v důsledku procesů mokré a suché depozice. Extrémní případy mokré depozice se vyskytují v pohoří Cairngorm v severním Skotsku. Roční srážkový úhrn v této oblasti se pohybuje okolo 2000 mm a jedna třetina až jedna polovina úhrnu je tvořena sněhovými srážkami. Občasný výskyt kyselých, silně znečištěných sněhových srážek výrazně ovlivňuje chemismus sněhové pokrývky. Znečištěné sněhové srážky mohou vykazovat hodnoty pH nižší než 3,0 a obsah pevných částic a organického uhlíku způsobuje, že zbarvení některých sněhových srážek je šedé až černé [1,2]. Při jarním tání dochází k rychlému vyplavení znečišťujících látek a ovlivnění chemismu vodních toků. I výskyt jediné vysoce kontaminované sněhové srážky může výrazně ovlivnit chemismus povrchových vod v příslušném povodí během jarního tání sněhové pokrývky [3].

Jednotlivé vrstvy sněhové pokrývky mohou být transportovány, navzájem smíseny a jejich chemismus ovlivněn působením větru. Redistribuce sněhové pokrývky bývá výrazná v oblastech, kde větrná expozice je kombinována s minimálním výskytem vegetace. Pohoří Cairngorm je takovou oblastí a chemické složení sněhové pokrývky je prostorově variabilní [4]. Přestože prostorová variabilita složení sněhové pokrývky byla kvantifi-

kována, procesy, které tuto variabilitu způsobují, nebyly v této souvislosti experimentálně zkoumány. Jestliže jsou sněhové částice unášeny větrem, mění se jejich fyzikální vlastnosti — jsou rozrušovány nárazy, získávají elektrostatický náboj a dochází k jejich sublimaci [5, 6]. Redistribuce sněhu tak může být důležitým faktorem při vývoji chemismu sněhové pokrývky.

V tomto příspěvku předkládáme výsledky měření změn chemického složení větrem unášeného sněhu, založených na zjišťování hmotového toku unášeného sněhu a stanovení koncentrací dominujících iontů v unášeném sněhu a ve vzorcích, které reprezentovaly (1) větrem erodovanou povrchovou vrstvu sněhu a (2) redistribuovaný sníh v místech depozice. Cílem bylo zjistit, jaký vliv má proces sublimace na zvýšení koncentrace znečišťujících látek ve větrem unášeném sněhu. Zpracování fyzikálních měření z hlediska poznání procesu sublimace a dalších jevů spojených se změnami vlastností větrem unášených sněhových částic bude publikováno jinde [7].

2. Měření

2.1 Terénní odběry a měření

Odběry a měření byly prováděny na náhorní planině pohoří Cairngorm v severním Skotsku ($57^{\circ}07'$ sev. š., $3^{\circ}38'$ záp. d.). Pohoří Cairngorm je zvláště vhodné pro daný druh experimentu, neboť je vystaveno častým a silným sněhovým bou-

řím [8]; atmosférické srážky často „vymývají“ silně znečištěné vzduchové masy přicházející (1) z průmyslových oblastí na jihu a (2) z východní Evropy [9].

Odběrová zařízení byla umístěna na náhorní rovině v nadmořské výšce 1135 m — v blízkosti vrcholu Cairn Gorm v asi 300 metrovém morfologicky stejnorodém úseku orientovaném jihozápadním směrem — což je v této oblasti směr převládajících větrů. Vítr v okolí Cairn Gorm (1245 m n. m.) dosahuje rychlosti $88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, sněhové srážky se mohou vyskytnout v průběhu celého roku. Sněhová pokrývka na náhorní planině je proměnlivá a často bývá redistribuována větrem do okolních svahových prohloubenin. Výška akumulovaného sněhu v údolí Ciste Mhearad v těsném sousedství náhorní planiny může dosáhnout až 20 m. Eroze sněhové pokrývky odhaluje do výše asi 30 cm ledem pokryté zaoblené balvany, za nimiž se tvoří malé závěje. Náhorní planina leží nad pásmem a řídká vegetace je tvořena bylinami alpských/arktických druhů [10].

Byly používány dva meteorologické stožáry. Na větším byly instalovány anemometry, detektor větrem unášených sněhových částic [11], termistory a hygrometry; na menším stožáru byla umístěna zařízení pro odběr větrem unášeného sněhu a měřidlo elektrostatického náboje sněhových částic. Zařízení pro odběr vzorků unášeného sněhu sestávalo z PVC hubice (vnitřní průměr 40 mm), která tvořila vstupní otvor do pytlíku z nylonové tkaniny o objemu $0,03 \text{ m}^3$. Průměr ok nylonové tkaniny byl $80 \mu\text{m}$ a umožňoval zachycení sněhových částic, zatímco proudící vzduch tkaninou procházel. Hygrometry a termistory byly instalovány ve výši 0,3 a 0,9 m. Detektory částic a anemometry byly umístěny ve čtyřech výškách logaritmicky vzrůstajících od místa těsně nad povrchem sněhové pokrývky do výše 2,0 m.

