



OHŇOSTROJE: toxická show s neúnosnými zdravotními riziky

- Chemické látky a prachové částice uvolňované během ohňostrojů jsou vysoce toxické a karcinogenní. Mají prokazatelně negativní a dlouhodobý dopad na lidské zdraví i životní prostředí.
- Z ovzduší, kde ohňostrojový smog může přetrvávat i řadu dnů, se škodlivé látky uvolňují do vody a půdy a stávají se tak součástí potravních řetězců.
- Značné riziko představují v ohňostrojích přítomné polycyklické aromatické uhlovodíky včetně benzo(a)pyrenu, chlorované aromatické uhlovodíky, oxidy síry, fosforu nebo dusíku.
- V ohňostrojovém smogu je přítomna řada prvků ve formě, která je pro člověka a životní prostředí vysoce toxická. Tyto kovy, mimo jiné měď, hliník, titan, baryum nebo lithium slouží k barevným efektům ohňostroje.
- Ohňostroje, zejména amatérské, nelze bez závažných zdravotních i environmentálních rizik provozovat.
- Je relevantní a odpovědné uvažovat o úplném zákazu ohňostrojů nebo o jejich zásadním omezení, jak je tomu například v Německu, Kanadě nebo v Austrálii.

Bez ohňostroju si řada lidí nedokáže představit silvestrovské oslavy. Osvětlená barevná obloha a zábavní pyrotechnika je ale doslova toxickou sprchou pro člověka i životní prostředí. Ročně se v Česku do ovzduší takto dostane alarmující množství nebezpečných a zdraví škodlivých látek. Mnohé ve formě, ve které se v přírodě přirozeně nevyskytují.

Tento AVex se věnuje popisu rizik plynoucích z používání zábavní pyrotechniky. Text vychází z kritického zpracování téměř 2000 původních prací publikovaných v mezinárodních recenzovaných časopisech s impaktním faktorem, jež se zabývaly tématem toxicity ohňostrojevého smogu. Z dosavadního vědeckého poznání vyplývá, že zejména amatérské ohňostroje nelze bez závažných zdravotních, environmentálních a dalších rizik provozovat.

Odhaduje se, že v rozvinutých zemích Evropy a v USA se novoročního ohňostroje v roli „střelce“ účastní každý desátý občan. Průměrný počet je přibližně 10 odpálených raket na jednoho amatérského pyrotechnika. V České republice to je za jedinou noc zhruba 10 milionů kusů zábavní pyrotechniky. Protože se jedná o počty bez nelegálně prodané pyrotechniky, skutečné množství může být výrazně vyšší.

Zastánci zábavní pyrotechniky často argumentují, že krátká novoroční epizoda nemůže vést k závažným důsledkům pro lidské zdraví nebo životní prostředí včetně zdraví zvířat atd. Není tomu tak. Například v Praze se střelby při výše uvedených počtech účastní přibližně 100 000 obyvatel, to je asi jeden milion vystřelených raket (s průměrným počtem 10 raket na střelce). Průměrná hmotnost rakety, bez ohledu na její obsah, činí asi 100 g. Během jedné hodiny tak v pražském ovzduší hoří neuvěřitelných 100 tun materiálu obsahujícího nebo vytvářejícího toxické sloučeniny.

Zábava v rizikovém složení

Zábavní pyrotechnika má heterogenní a velmi variabilní složení. Obsahuje palivo, pojiva a různá aditiva podporující nejen hoření, ale také barevný efekt ohňostroje.

Nejpoužívanějšími palivy jsou látky na bázi střelného prachu (směsi dusičnanu draselného, dřevěného uhlí a síry) s přísadami různých aditiv, jako jsou reaktivní kovy (hořčík, mangan, hliník, železo, zinek, antimon, stříbro, chrom), sacharidy a polysacharidy (sacharóza, laktóza, škrob) nebo různé polymery (korek, modifikované asfalty).

Jako pojiva se hojně využívají látky na bázi škrobu, želatiny, nitrocelulózy nebo různých polymerů. Pojiva často působí také jako oxidační činidla, která zvyšují efektivitu hoření.

Dalšími významnými oxidačními činidly používanými v zábavní pyrotechnice jsou chloristan a chlorečnan draselný nebo barnatý, chlornan barnatý, dichroman amonný, dusičnan barnatý, síran vápenatý nebo oxid železitý.

Přestože je použití mnoha dalších látek v zábavní pyrotechnice v zemích EU zakázáno, dle údajů v literatuře se objevuje na trhu značné množství produktů s obsahem olova, thalia a arzenu. Tato skutečnost dokládá velký podíl nelegální pyrotechniky na ohňostrojevému trhu.

