

Toto PDF obsahuje kapitolu z knihy:
Zdeněk Fiala, Drahomíra Holmannová (ed.):
Uhlíkové nanomateriály. Biomedicínské aplikace a toxicita,
Praha: Karolinum 2025,
<https://doi.org/10.14712/9788024659848>.

2. Toxikokinetika a biologické interakce uhlíkových nanomateriálů (Zdeněk Fiala, Drahomíra Holmannová)

© Univerzita Karlova, 2025
© Zdeněk Fiala, Drahomíra Holmannová, 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution
4.0 International License (CC BY 4.0), which permits unrestricted use,
distribution, and reproduction in any medium, provided the original
author and source are credited.

<https://doi.org/10.14712/9788024659848.2>

2 TOXIKOKINETIKA A BIOLOGICKÉ INTERAKCE UHLÍKOVÝCH NANOMATERIÁLŮ

Chování uhlíkových nanomateriálů (CNM) v biologických systémech je ovlivňováno mnoha faktory a prozatím neumožňuje formulaci ucelenějších závěrů. Konečný toxický/terapeutický účinek CNM silně závisí na fyzikálně-chemických vlastnostech, aplikačních (expozičních) cestách, charakteru distribuce v organismu, způsobech prostupu částic do intracelulárního prostředí a na mechanismech indukce buněčné toxicity. Uvedené faktory modulují interakce CNM s buněčnými membránami, buněčnou internalizaci a interference s buněčnými funkcemi. Z pohledu toxikokinetiky mohou CNM zasahovat do všech hlavních pochodů, které ovlivňují osud xenobiotik v organismu (absorpce, distribuce, kumulace, biotransformace a eliminace).

2.1 FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Uspořádání atomů v nanočásticích (krystalická struktura) významně ovlivňuje funkčnost CNM.¹ Podle krystalické struktury lze rozlišit sférické CNM (například fullereny a nanodiamanty), jednorozměrné CNM (například CNT), dvojrozměrné CNM (například grafen) a trojrozměrné CNM (například nanodiamanty a grafit).²

Velikost a povrch částic významně modifikují jejich absorpci, distribuci, kumulaci, biotransformaci a eliminaci. Velikost částic determinuje vstup CNM do systémové cirkulace po všech formách expozice, mimo aplikaci nitrožilní (v případě agregace částic je determinujícím faktorem velikost agregátů). Menší částice mají obecně vyšší míru translokace s vyšší biologickou dostupností. Po vstupu do systémové cirkulace jsou částice s průměrem větším než 2 μm separovány plicními kapilárními cévami. Menší částice se distribuují do tkání a orgánů (mimo kostní dřeň) a velmi malé částice s průměrem pod 100 nm vstupují (vedle ostatních tkání a orgánů) i do kostní dřeně.^{2,3}

Vlastnosti povrchu CNM, reprezentované především nábojem, hydrofilitou/hydrofobitou a funkčními skupinami, určují charakter jejich interakcí s biologickými systémy. Ty mohou mít povahu elektrostatických či hydrofobních interakcí, vodíkových vazeb nebo π - π interakcí.^{4,5} Vysoká interakční aktivita může významně omezovat vstup a chování částic CNP v biologickém systému.

Povrchový náboj významně určuje míru translokace částic do intracelulárního prostředí. Kladně nabitě částice jsou translokovány snadněji než částice neutrální či částice záporně nabitě. Povrchový náboj ovlivňuje rovněž vazbu částic na plazmatické proteiny, jejich průnik

hematoencefalickou bariérou a jejich interakce s krevními buňkami (hemolýzu a agregaci krevních destiček).⁶ Pozitivní povrchový náboj bývá často spojován s toxickými projevy a prozánětlivým potenciálem. Bylo prokázáno, že vyšší hustota pozitivního povrchového náboje úzce souvisí s oxidačním stresem, mitochondriální dysfunkcí a produkcí IL-8.^{7,8}