Jednotlivý odběr spočíval v umístění čtyř odběrových zařízení pro vzorkování větrem unášeného sněhu do držáků na stožáru ve výškách 0,1; 0,2; 0,5 a 0,9 m a sejmutí víček z hubic odběrových zařízení po dobu, než se spodní odběrová zařízení naplnila sněhem. Doby jednotlivých odběrů se pohybovaly v rozmezí 10 až 67 minut. Poté byla na odběrová zařízení nasazena víčka, zařízení byla sejmuta z držáků a přenesena do stanu, kde byl obsah pytlíku vyprázdněn do čistých polyethylenových lahví. Lahve byly potom uzavřeny do čistých plastických sáčků. Vzorkovací zařízení byla každý den čištěna deionizovanou vodou. Pokusy v laboratoři bylo ověřeno, že nedochází k měřitelnému ovlivnění koncentrací stanovovaných iontů v důsledku interakce sněhu a odběrového zařízení. Rovněž bylo ověřeno, že množství zachycených iontů nekoresponduje s množstvím vzduchu prošlého odběrovým zařízením a že stanovované ionty jsou tedy obsažené ve sněhu a nikoliv volně v atmosféře.

Během každého odběru byly rovněž odebírány vzorky z povrchu sněhové pokrývky. Ve směru proti vanoucímu větru byla vzorkována místa, kde docházelo k erozi sněhové pokrývky, a v blízkosti stožáru byla vzorkována místa, kde docházelo k depozici a akumulaci unášeného sněhu. Tato místa byla identifikována vizuálně. Eroze byla patrná na větrem exponovaných místech sněhové pokrývky zřetelnou stratifikací, zatímco depozice byla identifikovatelná v místech, kde se akumuloval lehčí sníh za terénní překážkou. Asi dvoucentimetrová vrstva sněhu z těchto míst byla vzorkována pomocí lopatek s teflonovým povrchem do čistých polyethylenových lahví. Tímto způsobem bylo pro každý odběr získáno asi 0,5 l vzorku sněhu z erodujících míst a asi 0,5 l vzorku deponovaného sněhu.

Jednotlivý odběr tedy představoval získání celkem šesti vzorků (vzorky unášeného sněhu ze 4 výšek, 1 vzorek erodovaného sněhu a 1 vzorek deponovaného sněhu).

2.2 Chemická analýza vzorků

Získané vzorky byly přechovávány v mrazícím boxu. V laboratoři byly lahve se vzorky sněhu ponořeny do horké vody a dříve, než jejich teplota dosáhla $10 \text{ }^\circ\text{C}$, byly získané vodné roztoky zfiltrovány (filtry Oxoid $0,45 \mu\text{m}$) za sníženého tlaku. Kapalné vzorky byly přechovávány při teplotě $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Koncentrace Cl^- , NO_3^- a SO_4^{2-} byly stanovovány na principu iontové chromatografie (Dionex 2000, Ion Chromatograph). Amonné ionty byly stanovovány fotometricky [12] a koncentrace Na^+ , K^+ a Mg^{2+} metodou atomové absorpční spektrofotometrie (Pye Unicam SP9 AA Spectrophotometer).

Množství vzorku sněhu získaná jednotlivými odběrovými zařízeními umístěnými na stožáru byla nepřímou úměrná výšce umístění odběrového zařízení nad terénem, a proto v některých případech množství vzorků získaných z výše umístěných odběrových zařízení nedovolovala provést veškerá stanovení.

3. Výsledky

3.1 Měření toku unášeného sněhu

Vyhovující vzorkování a měření bylo provedeno pro 30 odběrů uskutečněných během 5 dnů koncem března 1989. Čas nutný k naplnění kteréhokoliv ze vzorkovacích zařízení určoval dobu trvání jednotlivého odběru. Průměrná doba odběru byla 23 minut, minimální 10 minut a maximální 67 minut. Odběry tvoří 4 skupiny podle data měření. **Tabulka 1** sumarizuje meteorologickou situaci pro každou skupinu. Celkově lze říci, že v poměrech horských oblastí severního Skotska se jednalo o období relativně mírné a suché.

Vertikální profily rychlostí větru měřené do výšky

Tabulka I. Přehled povětrnostních podmínek na planině Cairngorm

odběr č.	datum (březen 1989)	pokryv terénu	max. hmotový tok částic [kg·m ⁻² ·s ⁻¹]	průměrná teplota [°C]	max. rychlost větru [m·s ⁻¹]	převládající směr větru
1–7	20.–21.	90 % led, kameny 10 % sníh	1,48	–5,5	12,1	JZ
8–16	22.	100 % čerstvý sníh	1,91*	–5,5	14,0	JZ
17–22	28.	70 % čerstvý sníh, 30 % kameny	0,25	–2,5	11,0	JZ
23–30	29.	95 % kameny, půda 5 % sníh	0,62	–3,0	23,5	JJV