Chemie barev

Požadovaný barevný efekt ohňostroje je dosahován přísadami konkrétního prvku, který je schopen během hoření uvolnit část své energie ve formě specifického barevného záření.

Například červené barvy se docílí přísadami stroncia a lithia, oranžové přísadami vápníku. Sodík propůjčuje ohňostroji žlutou barvu, baryum zelenou a měď modrou. Draslík, cesium a rubidium, případně kombinace mědi a stroncia poskytují fialový efekt, zatímco hořčík v kombinaci s hliníkem nebo titanem barví ohňostroj do stříbrné a bílé barvy. Většina z výše zmíněných kovů se přidává ve formě, která je pro člověka i životní prostředí vysoce toxická.

Životu nebezpečný koktejl

Zábavní pyrotechnika je na přelomu roku jedním z významných zdrojů emisí chemických látek do životního prostředí. Jejím hořením a explozí se uvolňuje hustý oblak kouře a během krátké doby se hromadí vysoké koncentrace širokého spektra pevných (prachových) částic a anorganických i organických polutantů.

Ohňostrojevý smog je plný škodlivých sloučenin. Kromě prvků a iontů prvků (kovů a metaloidů) se jedná například o velké množství toxických plyných produktů (oxidy síry, fosforu, dusíku) a dále organických sloučenin jako formaldehyd, acetaldehyd, butylacetát nebo rozličné organické hydroperoxydy. Mohou vznikat i chlorované toxické látky a polycyklické aromatické uhlovodíky včetně benzo(a)pyrenu, polychlorované dibenzodioxiny, polychlorované dibenzofurany nebo hexachlorbenzen, které jsou prokázanými karcinogeny a některé z nich způsobují i vrozené vývojové vady, v životním prostředí se velmi obtížně rozkládají a hromadí se v přírodě i v živých organismech.

Velmi problematickou složkou, která se uvolňuje při explozi zábavní pyrotechniky a na kterou je většina výše zmíněných polutantů navázána, jsou z pohledu lidského zdraví také prachové částice. Jejich koncentrace v ovzduší jsou během novoročních oslav abnormálně vysoké, limity jsou překračovány o desítky až stovky procent.

Plynné polutanty

Spalováním zábavní pyrotechniky se do ovzduší dostávají také plynné polutanty, jako jsou oxid uhelnatý, oxid siřičitý, oxid dusný, oxid dusičitý a přízemní ozon, které do jisté míry mohou ovlivnit chemii atmosféry i místní klima.

V případě zábavní pyrotechniky vzniká oxid uhelnatý obvykle nedokonalým spalováním uhlíku obsaženým v palivové směsi. Jeho průměrná koncentrace se může zvýšit až 3× proti tzv. běžnému pozadí, tj. normálním, běžně naměřeným hodnotám. Průměrná koncentrace oxidu siřičitého se může používáním zábavní pyrotechniky zvýšit až 10×, oxidu dusného nebo dusičitého až 4×. Přízemní ozon může stoupnout na dvojnásobek proti normálu.

Zplodinám pocházejícím z odpalu zábavní pyrotechniky jsou extrémním způsobem vystaveni nejen samotní účastníci ohňostrojevé zábavy, ale i lidé v jejich okolí (dle klimatických podmínek). Přímý vliv těchto chemických látek na lidské zdraví a životní prostředí pak závisí na rozptylových podmínkách, typu pyrotechniky a výšce světelného efektu.



Prachové částice

Prachové částice jsou drobné částice pevného skupenství volně rozptýlené ve vzduchu. Mají negativní vliv na zdravotní stav, především na dýchací a kardiovaskulární soustavu. Platí, že čím menší jsou prachové částice, tím horší je jejich působení na živé organismy.

Například částice menší než 10 μm (PM 10) pronikají do dolních cest dýchacích. Částice menší než 2,5 μm (PM 2,5) se usazují v průduškách. Do plicních sklípků pronikají částice menší než 1 μm (PM 1) a ultrajemné částice menší než 0,1 μm (PM 0,1) se mohou dostat až do krevního oběhu.

Důležitou vlastností prachových částic je jejich schopnost sorpce, tedy navázání různých chemických látek na svůj povrch (např. těžké kovy, polycyklické aromatické uhlovodíky, polychlorované bifenylly atd.), které mohou zvyšovat jejich negativní dopad na lidské zdraví.

V Brně, v Praze nebo Augsburgu

Podle výpočtů Německé agentury pro životní prostředí vyprodukovaly novoroční oslavy během několika hodin na území celého Německa kolem 1500 tun prachových částic (PM 10).

V Brně byla v letech 2017 a 2022 během novoročních oslav detekována koncentrace prachových částic (PM 10) až 6× vyšší než jejich hodinový imisní limit.