Rovněž tvar částic významně modifikuje proces jejich přestupu přes buněčnou membránu do intracelulárního prostředí (endocytózu).⁹ Různé tvary částic jsou pohlcovány odlišnými způsoby, přičemž endocytóza sférických CNM je obecně rychlejší než endocytóza jiných tvarů (tyčinky, pláty nebo hranoly).⁶ Tvar má vliv i na variabilitu distribuce absorbovaných částic v organismu. Například fullereny (kulatý tvar) a CNT (tubulární tvar) sice vykazují podobný distribuční obraz, avšak liší se charakterem kumulace v retikuloendoteliálním systému (RES). Oxidované víceštěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNT) a oxid grafenu (GO) s velmi podobnými povrchovými funkcemi prezentují zcela odlišné distribuční obrazy.^{7,10} Tvar částic má rovněž vliv na toxicitu. Například MWCNT (na rozdíl od sférických částic) jsou schopny blokovat autofagický tok.¹¹ Expozice makrofágů RAW246.7 nanočásticím sazí (*carbon black*) a nanografitu vyvolala apoptózu a nekrózu, zatímco MWCNT tento efekt nevykázaly.^{12,13}

Povrchová modifikace/funkcionalizace (kovalentní a nekovalentní formy) se často používá k ovlivnění biologických vlastností/stability, biokompatibility, biologické rozložitelnosti, farmakokinetiky, distribuce, kumulace a toxicity CNM. Povrch může být modifikován širokou škálou atomů a molekul, včetně polymerů.² Mezi typické modifikátory lze zařadit kovy, např. stříbro, zlato, dále polyethylenglykol (PEG), fluorescenční sondy, kyselinu ethylenodiamintetraoctovou (EDTA) atd.^{14,15}

Tvorba korony představuje spontánní adsorpci biomolekul, zejména proteinů, na povrch CNM.¹⁶ Proteinová korona se může skládat ze stovek proteinů, které mění velikost CNM, jejich náboj, morfologii, stav agregace a charakter interakcí s jinými molekulami. Těmito cestami může korona ovlivňovat absorpci, distribuci, kumulaci, biotransformaci i eliminaci CNM.¹⁷ Kromě uvedených typických toxikologických deskriptorů může proteinová korona významně ovlivňovat i aktivitu imunitního systému (aktivaci komplementu) a koagulaci.^{18–20}

Mezi další důležité faktory, které ovlivňují chování CNM v biologických systémech, patří agregace, povrchová energie, chemická reaktivita a biologické prostředí (pH, iontová síla, viskozita a anorganické či organické sloučeniny), stabilita částic, mezimolekulární interakce, tvorba komplexů, proces přenosu náboje a konformační změny biologických makromolekul při interakcích s částicemi.^{7,21}

2.2 APLIKAČNÍ (EXPOZIČNÍ) CESTY A DISTRIBUCE V ORGANISMU

Míra a intenzita toxického účinku CNM úzce souvisí s velikostí dávky a formou expozice. Základními expozičními formami, které přicházejí v životním (pracovním) prostředí obecně v úvahu, jsou inhalace, ingesce a dermální expozice.^{22,23} Nejčastější formou medicínské aplikace bývá naproti tomu aplikace intravenózní, která představuje téměř 100% biologickou dostupnost.²⁴

Inhalační absorpce vede k vysoké akumulaci částic v respiračním traktu s jejich následnou translokací do přilehlých struktur (pohrudnice, plicnice) a do systémové cirkulace. Paralelně dochází k jejich eliminaci z organismu prostřednictvím mukociliárního systému.^{25,26}

K absorpci a následné translokaci do systémové cirkulace dochází rovněž po perorální expozici. Po intraperitoneálním podání se částice dostávají do kontaktu s orgány v dutině břišní a různou měrou prostupují do jejich tkání.^{27,28}

