

EUKARYOTICKÉ MIKROORGANISMY JAKO BIOLOGICKÉ TOVÁRNY NA PŘÍPRAVU NANOČÁSTIC KOVŮ

ANNA MIŠKOVSKÁ a ALENA ČEJKOVÁ

Ústav biotechnologie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6
miskovsa@vscht.cz

Došlo 17.6.22, přijato 13.7.22.

Klíčová slova: nanočástice kovů, biologická syntéza, mikroskopické vláknité houby, kvasinky, řasy

● <https://doi.org/10.54779/chl20220662>

Obsah

1. Úvod
2. Mikroskopické vláknité houby
 - 2.1. *Fusarium*
 - 2.2. *Trichoderma*
 - 2.3. *Penicillium*
 - 2.4. Ostatní
3. Kvasinky
4. Mikroskopické řasy
5. Závěr

1. Úvod

Nanotechnologie je rychle se vyvíjející vědní obor, který je považován za jednu z klíčových technologií 21. století¹. Jedná se o technologii vývoje a výroby nových struktur a materiálů s alespoň jedním rozměrem spadajícím do rozmezí 1–100 nm (1 nm = 10⁻⁹ m) (cit.²). Právě malý rozměr činí nanomateriály pro mnoho oblastí tak jedinečnými, jelikož materiály v nanoměřítku často nabývají zcela odlišných fyzikálně-chemických vlastností v porovnání s jejich makroskopickými protějšky. Tyto rozdílné vlastnosti jsou výsledkem výrazně vyššího poměru povrchu ku objemu nanomateriálů, což má za následek vyšší reaktivitu ve srovnání s výchozími makromateriály³. Oblast nanotechnologie je velmi široká a zahrnuje práci s nanoobjekty různých materiálů jak organických např. lipidové nanočástice či nanočástice polymerů (např. lignin, škrob, chitosan), tak anorganických např. nanočástice kovů (např. Ag, Au, Fe, Pt), polovodičové nanočástice (např. Si, CdS, PbS) či nekovové nanočástice (např. grafen, fulleren). V tomto příspěvku bychom se rády věnovaly nanotechnologiím týkajícím se kovových nanočástic, které díky svým jedinečným vlastnostem nalézají uplatnění v různých odvětvích včetně medicíny, zemědělství, textilního průmyslu nebo elektroniky³.

Rostoucí zájem o kovové nanočástice motivoval vědce k výzkumu a vývoji nových, udržitelných metod výroby, které by byly šetrné k životnímu prostředí a zároveň by nebyly nákladné. To vedlo ke vzniku termínů, jako jsou „nano-biotechnologie“ či „bio-nanotechnologie“, které odkazují na využití biologických systémů pro výrobu nanočástic¹. Tradičně jsou nanočástice kovů připravovány chemickými procesy nebo fyzikálními metodami. Chemické přístupy obvykle spočívají v redukci kovových iontů pomocí různých chemických redukčních činidel (např. NaBH₄ při přípravě Ag nanočástic) a následně stabilizaci vznikajících nanočástic pomocí stabilizačních látek. Naproti tomu fyzikální metody často vytvářejí nanočástice zmenšováním částic materiálu, např. mletím, až do nanoměřítku. Tyto tradiční přístupy často pracují při vysokých teplotách, tlaku, nebo používají drahé a toxické chemikálie⁴. Biologické postupy obvykle uplatňují principy tzv. „zelené chemie“ a umožňují jednoduše získat nanočástice o velmi dobré stabilitě a zajímavých fyzikálně-chemických vlastnostech. Dlužno říci, že i některé nebiologické metody syntézy mohou splňovat zásady zelené chemie – např. redukce pomocí citrátu či askorbátu⁵.

