

ATMOSFÉRICKÁ DEPOZICE DUSÍKU

IVA HŮNOVÁ^{a,b}

^a Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4, ^b Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí, Benátská 2, 120 00 Praha 2
hunova@chmi.cz

Došlo 1.6.16, přijato 1.8.16.

Klíčová slova: amoniak, depozice atmosférická, dusík organický, dusík reaktivní, kyselina dusičná, monitoring, oxidy dusíku, srážky atmosférické

Obsah

1. Úvod
2. Sloučeniny přispívající k atmosférické depozici dusíku
 - 2.1. Oxidované formy dusíku
 - 2.2. Redukované formy dusíku
 - 2.3. Organický dusík
3. Které látky přispívající k depozici dusíku se měří?
4. Otázky k řešení
5. Jak se sleduje atmosférická depozice dusíku v ČR?

1. Úvod

Atmosférická depozice je přenos znečišťujících látek z atmosféry k zemskému povrchu. Jde o významný proces, který na jedné straně přispívá k odstraňování látek z ovzduší a tedy k jeho samočištění, na straně druhé je však zdrojem znečišťujících látek pro ostatní složky životního prostředí. Atmosférická depozice může být spojena s atmosférickými srážkami (tzv. mokrá depozice), ať už vertikálními (děšť, sníh) či horizontálními (mlha, námraza). V období beze srážek dochází k tzv. suché depozici, přímému přestupu plynů a aerosolu z ovzduší na vegetaci, zemský povrch či hydrosféru. Suchá depozice je mnohem pomalejší než depozice mokrá, na rozdíl od ní však probíhá neustále, zatímco depozice mokrá je dějem epizodickým. Článek se zabývá atmosférickou depozicí dusíku, která je v současné době velmi ožehavým tématem.

Dusík je v přírodě velmi hojným prvkem. Většina jeho zásob se vyskytuje v atmosféře, kde tvoří plyných 78 % jejího objemu. Molekula N₂ je však díky pevné trojné kovalentní vazbě mezi oběma jeho atomy vysoce chemicky stabilní a nereaktivní. Za dusík reaktivní (N_r) se pokládají všechny jeho biologicky, radiačně a/nebo foto-

chemicky aktivní formy¹. Nejdůležitější jsou (1) oxidy dusíku (NO_x) a amoniak hrající významnou úlohu v chemii troposféry; (2) nitráty a amonné ionty, převládající formy N, které jsou využívány organismy; (3) oxid dusný, důležitý skleníkový plyn, který je ve stratosféře katalyzátorem destrukce O₃; (4) kyselina dusičná, zejména v regionech se suchým klimatem². N_r je velmi mobilní, a protože jeho vznik je mnohem rychlejší než jeho přeměna na nereaktivní N₂, dochází v mnoha regionech světa k jeho kumulaci v životním prostředí³. Už od doby Průmyslové revoluce jsou pod vlivem vysoké depozice dusíku rozvinuté regiony severní polokoule, Evropa i kontinentální část USA⁴. Zde došlo k zásadnímu narušení přirozeného globálního cyklu dusíku⁵, které se s vysokou pravděpodobností bude projevovat na ekosystémech i v budoucnu⁶. V současné době je extrémně vysoká depozice dusíku pozorována v jihovýchodní Asii, zejména Číně a Indii, což je důsledkem rychle rostoucí populace a s tím spojeným rozvojem průmyslu, zemědělství a dopravy^{7,8}.

Atmosférická depozice dusíku je studována zejména s ohledem na acidifikaci, eutrofizaci a změnu biodiverzity^{9,10}. Provádějí se manipulační studie na experimentálních plochách¹¹ a vliv na ekosystémy se sleduje i v reálném prostředí v rámci dlouhodobého monitoringu¹². Přes velkou pozornost, která je studiu biogeochemického cyklu dusíku věnována, ho však naše současné poznatky ani zdaleka nevystihují¹³. Cílem příspěvku je přehledně přiblížit látky, které mohou přispět k celkové atmosférické depozici dusíku.