Prostup CNM do tkání závisí na typu buněk, jejich proliferační a regenerační aktivitě a na obranných mechanismech jejich povrchových vrstev (přítomnost povrchově aktivních látek, slzného filmu či hleny a pohyb řasinek).²⁹ Některé tkáně a orgány jsou schopny ve zvýšené míře CNM vylučovat (ledviny, dýchací cesty), jiné, zejména retikuloendoteliální tkáně, CNM kumulují (lymfatické uzliny, plíce, slezina, játra).^{30,31}

Hlavním mechanismem záchytu CNM v RES je pravděpodobně opsonizace. Snížení míry této formy záchytu je možné dosáhnout oslabením interakcí mezi CNM a opsoniny, například cestou redukce povrchového náboje nebo zvýšením hydrofility částice.³² Jednu z neúčinnějších forem funkcionalizace CNM za účelem dosažení proteinové rezistence představuje potažení částic PEG.^{33,34} Výsledky studií uvádějí, že CNM pokryté PEG cirkulují déle a jsou RES zachycovány méně. Další důležitou vlastností CNP je jejich schopnost procházet hematoencefalickou bariérou.^{35,36}

2.3 PROSTUP DO INTRACELULÁRNÍHO PROSTŘEDÍ A MECHANISMY BUNĚČNÉ TOXICITY

Na buněčné úrovni závisí translokace CNM do intracelulárního prostoru především na míře a charakteru interakcí částic s buněčnou membránou, které jsou, společně s interakcemi částic s vnitrobuněčným prostředím hlavními determinujícími faktory buněčné toxicity a genotoxicity.^{6,37}

Mezi nejznámější formy internalizace nanočástic jsou řazeny fagocytóza, makropinocytóza a mikropinocytóza, endocytóza závislá na klatrinu, endocytóza nezávislá na klatrinu, endocytóza závislá na caveolinu, difúze atd.^{38–40} CNM tak mohou pronikat přímo do cytoplazmy, mohou do ní být uvolňovány z endozomů nebo mohou být internalizovány do vezikul vytvořených z buněčné membrány během endocytózy (endozomy, fagozomy a pinozomy).^{41,42}

V intracelulárním prostředí CNM interagují s mitochondriemi, endoplazmatickým retikulem a jádrem. Mohou ovlivňovat genom a interferovat se signálními cestami. V závislosti na charakteru CNM dochází v intracelulárním prostředí k jejich modifikaci. CNM (či jejich modifikované formy) jsou z buněk odstraňovány exocytózou.⁴³

Mezi nejznámější mechanismy buněčné toxicity (indukované CNM) patří narušování buněčných membrán, včetně membrán organel a jádra (poškození buněčné integrity a funkcí organel), tvorba reaktivních forem kyslíku (ROS), interakce s enzymy, změny stability buněčného skeletu, změny buněčného cyklu, redukce mitózy, indukce apoptózy, interakce s DNA, indukce genové transkripce (prozánětlivé cytokiny) a epigenetických změn, změny replikace a translace, narušení opravných mechanismů DNA, spuštění zánětlivé odpovědi, sestavování multiproteinových komplexů (inflamozomů), produkce prozánětlivých cytokinů, uvolňování alarminů a prezentace intracelulárních antigenů.^{12,44}

2.4 ZÁVĚR

CNM představují vysoce heterogenní skupinu látek, jejíž členové se výrazně odlišují svými fyzikálně-chemickými vlastnostmi, a hlavně chováním v živých organismech. Mají různou schopnost pronikat do organismu a tkání, interagovat s buňkami a vstupovat do nich, ovlivňovat buněčnou aktivitu, a jsou také různě úspěšně eliminovány z organismu, tj. někdy může docházet ke tkáňové kumulaci. Velmi pestrá paleta interakcí s vnějším i vnitřním prostředím se tak stává základem pro jejich široké využití CNM nejen v medicíně, ale i v dalších oborech lidské činnosti. Zároveň s tím je však nutné mít na paměti, že CNM mohou vykazovat také určitou míru toxicity a vést k poškození životního prostředí, flóry a fauny včetně člověka. V následujících kapitolách bychom se oběma aspekty chtěli věnovat podrobněji.