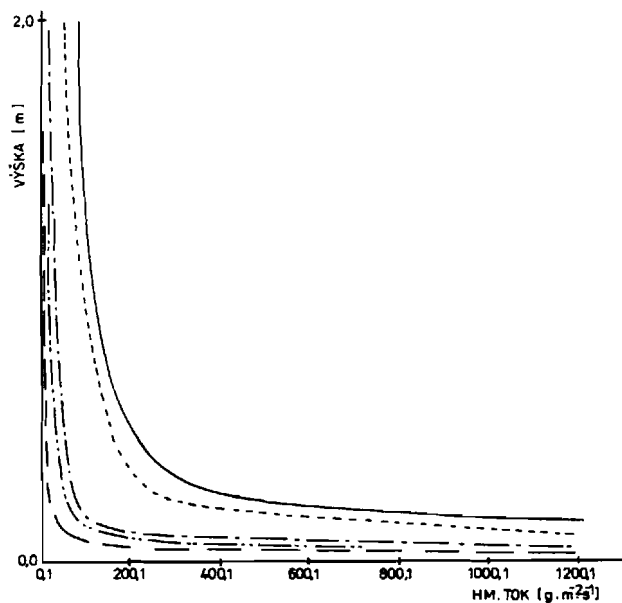
* během sněžení

Tabulka II. Průměrné koncentrace iontů v erodujícím sněhu [mg·l⁻¹]

Odběr č.	H ⁺ (pH)	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺
1–7	5,0	3,0	0,71	0,65	0,081	1,3	0,096	0,14
8–16	5,1	1,6	1,2	0,83	0,022	0,58	0,077	0,062
17–22	4,4	2,1	1,5	0,88	0,079	0,92	0,11	0,14
23–30	4,5	2,4	1,1	1,1	0,085	0,92	0,066	0,13

1,8 m sledují poměrně dobře logaritmické zvýšení.

Typické vertikální profily toku unášeného sněhu pro jednotlivé skupiny odběrů jsou vyneseny na **obr. 1**, společně s vertikálními profily, které změřil Pomeroy [13] v podmínkách souvislé sněhové pokrývky na kanadské prérii. Hmotové toky měřené na náhorní planině Cairngorm vykazují výraznější pokles s rostoucí výškou, než je tomu v případě souvislé sněhové pokrývky. Výjimkou je odběr 10, který probíhal za silného sněžení a při téměř souvislé sněhové pokrývce. Hmotové toky



Obr. 1. Typické vertikální profily toku unášeného sněhu.
 - - - odběr č. 18, - · - · - odběr č. 24, · · · · · odběr č. 6,
 - - - - - odběr č. 10, ————— měření Pomeroye z r. 1988.

měřené při nesouvislé sněhové pokrývce jsou přibližně o jeden řád nižší než v případě odběru 10 a měření v podmínkách souvislé sněhové pokrývky v Kanadě.

Podobný jev pozoroval Meister [14] při měření v Alpách, kde zaznamenal prudký pokles toku unášeného sněhu s výškou – s výjimkou měření prováděných za sněžení. Meister přičítal neobvykle prudký pokles měřených hodnot nedostatečné délce terénního úseku (malé náhorní planiny), kde byla měření prováděna. Velikost úseku neumožňovala úplnou difúzi sněhu. Námi měřené větrné profily podporují vznik turbulentních přenosových mechanismů, což spolu s 300 metrovou délkou terénního úseku umožňuje dobrou difúzi nad povrchem, jestliže sněhová pokrývka by byla souvislá [14]. Odběry 6, 19 a 24 představují sníh unášený větrem z povrchu míst se souvislou sněhovou pokrývkou vzdálených několik stovek metrů od měřicího místa ve směru proti vanoucímu větru. Tento sníh byl unášen 300 m přes úsek s nesouvislou pokrývkou k měřicímu místu.

Vzdálenost, kterou unášený sníh urazil, byla dostatečná, aby došlo k výrazné sublimaci sněhových částic. Protože „doplňení“ toku unášeného sněhu sněhem erodujícím z povrchu sněhové pokrývky bylo pro odběry 1–7, 17–22 a 23–30 minimální, představují tyto odběry sníh výrazně ovlivněný sublimací. Sníh ovlivněný sublimací je obsažen i v odběrech 8–16, ale možnost jeho „doplňení“ čerstvou sněhovou srážkou a sněhem z povrchu pokrývky byla při těchto odběrech vyšší.

3.2 Chemismus sněhové pokrývky

Střední hodnoty koncentrací iontů v povrchové vrstvě sněhové pokrývky podléhající větrné erozi

jsou pro jednotlivé skupiny odběrů uvedeny v **tabulce II**. Tyto hodnoty jsou na území západní Evropy typické pro středně kyselé srážky převážně oceánského původu [15]. V případě odběrů 1 až 7 erodovaný sníh obsahoval nejvyšší koncentrace mořské soli (Na^+ , Mg^{2+} , Cl^-) a vysoké koncentrace NH_4^+ , ale poměrně nízké koncentrace H^+ , NO_3^- a SO_4^{2-} . Toto složení indikuje relativně čisté srážky oceánského původu. Erodující sníh u odběrů 8–16 vykazuje značně odlišné složení a odráží složení sněhové srážky z téhož dne, patrně ovlivněné znečištěným vzduchem nad pevnou.

