

NÁMRAZA JAKO RELEVANTNÍ SOUČÁST ATMOSFÉRICKÉ DEPOZICE V HORSKÝCH OBLASTECH

Iva HUNOVÁ^{a,b}

^a Český hydrometeorologický ústav, Úsek kvality ovzduší, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4 – Komořany,

^b Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí, Benátská 2, 120 00 Praha 2, Česká republika
iva.hunova@chmi.cz

Došlo 21.2.23, přijato 7.3.23.

Príspevek predstavuje námrazu jako zajímavý hydrometeor, který může významně ovlivnit člověka a jeho životní prostředí. Shrnuje současné poznatky o vzniku námrazy a faktorech, které ovlivňují její tvorbu, a ukazuje důsledky a dopady, ke kterým může námraza vést. Kromě fyzikálních vlastností se článek věnuje i chemickému složení námrazy a poukazuje na to, do jaké míry se může námraza podílet na atmosférické depozici látek a jak významnou roli v tomto ohledu hraje zejména lokálně v horském prostředí.

Klíčová slova: námraza, atmosféra, atmosférická depozice, znečištění ovzduší

Obsah

1. Úvod
2. Co to je námraza a jak vzniká
3. Katastrofy způsobené námrazou
4. Námraza jako významná součást atmosférické depozice
5. Poznatky o chemickém složení námrazy v České republice
6. Závěr

1. Úvod

Cílem této studie – rešerše dostupné odborné literatury – je přiblížit čtenářům námrazu jako zajímavý hydrometeor a kromě stručného představení faktorů, které ovlivňují její tvorbu, a zmínění jejích možných závažných důsledků se zaměřit zejména na přehledné představení současných poznatků o jejím chemickém složení a příspěvku k atmosférické depozici.

2. Co to je námraza a jak vzniká

Námrazou rozumíme bílou, mléčně zakalenou zrnitou usazeninu tvořenou ledovými krystaly vznikající z mlhy nebo dešťových kapiček při teplotách pod bodem mrazu, když přechlazené vodní kapky přijdou do kontaktu s povrchem, jehož teplota je též buď pod bodem mrazu, nebo lehce nad ním^{1,2}. Přechlazené vodní kapky jsou takové, které si udržují své kapalně skupenství navzdory teplotám pod bodem mrazu². Námraza vzniká nejčastěji při teplotách vzduchu -2 až -10 °C (cit.²). Intenzita námrazy

závisí především na okolní teplotě vzduchu a rychlosti větru a souvisí s výskytem určitých synoptických situací³. Tvorba a usazování námrazy nezávisí na druhu podkladového materiálu, ale závisí na jeho tloušťce⁴. Vznik námrazy je významně ovlivňován typem krajiny, koreluje mnohem více s relativním převýšením dané lokality vůči okolnímu terénu než přímo s nadmořskou výškou⁵ a silně závisí na drsnosti povrchu³.

Námraza se obvykle tvoří na horách z mlhy orografického původu³. Velmi často se intenzivní námraza vyskytuje v Sudetských pohořích⁶, tedy v Krkonoších, Jizerských horách, Orlických horách a Jeseníkách. Naproti tomu výše položené evropské horské meteorologické stanice, jako jsou např. Jungfraujoch (3450 m n. m.), Sonnblick (3106 m n. m.), Zugspitze (2962 m n. m.), Lomnický štít (2633 m n. m) nebo Musala (2925 m n. m.), jsou už tak vysoko, že často vystupují nad vrstvu nízké ležících oblaků. To platí především v zimním období, kdy se snižuje kondenzační hladina v důsledku sezonního poklesu slunečního záření a převládající stabilní stratifikace s oblaky typu stratus a stratocumulus ležícími pod 2000 m n. m (cit.⁷).

V přírodě námraza vytváří fascinující obrazce na větvích stromů a keřů, na stéblech trav, na plotech. Extrémní přírodní podívanou pak představují tzv. ledové hříby (v angl. označované jako „rime mushrooms“) známé především horolezcům z jihoamerické Patagonie (jihopatagonské Andy). Tyto ohromné, perzistentní, okrouhlé nebo cibulovité srostlice námrazy vznikají na návětrných svazích horských vrcholů a hřebců obklopených oblaky za silného větru. Ledové hříby jsou nejčastější a nejlépe vyvinuté na izolovaných vrcholcích a exponovaných hřebcích v pobřežních oblastech s častým výskytem bouří^{8,9}.