Jako biologický systém mohou být využívány např. mikroorganismy (bakterie, kvasinky, vláknité houby, mikroskopické řasy) nebo rostliny. Tato práce má za cíl představit eukaryotické mikroorganismy jako zdroje perspektivních biologických činitelů pro výrobu nanočástic kovů. Cílem je seznámit čtenáře s hlavními zástupci vláknitých hub, kvasinek a mikroskopických řas používanými k syntéze kovových nanočástic.

2. Mikroskopické vláknité houby

Velká část výzkumu biosyntézy nanočástic kovů pomocí mikroorganismů je zaměřena na použití mikroskopických vláknitých hub. Ve srovnání s ostatními mikroorganismy produkuje tato skupina větší množství extracelulárních proteinů, enzymů a dalších biomolekul, které se aktivně mohou účastnit redukce kovů, a také se podílejí na stabilizaci vznikajících nanočástic^{6–8}. Zvýšená produkce extracelulárních enzymů (např. nitrátreduktasy, acetylxylosterasy, celobiohydrolasy D, glukosidasy a β-glukosidasy) je významná především při přípravě kovových nanočástic mimobuněčně⁹. Shluky mycelií mikroskopických vláknitých hub jsou také ve srovnání s jinými mikroorganismy odolnější pro vyšší průtok a míchání v bioreaktorech¹⁰. Dalšími výhodami použití mikroskopických hub jsou jednoduché dokončovací procesy, snadný „scale-up“ a vysoká absorpční kapacita buněk pro kovy^{6,11,12}.

Nanočástice kovů byly úspěšně syntetizovány za pomoci rodů, jako jsou *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Verticillium* či *Rhizopus*^{6,13}.

2.1. *Fusarium*

Velmi intenzivně je zkoumána biosyntéza za použití zástupců rodu *Fusarium*, pomocí kterého byly úspěšně připraveny nanočástice kovů, jako jsou stříbro, zlato, železo, titan, platina, zinek, zirkonium a kadmium^{7,11,14,15}. Přestože někteří zástupci tohoto rodu produkují mykotoxiny a patří mezi fytopatogeny, jsou považováni za slibné kandidáty převažující nevýhodou fytopatogenity svým biodegradačním potenciálem a především vylučováním velkého množství bílkovin¹⁵. Velké množství studií se věnuje přípravě nanočástic pomocí *F. oxysporum*. Syed s kolegy¹⁶ pro biosyntézu použili promyté mycelium *F. oxysporum* suspendované do 1mM vodného roztoku H_2PtCl_6 a tuto směs kultivovali při pokojové teplotě, čímž získali sférické nanočástice platiny o velikosti 5–30 nm. V jiných studiích byl zkoumán biosyntetický potenciál *F. solani*, o kterém je známo, že dokáže rychle růst na půdách kontaminovaných těžkými kovy. Pomocí vodného bezbuněčného extraktu této houby se podařilo připravit nanočástice stříbra (8–19 nm), mědi (10–20 nm) a zinku (9–22 nm), u kterých byla prokázána antibakteriální aktivita vůči několika lidským patogenům¹⁷.

2.2. *Trichoderma*

Zajímavým přístupem k biosyntéze nanočástic kovů je použití nepatogenních hub rodu *Trichoderma*. Mezi velmi perspektivní zástupce patří *T. reesei*, která mezi houbami vyniká svou schopností produkovat opravdu širo-

kou škálu enzymů a dalších metabolitů (včetně celulytického komplexu), a jehož použití je shledáno jako bezpečné jak biologicky, tak pro životní prostředí¹³. Výzkum biosyntézy nanočástic kovů pomocí *T. reesei* je zaměřen především na přípravu stříbrných nanočástic. Vahabi s kolegy¹³ použili k biosyntéze nanočástic promyté mycelium této houby a smícháním s roztokem dusičnanu stříbrného získali extracelulární nanočástice stříbra o rozměrech 5–50 nm. Jiní významní zástupci tohoto rodu zahrnují např. *T. viride* a *T. harzianum*, kteří jsou proslulí jako biokontrolní agens používaná v komerčně dostupných přípravcích k ochraně kořenového systému zemědělsky využívaných rostlin před fytopatogeny¹⁸. V nedávné studii Manikandaselvi s kolegy¹⁹ srovnali účinky stříbrných nanočástic připravených pomocí vodného bezbuněčného extraktu *T. viride* s účinky samotného izolátu této mykoparazitické houby vůči dvěma rostlinným patogenům. Výsledky studie ukázaly, že takto připravené nanočástice mají vyšší antibakteriální aktivitu než působení samotného izolátu *T. viride*. Výhodou potenciálního použití nanočástic oproti samotné houbě je dobrá rozpustnost a stabilita, jež jsou pro aplikace biokontrolních činidel klíčové.

