



Biowzbogacanie surowców mineralnych – interakcja bakteria-minerał

Anna HOŁDA¹⁾, Aldona KRAWCZYKOWSKA²⁾

¹⁾ AGH University of Science and Technology, Faculty of Mining and Geoengineering

²⁾ AGH University of Science and Technology, Faculty of Mining and Geoengineering

<http://doi.org/10.29227/IM-2019-02-44>

Submission date: 29-08-2019 | Review date: 28-09-2019

Abstrakt

Procesy biologiczne w przeróbce surowców mineralnych są korzystną alternatywą dla tradycyjnych fizykochemicznych metod wzbogacania. Stwarzają możliwość przetwarzania rud gorszej jakości, a także odpadów przerobczych zawierających metale użyteczne, jak również przyczyniają się do ochrony środowiska przyrodniczego przed negatywnym wpływem działalności górniczej.

Biowzbogacanie obejmuje procesy bioflotacji i bioflokulacji, czyli selektywnego rozdzielania składników mieszaniny w celu wyodrębnienia produktów wzbogaconych w składniki użyteczne pod wpływem adhezji komórek bakteryjnych na powierzchniach mineralnych. Efektem tych procesów jest modyfikacja powierzchni mineralnej, a także selektywne rozpuszczenie składników mineralnych, bioakumulacja rozpuszczonych jonów metali oraz utworzenie bądź konwersja różnych form mineralnych. W artykule przedstawiono szeroki przegląd literatury światowej związanej z tematyką wykorzystania bakterii w inżynierii mineralnej. Podano przykłady zastosowania określonych mikroorganizmów do konkretnych surowców mineralnych.

Słowa kluczowe: biowzbogacanie, bioflotacja, bioflokulacja.

Wstęp

Surowce mineralne należą do nieodnawialnych zasobów przyrody – ich ilość w skorupie ziemskiej jest ograniczona a regeneracja możliwa jedynie w specyficznych warunkach geologicznych oraz w czasie obejmującym setki, tysiące, a nawet miliony lat. Dlatego tak ważne jest poszukiwanie nowych technologii oraz udoskonalanie istniejących procesów wydobywczych i przerobczych poprzez dobranie procesu technologicznego, który uniemożliwi przejście zbyt dużych ilości metalu do odpadów. W nowych technologiach upatruje się nadzieję na zmniejszenie kosztów odzysku metali z coraz uboższych rud, jak również z odpadów po przeróbce rud zawierających niewielkie/śladowe ilości metali użytecznych, które można zaliczyć do złóż antropogenicznych. Taką możliwość może stworzyć technologia biogórnictwa, czyli wykorzystania procesów biologicznych w przeróbce surowców mineralnych (Rawlings, 2007). Bioinżynieria mineralna wydaje się korzystną alternatywą dla tradycyjnych fizykochemicznych metod wzbogacania ponieważ nie tylko stwarza możliwość wykorzystywania rud gorszej jakości (surowców ubogich lub trudnowzbogacalnych) ale również chroni środowisko przyrodnicze przed negatywnym wpływem działalności górniczej, zwłaszcza przed zanieczyszczeniem gleb i wód metalami oraz przed zakwaszeniem wód kopalnianych.

Bioinżynieria mineralna obejmuje procesy biohydrometalurgiczne (biohydrometalurgii) oraz biowzbogacania (biobenefikacji) co przedstawiono na Rys.1 (Sharma i inni, 2001). Biohydrometalurgia według Rawlingsa i in. (2003) to „wykorzystanie mikroorganizmów do ługowania metali z rud siarczkowych i ich koncentratów”. W tej definicji zawierają się dwa procesy bioługowania i biooksydacja. Bioługowanie to ekstrakcja metali z rud lub odpadów z wykorzystaniem biologicznego utleniania minerałów natomiast biooksydacja polega na biologicznym utlenianiu składników matrycy mineralnej lub skalnej podczas pozyskiwania metali szlachetnych.

Biowzbogacanie natomiast obejmuje procesy bioflotacji i bioflokulacji, czyli selektywnego rozdzielania składników mieszaniny w celu wyodrębnienia produktów wzbogaconych w składniki użyteczne (Hołda i inni, 2014).