2.5 LITERATURA

1. Nasir S, Hussein MZ, Zainal Z, Yusof NA. Carbon-Based Nanomaterials/Allotropes: A Glimpse of Their Synthesis, Properties and Some Applications. *Mater.* 2018;11(2):295. doi:10.3390/ma11020295.
2. Zarzycki PK. *Pure and Functionalized Carbon-Based Nanomaterials: Analytical, Biomedical, Civil, and Environmental Engineering Applications.* Routledge; 2022. ISBN: 9780367532147.
3. Rahmati M, Mozafari M. Biological Response to Carbon-Family Nanomaterials: Interactions at the Nano-Bio Interface. *Front Bioeng Biotechnol.* 2019;7:4. doi:10.3389/fbioe.2019.00004.
4. Lee A, Beak S, Lee S et al. Hydrophilic/Hydrophobic Characteristics on the Carbon Nanotube Buckypapers With Various Mechanical and Chemical Manufacture Process. *Diam Relat Mater.* 2020;110:108152. doi:10.1016/J.DIAMOND.2020.108152.
5. Camilli L, Capista D, Eramo P et al. Synthesis of Hydrophilic Carbon Nanotube Sponge via Post-Growth Thermal Treatment. *Nanotechnology.* 2022;33(24):245707. doi:10.1088/1361-6528/AC5BB7.
6. Sousa De Almeida M, Susnik E, Drasler B, Taladriz-Blanco P, Petri-Fink A, Rothen-Rutishauser B. Understanding Nanoparticle Endocytosis to Improve Targeting Strategies in Nanomedicine. *Chem Soc Rev.* 2021;50(9):5397–5434. doi:10.1039/d0cs01127d.
7. Feng L, Liu Z. Biomedical Applications and Toxicology of Carbon Nanomaterials. In: Chen C, Wang H, eds. *Biomedical Applications of Carbon Nanomaterials.* Wiley-VCH; 2016:131–162. doi:10.1002/9783527692866.ch5.
8. Weiss M, Fan J, Claudel M et al. Density of Surface Charge Is a More Predictive Factor of the Toxicity of Cationic Carbon Nanoparticles Than Zeta Potential. *J Nanobiotechnology.* 2021;19(1):5. doi:10.1186/s12951-020-00747-7.
9. Rauti R, Musto M, Bosi S, Prato M, Ballerini L. Properties and Behavior of Carbon Nanomaterials When Interfacing Neuronal Cells: How Far Have We Come? *Carbon.* 2019;143:430–446. doi:10.1016/J.CARBON.2018.11.026.
10. Lin Z, Zhang H, Huang J, et al. Biodistribution of Single-walled Carbon Nanotubes in Rats, *Toxicology Research.* 2014; 3(6): 497–502. doi.org/10.1039/c3tx50059d.
11. Cohignac V, Landry MJ, Ridoux A et al. Carbon Nanotubes, but Not Spherical Nanoparticles, Block Autophagy by a Shape-Related Targeting of Lysosomes in Murine Macrophages. *Autophagy.* 2018;14(8):1323–1334. doi:10.1080/15548627.2018.1474993.
12. Yuan X, Zhang X, Sun L, Wei Y, Wei X. Cellular Toxicity and Immunological Effects of Carbon-Based Nanomaterials. *Part Fibre Toxicol.* 2019;16(1):1–27. doi:10.1186/S12989-019-0299-Z.