V našich klimatických podmínkách je námraza nebezpečným atmosférickým jevem představujícím významný problém pro dopravu silniční i leteckou^{10–12}, způsobující svou vahou kalamity v rozvodných energetických sítích^{13,14} či lámání stromů. Energetika má u nás k dispozici výsledky pozorování výskytu námrazy od třicátých let dvacátého století a jde o nejdelší záznamy v celosvětovém měřítku^{4,15–18}. V České republice je námraza významným, často se opakujícím, lesy poškozujícím faktorem v částech Českomoravské vysočiny, Krušných hor, Jizerských hor, Orlických hor, Kralického Sněžníku, Českého lesa, Brd a Slavkovského lesa⁴.

Problémy ovšem může námraza působit nejen v důsledku svých fyzikálních vlastností, ale i v souvislosti se svým chemickým složením. Z ekologického a environmentálního hlediska je námraza důležitá vzhledem ke své vysoké mineralizaci, tedy vysokým koncentracím znečišťujících látek, které obsahuje^{19–26}. Námraza tak může zvyšovat negativní dopady znečištění ovzduší na horské lesy v procesu její opakované tvorby, odtávání a opadávání, při němž se veškeré látky v námraze nakumulované dostávají do půdy nad kořenovým systémem a mohou postupně pronikat do spodních půdních horizontů²⁷. Námraza je pokládána za jeden z faktorů, které se podílely na odumírání lesů v sedmdesátých letech dvacátého století v mnoha regionech Evropy i Severní Ameriky^{28,29}.

Chemické složení námrazy stejně tak jako mlhy není příliš studováno, a to z jednoduchého důvodu, kterým jsou komplikace neodmyslitelně spjaté s odběrem vzorků těchto hydrometeorů³⁰. Výsledky existujících studií se porovnávají poněkud obtížně vzhledem k tomu, že používají jiné metody odběru, jinou délku expoziční doby, jsou z rozdílných geografických oblastí, z různých nadmořských výšek a z různých klimatických regionů. Nicméně všechny studie jsou zajedno v tom, že v námraze stejně tak jako v mlze jsou výrazně vyšší obsahy iontů než v odpovídajících vzorcích sněhu či deště^{21,24–26,31–35}.

3. Katastrofy způsobené námrazou

Tvorba námrazy může vést k mnohým problémům a dokonce vyústit až ve vznik katastrofálních událostí. Tak např. v roce 1928 došlo v důsledku přetížení námrazou ke ztroskotání vzducholodi Italia při polární vědecké výpravě v Severním ledovém oceánu asi 120 km severovýchodně od norských Špicberků cestou od Severního pólu. Silná námraza vytvořená na kovové konstrukci vzducholodi zvýšila její hmotnost o několik tun, což způsobilo pokles a nakonec i pád vzducholodi na plovoucí kru. Výpravu vedl italský generál Umberto Nobile a účastnil se jí též (na základě přímluvy dvojnásobné držitelky Nobelovy ceny za fyziku a chemii, Marie Curie Skłodowské) český fyzik a spisovatel František Běhounek. Při záchraně trosečníků zahrnul kromě jiných i významný norský polární badatel Roald Amundsen^{12,36,37}. Běhounek během expedice proěřoval závislost intenzity kosmického záření na zeměpisné šířce, měřil hustotu iontů ve vzduchu, gradient elektrické-

ho pole v ovzduší, koncentraci radonu ve vzduchu a prováděl meteorologická měření a pozorování. Jeho měření týkající se intenzity kosmického záření a obsahu radonu v ovzduší jsou jediným dochovaným podstatným vědeckým výstupem této expedice^{38,39}.