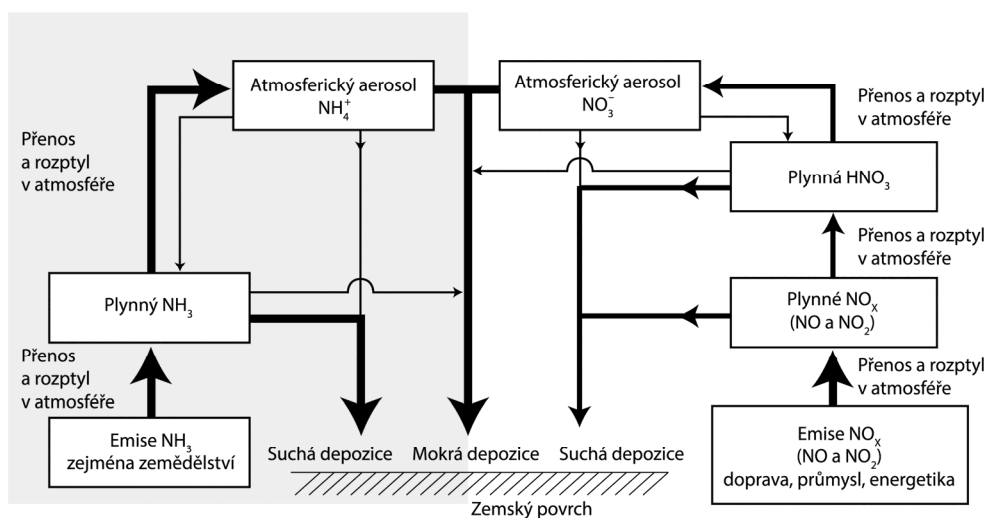
2. Sloučeniny přispívající k atmosférické depozici dusíku

Reaktivní dusík se v atmosféře vyskytuje ve formě oxidovaných a redukovaných sloučenin. Oxidované sloučeniny pocházejí převážně ze spalovacích procesů, redukované ze zemědělství, nezanedbatelnými emitenty jsou i přírodní zdroje. Na atmosférické depozici dusíku se určitým způsobem podílejí všechny výše uvedené sloučeniny N_r, kromě N₂O, který má, proti ostatním, relativně dlouhou dobu setrvání v atmosféře (řádově roky). Ten je však vzhledem ke svému radiačně-absorbčním vlastnostem skleníkovým plynem, s potenciálem globálního oteplování (GWP, global warming potential) v časovém horizontu 100 let dokonce zhruba 300krát vyšším než CO₂ (cit.¹⁴). Kromě toho hraje významnou úlohu při odbourávání stratosférického ozonu¹⁵. Sloučeniny N_r se účastní celé řady fyzikálních a chemických procesů v atmosféře. Šíří se od svých emisních zdrojů v důsledku meteorologických procesů, jako je rozptyl a přenos v atmosféře a podléhají četným chemickým reakcím^{16,17}. Představu o podílu zdrojů na

Tabulka I

Podíl zdrojů na globálních emisích N_r v modelu GEOS-Chem, 2006 (cit.¹⁸)

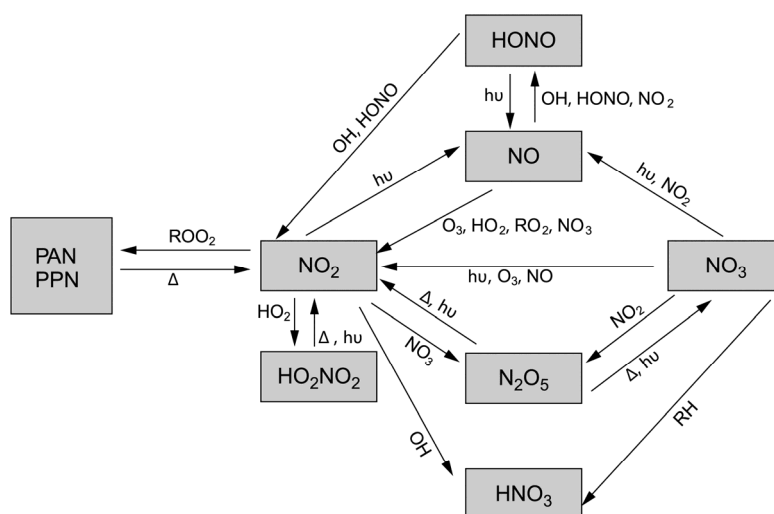
Sloučenina	Emisní zdroj	Globální emise [Tg N rok ⁻¹]
NO_x	spalování paliv	27,8
	– fosilních	25,7
	– biopaliv	1,6
	– pohonných látek	0,5
	půda	6,9
	požáry	5,1
	blesky	2,3
	použití hnojiv	0,6
<i>celkem</i>	<i>42,7</i>	
NH_3	zemědělství	36
	přírodní zdroje ^a	14,3
	požáry	5,3
	použití biopaliv	1,6
	<i>celkem</i>	<i>57,2</i>