13. Figarol A, Pourchez J, Boudard D et al. In Vitro Toxicity of Carbon Nanotubes, Nano-Graphite and Carbon Black, Similar Impacts of Acid Functionalization. *Toxicol Vitro*. 2015;30(1):476–485. doi:10.1016/j.tiv.2015.09.014.
14. Speranza G. Carbon Nanomaterials: Synthesis, Functionalization and Sensing Applications. *Nanomater*. 2021;11(4):967. doi:10.3390/nano11040967.
15. Díez-Pascual AM. Chemical Functionalization of Carbon Nanotubes With Polymers: A Brief Overview. *Macromol*. 2021;1(2):64–83. doi:10.3390/macromol1020006.
16. Bilardo R, Traldi F, Vdovchenko A, Resmini M. Influence of Surface Chemistry and Morphology of Nanoparticles on Protein Corona Formation. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol*. 2022;14(4):e1788. doi:10.1002/WNAN.1788.
17. Yu Q, Zhao L, Guo C, Yan B, Su G. Regulating Protein Corona Formation and Dynamic Protein Exchange by Controlling Nanoparticle Hydrophobicity. *Front Bioeng Biotechnol*. 2020;8:210. doi:10.3389/fbioe.2020.00210.
18. Pinals RL, Yang D, Rosenberg DJ et al. Protein Corona Composition and Dynamics on Carbon Nanotubes in Blood Plasma and Cerebrospinal Fluid. *bioRxiv*. Published January 13, 2020. doi:10.1101/2020.01.13.905356.
19. Kenry. Understanding the Hemotoxicity of Graphene Nanomaterials Through Their Interactions With Blood Proteins and Cells. *J Mater Res*. 2018;33(1):44–57. doi:10.1557/jmr.2017.388.
20. Palmieri V, Perini G, De Spirito M, Papi M. Graphene Oxide Touches Blood: In Vivo Interactions of Bio-Coronated 2D Materials. *Nanoscale Horiz*. 2019;4(2):273–290. doi:10.1039/C8NH00318A.
21. Gattoo MA, Naseem S, Arfat MY, Mahmood Dar A, Qasim K, Zubair S. Physicochemical Properties of Nanomaterials: Implication in Associated Toxic Manifestations. *Biomed Res Int*. 2014;2014(1):498420. doi:10.1155/2014/498420.
22. Podkolodnaya OA, Ignatieva EV, Podkolodnyy NL, Kolchanov NA. Routes of Nanoparticle Uptake Into Mammalian Organisms, Their Biocompatibility and Cellular Effects. *Biol Bull Rev*. 2012;2(4):279–289. doi:10.1134/s2079086412040068.
23. Paramasivam G, Palem VV, Meenakshy S et al. Advances on Carbon Nanomaterials and Their Applications in Medical Diagnosis and Drug Delivery. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2024;241:114032. doi: 10.1016/j.colsurfb.2024.114032.
24. Holmannova D, Borsky P, Svadlakova T, Borska L, Fiala Z. Carbon Nanoparticles and Their Biomedical Applications. *Appl Sci*. 2022;12(15):7865. doi:10.3390/APP12157865.
25. Nemmar A, Hoet PHM, Vanquickenborne B et al. Passage of Inhaled Particles Into the Blood Circulation in Humans. *Circulation*. 2002;105(4):411–414. doi:10.1161/hc0402.104118.
26. Laux P, Riebeling C, Booth AM et al. Biokinetics of Nanomaterials: The Role of Biopersistence. *NanoImpact*. 2017;6:69–80. doi:10.1016/J.IMPACT.2017.03.003.
27. Jacobsen NR, Møller P, Clausen PA et al. Biodistribution of Carbon Nanotubes in Animal Models. *Basic Clin Pharmacol Toxicol*. 2017;121:30–43. doi:10.1111/bcpt.12705.
28. Chenthamara D, Subramaniam S, Ramakrishnan SG et al. Therapeutic Efficacy of Nanoparticles and Routes of Administration. *Biomater Res*. 2019;23(1). doi:10.1186/s40824-019-0166-x.
29. Zhang Y, Bai Y, Jia J et al. Perturbation of Physiological Systems by Nanoparticles. *Chem Soc Rev*. 2014;43(10):3762–3809. doi:10.1039/c3cs60338e.
30. Mortensen NP, Snyder RW, Pathmasiri W, Moreno Caffaro M, Sumner SJ, Fennell TR. Intravenous Administration of Three Multiwalled Carbon Nanotubes to Female Rats and Their Effect on Urinary Biochemical Profile. *J Appl Toxicol*. 2022;42(3):409–422. doi:10.1002/jat.4226.
31. Zhang A, Meng K, Liu Y et al. Absorption, Distribution, Metabolism, and Excretion of Nanocarriers in Vivo and Their Influences. *Adv Colloid Interface Sci*. 2020;284:102261. doi:10.1016/J.CIS.2020.102261.
32. Kotagiri N, Kim JW. Stealth Nanotubes: Strategies of Shielding Carbon Nanotubes to Evade Opsonization and Improve Biodistribution. *Int J Nanomedicine*. 2014;9(Supplement 1):85–105. doi:10.2147/IJN.S51854.