Koncentrace H^+ , NH_4^+ , Na^+ , Mg^{2+} a Cl^- představují třetinu až polovinu hodnot stanovených ve vzorcích z předcházejícího dne a NO_3^- a SO_4^{2-} se vyskytují ve vyšších koncentracích. Chemické složení vzorků erodujícího sněhu u odběrů 17–30 odráží složení čerstvé kyselé sněhové srážky ze dne 28. března. Avšak i tento sníh vykazuje aciditu o několik řádků nižší, než bylo několikrát v minulosti zaznamenáno v případě výskytu šedé/černé sněhové srážky v pohorí Cairngorm [1]. U odběrů 17–30 jsou koncentrace mořské soli nižší než u skupiny odběrů 1–7. Ve skupině

Tabulka III. Přehled koncentrací stanovovaných iontů [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$] – odběry 8–16

číslo odběru – druh vzorku *	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}
8 – E	3,8	1,2	0,96	0,032	1,7	0,12	0,20
D	1,3	1,1	<0,010	0,025	–	–	–
1	1,3	1,2	0,77	0,032	–	–	–
2	2,2	2,3	0,84	–	–	–	–
9 – E	1,2	1,7	<0,010	0,013	0,24	0,082	0,017
D	1,5	1,2	<0,010	0,072	0,40	0,10	0,031
1	1,4	1,1	<0,010	0,032	0,40	0,17	0,014
2	2,0	1,7	0,94	0,11	–	–	–
3	3,5	1,7	2,2	–	–	–	–
4	1,9	1,4	0,76	–	–	–	–
10 – E	3,0	1,1	0,83	0,052	1,5	0,14	0,15
D	1,1	1,5	<0,010	0,049	0,24	0,068	0,024
i	1,9	1,1	0,99	0,061	0,54	0,19	0,027
2	1,7	1,2	0,66	0,031	0,61	0,17	0,029
3	2,6	1,2	0,94	0,076	–	–	–
4	3,3	1,9	1,1	–	–	–	–
11 – E	1,3	1,1	0,70	0,034	0,45	0,16	0,042
D	1,1	1,0	<0,010	0,036	0,32	0,086	0,031
1	1,3	1,1	<0,010	0,036	0,36	0,13	0,024
2	1,4	1,8	0,72	0,10	0,43	0,16	0,037
3	3,3	1,6	0,99	–	–	–	–
4	2,4	1,4	1,0	–	–	–	–
12 – E	0,83	<0,010	<0,010	0,022	0,20	0,022	0,017
D	0,89	1,0	<0,010	0,043	0,22	0,047	0,020
1	1,1	1,1	<0,010	0,069	0,43	0,11	0,031
2	1,2	0,89	<0,010	–	0,46	0,16	0,033
3	2,5	1,7	0,93	0,052	–	–	–
4	3,8	2,3	1,1	–	–	–	–
13 – E	1,4	0,81	<0,010	0,022	0,36	0,024	0,041
D	0,90	0,85	<0,010	0,036	0,23	0,043	0,021
1	1,3	1,6	<0,010	0,018	0,37	0,086	0,031
2	3,1	2,1	0,93	–	–	–	–
14 – E	1,2	1,1	<0,010	0,023	0,30	0,060	0,027
D	1,4	2,6	<0,010	0,041	0,38	0,060	0,036
1	2,4	1,1	0,76	0,034	0,83	0,25	0,079
2	1,9	1,1	0,79	0,025	0,75	0,16	0,072
3	1,5	0,95	0,68	0,038	0,57	0,11	0,059
4	2,3	1,2	0,77	0,029	0,84	0,20	0,055
15 – E	1,0	<0,010	<0,010	0,011	0,29	0,061	0,031
D	1,3	1,0	<0,010	0,013	0,33	0,056	0,029
1	1,4	0,97	0,62	0,036	0,55	0,17	0,047
2	1,4	0,89	<0,010	0,029	0,55	0,11	0,056
3	1,8	1,0	0,79	0,052	–	–	–
4	3,6	1,8	0,94	0,014	–	–	–
16 – E	1,1	<0,010	<0,010	0,011	0,32	0,031	0,031
D	1,8	1,1	0,72	0,036	0,61	0,099	0,060
1	1,2	0,78	<0,010	0,022	0,45	0,093	0,040
2	1,3	0,77	<0,010	0,027	0,51	0,10	0,048
3	1,7	1,2	0,69	0,11	1,03	0,33	0,075
4	1,9	1,1	0,78	0,072	–	–	–

* E – erodovaný sníh
D – deponovaný sníh
1 – unášený sníh ve výšce 0,1 m

2 – unášený sníh ve výšce 0,2 m
3 – unášený sníh ve výšce 0,5 m
4 – unášený sníh ve výšce 0,9 m

odběrů 17–30 se rovněž vyskytují nejvyšší koncentrace NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ a K^+ v průběhu celého experimentu.