V letectví patří námraza k nejnebezpečnějším atmosférickým jevům a je s ní spojena řada leteckých nehod^{11,40,41}. Tak např. dne 12. 12. 1985 došlo krátce po startu z kanadského města Gander na trase do Fort Campbell v USA k havárii letadla McDonnell Douglas DC-8. Asi půl kilometru od vzletové dráhy ztratil letoun vztlak a zřítíl se. Na palubě zahynulo všech 248 cestujících a 8 členů posádky. Jde o jednu z nejtragičtějších nehod v celé historii Kanady. Za pravděpodobnou příčinu vedoucí ke katastrofě byl označen snížený vztlak způsobený právě nahromaděním námrazy na křídlech a náběžných hranách vedoucí ke ztrátě rychlosti v malé výšce a následnému pádu letadla⁴².

Tíha námrazy může vést také k lámání stromů a poškození lesů. V ČR patří sníh a námraza spolu s větrem k nejvýznamnějším příčinám nahodilé těžby dřeva^{43,44}. Poškození porostů začíná při sněhové či námrazové zátěži mezi 20–30 kg m⁻², ale velikost zátěže potřebné ke vzniku poškození se podstatně liší podle typu (kvality) sněhu v korunách stromů a je podstatný rozdíl mezi zatížením sněhem (suchým, mokrým nebo přemrzlým) a námrazou⁴⁵. Výsledné ohrožení porostů námrazou a velikost následných polomů závisí na několika faktorech⁴⁶: nadmořské výšce a poloze, druhu dřeviny a typu porostu. Nejvíce jsou ohroženy podhorské a nižší horské polohy, více jsou poškozovány porosty na svazích a hřebenech (zachycení teplejších proudů mlh z údolí). Co se týká rozdílů v poškození dřevin podle druhů, uvádí se, že nejvíce je poškozována borovice lesní (*Pinus sylvestris*), u které může dojít k rozlámání korun a smrk ztepilý (*Picea abies*), u něhož mohou vznikat vrcholkové polomy. Z listnáčů pak je to olše (*Alnus* sp.), buk lesní (*Fagus sylvatica*) a v některých lokalitách i dub zimní (*Quercus petraea*). V důsledku tvorby námrazy může dojít až k násobnému zvýšení hmotnosti stromů, a to až 30násobnému u modřínu a dokonce až 50násobnému u buku¹⁷. Námraza způsobila v našich lesích kalamity opakovaně, např. v letech 1911, 1924, 1927, 1930, 1966, 1974. V zimě 1995/1996 námrazová kalamita vedla ke vzniku 2,4 mil. m³ polomů⁴.

4. Námraza jako významná součást atmosférické depozice

Atmosférická depozice, tedy přenos/tok znečišťujících látek z atmosféry na zemský povrch je významným samočisticím procesem, díky kterému se ovzduší zbavuje látek, které by se zde jinak kumulovaly^{47–49}. Na druhou stranu ovšem představuje atmosférická depozice vstup látek do ostatních složek prostředí a do ekosystémů, které může buď ve formě živin obohacovat, nebo jim naopak může prostřednictvím znečišťujících příměsí škodit. Často

u jedné látky přitom pozorujeme obojí efekt. Typickým případem je dusík⁵⁰, který je jako biogenní prvek důležitou a nezbytnou živinou pro živé organismy, v množství nadbytečném však způsobuje acidifikaci, eutrofizaci a snížení druhové rozmanitosti, biodiversity^{51–53}. Proces depozice probíhá buď suchou cestou, prostřednictvím plynů a aerosolu, prakticky neustále, nebo prostřednictvím atmosférických srážek a hydrometeorů, epizodicky.

Námraza a mlha bývají v češtině označovány termínem horizontální depozice (v angličtině occult deposition) jako protějšek depozice vertikální spojené s padajícími atmosférickými srážkami, deštěm a sněhem. Horizontální depozice je mnohem méně poznanou součástí depozice, na rozdíl od atmosférických srážek, jejichž vzorky jsou odbírány a chemické složení je zkoumáno v rámci provozu rutinních monitorovacích sítí^{54,55} na různých úrovních od globální, jako např. BAPMON (Background Air Pollution Monitoring Network) provozované v rámci Světové meteorologické organizace WMO, přes úroveň regionální – evropskou monitorovací síť EMEP (Europe Monitoring and Evaluation Programme), monitorovací síť USA NADP/NTN (National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network) či kanadskou monitorovací síť CAPMoN (Canadian Air and Precipitation Monitoring Network) až po jednotlivé národní monitorovací sítě^{56–61}.