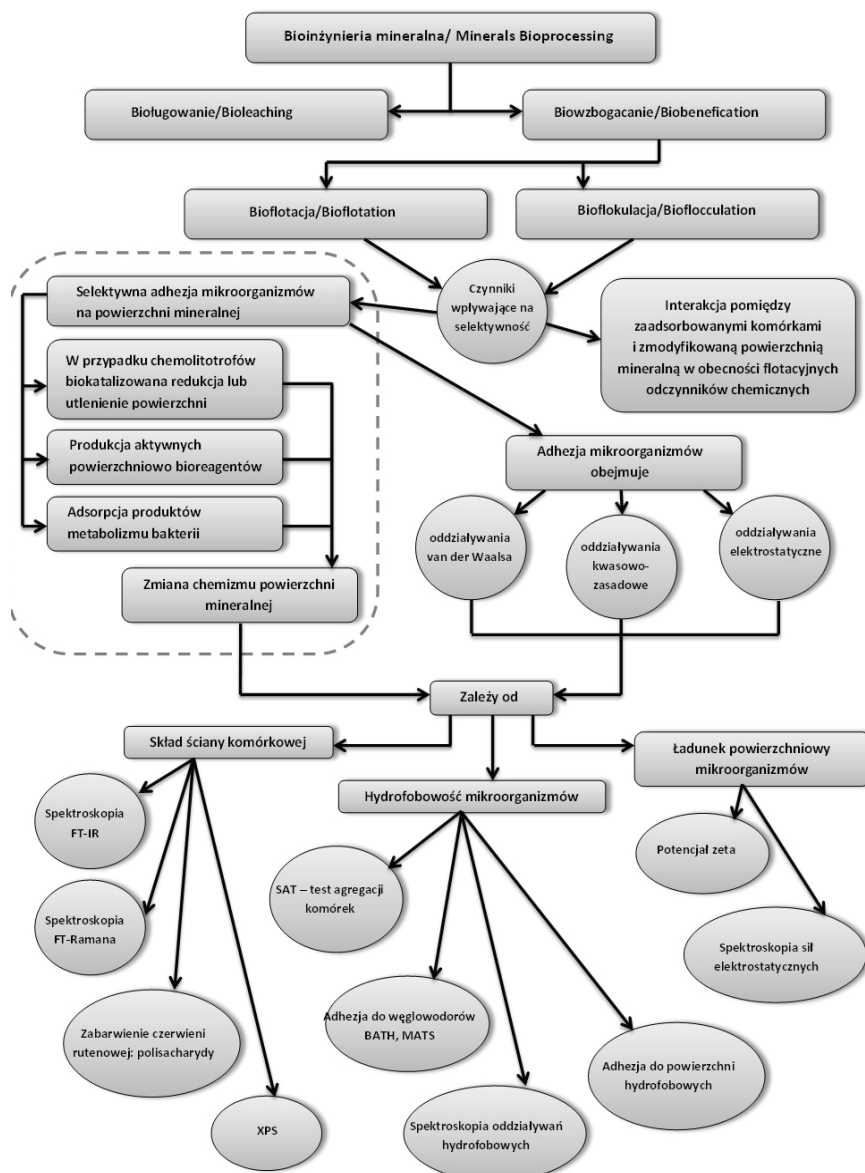
Interakcja bakterie-minerał

Bardzo istotnym etapem procesów biowzbogacania jest adhezja komórek bakteryjnych na powierzchni ziarn mineralnych, której konsekwencją jest ich biomodifikacja. Mechanizm adhezji komórek bakteryjnych na powierzchniach mineralnych zachodzi z wykorzystaniem sił elektrostatycznych, dyspersyjnych sił Londona (LDF) oraz oddziaływań hydrofilowych i hydrofobowych (Sharma i inni, 2001). Interakcja pomiędzy bakteriami i minerałami może zachodzić poprzez (Deo i inni, 2001):

1. adhezję komórek bakteryjnych i wytworzenie biofilmu,
2. biokatalizowane reakcje utlenienia, redukcji, kompleksowania i strącania,
3. reakcje komórek bakteryjnych i ich metabolitów ze składnikami matrycy rudy.

Końcowym efektem tych procesów biologicznych jest nie tylko modyfikacja powierzchni mineralnej, ale również selektywne rozpuszczenie składników mineralnych, bioakumulacja rozpuszczonych jonów metali oraz utworzenie bądź konwersja różnych form mineralnych.