Extrémní koncentrace prachových částic byly detekovány i v roce 2023 v Táboře, kde byla během novoročních oslav detekována vůbec nejvyšší hodinová koncentrace PM 10 – více než 16× vyšší než hodinový imisní limit.

Pozadu však nezůstala ani další česká města, např. ve Znojmě, v Mladé Boleslavi a v Praze-Vyšocanech byla detekována hodinová koncentrace PM 10 překračující hodinový imisní limit až 8×.

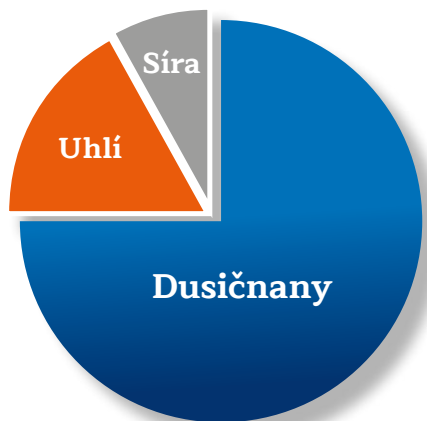
V německém Augsburgu byla naměřena nejvyšší koncentrace jemných prachových částic (PM 2,5) mezi půlnocí a druhou hodinou ranní – 2,4× (2020–2021) až 24× (2012–2013) vyšší než pozadová hodnota. Nízká koncentrace jemných prachových částic (PM 2,5) v roce 2020–2021 byla pravděpodobně způsobena mimořádnou situací v souvislosti s pandemií COVID-19.

Naopak v kanadském Montrealu byly v roce 2007 během festivalu International Fireworks Competition naměřeny extrémně vysoké koncentrace PM 2,5, až 1000× vyšší než pozadové hodnoty.

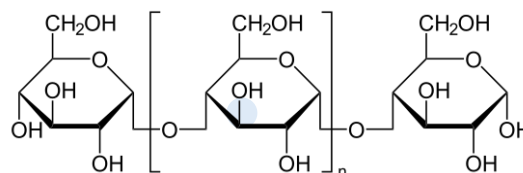
Chemické složení zábavní pyrotechniky

							
Červená	Oranžová	Žlutá	Zelená	Modrá	Fialová	Stříbrná	Bílá
Stroncium Lithium	Vápník	Sodík + železo	Baryum	Měď	Měď + stroncium Rubidium Draslík Cesium	Hořčík + hliník	Hořčík Hliník Titan
							

Palivo - střelný prach



Pojiva



Dextrin

Intenzifikátory



CHLOREČNANY



CHLORISTANY

Oxidační činidla



DUSIČNANY



CHLOREČNANY



CHLORISTANY

Výška rozhoduje

Amatérské ohňostroje představují nesrovnatelně vyšší riziko než ohňostroje profesionální, vedené akreditovanými ohňostrůjci. Zatímco běžná pyrotechnika vybuchuje ve výši 20 až 40 metrů nad zemskou úrovní, u profesionálních raket jde spíše o 100 m, kde se škodliviny mohou mnohem efektivněji a rychleji rozptýlit v atmosféře.

Nejen utržené prsty

Zatímco rizika poranění spojená s používáním zábavní pyrotechniky jsou veřejnosti dobře známa a lze je efektivně mírnit, například udržováním bezpečné vzdálenosti, toxické účinky emisí z ohňostrojů jsou podceňovány. A to i přesto, že mohou mít závažné a někdy i dlouhotrvající následky a zasahují i osoby, které se ohňostrojů dobrovolně neúčastní.

Prachové částice emitované detonací zábavní pyrotechniky ve většině případů obsahují na svém povrchu toxické kovy (kadmium, olovo, chrom, nikl), organické polutanty typu polycyklických aromatických uhlovodíků, které jsou prokazatelně identifikovány jako lidské karcinogeny, nebo teratogeny, tedy látky způsobující vrozené vývojové vady, či dokonce i endokrinní disruptory, látky narušující hormonální rovnováhu, například perchlorát.

Již krátkodobé vystavení vysokým koncentracím prachových částic je doprovázeno zvýšeným rizikem srdečně-cévních příhod. Data

z takzvaných smogových epizod dokumentují významný nárůst zdravotních problémů následovaný zvýšeným počtem hospitalizací a úmrtí již v řádu hodin či dní po nástupu smogové epizody.

Záchvaty u dětí

Vdechování látek emitovaných při ohňostrojích může způsobit široké spektrum dýchacích i jiných obtíží. Vysoké koncentrace polutantů z odpálené zábavní pyrotechniky mohou dráždit dýchací cesty, a vyvolávat tak příznaky astmatu, jež se projevují jako potíže s dýcháním, sipání, kašel a dušnost.