Ačkoliv je horizontální depozice pokládána za důležitou, a to zejména v horských oblastech, kde se vykytuje často, zůstává problémem ji kvantifikovat vzhledem ke značným nejistotám ohledně faktorů, které ovlivňují proces jejího vzniku⁶², a to jak její příspěvek hydrologický, tak chemický. Proto se při kvantifikaci celkové atmosférické depozice příspěvek depozice horizontální běžně neuvažuje a nezohledňuje vzhledem k nedostatku dat a informací. Přitom mlha a její chemické složení je studována mnohem častěji^{63,64}, zatímco o námraze jsou informace pouze sporadické. Podobně jako mlha⁶⁵, která ve srovnání s deštěm obsahuje vyšší koncentrace iontů, i námraza je poměrně vysoce mineralizovaná, ve srovnání s padajícími srážkami – deštěm a sněhem – jsou ionty v námraze přítomné ve významně vyšších koncentracích^{21,33,35,66,67}. Práci, které se zabývají chemickým složením námrazy, není sice k dispozici mnoho, nicméně na tomto faktu panuje obecná shoda, ať už se provedené studie zabývají jakýmkoliv regionem světa a ať se jedná o oblasti vysoce znečištěné jako např. Čínu⁶⁸, nebo oblasti relativně čisté, vzdálené od emisních zdrojů, např. odlehle horské regiony⁶⁹.

Provedené studie indikují značnou variabilitu při srovnávání jednotlivých zkoumaných událostí, které jsou ovlivňovány mnoha rozličnými procesy, jako je transport vzdušných mas, mrznutí, vymývání plynů a aerosolu, komplikované heterogenní chemické reakce⁷⁰. Zmíněné procesy mohou probíhat a působit simultánně a v obdobných časových dimenzích za vzniku složitých účinků, jejichž vliv je obtížné rozklíčovat⁷¹. Znečištění mrznoucích kapek souvisí s jejich velikostí, čím jsou kapičky menší, tím je koncentrace znečišťujících látek vyšší⁷².

5. Poznatky o chemickém složení námrazy z České republiky

Informaci o tom, jak to bylo s koncentracemi majoritních iontů v námraze u nás v minulosti, můžeme čerpat z práce Bridges a spol.³⁵, kde jsou prezentovány výsledky odběrů námrazy a sněhu prováděných v devadesátých letech dvacátého století v Krušných horách v oblasti Flájské přehrady v nadmořské výšce 740 m n. m. V té době byla tato oblast ovlivněna značně vysokými průmyslovými emisemi vypouštěnými z velkých elektráren soustředěných v blízkém Podkrušnohoří. Studie byla konkrétně provedena v obdobích březen 1995 – březen 1996 a listopad 1996 – březen 1997, tedy ještě před zavedením nových striktních legislativních opatření v podobě přísných emisních limitů vyžadujících provedení zásadních technických opatření na zdrojích ke snížení emisí k roku 1998 (cit.⁷³). V té době byla koncentrace sulfátů v námraze asi 2,5krát vyšší a ve sněhu téměř 5krát vyšší než ve vzorcích odebraných v Krušných horách později, v letech 2009–2011 (cit.⁷⁴). Jinak tomu bylo ale u nitrátů, kde v současných vzorcích z období 2009–2011 byla koncentrace v námraze z Krušných hor překvapivě 1,6krát vyšší a ve sněhu stejná jako ve vzorcích z devadesátých let⁷⁵.