2.3. *Penicillium*

Dalším ze zkoumaných rodů mikroskopických vláknitých hub jako potenciálních producentů nanočástic je *Penicillium*. Přestože někteří zástupci tohoto rodu produkují mykotoxiny, řada druhů těchto hub je dobře poznána a některé jsou v současné době běžně využívány

Tabulka I

Syntéza nanočástic kovů pomocí mikroskopických vláknitých hub (NP – nanočástice z angl. nanoparticle)

Mikroskopické vláknité houby	Typ NP	Velikost	Aplikace	Lit.
<i>Rhizopus stolonifer</i>	Ag	9,5 nm	–	33
<i>Fusarium solani</i>	Ag	7,7–18,9 nm	antibakteriální	17
	Cu	10–19,5 nm		
	ZnO	8,6–21,8 nm		
<i>Fusarium oxysporum</i>	Au	100 nm	–	34
<i>Fusarium oxysporum</i>	Ti	6–13 nm	–	35
<i>Fusarium oxysporum</i>	Pt	5–30 nm	–	16
<i>Fusarium scirpi</i>	Ag	2–20 nm	antibakteriální	36
<i>Verticillium luteoalbum</i>			–	
	Au	100 nm		34
<i>Verticillium dahliae</i>	Au	< 10 nm	–	34
<i>Trichoderma reesei</i>	Ag	5–50 nm	–	13
<i>Trichoderma viride</i>	Ag	100+ nm	antifungální	19
<i>Trichoderma harzianum</i>	Au	32–44 nm	antibakteriální, katalýza	37
<i>Trichoderma atroviride</i>	Ag	15–25 nm	antimikrobiální, protirakovinné	38
<i>Penicillium purpurogenum</i>	Ag	8–10 nm	antibakteriální	21
<i>Aspergillus terreus</i>	ZnO	10–45 nm	antibakteriální, cytotoxicita, textilní průmysl	39
<i>Aspergillus niger</i>	Ag	~20 nm	antibakteriální	40
<i>Aspergillus oryzae</i>	Fe	10–25 nm	–	41

v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Dosud bylo poznáno minimálně 25 druhů *Penicillium* schopných syntetizovat nanočástice kovů. Většina studií se týká biosyntézy nanočástic stříbra²⁰. Monodisperzní částice tohoto kovu o rozměrech 8–10 nm byly připraveny pomocí bezbuněčného vodného extraktu *P. purpurogenum*²¹. Zbytek studií pak zmiňuje především přípravu nanočástic zlata, mědi a stříbra^{22–24}.

2.4. Ostatní

Nanočástice kovů se však podařilo připravit i za pomoci mnoha dalších zástupců mikroskopických vláknitých hub. Například lze uvést rod *Aspergillus*, pomocí kterého byly syntetizovány nanočástice stříbra, zlata, zinku, železa a kobaltu^{6,14}. Následující tabulka obsahuje přehled vybraných zástupců mikroskopických vláknitých hub, použitých k biosyntéze nanočástic kovů (tab. I).