^a Oceán, půda, exkrementy divoce žijících zvířatObr. 1. Proměny sloučenin N_r v atmosféře¹⁹

globálních emisích N_r podává tab. I. Zjednodušené schéma na obr. 1 představuje hlavní cesty, kterými sloučeniny N_r procházejí. Na levé straně obrázku jsou znázorněny přeměny redukováných forem, na pravé straně pak forem oxidovaných.

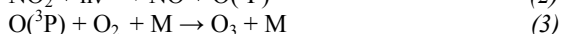
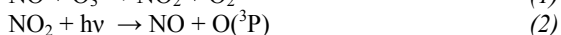
2.1. Oxidované formy dusíku

Mezi oxidované formy dusíku v atmosféře patří oxidy dusíku, kyselina dusičná, kyselina dusitá ($HONO$) a peroxyacetylnitrát (PAN). Interakce mezi oxidovanými formami N_r znázorňuje schéma na obr. 2 (cit.¹⁹).



Obr. 2. Interakce mezi oxidovanými formami N_r v mezní vrstvě troposféry. Symbolem Δ je označena energie potřebná k termální degradaci, hv představuje sluneční záření potřebné k fotodisociaci, RH symbolizuje reagující uhlovodík a PPN znamená peroxylnitrát¹⁹

Oxidy dusíku jsou emitovány zejména ve formě oxidu dusnatého a v menší míře (obvykle 5–20 %), zejména při vysokoteplotním spalování, jako oxid dusičitý. V troposférické mezní vrstvě je pak poměr mezi NO a NO₂ řízen především ozonem, který rychle reaguje s NO za vzniku NO₂, viz rov. (1). Vlivem slunečního záření o vlnových délkách 200–420 nm dochází k fotodisociaci NO₂, viz rov. (2), za vzniku NO a velmi reaktivního atomárního kyslíku O(³P). Ten většinou zpětnou reakcí s O₂ vytvoří O₃, viz rov. (3), za spolupůsobení molekuly M (zpravidla N₂ nebo O₂), která absorbuje přebytečnou vibrační energii, čímž stabilizuje vzniklou molekulu O₃. Reakční doba se u těchto reakcí pohybuje řádově v sekundách či minutách¹⁹.

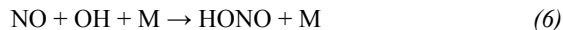


NO_x jsou z atmosféry odstraňovány mokrou a suchou depozicí HNO₃ prostřednictvím reakce s radikálem OH ve dne, viz rov. (4), a tvorbou N₂O₅ v noci, viz rov. (5).

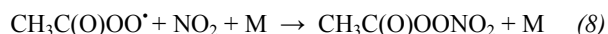


Radikál OH, který významně zvyšuje oxidační kapacitu atmosféry, čímž přispívá k odstraňování látek z atmosféry a tedy k jejímu samočištění, vzniká ve dne za přítomnosti slunečního záření¹⁶. Reakcí radikálu OH a NO vzniká plynná kyselina dusitá HONO, viz rov. (6). Ve dne dochází vlivem slunečního záření o vlnové délce $\lambda < 400 \text{ nm}$ k její rychlé fotodisociaci, viz rov. (7), zpět na původní reaktanty. Ačkoliv se zdá, že příspěvek HONO k atmosférické depozici dusíku je nevýznamný, je tato

sloučenina v poslední době intenzivně studována právě jako potenciální zdroj radikálu OH; odhaduje se, že primárně fotolýzou HONO dokonce vzniká kolem 30 % radikálu OH (cit.²⁰).

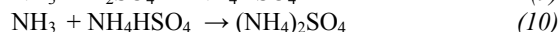


Z organických sloučenin dusíku je neznámější peroxyacetylitrát (PAN), který vzniká reakcí aldehydů s NO₂, viz rov. (8). PAN je termálně nestabilní a v mezní vrstvě je jeho koncentrace v rovnováze s peroxyacetylradikálem a NO₂.