V odborné literatuře byly popsány i případy těžkých až fatálních astmatických záchvatů u dětí krátce po použití zábavní pyrotechniky. Kouř z ohňostrojů obsahuje řadu dráždivých látek (například oxid siřičitý), které mohou vést od podráždění dýchacích cest, přes zánět až k rozvoji bronchitidy.

Jednou a navždy

Na toxické účinky ohňostrojů se často pohlíží jako na jednorázovou záležitost. Mnohé chemické látky obsažené v pyrotechnice lze však těžko odbourat, kupříkladu těžké kovy, a zůstávají tak v lidském těle i v životním prostředí po velmi dlouhou dobu. K dalšímu nežádoucímu působení pak může přispět kontaminovaná voda, půda, případně další hromadění v potravním řetězci.

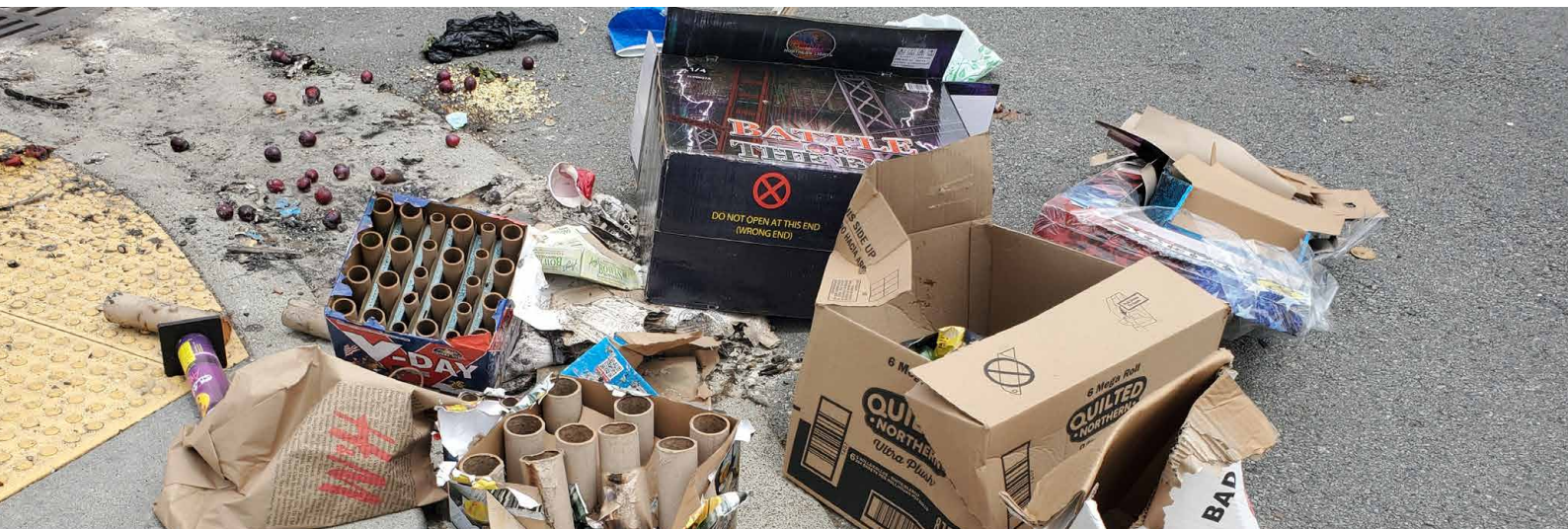
ZÁVĚRY

Zábavní pyrotechniku nelze bez závažných zdravotních a environmentálních rizik provozovat.

Odpovídající monitoring nelegálního prodeje pyrotechniky v ČR i v EU chybí.

S ohledem na prokázaná rizika a dopady na zdraví lidí a vliv na životní prostředí je na místě uvažovat o zásadním omezení zábavní pyrotechniky, případně o jejím celkovém zákazu.

Ve většině zemí dosud nebylo používání zábavní pyrotechniky plošně zakázáno, ale postupně se omezuje. Zákaz prodeje zábavní pyrotechniky široké veřejnosti platí například v Irsku, Austrálii nebo v americkém státu Massachusetts. Omezený prodej a použití pouze určitých kategorií zábavní pyrotechniky se uplatňuje kupříkladu v Německu, Nizozemí, Švédsku, Finsku nebo Kanadě.



AVEX 2/2023: OHŇOSTROJE: TOXICKÁ SHOW S NEÚNOSNÝMI ZDRAVOTNÍMI RIZIKY, ČERVEN 2023

Přehled použité literatury: <https://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/>

AVex je nezávislé a nestranné expertní stanovisko, které Akademie věd České republiky připravuje pro legislativní potřeby zákonodárců Poslanecké sněmovny a Senátu Parlamentu České republiky.