3. Kvasinky

Napříč eukaryoty patří kvasinky k nejstudovanějším a nejhodněji používaným mikroorganismům v mnoha biotechnologických procesech¹². Bylo zjištěno, že kvasinky mají schopnost absorbovat a akumulovat ze svého okolí vysoké koncentrace iontů toxických kovů. Právě v rámci detoxikačních mechanismů může dojít k biomineralizaci iontů za vzniku nanočástic příslušného kovu, což z kvasinek činí kandidáty vhodné ke studiu schopnosti průmyslové produkce nanočástic kovů⁴. Kvasinky jsou známé zejména biosyntézou polovodičových nanočástic sulfidu kadmennatého (CdS) a sulfidu olovnatého (PbS), ale byly pomocí nich připraveny i nanočástice kovů, jako je stříbro, zlato, titan, zinek či palladium^{6,12}. Zmíněné polovodičové nanočástice se podařilo připravit např. kultivací kvasinky *Schizosaccharomyces pombe* v roztoku obsahujícím kadmennaté ionty (ve formě 1 mM CdS). Tímto způsobem byly připraveny intracelulární nanočástice CdS o velikosti 1–1,5 nm (cit.²⁵).

Úspěšná biosyntéza nanočástic pomocí kvasinek byla provedena použitím zástupců rodů *Schizosaccharomyces*, *Saccharomyces*, *Yarrowia*, *Candida*, *Pichia* a *Rhodotorula*^{4,11,12}. Podrobnější přehled uvádí tab. II.

4. Mikroskopické řasy

Řasy jsou v současné době komerčně využívány v potravinářství, farmacii, jako přísady do kosmetiky a krmiv nebo jako hnojiva a v posledních letech nabývají významu také v oblasti zelených nanotechnologií. Pro biotechnologické postupy přípravy nanočástic kovů jsou řasy zajímavé především proto, že jsou bohatým zdrojem sekundárních metabolitů, dají se snadno kultivovat, rychle rostou a navíc bývají vznikající nanočástice vzhledem k používání netoxických řas biokompatibilní²⁶. Nejčastěji jsou z hlediska biosyntézy nanočástic studovány řasy zelené, hnědé (chaluhy) a červené (ruduchy), a dále bude v tomto textu popsána také biosyntéza nanočástic pomocí fotosyntetizujících prokaryot tzv. sinic, které bývají v odborných textech často součástí kapitol týkajících se biosyntézy kovových nanočástic zprostředkované řasami^{6,26}.

V souvislosti s biosyntézou nanočástic kovů bylo studováno mnoho zástupců zmíněných skupin řas, výběr některých z nich (patřících mezi jednobuněčné zástupce) je prezentován v tab. III na konci kapitoly. Výsledky experimentů naznačují, že řasy jsou v této oblasti perspektivními biočiniteli, pomocí kterých by mohla být zavedena udržitelná, nákladově efektivní výroba nanočástic nezatažující životní prostředí. V řasami zprostředkované biosyntéze kovových nanočástic jsou redukčními a stabilizačními biomolekulami pigmenty (chlorofyly, fykobiliny, karotenoidy), minerály, oleje, sacharidy, tuky a mnohé bílkoviny²⁶.

Příkladem biosyntézy nanočástic pomocí jednobuněčných hnědých řas může být použití rozsivek. Pomocí kultivace rozsivky *Navicula atomus* v přítomnosti HAuCl₄ byly získány nanočástice zlata o velikosti 1–29 nm (cit.²⁷).

Tabulka II

Syntéza nanočástic kovů pomocí kvasinek (NP – nanočástice z angl. nanoparticle)

Kvasinky	Typ NP	Velikost	Aplikace	Lit.
<i>Schizosaccharomyces pombe</i>	CdS	1–1,5 nm	diody	25
<i>Schizosaccharomyces pombe</i>	CdS	2–6 nm	–	42
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Ag	2–20 nm	–	43
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	ZnS	30–40 nm	–	44
<i>Saccharomyces boulardii</i>	Ag	3–10 nm	protirakovinné	45
<i>Yarrowia lipolytica</i>	Ag	~10 nm	antibiofilmové	46
<i>Candida glabrata</i>	Ag	2–15 nm	antimikrobiální	47
<i>Candida glabrata</i>	CdS	–	–	48
<i>Pichia pastoris</i>	Au	~100 nm	protirakovinné	49
	Pd	~100 nm		
<i>Rhodotorula glutinis</i>	Ag	5–45 nm	antimikrobiální, katalýza	50