33. Yang ST, Luo J, Zhou Q, Wang H. Pharmacokinetics, Metabolism and Toxicity of Carbon Nanotubes for Bio-Medical Purposes. *Theranostics*. 2012;2(3):271–282. doi:10.7150/thno.3618.
34. Tang Y, Wang X, Li J et al. Overcoming the Reticuloendothelial System Barrier to Drug Delivery With a “Don’t-Eat-Us” Strategy. *ACS Nano*. 2019; 13(11):13015–13026. doi:10.1021/ACS.NANO.9B05679.
35. Hasannejad-Asl B, Pooresmaeil F, Choupani E et al. Nanoparticles as Powerful Tools for Crossing the Blood-Brain Barrier. *CNS Neurol Disord Drug Targets*. 2022;22(1):18–26. doi:10.2174/187152732166622022092655.
36. Gonzalez-Carter D, Goode AE, Kiryushko D et al. Quantification of Blood–Brain Barrier Transport and Neuronal Toxicity of Unlabelled Multiwalled Carbon Nanotubes as a Function of Surface Charge. *Nanoscale*. 2019;11(45):22054–22069. doi:10.1039/C9NR02866H.
37. Augustine R, Hasan A, Primavera R, Wilson RJ, Thakor AS, Kevadiya BD. Cellular Uptake and Retention of Nanoparticles: Insights on Particle Properties and Interaction With Cellular Components. *Mater Today Commun*. 2020;25:101692. doi:10.1016/J.MTCOMM.2020.101692.
38. Foroozandeh P, Aziz AA. Insight Into Cellular Uptake and Intracellular Trafficking of Nanoparticles. *Nanoscale Res Lett*. 2018;13(1):1–12. doi:10.1186/S11671-018-2728-6.
39. Mosquera J, García I, Liz-Marzán LM. Cellular Uptake of Nanoparticles Versus Small Molecules: A Matter of Size. *Acc Chem Res*. 2018;51(9):2305–2313. doi:10.1021/ACS.ACCOUNTS.8B00292.
40. Singh U, Teja AG, Walia S, Vaswani P, Dalvi S, Bhatia D. Water Stable, Red Emitting, Carbon Nanoparticles Stimulate 3D Cell Invasion Via Clathrin-Mediated Endocytic Uptake. *Nanoscale Adv*. 2022;4(5):1375–1386. doi:10.1039/D1NA00813G.
41. Zhao J, Stenzel MH. Entry of Nanoparticles Into Cells: The Importance of Nanoparticle Properties. *Polym Chem*. 2018;9(3):259–272. doi:10.1039/C7PY01603D.
42. Li Y, Shi Z, Radauer-Preiml I et al. Immunotoxicity of Carbon-Based Nanomaterials, Starring Phagocytes. *Int J Mol Sci*. 2022;23(16):8889. doi:10.3390/IJMS23168889.
43. Oh N, Park JH. Endocytosis and Exocytosis of Nanoparticles in Mammalian Cells. *Int J Nanomedicine*. 2014;9(Supplement 1):51–63. doi:10.2147/IJN.S26592.
44. Marano F, Rodrigues-Lima F, Dupret JM, Baeza-Squiban A, Boland S. Cellular Mechanisms of Nanoparticle Toxicity. In: Bhushan B, ed. *Encyclopedia of Nanotechnology*. Springer; 2016: 498–505. doi:10.1007/978-94-017-9780-1_175.