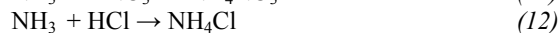
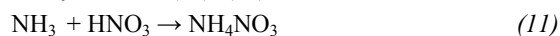


2.2. Redukované formy dusíku

Prekurzorem redukovaných sloučenin dusíku je plynný amoniak, který vzniká degradací organických sloučenin. Jeho reakcí s anorganickými kyselinami v plynné fázi vzniká jemný aerosol. Pokud je v ovzduší přítomna kyselina sírová v plynné fázi, dochází vždy k reakci s NH₃, viz rov. (9), (10). Tato reakce je zpravidla pokládána za ireverzibilní a probíhá ve dvou krocích.



Jsou-li v ovzduší přítomny jiné anorganické kyseliny v plynné fázi, jako např. HNO₃ či HCl, dochází ke vzniku amonných solí, které jsou v rovnováze se svými plynnými prekurzory, viz rov. (11), (12).



2.3. Organický dusík

Je známo, že v atmosféře existují i organické sloučeniny dusíku, přímá měření jednotlivých složek jsou však spíše výjimečná¹⁹. O tom, že organické složky dusíku v atmosféře nejsou zanedbatelné, svědčí fakt, že ve vzorcích atmosférických srážek se vyskytují ve formě rozpuštěného organického dusíku (DON, dissolved organic nitrogen), který zpravidla tvoří kolem 25 % celkového rozpuštěného dusíku ve srážkách²¹. Je biologicky dostupný a skládá se z celé řady různých sloučenin, jako jsou aminy, aminokyseliny, močovina, nitrofenoly, alkylamidy, alkaloidy a organické nitráty. Složení DON je značně variabilní v závislosti na lokalitě a jeho zdroje nejsou známy. Fakt, že organický dusík tvoří významnou součást dusíkového cyklu²² je všeobecně znám, nicméně ve většině studií zabývajících se depozicí dusíku bývá zanedbán^{23,24}.

3. Které látky přispívající k depozici dusíku se měří?

Dusík, který se dostává z atmosféry prostřednictvím srážek (deště a sněhu), je velmi dobře kvantifikován. Monitorovací programy na úrovni celosvětové (BAPMON od roku 1969, pod hlavičkou Světové meteorologické organizace WMO), regionální (v Evropě program EMEP od roku 1979, v USA NADP/NTN od roku 1978, v Kanadě program CANSAP od r. 1977) i národní, sledují koncentrace iontů NH_4^+ a NO_3^- ve srážkách. Odběry jsou technicky jednoduché, odebírají se vzorky typu „wet-only“, „bulk“ a „throughfall“²⁵, koncentrace NO_3^- se měří metodou iontové chromatografie, koncentrace NH_4^+ metodou spektrofotometrie za využití Berthelotovy reakce. Depozice udávaná v jednotkách [$\text{g m}^{-2} \text{rok}^{-1}$] nebo častěji [$\text{kg ha}^{-1} \text{rok}^{-1}$] se vypočte jako součin koncentrace a srážkového úhrnu. Mokrý depozice je tak velmi dobře známa, jsou sledovány a publikovány její trendy i roční chod a naše informace můžeme pokládat za velmi spolehlivé. Detailnější popis způsobu odběru, metod chemické analýzy i syntézu současných poznatků lze najít v řadě přehledných článků²⁶.

Obtížně kvantifikovatelná je suchá atmosférická depozice, čili vše, co se z atmosféry k zemskému povrchu dostává v období bez srážek, ať už v podobě pevné, jako částice, nebo plynné. Suchou depozici nelze přímo měřit, ale kvantifikuje se zpravidla tzv. inferenčními metodami, tedy na základě známé koncentrace sledované látky v ovzduší a její depoziční rychlosti. Depoziční rychlost je velmi variabilní v čase i prostoru a závisí na celé řadě faktorů, jako je např. charakter zemského povrchu, druhové a věkové složení porostů, meteorologické podmínky, roční období a denní doba²⁷. Co se týká dusíku, u nás i v Evropě se pravidelně měří koncentrace oxidů dusíku (NO_x , jako směs oxidu dusnatého a dusičitého). Důvodem poměrně intenzivního a pečlivého měření je požadavek legislativy, který ukládá monitorovat NO_2 z hlediska ochrany lidské-

ho zdraví a NO_x z hlediska ochrany vegetace a ekosystémů²⁸. NH_3 se v evropských zemích měří na větším počtu stanic pouze tam, kde jsou zvláště vysoké koncentrace, tedy např. v Nizozemí a Švýcarsku. Naproti tomu v USA se sledují imisní úrovně NH_3 a plynné HNO_3 , a neměří se naopak NO_x . Koncentrace NH_4^+ a NO_3^- v aerosolu se sledují spíše orientačně.