V průběhu let 2000–2004 byly prováděny odběry mlhy a námrazy⁷⁶ v Českém středohoří na Milešovce, observatoři provozované Ústavem fyziky atmosféry AV ČR. Milešovka, vysoká 837 m n. m. je izolovaným vrcholem převyšujícím okolní terén o 350–500 m, což ji činí obzvláště vhodnou pro výskyt mlhy i námrazy. Kromě toho v blízkosti leží Podkrušnohorská hnědouhelná pánev s kumulací velkých hnědouhelných elektráren emitujících znečišťující látky přispívající ke vzniku kondenzačních jader účastnicích se tvorby námrazy. Celkem odebrané vzorky dokumentovaly 234 mlžných a 14 námrazových událostí, přičemž o významu námrazy svědčí její absolutní maximální hmotnost z 28. 12. 2002, která činila plných 52,3 kg m⁻². Průměrná koncentrace majoritních iontů byla vyšší v mlze než v námraze, přičemž rozdíly v koncentracích (uvedených pro mlhu/námrazu v mg l⁻¹) byly následující: SO₄²⁻ 25,7/18,8, NO₃⁻ 29,7/17,9 a NH₄⁺ 14,7/6,0 (cit.⁷⁶). Srovnáme-li tyto hodnoty s koncentracemi naměřenými na stejné lokalitě dříve (mlha v roce 1999 a námraza na přelomu let 1999/2000) a publikovanými v práci Fišáka a Řezáčové⁷⁷ vidíme obdobné relace s vyššími koncentracemi v mlze než v námraze ovšem s vyššími absolutními hodnotami při dřívějších odběrech: SO₄²⁻ 145,2/106,0, NO₃⁻ 32,5/26,3 a NH₄⁺ 19,4/10,2 (cit.⁷⁷). Nápadný rozdíl mezi odběry před a po roce 2000 je zřejmý zejména u SO₄²⁻, kde koncentrace v námraze i mlze poklesly řádově, což bylo způsobeno právě odsířením velkých zdrojů⁷³.

V období 2009–2011 prováděla Česká geologická služba odběry námrazy na deseti vrcholových lokalitách okrajových českých pohoří – Krušných hor, Krkonoš, Jizerských hor, Orlických hor, Jeseníků, Beskyd, Šumavy, Novohradských hor a Českého lesa. Studovány v námraze byly koncentrace kadmia⁷⁸, zinku⁷⁹, olova⁸⁰, mědi⁸¹, arse-

nu⁸², beryllia⁸³, síry⁷⁴, dusíku^{75,84} a antimonu⁸⁵. Koncentrace S-SO₄²⁻ byly na všech 10 odběrových lokalitách významně vyšší v námraze než ve sněhu, a to 5–10krát (cit. ⁷⁴) a koncentrace N-NO₃⁻ byly v průměru 12krát vyšší v námraze než ve sněhu⁷⁵. Výsledky majoritních iontů ukázaly, že depozice sulfátů i nitrátů prostřednictvím námrazy není na našich horách zanedbatelná ani v současnosti, ale je potřeba ji uvažovat zejména s ohledem na velmi lokální účinky. Zatímco zátěž sulfáty se ukázala významně vyšší na severních horách, což je v souladu s všeobecným narativem vyššího znečištění ovzduší na průmyslovém severu, zátěž nitrátů byla překvapivě vyšší naopak na jihu. V porovnání s odběry z devadesátých let dvacátého století pak byly koncentrace sulfátů v Krušných horách v námraze výrazně vyšší než v současnosti, zatímco u nitrátů byly koncentrace v průměru obdobné^{35,75}.

6. Závěr

Na základě provedené rešerše je možné shrnout, že práci zabývající se námrazou, zaměřených na studium jejího chemického složení není celosvětově k dispozici mnoho, což nepochybně souvisí i s náročnými odběry jejích vzorků v terénu. Početnější jsou přitom práce zkoumající chemismus námrazy v minulosti (sedmdesátá až devadesátá léta dvacátého století) než práce současné. Z existujících prací vyplývá, že námraza bývá několikanásobně kontaminovanější než sníh či déšť, ale zpravidla poněkud méně koncentrovaná než mlha. Hydrologický podíl námrazy není jednoduché kvantifikovat, ale i když je řádově nižší než hydrologický podíl padajících srážek, vzhledem k vyšší koncentraci znečišťujících látek v námraze než ve srážkách padajících, představuje námraza významný příspěvek k atmosférické depozici, a to zejména v horském prostředí. To dokládají i výsledky měření provedených v českých horách, které ukazují, že i když se námraza v našich klimatických podmínkách vyskytuje pouze po dobu několika málo měsíců v roce (2–3 měsíce) a její hydrologický podíl je nevýznamný, může představovat vzhledem ke své vysoké mineralizaci a kumulaci v čase i prostoru nezanedbatelnou ekologickou a environmentální zátěž. Ta se pak může projevit lokálně zejména v horském prostředí, a to i ve středních nadmořských výškách.