3.3 Vliv redistribuce větrem na chemismus sněhu

V tabulkách III a IV jsou uvedeny koncentrace stanovovaných iontů pro skupinu odběrů 8–16, resp. 23–30 a na obr. 2 jsou průměrné koncentrace iontů ve sledovaných typech sněhu (sníh erodovaný z povrchové vrstvy, větrem transportovaný sníh v místech deponice a unášený sníh ve čtyřech výškách nad povrchem). Hodnoty na obr. 2 jsou poměrné koncentrace – vztažené k příslušným hodnotám koncentrací erodovaného sněhu. Jsou uváděny hodnoty pro skupinu odběrů 8–16 a 23–30, kdy podmínky odběrů byly navzájem výrazně odlišné. Odběry 8–16 (obr. 2a) byly pro-

váděny za sněžení a v podmínkách, kdy byl sníh unášen nad souvislou sněhovou pokrývkou, zatímco odběry 23–30 (obr. 2b) byly prováděny za podmínek, kdy sníh erodovaný ze sněhem zaplněného údolí Ciste Mhearad sublimoval při unášení nad nesouvislou sněhovou pokrývkou.

Typ erodovaného sněhu byl odlišný u prováděných skupin odběrů: u odběrů 8–16 se jednalo o čerstvou sněhovou srážku v místě měření, zatímco u odběrů 23–30 se jednalo o starší sníh na okraji údolí Ciste Mhearad. Průměrné koncentrace iontů jsou vyšší ve vzorcích větrem unášeného sněhu v porovnání s koncentracemi v erodovaném sněhu s výjimkou koncentrací Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ a Mg^{2+} ve vzorcích z nejnižšího odběrového místa u skupin odběrů 8–16 a koncentrací

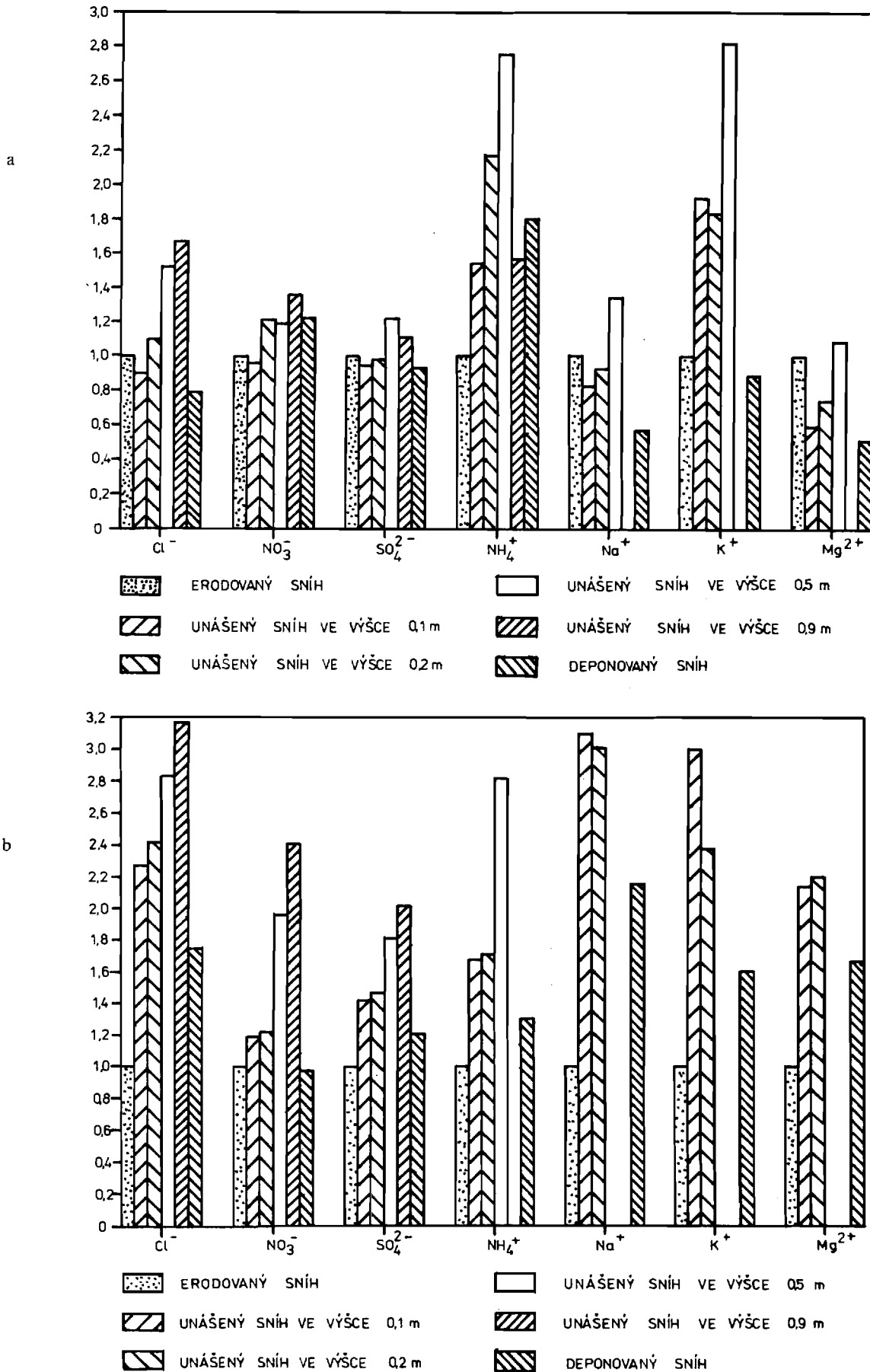
Tabulka IV. Přehled koncentrací stanovovaných iontů [mg.l^{-1}] – odběry 23–30