Přípravila Akademie věd ČR, odbornými guaranty stanoviska jsou Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, Ústav chemických procesů AV ČR a Ústav experimentální medicíny AV ČR.

Odpovědná redaktorka: Markéta Růžičková, e-mail: avex@kav.cas.cz, <http://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/>

Kontaktní osoby: doc. RNDr. Martin Pivokonský, Ph.D., Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, e-mail: pivo@ih.cas.cz, doc. Dr. Ing. Petr Klusoň, DrSc., Ústav chemických procesů AV ČR, e-mail: kluson@icpf.cas.cz, Ing. Mgr. Táňa Závodná, Ph.D., Ústav experimentální medicíny AV ČR, e-mail: tana.zavodna@iem.cas.cz

Použité prameny a odkazy AVex 2/2023

1. Abas, M. R. B., Mohamad, S. (2011). *Hazardous (Organic) Air Pollutants* (J. O. B. T.-E. of E. H. Nriagu (ed.); pp. 23–33). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00070-2>.
2. Al-Qattan, M. M., Al-Tamimi, A. S. (2009). Localized hand burns with or without concurrent blast injuries from fireworks. *Burns: Journal of the International Society for Burn Injuries*, 35(3), 425–429. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2008.06.015>.
3. Beig, G., Chate, D. M., Ghude, S. D., Ali, K., Satpute, T., Sahu, S. K., Parkhi, N., Trimbake, H. K. (2013). Evaluating population exposure to environmental pollutants during Deepavali fireworks displays using air quality measurements of the SAFAR network. *Chemosphere*, 92(1), 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.043>.
4. Berger, L. R., Kalishman, S., Rivara, F. P. (1985). Injuries from fireworks. *Pediatrics*, 75(5), 877–882.
5. Betha, R., a Balasubramanian, R. (2014). PM_{2.5} emissions from hand-held sparklers: chemical characterization and health risk assessment. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(5), 1477–1486. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.07.0255>.
6. Billiard, S. M., Meyer, J. N., Wassenberg, D. M., Hodson, P. V., Di Giulio, R. T. (2007). Nonadditive effects of PAHs on Early Vertebrate Development: mechanisms and implications for risk assessment. *Toxicological Sciences*, 105(1), 5–23. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfm303>.
7. Bralewska, K., Rakowska, J. (2020). Concentrations of Particulate Matter and PM-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Released during Combustion of Various Types of Materials and Possible Toxicological Potential of the Emissions: The Results of Preliminary Studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph17093202>.
8. Brzezina, J. (2022). <https://www.infoviz.cz/>.
9. Brzezina, J. (2023). <https://chmibrno.org/blog/>.
10. Caballero, S., Galindo, N., Castaner, R., Giménez Torres, J., Crespo, J. (2015). Real-Time Measurements of Ozone and UV Radiation during Pyrotechnic Displays. *Aerosol and Air Quality Research*, 15. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.04.0204>.
11. Cao, X., Zhang, X., Tong, D. Q., Chen, W., Zhang, S., Zhao, H., Xiu, A. (2018). Review on physicochemical properties of pollutants released from fireworks: environmental and health effects and prevention. *Environmental Reviews*, 26(2), 133–155. <https://doi.org/10.1139/er-2017-0063>.
12. Chatterjee, A., Sarkar, C., Adak, A., Mukherjee, U., Ghosh, S., Raha, S. (2013). Ambient Air Quality during Diwali Festival over Kolkata – A Mega-City in India. *Aerosol and Air Quality Research*, 13. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.03.0062>.
13. Chen, S.-C., Liao, C.-M. (2006). Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources. *Science of the Total Environment*, 366(1), 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006>.