Tabulka III

Syntéza nanočástic kovů pomocí mikroskopických řas a sinic (NP – nanočástice z angl. nanoparticle)

Řasy	Typ NP	Velikost	Aplikace	Lit.
Hnědé řasy				
<i>Navicula atomus</i>	Au	5–39 nm	–	27
<i>Diademsis gallica</i>	Au	1–29 nm	–	
<i>Stephanopyxis turris</i>	Au	<50 nm	–	51
Červené řasy				
<i>Porphyridium purpureum</i>	Ag	–	–	28
Zelené řasy				
<i>Chlorella vulgaris</i>	Pd	5–20 nm	–	52
<i>Chlorella vulgaris</i>	Ag	3–15 nm	antibakteriální	53
<i>Chlorella vulgaris</i>	ZnO	20–50 nm	fotokatalýza	54
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Ag	5–20 nm	antibakteriální, fotokatalýza	55
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	CdSe	2–6 nm	nanoprobe	29
<i>Scenedesmus obliquus</i>	CdSe	2–6 nm	nanoprobe	
<i>Dunaliella salina</i>	Ag	1–30 nm	protirakovinné	30
<i>Dunaliella salina</i>	Au	5–45 nm	protirakovinné	56
<i>Rhizoclonium fontinale</i>	Au	–	–	57
<i>Euglena gracilis</i>	Ag	15–60 nm	–	58
Sinice				
<i>Spirulina platenesis</i>	Au	16–77 nm	antivirové	59
<i>Spirulina platenesis</i>	Au	2–8 nm	antibakteriální	31
<i>Spirulina platenesis</i>	Ag	30–50 nm	antibakteriální	32

Zajímavé bylo, že přestože bylo kapalně médium zabarvené typickou barvou pro zlaté nanočástice, po oddělení biomasy od kapalné složky byla přítomnost nanočástic detekována (UV-Vis) pouze v peletě buněk.

Z jednobuněčných červených řas je v biotechnologiích nejrozšířenější a nejstudovanější rod *Porphyridium*, hlavní komerční producent barviv fykoerithrinu a fykocyaniu, pomocí kterého se podařilo připravit nanočástice stříbra²⁸.

Ze všech druhů řas jsou však pro biosyntézu nanočástic kovů nejčastěji studovány zelené řasy. Mezi významné jednobuněčné zástupce těchto mikroorganismů patří *Chlorella*, která byla studována především v souvislosti s biosyntézou nanočástic stříbra, zlata, palladia, zinku a kadmia (kvantové tečky)^{4,6,29}. Zhang s kolegy²⁹ připravili pomocí dvou druhů zelených řas monodisperzní částice CdSe (2–6 nm) s biomedicínským potenciálem nanoznaček pro detekci léčiva imatinib. Dalším perspektivním mikroorganismem patřícím do skupiny jednobuněčných zelených řas je extrémofil *Dunaliella salina*. Pomocí vodného extraktu tohoto mikroorganismu byly připraveny nanočástice stříbra (1–30 nm), které měly protirakovinné účinky v mnoha ohledech srovnatelné s účinky cis-platiny³⁰. V současnosti je však známo mnoho dalších mikroskopických zelených řas schopných syntetizovat nanočástice kovů (*Pithophora*, *Chlorococcum*, *Euglena* a další)²⁶.

Schopnost syntetizovat nanočástice byla studována také u sinic. Z těchto prokaryotických mikroorganismů je biotechnologicky nejvýznamnější rod *Arthrospira* (dříve nazvaný *Spirulina*), který je známý pro své blahodárné účinky na lidské zdraví. Pomocí tohoto rodu byly syntetizovány např. nanočástice stříbra a zlata^{31,32}.