číslo odběru – druh vzorku *	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}
23 – E	1.9	1.2	0.86	0.059	0.81	0.051	0.11
D	1.1	1.1	0.81	0.081	0.32	0.018	0.044
1	6.6	1.1	1.7	0.12	3.4	0.17	0.36
2	7.2	1.2	1.9	0.12	3.5	0.19	0.37
3	8.0	1.8	2.1	–	–	–	–
4	8.9	3.1	2.5	–	–	–	–
24 – E	1.4	1.1	0.82	0.068	0.15	0.035	0.065
D	4.7	1.0	1.4	0.076	2.4	0.099	0.26
1	6.2	1.5	1.7	0.12	3.4	0.16	0.34
2	7.0	1.4	1.8	0.15	–	–	–
3	6.9	2.9	2.2	–	–	–	–
4	7.0	3.5	2.1	–	–	–	–
25 – E	2.0	1.4	1.1	0.072	0.84	0.054	0.099
D	1.1	1.2	0.97	0.051	0.29	0.035	0.041
1	5.4	1.1	1.6	0.13	2.7	0.14	0.30
2	5.7	1.5	1.8	0.17	2.9	0.15	0.31
3	6.5	2.3	2.2	–	–	–	–
4	7.8	3.1	2.4	–	–	–	–
26 – E	4.3	1.4	1.6	0.12	2.3	0.12	0.23
D	6.9	1.3	1.9	0.13	3.5	0.14	0.38
1	4.9	1.1	1.6	0.096	2.4	0.12	0.26
2	5.0	1.1	1.5	0.12	2.6	0.12	0.27
3	6.1	1.6	1.9	0.17	–	–	–
4	6.9	1.8	2.1	–	–	–	–
27 – E	1.9	1.3	1.2	0.063	0.74	0.046	0.096
D	–	–	–	–	–	–	–
1	4.9	1.4	1.4	0.14	–	0.20	0.25
2	5.1	1.1	1.5	0.12	2.6	0.14	0.27
3	5.9	1.6	1.7	0.16	–	–	–
4	6.2	1.8	2.0	–	–	–	–
28 – E	3.8	1.1	1.4	–	1.7	0.079	0.22
D	5.7	1.6	1.6	0.15	2.7	0.21	0.30
1	4.9	1.3	1.6	0.13	2.5	0.22	0.25
2	5.1	1.4	1.5	0.15	2.4	0.14	0.26
3	6.3	2.2	1.9	0.26	3.3	0.26	0.32
4	6.6	1.8	1.9	0.18	–	–	–
29 – E	2.8	0.63	1.2	0.090	0.27	0.099	0.18
D	5.0	0.70	1.3	0.17	2.4	0.12	0.26
1	5.3	0.81	1.3	0.14	2.7	0.21	0.28
2	5.7	1.6	1.5	0.19	2.7	0.20	0.30
3	8.1	2.6	2.2	0.36	–	–	–
4	10.0	3.3	2.8	–	–	–	–
30 – E	1.2	0.62	0.77	0.12	0.58	0.047	0.077
D	5.0	0.55	1.5	0.10	2.3	0.12	0.29

* E – erodovaný sníh
D – deponovaný sníh
1 – unášený sníh ve výšce 0,1 m

2 – unášený sníh ve výšce 0,2 m
3 – unášený sníh ve výšce 0,5 m
4 – unášený sníh ve výšce 0,9 m

Obr. 2. Průměrné koncentrace iontů ve sledovaných typech sněhu — vztahené k příslušným hodnotám koncentrací v erodovaném sněhu. a) skupina odběrů 8–16, b) skupina odběrů 23–30.



Na⁺ a Mg²⁺ ve vzorcích z druhého nejnižšího odběrového místa u téže skupiny odběrů.

Pro hodnocení rozdílu koncentrací v erodovaném a větrem unášeném sněhu byly všechny hodnoty koncentrací v unášeném sněhu porovnány s hodnotami koncentrací v erodovaném sněhu za použití Studentova t-testu. Pravděpodobnost (0–1), že měřené koncentrace odrážejí rozdílnost mezi erodovaným a unášeným sněhem, je pro každý ion a skupinu odběrů uvedena v **tabulce V**. Rozdílnost mezi oběma skupinami se projevuje v příslušných hodnotách pravděpodobnosti. U odběrů 23–30 pravděpodobnost, že vzorky unášeného sněhu jsou koncentrovanější, nabývá hodnoty 0,99 a vyšší. U odběrů 8–16 pouze NH₄⁺ a K⁺ vykazuje tuto pravděpodobnost a další nejvyšší je 0,84 pro Cl⁻.