14. Cheng, Y., Engling, G., He, K., Duan, F., Du, Z., Ma, Y., Liang, L., Lu, Z., Liu, J., Zheng, M., Weber, R. J. (2014). The characteristics of Beijing aerosol during two distinct episodes: impacts of biomass burning and fireworks. *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 185, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.037>.
15. Croteau, G., Dills, R., Beaudreau, M., Davis, M. (2010). Emission factors and exposures from ground-level pyrotechnics. *Atmospheric Environment*, 44(27), 3295–3303. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.048>.
16. Czech, H., Miersch, T., Orasche, J., Abbaszade, G., Sippula, O., Tissari, J., Michalke, B., Schnelle-Kreis, J., Streibel, T., Jokiniemi, J. (2018). Chemical composition and speciation of particulate organic matter from modern residential small-scale wood combustion appliances. *Science of the Total Environment*, 612, 636–648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.20>.
17. Devereux, R., Westhead, E. K., Jayaratne, R., Newport, D. (2022). Microplastic abundance in the Thames River during the New Year period. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 113534. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113534>.
18. Dhir, S. P., Shishko, M. N., Krewi, A., Mabruka, S. (1991). Ocular fireworks injuries in children. *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 28(6), 354–355. <https://doi.org/10.3928/0191-3913-19911101-16>.
19. Di Benedetto, G., Grasseti, L., Forlini, W., Bertani, A. (2009). An explosion in the mouth caused by a firework. *Journal of Plastic, Reconstructive a Aesthetic Surgery : JPRAS*, 62(6), e145-6. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2008.06.074>.
20. Dyke, P., Coleman, P., James, R. (1997). Dioxins in ambient air, bonfire night 1994. *Chemosphere*, 34(5), 1191–1201. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)00418-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)00418-9).
21. EPA <https://www.epa.gov/>.
22. Feng, J., Sun, P., Hu, X., Zhao, W., Wu, M., Fu, J. (2012). The chemical composition and sources of PM_{2.5} during the 2009 Chinese New Year's holiday in Shanghai. *Atmospheric Research*, 118, 435–444. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.08.012>.
23. Fernández-González, R., Yebra-Pimentel, I., Martínez-Carballo, E., Simal-Gándara, J., Pontevedra-Pombal, X. (2014). Atmospheric pollutants in fog and rain events at the northwestern mountains of the Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*, 497–498, 188–199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.093>.
24. Fišák, J., Stoyanova, V., Chaloupecký, P., Rezacova, D., Tsacheva, T., Kuppenova, T., Marinov, M. (2009). Soluble and Insoluble Pollutants in Fog and Rime Water Samples. *Soil and Water Research*, 4, S123–S130. <https://doi.org/10.17221/473-SWR>.
25. Fleischer, O., Wichmann, H., Lorenz, W. (1999). Release of polychlorinated dibenzop-dioxins and dibenzofurans by setting off fireworks. *Chemosphere*, 39(6), 925–932. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00019-3).
26. Ganguly, N. (2009). Surface ozone pollution during the festival of Diwali, New Delhi, India. *Earth Science India*, 2, 224–229. [ISSN:0974 – 8350](https://doi.org/10.1007/s12040-009-0001-3).

27. Ganguly, N. D. (2015). Short term change in relative humidity during the festival of Diwali in India. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 129, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.04.007>.
28. Gouder, C., Montefort, S. (2014). Potential impact of fireworks on respiratory health. *Lung India: Official Organ of Indian Chest Society*, 31(4), 375–379. <https://doi.org/10.4103/0970-2113.142124>.
29. Han, G., Gong, W., Quan, J. H., Li, J., Zhang, M. (2014). Spatial and temporal distributions of contaminants emitted because of Chinese New Year's Eve celebrations in Wuhan. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 16(4), 916–923. <https://doi.org/10.1039/C3EM00588G>.
30. Hart, K. M., Tremp, J., Molnar, E., Giger, W. (1993). The occurrence and the fate of organic pollutants in the atmosphere. *Water, Air, and Soil Pollution*, 68(1), 91–112. <https://doi.org/10.1007/BF00479395>.
31. Hirai, K., Yamazaki, Y., Okada, K., Furuta, S., Kubo, K. (2000). Acute eosinophilic pneumonia associated with smoke from fireworks. *Internal Medicine (Tokyo, Japan)*, 39(5), 401–403. <https://doi.org/10.2169/internalmedicine.39.401>.
32. Jia, C., Xue, Z., Fu, X., Sultana, F., Smith, L. J., Zhang, Y., Li, Y., Liu, B. (2020). Impacts of Independence Day fireworks on pollution levels of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the U.S. *Science of The Total Environment*, 743, 140774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140774>.
33. Joly, A., Smargiassi, A., Kosatsky, T., Fournier, M., Dabek-Zlotorzynska, E., Celo, V., Mathieu, D., Servranckx, R., D'amours, R., Malo, A., Brook, J. (2010). Characterisation of particulate exposure during fireworks displays. *Atmospheric Environment*, 44(34), 4325–4329. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.010>.
34. Keller, F., Schragen, C. (2021). Determination of Particulate Matter Emission Factors of Common Pyrotechnic Articles. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 46(5), 825–842. <https://doi.org/10.1002/prep.202000292>.
35. Khedr, M., Liu, X., Hadiatullah, H., Orasche, J., Zhang, X., Cyrus, J., Michalke, B., Zimmermann, R., Schnelle-Kreis, J. (2022). Influence of New Year's fireworks on air quality – A case study from 2010 to 2021 in Augsburg, Germany. *Atmospheric Pollution Research*, 13(3), 101341. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101341>.
36. Kong, S., Li, X., Li, L., Yin, Y., Chen, K., Yuan, L., Zhang, Y., Shan, Y., Ji, Y. (2015). Variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM_{2.5} during winter haze period around 2014 Chinese Spring Festival at Nanjing: Insights of source changes, air mass direction and firework particle injection. *Science of The Total Environment*, 520, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.001>.
37. Li, X., Guo, X., Liu, X., Liu, C., Zhang, S., Wang, Y. (2009). Distribution and sources of solvent extractable organic compounds in PM_{2.5} during 2007 Chinese Spring Festival in Beijing. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 21(2), 142–149. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62242-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62242-1).