K atmosférické depozici mohou dále přispět i mlha či námraza, označované jako horizontální depozice²⁹. Je známo, že ionty NH_4^+ a NO_3^- v mlze jsou oproti dešti významně obohaceny, jejich koncentrace mohou být řádově až 30násobné (cit.³⁰). Příspěvek k depozici tedy může být poměrně značný, a to zejména v regionech, kde se mlha a námraza vyskytuje často, tedy především v horách.

4. Otázky k řešení

Osud jednotlivých látek přispívajících k atmosférické depozici dusíku není dostatečně popsán a v tomto ohledu existuje celá řada nejistot a otázek ke studiu. Nejistoty se týkají řady aspektů a projevují se v celé posloupnosti dějů od emisí, přes chemické transformace látek, jejich regionální a dálkový přenos až po působení na ekosystémy. Klíčovou záležitostí jsou např. neúplné emisní inventury. Vytvoření kompletních a spolehlivých emisních inventur je nesmírně důležité pro úplnou kvantifikaci dusíkového cyklu³¹. 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 porostem¹³. Velmi diskutován je v tomto ohledu NH_3 . U něj se též ukazuje, že významně mohou k jeho emisím přispívat i přirozené zdroje, např. rozklad odpadu, či emise z exkrementů kolonií vodních ptáků. Tyto zdroje nemusí být významné v globálním měřítku, ale lokálně či regionálně se projevit mohou, zejména tam, kde ostatní zdroje NH_3 jsou zanedbatelné^{32,33}.

Další zajímavou otázkou je speciace plynné fáze a aerosolu u sloučenin dusíku v atmosféře. Emise SO_2 ovlivňují depozici N_r prostřednictvím tvorby aerosolu (sírany amonné, dusičnan amonný) tím, že mění speciaci N_r mezi plynnou a pevnou fází. Vyšší koncentrace SO_2 zvyšují podíl NH_x v částicové podobě jako iontů NH_4^+ , což vede ke zvýšení doby setrvání NH_x v atmosféře, protože částice jsou vůči suché depozici odolnější než plynný NH_3 . Zvýšené emise SO_2 mohou též zvýšit tekavost NO_3^- , zejména v zimě, a vést tak k jeho zvýšené depozici ve formě HNO_3 , protože plynná HNO_3 má vyšší depoziční rychlost než částicový NO_3^- (cit.¹⁸).

O příspěvku organického dusíku k suché depozici, ať už plynné či částicové, se ví jen velmi málo. Týká se to např. PAN, u kterého se zdá, že jeho příspěvek k suché depozici je patrně podceňován¹⁹.

5. Jak se sleduje atmosférická depozice dusíku v ČR?

Sledováním chemického složení atmosférických srážek se v rámci monitoringu kvality ovzduší zabývá na celém území ČR dlouhodobě Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). V rámci geochemického monitoringu malých povodí (GEOMON) měří chemismus srážek, jako významný vstup znečištění do prostředí i Česká geologická služba (ČGS). V menším rozsahu měří složení srážek z hlediska ovlivnění lesních porostů Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM), dále Akademie věd ČR, a v minulosti to byl i Výzkumný ústav vodohospodářský (VÚV). Odběry jsou prováděny různými metodami³⁴, v závislosti na tom, jakému účelu mají naměřená data sloužit. Data jsou shromažďována v národní imisní databázi ISKO (Informační systém kvality ovzduší). Suchá depozice dusíku, tak jak je pravidelně publikována v prostorovém znázornění pro ČR³⁴, je založena výhradně na měřeních koncentrací oxidů dusíku, používá se metoda chemiluminiscence. Není zohledněn příspěvek NH_3 , plynné HNO_3 a částic NH_4^+ a NO_3^- a suchá depozice je tedy pravděpodobně významně podceňována³⁵. Depozice z mlhy a námrazy se měří pouze na několika stanicích. U nás se jejím sledováním zabývá Ústav pro hydrodynamiku a Ústav fyziky atmosféry AVČR.