Tabulka V. Pravděpodobnost zvýšení koncentrace iontů v unášeném sněhu

Odběr č.	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺
8–16	0,836	0,713	—	0,991	0,032	0,997	—
23–30	0,999	0,989	0,999	0,996	0,999	0,999	0,999

Pomocí F-testu byly srovnávány koncentrace iontů v erodovaném sněhu a ve sněhu akumulovaném v místech depozice (počty odebraných vzorků byly stejné). Pravděpodobnost, že měřené koncentrace erodovaného a akumulovaného sněhu jsou rozdílné, je pro každý ion a skupinu odběrů uvedena v **tabulce VI**. U odběrů 8–16 pouze NH₄⁺ vykazuje pravděpodobnost vyšší než 0,8, že akumulovaný sníh bude koncentrovanější a Mg²⁺, Na⁺ a Cl⁻ vykazují pravděpodobnost vyšší než 0,7, že jejich koncentrace budou vyšší v erodovaném sněhu. U odběrů 23–30 je akumulovaný sníh koncentrovanější s ohledem na koncentrace těchto iontů (seřazených podle velikosti diference): Na⁺ > Cl⁻ > Mg²⁺ > K⁺ > SO₄²⁻ > NH₄⁺. NO₃⁻ nevykazuje významné rozdíly koncentrací v akumulovaném a unášeném sněhu. Pravděpodobnost příslušných zvýšení koncentrace v akumulovaném sněhu je: minimálně 0,9 pro Na⁺, Mg²⁺ a Cl⁻; 0,8 pro K⁺ a SO₄²⁻ a 0,75 pro NH₄⁺.

Změny koncentrace iontů ve větrem unášeném sněhu v závislosti na výšce odběru sněhu (0,1; 0,2; 0,5; 0,9 m) byly hodnoceny na základě analýzy

Tabulka VI. Pravděpodobnost zvýšení/snížení koncentrace iontů v deponovaném sněhu

Odběr č.	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺
8–16	0,728*	0,661	0,363*	0,977	0,758*	0,305*	0,777*
23–30	0,934	0,130	0,807	0,784	0,943	0,856	0,892

* Koncentrace v deponovaném sněhu nižší než v erodovaném sněhu.

rozptylu pro každý ion v rámci skupin odběrů. U odběrů 8–16 vykazují ionty zvýšení koncentrací s rostoucí výškou vzorkování a lze je podle tohoto kritéria seřadit následovně: Cl⁻ > Na⁺ > Mg²⁺ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > K⁺ > SO₄²⁻. Změny jsou významné na 1% hladině významnosti u Cl⁻, 10% hladině u Na⁺, 20% hladině u Mg²⁺, NO₃⁻ a NH₄⁺ a pouze 35% hladině u K⁺. U odběrů 23 až 30 pouze anionty vykazovaly významné zvýšení koncentrace s výškou vzorkování. (Koncentrace kationtů byly zjištěny pouze pro dvě nejnižší místa odběrů (0,1 a 0,2 m)). Koncentrace Na⁺ a K⁺ se snižovaly s výškou, ale pouze snížení koncentrace K⁺ bylo významné alespoň na 25% hladině významnosti. Ionty, které zvyšovaly svou koncentraci s rostoucí výškou, lze podle tohoto kritéria seřadit následovně: SO₄²⁻ > NO₃⁻ > Cl⁻ > NH₄⁺ > Mg²⁺. Změny jsou významné na 1% hladině významnosti u SO₄²⁻, NO₃⁻ a Cl⁻ a na 5% hladině významnosti u NH₄⁺.

4. Diskuse

Lze pozorovat rozdíly v chování jednotlivých iontů v rámci jednotlivých skupin odběrů a mezi skupinami odběrů. V případě odběrů 23–30, kdy experimentální podmínky byly téměř ideální, se nabízí možnost vysvětlit výraznější růst koncentrace SO₄²⁻ a NO₃⁻ s rostoucí výškou odběru tím, že docházelo k erozi z relativně znečištěné a kyselé vrstvy sněhu. Sněhové srážky tohoto typu mohou vykazovat nehomogenní prostorovou distribuci SO₄²⁻ a NO₃⁻, ať už v rámci jednotlivých krystalů, sněhových vloček nebo v rámci objemu příslušné sněhové vrstvy. Např. v krystalech sněhu bývají složky odpovídající mořské soli (Na⁺, Mg²⁺ a Cl⁻) rovnoměrně zastoupeny v objemu krystalů, zatímco SO₄²⁻ a NO₃⁻ (odpovídající kyselé složce) se mohou nacházet ve zvýšené koncentraci ve vnější části krystalů. Při větrné erozi znečištěné vrstvy a částečném rozpadu částic při unášení je tak vyšší pravděpodobnost vzniku většího množství malých částic s relativně vysokou koncentrací SO₄²⁻ a NO₃⁻. Nižší hmotnost a větší specifický povrch (podléhající sublimaci) částic pak mohou být příčinami pozorovaného jevu.