38. Mahecha, G. S., Bamniya, B. R., Kapasya, V., Meena, R. S. (2012). Noise pollution monitoring during Diwali festival in Golden city Jaisalmer of Rajasthan, India. *The Environmentalist*, 32, 415–419. <https://doi.org/10.1007/s10669-012-9404-7>.
39. Mandal, P., Prakash, M., Bassin, J. (2011). Impact of Diwali celebrations on urban air and noise quality in Delhi City, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 209–215. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1960-7>.
40. Miranda, J., Barrera, V. A., Espinosa, A. A., Galindo, O. S., Núñez-Orosco, A., Montesinos, R. C., Leal-Castro, A., Meinguer, J. (2004). PIXE analysis of atmospheric aerosols from three sites in Mexico City. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 219, 157–160. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.045>.
41. Moore, R. S. J., Tan, V., Dormans, J. P., Bozentka, D. J. (2000). Major pediatric hand trauma associated with fireworks. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 14(6), 426–428. <https://doi.org/10.1097/00005131-200008000-00008>.
42. Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Amato, F., Pey, J., Pandolfi, M., Kuenzli, N., Bouso, L., Rivera, M., Gibbons, W. (2010). Effect of fireworks events on urban background trace metal aerosol concentrations: Is the cocktail worth the show? *Journal of Hazardous Materials*, 183(1), 945–949. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.082>.
43. Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Minguillón, M. C., Pey, J., Rodriguez, S., Miró, J. V., Felis, C., Gibbons, W. (2007). Recreational atmospheric pollution episodes: Inhalable metalliferous particles from firework displays. *Atmospheric Environment*, 41(5), 913–922. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.09.019>.
44. Orasche, J., Seidel, T., Hartmann, H., Schnelle-Kreis, J., Chow, J. C., Ruppert, H., Zimmermann, R. (2012). Comparison of emissions from wood combustion. Part 1: emission factors and characteristics from different small-scale residential heating appliances considering particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) – related toxicological potential. *Energy & Fuels*, 26(11), 6695–6704. <https://doi.org/10.1021/ef301295k>.
45. Pace, C., Vella, A. J. (2019). Contamination of water resources of a small island state by fireworks-derived perchlorate: A case study from Malta. *Environmental Pollution*, 250, 475–481. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.012>.
46. Pacyna, J. M. (2008). *Atmospheric Deposition* (S. E. Jørgensen B. D. B. T.-E. of E. Fath (eds.); pp. 275–285). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00258-5>.
47. Pant, P., Harrison, R. M. (2013). Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment*, 77, 78–97. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>.
48. Pathak, B., Bharali, C., Biswas, J., Bhuyan, P. (2013). Firework Induced Large Increase in Trace Gases and Black Carbon at Dibrugarh, India. *Journal of Earth Science and Engineering*, 3, 540–544.

49. Pongpiachan, S., Hattayanone, M., Suttinun, O., Khumsup, C., Kittikoon, I., Hirunyatrakul, P., Cao, J. (2017). Assessing human exposure to PM₁₀-bound polycyclic aromatic hydrocarbons during fireworks displays. *Atmospheric Pollution Research*, 8(5), 816–827. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.01.014>.
50. Pope, C. A. 3rd, Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287(9), 1132–1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>.
51. Rai, P., Furger, M., Slowik, J. G., Canonaco, F., Fröhlich, R., Hüglin, C., Minguillón, M. C., Petterson, K., Baltensperger, U., Prévôt, A. S. H. (2020). Source apportionment of highly time-resolved elements during a firework episode from a rural freeway site in Switzerland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(3), 1657–1674. <https://doi.org/10.5194/acp-20-1657-2020>.
52. Ross, J. A., Nesnow, S. (1999). Polycyclic aromatic hydrocarbons: correlations between DNA adducts and ras oncogene mutations¹This manuscript has been reviewed by the National Health and Environmental Effects Research Laboratory, U.S. EPA and approved for publication. Mention of trade names or commercial products should not be construed as endorsement or recommendation for use.¹ *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 424(1), 155–166. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(99\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(99)00016-0).
53. Sacu, S., Ségur-Eltz, N., Stenng, K., Zehetmayer, M. (2002). Ocular firework injuries at New Year's eve. *Ophthalmologica. Journal International d'ophtalmologie. International Journal of Ophthalmology. Zeitschrift Fur Augenheilkunde*, 216(1), 55–59. <https://doi.org/10.1159/000048298>.
54. Sanderson, P., Delgado-Saborit, J. M., Harrison, R. M. (2014). A review of chemical and physical characterisation of atmospheric metallic nanoparticles. *Atmospheric Environment*, 94, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.023>.
55. Sarkar, S., Khillare, P. S., Jyethi, D. S., Hasan, A., Parween, M. (2010). Chemical speciation of respirable suspended particulate matter during a major firework festival in India. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1), 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.039>.
56. Silva Passos, R., da Rocha, C. A. A. C., de Carvalho, A. P. O., da Silva, L. B., da Silva, R. L. A. (2021). Environmental noise exposure assessment from fireworks at festivals and pilgrimages in Northern Portugal. *Applied Acoustics*, 181, 108143. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108143>.
57. Sundelin, K., Norrsell, K. (2000). Eye injuries from fireworks in Western Sweden. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 78(1), 61–64. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0420.2000.078001061.x>.
58. Schmeltz, I., Hoffmann, D. (1976). Formation of polynuclear aromatic hydrocarbons from combustion of organic matter. *Carcinogenesis*, 1, 225–239.