5. Závěry

Nanočástice kovů syntetizované pomocí mikroskopických hub a řas mají dle dosavadních studií potenciál pro řadu aplikací včetně medicíny. Obrovská škála možných producentů spolu s možnou změnou podmínek syntézy, jako jsou pH, množství biomasy, vstupní koncentrace kovového prekursoru, či teplota, umožňují produkci nepřehledného množství kovových nanočástic různých fyzikálně-chemických vlastností. Pro výrobu v průmyslovém měřítku je zásadní výběr vhodných mikroorganismů, a také je nutné zvážit monodisperzitu, velikost a tvar vznikajících nanočástic. Většina studií je však prováděna v laboratorním měřítku, kde bývají parametry mikrobiálního růstu poměrně snadno zachovány a výzvou tak prozatím zůstává převedení do většího měřítku, tak aby byly všechny parametry kultivace a vlastnosti vznikajících nanočástic zachovány.

Tento výstup vznikl v rámci projektu Specifického vysokoškolského výzkumu – projekt č. A2_FPBT_2022_018.

LITERATURA

- Abdel-Aziz S. M., Prasad R., Hamed A. A., Abdelraof M., v knize: *Fungal Nanobionics: Principles and Applications*, str. 61. Springer, Berlin 2018.
- Shah S. S., Shaikh M. N., Khan M. Y., Alfasane M. A., Rahman M. M., Aziz M. A.: *The Chemical Record* 21, 1631 (2021).
- Maťátková O., Michilidu J., Miškovská A., Kolouchová I., Masák J., Čejková A.: *Biotechnol. Adv.* 107905 (2022).
- Gahlawat G., Choudhury A. R.: *RSC Adv.* 9, 12944 (2019).
- Adil S. F., Assal M. E., Khan M., Al-Warthan A., Siddiqui M. R. H., Liz-Marzán L. M.: *Dalton Trans.* 44, 9709 (2015).
- Salem S. S., Fouda A.: *Biol. Trace Elem. Res.* 1 (2020).
- Jeyaraj M., Gurunathan S., Qasim M., Kang M.-H., Kim J.-H.: *Nanomaterials* 9, 1719 (2019).
- Guilger-Casagrande M., Lima R. d.: *Front. Bioeng. Biotechnol.* 7, 287 (2019).
- Ovais M., Khalil A. T., Ayaz M., Ahmad I., Nethi S. K., Mukherjee S.: *Int. J. Mol. Sci.* 19, 4100 (2018).
- Saravanan A., Kumar P. S., Karishma S., Vo D.-V. N., Jeevanantham S., Yaashikaa P., George C. S.: *Chemosphere* 264, 128580 (2021).
- Prasad R., Pandey R., Barman I.: *Wiley Interdiscip. Rev.: Nanomed. Nanobiotechnol.* 8, 316 (2016).
- Hulkoti N. I., Taranath T.: *Colloids Surf., B* 121, 474 (2014).
- Vahabi K., Mansoori G. A., Karimi S.: *Insciences J.* 1, 65 (2011).
- Bakshi M., Mahanty S., Chaudhuri P., v knize: *Handbook of Metal-Microbe Interactions and Bioremediation*. kap. 25, str. 423. CRC Press, Boca Raton 2017.
- Gupta K., Chundawat T. S.: *Biomass Bioenergy* 143, 105840 (2020).
- Syed A., Ahmad A.: *Colloids Surf. B. Biointerfaces* 97, 27 (2012).
- Sayed M. T. E., El-Sayed A. S.: *J. Microbiol. Biotechnol.* 30, 226 (2020).
- Zin N. A., Badaluddin N. A.: *Ann. Agric. Sci.* 65, 168 (2020).
- Manikandaselvi S., Sathya V., Vadivel V., Sampath N., Brindha P.: *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 11, 035004 (2020).