ZKRATKY

16HBE	lidská bronchiální epiteliální buněčná linie (<i>human bronchial epithelial cells</i>)
3HFWC	hyper-harmonizovaný vodní komplex hydroxylovaného fullerenu C ₆₀
A549	alveolární epiteliální buňky A549 (<i>adenocarcinomic human alveolar basal epithelial cells</i>)
ABCA-1	<i>ATP-binding cassette transporter</i>
ALP	alkalická fosfatáza
ALT	alaninaminotransferáza
ARPE-19	imortalizované lidské retinální buňky
AST	aspartátaminotransferáza
BAL	bronchoalveolární laváž
BEAS-2B	imortalizovaná a nenádorová linie lidských plicních epiteliálních buněk (<i>bronchial epithelial cells</i>)
BMEC	mozkové mikrovaskulární endoteliální buňky (<i>bone marrow microvascular endothelial cells</i>)
BSA	bovinní sérový albumin
BUN	<i>blood urea nitrogen</i>
C ₆₀	fulleren
CaCo2	buněčná linie lidského kolorektálního adenokarcinomu (<i>human colon adenocarcinoma cell line</i>)
Caco-2	imortalizované lidské buňky kolorektálního adenokarcinomu
cAMP	cyklický adenosinmonofosfát
CAT	kataláza
CB	saze (<i>carbon black</i>)
CD	uhlíkové tečky (<i>carbon dots</i>)
CDH1	kadherin 1
CFU	kolonie tvořící jednotku
CHCE-T	lidské rohovkové epitelové buňky
CNF	uhlíková nanovláknina (<i>carbon nanofibres</i>)
CNH	uhlíkové nanorohy (<i>carbon nanohorns</i>)
CNM	uhlíkové nanomateriály (<i>carbon nanomaterials</i>)
CNP	uhlíkové destičky (<i>carbon platelets</i>)
CNS	centrální nervová soustava
CNT	uhlíkové nanotrubicice (<i>carbon nanotubes</i>)
CPPED1	<i>calcineurin-like phosphoesterase domain containing 1</i>
CT	počítačová tomografie
CVD	chemická depozice z plynné fáze

DAMP	<i>damage/danger-associated molecular patterns</i>
DWCNT	dvoustěnné uhlíkové nanotrubičky (<i>double-walled carbon nanotubes</i>)
EC ₅₀	polovina maximální účinné koncentrace
EEG	elektroencefalografie
EKG	elektrokardiografie
EPC	endoteliální progenitorové buňky
EPO	eozinofilní peroxidáza
FBN1	fibrilin 1
FBS	fetální bovinní sérum
FDT	fotodynamická terapie
FLG	vícevrstvý grafen (<i>few layer graphene</i>)
FLGO	několikvrstvý grafen oxid (<i>few-layer graphene oxide</i>)
FN1	fibronektin
FSF1	fibroblasty z kůže lidského obličeje
FSH	folikuly stimulující hormon
FTT	fototermální terapie
GGT	γ -glutamyltransferáza
GIT	gastrointestinální trakt
GNP	grafenové nanodestičky (<i>graphene nanoplatelets</i>)
GO	oxid grafenu (<i>graphen oxide</i>)
GO-DOTA	oxid grafenu funkcionalizovaný kyselinou 1,4,7,10-tetraazacyklododekan-1,4,7,10-tetraoctovou
GO-QD	kvantové tečky oxidu grafenu (<i>graphene oxide quantum dots</i>)
GP	grafenové plátky
GPCR	receptor spřažený s G proteinem (<i>G protein-coupled receptors</i>)
GQD	grafenové kvantové tečky (<i>graphene quantum dots</i>)
H2AFX	<i>histone family member X</i>
H9c2	kardiomyoblasty
HaCaT	imortalizované keratinocyty
HASMC	buňky hladké svaloviny aorty (<i>human aortic smooth muscle cells</i>)
HBEC-3KT	nenádorové buňky lidského bronchiálního epitelu
hConECs	lidské epitelové spojivkové buňky
hCorECs	lidské epitelové buňky rohovky
HEB	hematoencefalická bariéra
HEK-293T	lidské embryonální ledvinné buňky
HepG2	buňky hepatocelulárního karcinomu
HK-2	dospělé lidské buňky proximální tubulárního epitelu
HLF	lidské plicní fibroblasty (<i>human lung fibroblasts</i>)
HNEpC	primární buňky lidského nosního epitelu
hpf	hodin po fertilizaci
HSC 2012	Hazard Communication Standard
Hsp90	<i>heat shock protein 90</i>
HT29	buňky lidského kolorektálního adenokarcinomu s epiteliální morfologií
HUVEC	endoteliální buňky lidské pupečnickové žíly (<i>human umbilical vein endothelial cells</i>)
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICAM-1	solubilní intercelulární adhezivní molekuly 1 (<i>intercellular adhesion molecules</i>)
IL	interleukin
LLC-PK1	prasečí buňky proximálního ledvinného tubulu
LOX-1	<i>lectin-like oxidized low-density lipoprotein receptor</i>
LPS	lipopolysacharid