Z látek, které se měří v relativně podrobné síti stanic, je možné vytvořit pomocí GIS (Geografické informační systémy) mapy znázorňující jejich prostorovou variabilitu. To se v ČR běžně provádí pro NH_4^+ a NO_3^- v mokré depozici, a pro NO_x v depozici suché; mapy jsou pravidelně publikovány v grafických ročnících ČHMÚ (cit.³⁴) a volně jsou k dispozici na webové stránce ČHMÚ (www.chmi.cz). Měření NH_4^+ a NO_3^- v aerosolu a NH_3 jsou natolik řídká, že neumožňují vytvoření map a slouží pouze orientačně k vytvoření představy, jaké hodnoty mohou být na různých typech stanic dosahovány.

Na základě hodnocení dat naměřených v ČR byly publikovány i studie týkající se dlouhodobých časových trendů a změn v prostorové variabilitě depozice dusíku³⁶ a zpřesnění kvantifikace celkové depozice dusíku zahrnutím neměřených složek s využitím modelových výpočtů³⁵. Výsledky dlouhodobého monitoringu prováděného Českým hydrometeorologickým ústavem ukazují, že depozice dusíku klesá, i když zdaleka ne tak razantně jako tomu bylo u síry^{36,37} a že stejně tak jako v mnoha jiných oblastech světa se i v ČR poměr redukovaných a oxidovaných forem anorganických iontů N ve srážkách postupně mění ve prospěch NH_4^+ (cit.³⁸).

Pro získání informací o depozici dusíku je do budoucna potřeba se více zaměřit i na další, dosud jen výjimečně měřené látky^{39–42}, zejména pak na ty, které mohou významně přispět k depozici dusíku, jako je např. NH_3 a plynná HNO_3 . Tak bude možné celkovou atmosférickou depozici dusíku přesněji kvantifikovat a přispět tak k lepšímu poznání jejího vlivu na ekosystémy.

Tato studie byla podpořena Grantovou agenturou České republiky (projekt 14-12262S). Autorka děkuje Haně Stehlíkové, DiS, za vytvoření obrázků.

LITERATURA

- Galloway J. N., Schlesinger W. H., Levy H. I., Michaels A., Schnoor J. L.: *Global Biogeochem. Cycles* 9, 235 (1995).
- Matyssek R., Clarke P., Cudlín P., Mikkelsen T. N., Tuovinen J.-P. (ed.): *Climate Change, Air Pollution and Global Challenges*. Developments in Environmental Sciences Vol. 13. Elsevier, Amsterdam 2013.
- Erismann J. W., Galloway J. N., Seitzinger S., Bleeker A., Dise N. B., Petrescu A. M. R., Leach A. M., de Vries W.: *Philos. Roy. Soc. B* 368, 20130116 (2013).
- Holland E. A., Braswell B. H., Sulzman J., Lamarque J.-F.: *Ecol. Appl.* 15, 38 (2005).
- Elser J. J.: *Science* 334, 1504 (2011).
- Canfield D. E., Glazer A. N., Falkowski P. G.: *Science* 330, 192 (2010).
- Chen X. Y., Mulder J.: *Sci. Total Environ.* 378, 317 (2007).
- Vet R., Artz R. S., Carou S., Shaw M., Ro C.-U., et al.: *Atmos. Environ.* 93, 3 (2014).
- Bobbink R., Hicks K., Galloway J., Spranger T., Alkemade R. et al.: *Ecol. Appl.* 20, 30 (2010).
- Dirnböck T., Grandin U., Bernhardt-Römermann M., Beudert B., Canullo R., et al.: *Glob. Change Biol.* 20, 429 (2014).
- Tietema A., Emmett B. A., Gundersen P., Kjonaas O. J., Koopmans C. J.: *Forest Ecol. Manag.* 101, 19 (1998).
- Sicard P., Augustatis A., Belyazid S., Calfapietra C., de Marco A. et al.: *Environ. Pollut.* 213, 977 (2016).
- Fowler D., Pyle J. A., Raven J. A., Sutton M. A.: *Philos. Roy. Soc. B* 368, 20130165 (2013).
- IPCC: *Climate Change 2007: Synthesis Report*. IPCC, Geneva 2007.
- Ravishankara A. R., Daniel J. S., Portmann R. W.: *Science* 326, 123 (2009).
- Finlayson-Pitts B. J., Pitts J. N. Jr.: *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academia Press, San Diego 2000.
- Seinfeld J. H., Pandis S. N.: *Atmospheric Chemistry and Physics, From Air Pollution to Climate Change*. J. Wiley, New York 1998.
- Paulot F., Jacob D. J., Henze D. K.: *Environ. Sci. Technol.* 47, 3226 (2013).
- Sutton M. A., Howard C. M., Erismann J. W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., Van Grinsven H., Grizzetti B. (ed.): *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge 2011.
- Su H., Cheng Y., Oswald R., Behrendt T., Trebs I., Meixner F. X., Andreae M. O., Cheng P., Zhang Y., Pöschl U.: *Science* 33, 1616 (2011).