LITERATURA

- Česká meteorologická společnost [online]: Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS). <http://slovník.cmes.cz>, staženo 24. 4. 2021.
- WMO ICA: International Cloud Atlas, 2017. <https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html>, staženo 7. 9. 2020.
- Baranowski S., Libersbach J.: *J. Glaciol.* 19, 489 (1977).
- Vicena I.: *Lesn. Pr.* 79, 7 (2000).
- Makkonen L., Ahti K.: *Atmos. Res.* 36, 185 (1995).
- Blaś M., Sobik M.: *Geogr. Pol.* 77, 19 (2004).
- Polkowska Ź., Sobik M., Blaś M., Klimaszewska K., Walna B., Namiesnik J.: *J. Atmos. Chem.* 62, 5 (2009).
- Crouch G.: *National Geographic* 197, 101 (2000).
- Whiteman C. D., Garibotti R.: *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, 1319 (2013).
- Gultepe I. a 21 spoluautorů: *Pure Appl. Geophys.* 176, 1869 (2019).
- Fodor P., Jarošová M.: *Detekcia a predikcia hrozby námrazy na základe analýzy povetnostnej situácie a správ o počasí na letisku Žilina*, str. 57. Práce a štúdie/ Studies – KLD, Fakulta Pedas ŽU 2020.
- Drška M.: *Námraza jako nebezpečný jav v letectve. Bakalářská práce*. Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, Brno 2013.
- Vrána J.: *Námraza a její předpověď – Námrazové kalamity v energetice na území ČR*. Práce a studie. ČHMÚ, Praha 1986.
- Li B., Bai J., He J., Ding C., Dai X., Ci W., Zhu T., Liao R., Yuan Y.: *Coatings* 13, 301 (2023).
- Hrudička B.: *Elektrotech. Obz.* 22, 49 (1933).
- Hrudička B.: *Elektrotech. Obz.* 23, 9 (1934).
- Wald E.: *Meteorol. Zpr.* 1, 77 (1947).
- Popolanský F.: *Meteorol. Zpr.* 49, 182 (1996).
- Berg N., Dunn P., Fenn M.: *Atmos. Environ.* 25, 915 (1991).
- Fenn M. E., Bytnerowicz A.: *Environ. Pollut.* 81, 277 (1993).
- Ferrier R. C., Jenkins A., Elston D. A.: *Environ. Pollut.* 87, 259 (1995).
- Lukewille A., Semb A.: *Deposition in Norwegian Mountain Areas*. NILU OR 66/97. Kjeller, Norway 1998.
- Nagafuchi O., Kakimoto H., Ebise S., Inoue T., Koga M.: *Water Sci. Technol.* 44, 57 (2001).
- Migala K., Lieberbach J., Sobik M.: *Atmos. Res.* 64, 63 (2002).
- Burns D. A.: *Atmos. Environ.* 37, 921 (2003).
- Godek M., Blas M., Sobik M., Polkowska Z., Cichala-Kamrowska K., Namiesnik J.: *Pure Appl. Geophys.* 169, 1093 (2012).
- Eliáš V., Tesař M., Moldan B., v knize: *Hydrology of Mountainous Areas* (Molnar L., ed.). IAHS Publication No. 190, IH, Wallingford, UK 1988.
- Mueller-Dombois D.: *Bioscience* 37, 575 (1987).
- Lomský B., Šrámek V.: *J. For. Sci.* 50, 533 (2004).
- Unsworth M. H., Wilshaw J. C.: *Agric. For. Meteorol.* 47, 221 (1989).
- Borys R. D., Hindman E. E., Demott P. J.: *J. Atmos. Chem.* 7, 213 (1988).
- Mitchell D. L., Lamb D.: *J. Geophys. Res. Atmos.* 94, 14831 (1989).
- Duncan L. C.: *Environ. Sci. Technol.* 26, 61 (1992).
- Lokupitiya E., Stanton N. L., Seville R. S., Snider J. R.: *Pedobiologia* 44, 591 (2000).
- Bridges K. S., Jickells T. D., Davies T. D., Zeman Z.,