- Barabadi H., Tajani B., Moradi M., Kamali K. D., Meena R., Honary S., Mahjoub M. A., Saravanan M.: *J. Cluster Sci.* 30, 1 (2019).
- Nayak R. R., Pradhan N., Behera D., Pradhan K. M., Mishra S., Sukla L. B., Mishra B. K.: *J. Nanopart. Res.* 13, 3129 (2011).
- Du L., Xian L., Feng J.-X.: *J. Nanoparticle Res.* 13, 921 (2011).
- El-Batal A. I., El-Sayyad G. S., Mosallam F. M., Fathy R. M.: *J. Cluster Sci.* 31, 79 (2020).
- Yassin M. A., Elgorban A. M., El-Samawaty A. E.-R. M., Almunqedhi B. M.: *Saudi J. Biol. Sci.* 28, 2123 (2021).
- Kowshik M., Deshmukh N., Vogel W., Urban J., Kulkarni S. K., Paknikar K.: *Biotechnol. Bioeng.* 78, 583 (2002).
- Chaudhary R., Nawaz K., Khan A. K., Hano C., Abbasi B. H., Anjum S.: *Biomolecules* 10, 1498 (2020).
- Schröfel A., Kratošová G., Bohunická M., Dobročka E., Vávra I.: *J. Nanopart. Res.* 13, 3207 (2011).
- Bunghuez I.-R., Ion R.-M., Velea S., Ilie L., Fierascu R.-C., Dumitriu I., Dinu A., Troncea S., v knize: *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies V*, str. 428. SPIE, United States 2010.
- Zhang Z., Chen J., Yang Q., Lan K., Yan Z., Chen J.: *Sens. Actuators, B* 263, 625 (2018).
- Singh A. K., Tiwari R., Kumar V., Singh P., Khadim S. R., Tiwari A., Srivastava V., Hasan S., Asthana R.: *J. Photochem. Photobiol., B* 166, 202 (2017).
- Suganya K. U., Govindaraju K., Kumar V. G., Dhas T. S., Karthick V., Singaravelu G., Elanchezhian M.: *Mater. Sci. Eng., C* 47, 351 (2015).
- Sharma G., Jasuja N. D., Kumar M., Ali M. I.: *J. Nanotechnol.* 2015, 132675 (2015).
- AbdelRahim K., Mahmoud S. Y., Ali A. M., Almaary K. S., Mustafa A. E.-Z. M., Husseiny S. M.: *Saudi J. Biol. Sci.* 24, 208 (2017).
- Gericke M., Pinches A.: *Hydrometallurgy* 83, 132 (2006).
- Bansal V., Rautaray D., Bharde A., Ahire K., Sanyal A., Ahmad A., Sastry M.: *J. Mater. Chem.* 15, 2583 (2005).
- Rodríguez-Serrano C., Guzmán-Moreno J., Ángeles-Chávez C., Rodríguez-González V., Ortega-Sigala J. J., Ramírez-Santoyo R. M., Vidales-Rodríguez L. E.: *PLoS One* 15, e0230275 (2020).
- Tripathi R. M., Shrivastav B. R., Shrivastav A.: *IET Nanobiotechnol.* 12, 509 (2018).
- Saravanakumar K., Wang M.-H.: *Microb. Pathog.* 114, 269 (2018).
- Fouda A., Saad E., Salem S. S., Shaheen T. I.: *Microb. Pathog.* 125, 252 (2018).
- Gade A., Bonde P., Ingle A., Marcato P., Duran N., Rai M.: *J. Biobased Mater. Bioenergy* 2, 243 (2008).
- Tarafdar J. C., Raliya R.: *J. Nanopart.* 2013, 141274 (2013).
- Al-Shalabi Z., Doran P. M.: *J. Biotechnol.* 223, 13 (2016).
- Korbekandi H., Mohseni S., Mardani Jouneghani R., Pourhossein M., Irvani S.: *Artif. Cells, Nanomed., Biotechnol.* 44, 235 (2016).
- Mala J. G. S., Rose C.: *J. Biotechnol.* 170, 73 (2014).
- Kaler A., Jain S., Banerjee U. C.: *Biomed. Res. Int.* 2013, 872940 (2013).
- Apte M., Sambre D., Gaikwad S., Joshi S., Bankar A., Kumar A. R., Zinjarde S.: *AMB Express* 3, 32 (2013).