MAMP	<i>microbe-associated molecular patterns</i>
MPO	myeloperoxidáza
MWCNT	vícetěnné uhlíkové nanotrubičky (<i>multi-walled carbon nanotubes</i>)
MWCNT-PVP	mnohovrstvé uhlíkové nanotrubičky funkcionalizované polyvinylpyrrolidonem
MWCNT-TEPA	MWCNT funkcionalizované tetraetylenpentaminem
NCI-H322	nemalobuněčný bronchoalveolární karcinom
NCM460	epitelové buňky tlustého střeva
ND	nanodiamanty
NET	extracelulární neutrofilové pasti (<i>neutrofil extracellular traps</i>)
NF- κ B	<i>nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells</i>
NHBE	normální lidské bronchiální epitelové buňky
NHDF	lidské dermální fibroblasty
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NIR	blízké infračervené záření
NKR-52E	krysi epitelové buňky ledvin
NLR	<i>NOD-like receptor</i>
NLRP3	<i>NOD-like receptor family pyrin domain containing 3</i>
NOD	<i>nucleotide-binding oligomerization domain</i>
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
Ox-MWCNT	oxidované MWCNT
PAMP	<i>pathogen-associated molecular patterns</i>
PEG	polyethylenglykol
PEG-MWCNT	polyethylenglykolované MWCNT
PRR	<i>pattern recognition receptors</i>
PTEN	homolog fosfatázy a TENSinu (<i>phosphatase and TENsin homolog</i>)
RES	retikuloendoteliální systém
rGO	redukovaný GO
RhE	SkinEthic™ model rekonstruované lidské epidemirs
ROS	volné kyslíkové radikály (<i>reactive oxygen species</i>)
RPE	retinální pigmentový epitel
RTG	rentgenové záření
SAEC	epitelové buňky nižších etází dýchacích cest (<i>small airway epithelial cells</i>)
sFLG	malý vícevrstevný grafen (<i>small few-layer graphene</i>)
SLGO	jednovrstvý grafen oxid (<i>single-layer graphene oxide</i>)
SOD1	superoxiddismutáza
SWCNT	jednovrstvé uhlíkové nanotrubičky (<i>single-wall carbon nanotubes</i>)
TGF	<i>transforming growth factor</i>
TGFB1	transformující růstový faktor β (<i>transforming growth factor β</i>)
TLR	<i>Toll-Like Receptor</i>
T-MWCNT	dispergované Tweenem-80
TNF	<i>tumor necrosis factor</i>
VCAM-1	solubilní vaskulární buněčné adhezni molekuly 1 (<i>vascular cell adhesion molecule</i>)
VEGF	vaskulární endotelový růstový faktor
Vero	buněčná linie epitelialních buněk ledvin z afrického kočkodana zeleného
ZO-1	zonula occludens-1