- Hůnová I.: Atmos. Env. 36, 353 (2002).
36. Běhounek F.: *Trosečníci polárního moře*. Albatros, Praha 1971.
 37. Aas S.: Polar Res. 24, 5 (2005).
 38. Jech Č.: Czech J. Phys. 49 (Suppl 1), 41 (1999).
 39. Kolomý R.: Rozhledy matematicko-fyzikální 83, 26 (2008).
 40. Politovich M. K.: Encycl. Atmos. Sci. 358, 68 (2003).
 41. Cao Y., Tan W., Wu Z.: Aerosp. Sci. Technol. 75, 353 (2018).
 42. AVIATIONSAFETYNETWORK. Flight 1285 [online]. <https://aviationsafety.net/database/record.php?id=19851212-0>, staženo 14. 1. 2023.
 43. Rychtecká P., Urbaňcová N.: Lesn. Pr. 6, 14 (2008).
 44. Krístek Š., Holuša J.: Lesn. Cas. For. J. 60, 214 (2014).
 45. Lehtonen I., Hoppula P., Pirinen P., Gregow H.: Silva Fennica 48, 1120 (2014).
 46. Čermák P., Palovčíková D., Beránek P., 2011. Atlas poškození dřevin. LDF Menedelo (online) <https://rumex.mendelu.cz/atlasposkozenidrevin>, staženo 20. 1. 2023.
 47. Seinfeld J. H., Pandis S. N.: *Atmospheric Chemistry and Physics*. John Wiley, New York 1998.
 48. Pacyna J. M., v knize: *Encyclopedia of Ecology* (Jorgensen S. E., Fath B., ed.), str. 275. Elsevier, Oxford 2008.
 49. Braniš M., Hůnová I. (ed.): *Atmosféra a klima. Aktuální otázky ochrany ovzduší*. Karolinum, Praha 2009.
 50. Hůnová I.: Chem. Listy 110, 779 (2016).
 51. Bobbink R. a 16 spoluautorů: Ecol. Appl. 20, 30 (2010).
 52. Dirnbock T. a 16 spoluautorů: Glob. Chang. Biol. 20, 429 (2014).
 53. Braun S., Ahrends B., Alonso R., Augustin S., Garcia-Gómez H., Hůnová I., Karlsson P. E., Pihl Karlsson G., Schmitz A., Thimonier A.: Frontiers in Forests and Global Change 5, 1062223 (2022).
 54. Dammgen U., Erisman J. W., Cape J. N., Grumhage L., Fowler D.: Environ. Pollut. 134, 535 (2005).
 55. Zhang Q. a 10 spoluautorů: Ecotoxicol. Environ. Saf. 216, 112180 (2021).
 56. Granat L.: J. Great Lakes Res. 2 (Suppl. 1), 42 (1976).
 57. Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M., Tsakovski S., Loofler H., Heimbürger G., Biebl P., Weber A., Damm A.: Chemosphere 48, 733 (2002).
 58. Wetherbee G. A., Shaw M. J., Latysh N. E., Lehmann C. M. B., Rothert J. E.: Environ. Monit. Assess. 164, 111 (2010).
 59. Torseth K., Aas W., Breivik A. M., Fjaeraa M., Fiebig M., Hjellbrekke A. G., Lund Myhre C., Solberg S., Yttri K. E.: Atmos. Chem. Phys. 12, 5447 (2012).
 60. Likens G. E., Butler T. J., Claybrooke R., Vermeylen F., Larson R.: Atmos. Environ. 245, 118031 (2021).
 61. Foken, T. (ed.): *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. Springer Handbooks. Springer, Cham 2021.
 62. Draaijers G. P. J., Erisman J. W.: Atmos. Environ. 27A, 43 (1993).
 63. Blas M., Polkowska Z., Sobik M., Klimaszewska K., Nowinski K., Namienik J.: Atmos. Res. 95, 455 (2010).
 64. Michna P., Werner R., Eugster W.: Atmos. Res. 151, 31 (2015).
 65. Hůnová I.: Chem. Listy 115, 436 (2021).
 66. Berg N., Heggli M., Monteverdi J.: Water, Air, Soil Pollut. 81, 25 (1995).
 67. Klimaszewska K., Polkowska Z., Namieśnik J.: Pol. J. Environ. Stud. 16, 943 (2007).
 68. Zhu C., Li J., Chen H., Cheng T., Wen L., Herrmann H., Xiao H., Chen J.: Sci. Total Environ. 722, 137911 (2020).
 69. Saitoh K., Kodama H., Sera K., Yoshimura K., Nagafuchi O.: Int. J. PIXE 15, 211 (2005).
 70. Domine F., Bock J., Voisin D., Donaldson D. J.: J. Phys. Chem. 117, 4733 (2013).
 71. Collett J. L., Prévot A. S. H., Staehelin J., Waldvogel A.: Environ. Sci. Technol. 25, 762 (1991).
 72. Collett J. L., Oberholzer B., Staehelin J.: Atmos. Environ. 276, 33 (1993).
 73. Hůnová I.: Atmosphere 11, 214 (2020).
 74. Hůnová I., Novák M., Kurfurst P., Škáchová H., Štěpánová M., Přečová E., Komárek A., Čurík J., Veselovský F., Bohdálková L.: Atmos. Environ. 270, 118877 (2022).
 75. Hůnová I., Novák M., Kurfurst P., Škáchová H., Štěpánová M., Přečová E., Veselovský F., Čurík J., Bohdálková L., Komárek A.: Sci. Total Environ. 869, 161697 (2023).
 76. Fišák J., Tesař M., Fottová D.: Water, Air, Soil Pollut. 196, 273 (2009).
 77. Fisak J., Rezacova D.: Stud. Geophys. Geod. 45, 319 (2001).
 78. Bohdalkova L., Novak M., Krachler M., Mikova J., Chrastny V., Veselovsky F., Voldrichova P., Pacherova P., Komarek A., Prechova E.: Environ. Pollut. 265, 114949 (2020).
 79. Voldrichova P., Chrastny V., Sipkova A., Farkas J., Novak M., Stepanova M., Krachler M., Veselovsky F., Blaha V., Prechova E., Komarek A., Bohdalkova L., Curik J., Mikova J., Erbanova L., Pacherova P.: Chem. Geol. 388, 130 (2014).
 80. Cimova N., Novak M., Chrastny V., Curik J., Veselovsky F., Blaha V., Prechova E., Pasava J., Houskova M., Bohdalkova L., Stepanova M., Mikova J., Krachler M., Komarek A.: Atmos. Environ. 143, 51 (2016).
 81. Novak M., Sipkova A., Chrastny V., Stepanova M., Voldrichova P., Veselovsky F., Prechova E., Blaha V., Curik J., Farkas J., Erbanova L., Bohdalkova L., Pasava J., Mikova J., Komarek A., Krachler M.: Environ. Pollut. 218, 1135 (2016).
 82. Petrash D. A., Novak M., Bohdalkova L., Krachler M., Dousova B., Curik J., Veselovsky F., Stepanova M.,