59. Schmid, P., Bogdal, C., Wang, Z., Azara, V., Haag, R., von Arx, U. (2014). Releases of chlorobenzenes, chlorophenols and dioxins during fireworks. *Chemosphere*, 114, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.088>.
60. Schwartz, J., Neas, L. M. (2000). Fine particles are more strongly associated than coarse particles with acute respiratory health effects in schoolchildren. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 11(1), 6–10. <https://doi.org/10.1097/00001648-200001000-00004>.
61. Shi, G.-L., Liu, G.-R., Tian, Y.-Z., Zhou, X.-Y., Peng, X., a Feng, Y.-C. (2014). Chemical characteristic and toxicity assessment of particle associated PAHs for the short-term anthropogenic activity event: During the Chinese New Year's Festival in 2013. *Science of The Total Environment*, 482–483, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.107>.
62. Silva Passos, R., da Rocha, C. A. A. C., de Carvalho, A. P. O., da Silva, L. B., da Silva, R. L. A. (2021). Environmental noise exposure assessment from fireworks at festivals and pilgrimages in Northern Portugal. *Applied Acoustics*, 181, 108143. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108143>.
63. Singh, D. P., Gadi, R., Mandal, T. K., Dixit, C. K., Singh, K., Saud, T., Singh, N., Gupta, P. K. (2010). Study of temporal variation in ambient air quality during Diwali festival in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 169(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1145-9>.
64. Srogi, K. (2007). Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 5(4), 169–195.
65. Sundelin, K., Norrsell, K. (2000). Eye injuries from fireworks in Western Sweden. *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, 78(1), 61–64. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0420.2000.078001061.x>.
66. Tian, Y. Z., Wang, J., Peng, X., Shi, G. L., Feng, Y. C. (2014). Estimation of direct and indirect impacts of fireworks on the physicochemical characteristics of atmospheric fine and coarse particles. *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 14(8), 11075–11101. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/acpd-14-11075-2014>.
67. UBA, 2020. 2.050 Tonnen Feinstaub durch Feuerwerk pro Jahr Feinstaubbelastung in der Atemluft an Neujahr besonders hoch. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/2050-tonnenfeinstaub-durch-feuerwerk-pro-jahr>, Accessed 20th January 2023.
68. van Kamp, I., van der Velden, P. G., Stellato, R. K., Roorda, J., van Loon, J., Kleber, R. J., Gersons, B. B. R., Lebet, E. (2006). Physical and mental health shortly after a disaster: first results from the Enschede firework disaster study. *European Journal of Public Health*, 16(3), 253–259. <https://doi.org/10.1093/eurpub/cki188>.
69. Vecchi, R., Bernardoni, V., Cricchio, D., D'Alessandro, A., Fermo, P., Lucarelli, F., Nava, S., Piazzalunga, A., Valli, G. (2008). The impact of fireworks on airborne particles. *Atmospheric Environment*, 42(6), 1121–1132. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.047>.

70. Wilkin, R. T., Fine, D. D., Burnett, N. G. (2007). Perchlorate Behavior in a Municipal Lake Following Fireworks Displays. *Environmental Science a Technology*, 41(11), 3966–3971. <https://doi.org/10.1021/es0700698>.
71. Zhang, M., Wang, X., Chen, J., Cheng, T., Wang, T., Yang, X., Gong, Y., Geng, F., Chen, C. (2010). Physical characterization of aerosol particles during the Chinese New Year's firework events. *Atmospheric Environment*, 44(39), 5191–5198. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.08.048>.