47. Jalal M., Ansari M. A., Alzohairy M. A., Ali S. G., Khan H. M., Almatroudi A., Raees K.: *Nanomaterials* 8, 586 (2018).
48. Dameron C. T., Winge D. R.: *Trends Biotechnol.* 8, 3 (1990).
49. Elahian F., Heidari R., Charghan V. R., Asadbeik E., Mirzaei S. A.: *Artif. Cells, Nanomed., Biotechnol.* 48, 259 (2020).
50. Cunha F. A., da CSO Cunha M., da Frota S. M., Mallmann E. J., Freire T. M., Costa L. S., Paula A. J., Menezes E. A., Fachine P. B.: *World J. Microbiol. Biotechnol.* 34, 127 (2018).
51. Pytlik N., Kaden J., Finger M., Naumann J., Wanke S., Machill S., Brunner E.: *Algal Res.* 28, 9 (2017).
52. Arsiya F., Sayadi M. H., Sobhani S.: *Mater. Lett.* 186, 113 (2017).
53. da Silva Ferreira V., ConzFerreira M. E., Lima L. M. T., Frases S., de Souza W., Sant'Anna C.: *Enzyme Microb. Technol.* 97, 114 (2017).
54. Khalafi T., Buazar F., Ghanemi K.: *Sci. Rep.* 9, 1 (2019).
55. Aziz N., Faraz M., Pandey R., Shakir M., Fatma T., Varma A., Barman I., Prasad R.: *Langmuir* 31, 11605 (2015).
56. Singh A. K., Tiwari R., Singh V. K., Singh P., Khadim S. R., Singh U., Srivastava V., Hasan S., Asthana R.: *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* 51, 164 (2019).
57. Parial D., Pal R.: *J. Appl. Phycol.* 27, 975 (2015).
58. Li X., Schirmer K., Bernard L., Sigg L., Pillai S., Behra R.: *Environ. Sci. Nano* 2, 594 (2015).
59. El-Sheekh M. M., Shabaan M. T., Hassan L., Morsi H. H.: *Int. J. Environ. Health Res.* 32, 616 (2020).

A. Miškovská and A. Čejková (*Department of Biotechnology, University of Chemistry and Technology Prague, Czech Republic*): **Eukaryotic Microorganisms as Biological Factories for the Preparation of Metal Nanoparticles**

The use of microorganisms as reducing and stabilizing agents in biogenic syntheses of metal nanoparticles is an attractive approach. There is a large number of potential bioagents able to yield big amounts of various biomolecules, and to prepare nanoparticles of diverse physicochemical properties. Microscopic fungi and algae are widely studied for the preparation of nanoparticles, mainly because of their ability to produce vast amounts of extracellular proteins, enzymes, and other metabolites that can actively participate in the metal reduction and also contribute to the nanoparticle stabilization. This results in highly stable metal nanoparticles with interesting properties that can be used, for example, as antimicrobial agents (especially Ag or Cu nanoparticles) or as catalysts. This review summarizes the main, promising representatives of microscopic fungi, yeasts, and algae used for the preparation of nanoparticles of various metals.

Keywords: metal nanoparticles, biogenic synthesis, microscopic fungi, yeasts, algae

● Miškovská A., Čejková A.: *Chem. Listy* 116, 662–667 (2022).

● <https://doi.org/10.54779/chl20220662>

Acknowledgements

This project was supported from the grant of Specific university research – grant No. A2_FPBT_2022_018.