21. Jickells T., Baker A. R., Cape J. N., Cornell S. E., Nemitz E.: *Philos. Roy. Soc. B* 368, 20130115 (2013).
22. Neff J. C., Holland E. A., Dentener F. J., McDowell W. H., Russell K. M.: *Biogeochemistry* 57/58, 99 (2002).
23. Cornell S. E.: *Environ. Pollut.* 159, 2214 (2011).
24. Cape J. N., Tang Y. S., González-Benítez J. M., Mitošinková M., Makkonen U., Joher M., Stok A.: *Biogeosciences* 9, 4401 (2012).
25. Hůnová I., Janoušková S.: *Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší*. Karolinum, Praha 2004.
26. Amodio M., Catino S., Dambruoso P. R., de Gennaro G., Di Gilio A., Giungato P., Laiola E., Marzocca A., Mazzone A., Sardaro A., Tutino M.: *Advances in Meteorology*, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/161730>, article ID 161730 (2014).
27. Brook J. R., Di-Giovanni F., Cakmak S., Meyers T. P.: *Atmos. Environ.* 31, 3911 (1997).
28. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, OJEC L 152.
29. Prošková J., Hůnová I.: *Meteorol. Zpr.* 59, 151 (2006).
30. Bridges K. S., Jickells T. D., Davies T. D., Zeman Z., Hůnová I.: *Atmos. Environ.* 36, 353 (2002).
31. Reis S., Pinder R. W., Zhang M., Lijie G., Sutton M. A.: *Atmos. Chem. Phys.* 9, 7657 (2009).
32. Sutton M. A., Dragosits U., Tang Y. S., Fowler D.: *Atmos. Environ.* 34, 855 (2000).
33. Blackall T. D., Wilson L. J., Theobald M. R., Milford C., Nemitz E., Bull J., Bacon P. J., Hamer K. C., Wanless S., Sutton M. A.: *Geophys. Res. Lett.* 34, L10801 (2007).
34. ČHMÚ: *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2014*. ČHMÚ, Praha 2015.
35. Hůnová I., Kurfürst P., Vlček O., Stráník V., Stoklasová P., Schovánková J., Srbová, D.: *Environ. Pollut.* 213, 1028 (2016).
36. Hůnová I., Maznová J., Kurfürst P.: *Environ. Pollut.* 184, 668 (2014).
37. Hůnová I., Šantroch J., Ostatnická J.: *Atmos. Environ.* 38, 887 (2004).
38. Hůnová I., Kurfürst P., Stráník V., Modlík M.: *Meteorol. Zpr.* 69, 108 (2016).
39. Behera S., Sharma M., Aneja V. P.: *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20, 8092 (2013).
40. Li Y., Schwandner F. M., Sewell H. J., Zivkovich A., Tigges M. et al.: *Atmos. Environ.* 83, 80 (2014).
41. Lammel G., Cape J. N.: *Chem. Soc. Rev.* 25, 361 (1996).
42. Spataro F., Ianniello A.: *J. Air Waste Manage.* 64, 1232 (2014).

I. Hůnová^{a,b} (^a *Czech Hydrometeorological Institute, Prague*, ^b *Charles University in Prague, Faculty of Science, Institute for Environmental Studies*): **Atmospheric Deposition of Nitrogen**

Nitrogen is an essential plant nutrient. Atmospheric deposition of nitrogen, which has substantially increased in recent decades due to human activities, is harmful to ecosystems, disturbing the nitrogen biogeochemical cycle, and resulting in acidification, eutrophication, and changes in biodiversity. Nitrogen species, both in reduced and oxidized forms contributing to nitrogen deposition and their transformations are described, and nitrogen monitoring activities in the Czech Republic are summarized. Moreover, the major problems to be tackled are highlighted.