- Prechova E., Komarek A.: *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 16107 (2020).
83. Bohdalkova L., Novak M., Voldrichova P., Prechova E., Veselovsky F., Erbanova L., Krachler M., Komarek A., Mikova J.: *Sci. Total Environ.* 439, 26 (2012).
84. Novak M., Jackova I., Curik J., Stepanova M., Veselovsky F., Buzek F., Vile M. A., Bufkova I., Valkova I., Adamova M., Bohdalkova L., Komarek A.: *Ecosystems* 19, 1037 (2016).
85. Paces T., Krachler M., Novak M., Stepanova M., Bohdalkova L., Prechova E.: *Environ. Pollut.* 316, 120518 (2023).

I. Hůnová (^a *Czech Hydrometeorological Institute, Prague*, ^b *Charles University, Faculty of Science, Institute for Environmental Studies, Prague, Czech Republic*):
Rime as a Relevant Part of Atmospheric Deposition in Mountain Regions

This review presents the rime as an interesting hydro-meteor which might substantially influence people and their environment. It summarises up-to-date knowledge on rime genesis and the factors affecting its formation and indicates its potential effects and impacts. Apart from rime's physical characteristics, this review deals with chemical composition of rime and indicates its relevance as a substantial part of atmospheric deposition, namely locally in mountain regions.

Keywords: rime, atmosphere, atmospheric deposition, ambient air pollution