V případě odběrů 8–16 je zřejmé výrazné ovlivnění výsledků měření v důsledku probíhající sněhové srážky. Docházelo patrně také ke značné erozi starší sněhové vrstvy odpovídající čistým sněhovým srážkám oceánského původu s relativně vysokým obsahem Na⁺, Mg²⁺ a Cl⁻. Probíhající sněhová srážka byla znečištěná a její složka málo ovlivněná sublimací ovlivnila složení vzorků unášeného a zejména deponovaného sněhu. Rozdílné chování iontů u odběrů 8–16 v porovnání s odběry 23–30 tomuto pozorování odpovídá.

5. Závěr

Experimentální měření provedená v pohoří Cairngorm v severním Skotsku potvrdila, že

v průběhu redistribuce sněhu větrem dochází ke změnám koncentrací látek rozpuštěných ve sněhu. Koncentrace dominujících kationtů a aniontů mohou být až třikrát vyšší ve větrem unášeném sněhu v porovnání s koncentracemi v povrchové vrstvě sněhové pokrývky erodované větrem a až dvakrát vyšší ve sněhu akumulujícím se po redistribuci než v erodovaném sněhu.

Změny, ke kterým v důsledku redistribuce sněhu větrem dochází, lze charakterizovat takto:

- Koncentrace iontů ve větrem unášeném sněhu jsou zvýšené v porovnání s koncentracemi v povrchové vrstvě sněhové pokrývky a zvyšující se ve vertikálním směru.
- Zvýšení koncentrací je výraznější v podmínkách bez souběžné sněhové srážky a při výskytu nesouvislé sněhové pokrývky; tedy v podmínkách, kdy sněhové částice byly ve větší míře podrobeny transportu větrem a sublimaci.
- Koncentrace iontů ve sněhu akumulujícím se po redistribuci jsou zvýšené v porovnání s hodnotami koncentrací v erodovaném sněhu.
- Zvýšení koncentrací iontů v akumulujícím se sněhu je výraznější v podmínkách, kdy sněhové částice byly ve větší míře podrobeny transportu větrem a sublimaci.

Akumulace sněhu s podstatně zvýšeným obsahem znečišťujících látek v určitých místech terénu může při jarním tání sněhu nepříznivě ovlivnit příslušný ekosystém. V některých případech může popsáný jev přispívat k vysvětlení lokálních diferencí v odezvě přírodního systému na imisní zátěž. Sezónní aplikace umělých terénních překážek na vhodných místech sněhové pokrývky představuje teoretickou možnost částečně řídit proces redistribuce sněhu a do jisté míry tak chránit ta citlivá místa ekosystému, která jsou zvýšenou akumulací sněhu negativně ovlivněna.

Literatura

- [1] DAVIES, T. D. et al.: Black acidic snow in the remote Scottish Highlands. *Nature*, 312, 1984, č. 5989, s. 58–61.
- [2] DAVIES, T. D. et al.: Chemical composition of snow in the remote Scottish Highlands. In NATO Advanced Study Institute Series C 252. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1988, s. 517–539.
- [3] TRANTER, M. et al.: The impact of a single black snowfall on streamwater chemistry in the Scottish Highlands. *Nature*, 332, 1988, č. 6167, s. 826–829.
- [4] TRANTER, M. et al.: The composition of snowfall, snowpack and meltwater in the Scottish Highlands — evidence for preferential elution. *Atmospheric Environment*, 20, 1986, č. 3, s. 517–525.
- [5] POMEROY, J. W.: A process-based model of snow drifting. *Annals of Glaciology*, 13, 1989, s. 237–240.
- [6] SCHMIDT, R. A.: Vertical profiles of wind speed, snow concentration and humidity in blowing snow. *Boundary-Layer Meteorology*, 23, 1982, s. 223–246.
- [7] POMEROY, J. W. et al.: Blowing snow measurement techniques: application to the study of snow chemistry in extreme environments. (přípraveno k publ.)
- [8] GREEN, F. H. W.: Climate and Weather. In: *The Cairngorms, their Natural History and Scenery*. 1. vyd. Perth, Scotland, The Melvern Press 1981.
- [9] DAVIES, T. D. et al.: Heavily-contaminated snowfalls in the remote Scottish Highlands: a consequence of regional-scale mixing and transport. *Atmospheric Environment*. (v tisku)
- [10] RACTLIFFE, D. A.: The Vegetation. In: *The Cairngorms, their Natural History and Scenery*. 1. vyd. Perth, Scotland, The Melvern Press 1981.
- [11] BROWN, T. — POMEROY, J. W.: A blowing snow particle detector. *Cold Regions Science and Technology*, 16, 1989, s. 167–174.
- [12] PARSONS, T. R. — MAITA, Y. — LALLI, C. M.: Determination of Ammonia. In: *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Oxford, Pergamon Press 1984.
- [13] POMEROY, J. W.: Wind Transport of Snow. Ph.D. Thesis, Division of Hydrology, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1988.
- [14] MEISTER, R.: Influence of strong winds on snow distribution and avalanche activity. *Annals of Glaciology*, 13, 1989, s. 195–201.
- [15] SNOEYINK, V. L. — JENKINS, D.: *Water Chemistry*, Toronto, John Wiley and Sons 1980.