Biomodifikację powierzchni mineralnej a tym samym zachowanie ziarn w procesie biowzbogacania można ocenić tylko w przypadku dogłębnego zrozumienia procesu adhezji mikroorganizmów. Wpływ komórek bakteryjnych na powierzchnię ziarn mineralnych jest uzależniony od kilku czynników, mianowicie właściwości roztworu (pH, siła jonowa), ładunku powierzchniowego, hydrofobowości powierzchni (van der Mei i inni, 1998), powierzchniowej energii swobodnej oraz składu ściany komórkowej (surface composition)



Rys. 1. Znaczenie fizyczno-chemicznej charakterystyki powierzchni komórek bakteryjnych
 Fig. 1. Relevance of physico-chemical surface characterisation of microbial cells

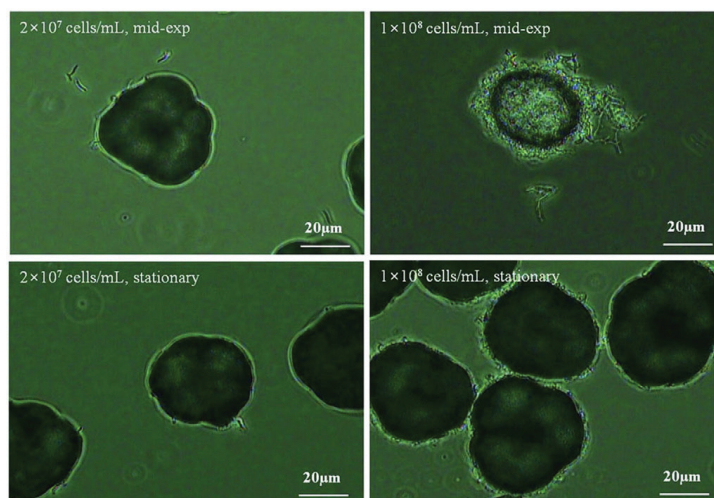
(Rijnaarts et al., 1995; Sharma and Rao, 1999; Botero i inni, 2007, Smith and Miettinen, 2006; Yee N. i inni, 1999). Każda teoria próbująca wyjaśnić adhezję bakterii musi uwzględniać te parametry.

Skład komórek bakteryjnych jest bardzo złożony ze względu na obecność wielu różnych związków chemicznych o różnej strukturze i właściwościach. Zasadniczo każda ściana komórkowa bakterii składa się ze szkieletu podporowego i warstwy plastycznej. Obie ściśle się ze sobą zająbiają i wzajemnie przenikają. Szkielet podporowy (warstwa peptydoglikanu mureiny) otacza komórkę tworząc mniej lub bardziej szczelną sieć natomiast warstwa plastyczna to kompleks związków wysokocząsteczkowych. Znajdują się w nim lipoproteidy, lipopolisacharydy, białka, lipidy, polisacharydy i kwasy teichojowe. Udział tych związków w budowie ściany komórkowej jest bardzo różny u poszczególnych rodzajów bakterii. Większość makrocząsteczek wchodzących w skład ściany komórkowej to polielektrolity ponieważ zawierają naładowane dodatnio lub ujemnie grupy funkcyjne takie jak karboksylowa, fosforanowa lub aminowa. To nadaje właści-

wości amfoteryczne ścianie komórkowej, a co za tym idzie ładunek powierzchniowy (zależny od pH) może być zarówno dodatni, ujemny jak i równy 0 (de Mesquita, 2003). Jednak badania Van der Wal'a i innych (1997) wykazały, że dla większości bakterii grupy anionowe dominują nad kationowymi, a ich punkt izoelektryczny (IEP) znajduje się poniżej pH równego 4. Ponadto obecność polarnych i niepolarnych grup funkcyjnych w ścianie komórkowej upodabnia właściwości komórek bakteryjnych do chemicznych surfaktantów. Te grupy funkcyjne mogą oddziaływać bezpośrednio na powierzchnię mineralną poprzez selektywną adsorpcję komórek bakteryjnych lub pośrednio przy wykorzystaniu EPS (egzopolisacharydów niezwiązanych ze ścianą komórkową i wydzielanych na zewnątrz) jako powierzchniowo czynnych reagentów (Botero i inni, 2007, Poortinga et al., 2002; Van Der Mei et al., 1998, Sharma and Rao, 1999, Schneider et al., 1994; Raichur et al., 1997). Należy również pamiętać że w/w interakcja zmienia nie tylko powierzchnię mineralną ale również właściwości samych komórek bakteryjnych. Wielkość populacji komórek bakteryjnych, czas kontaktu biomasy

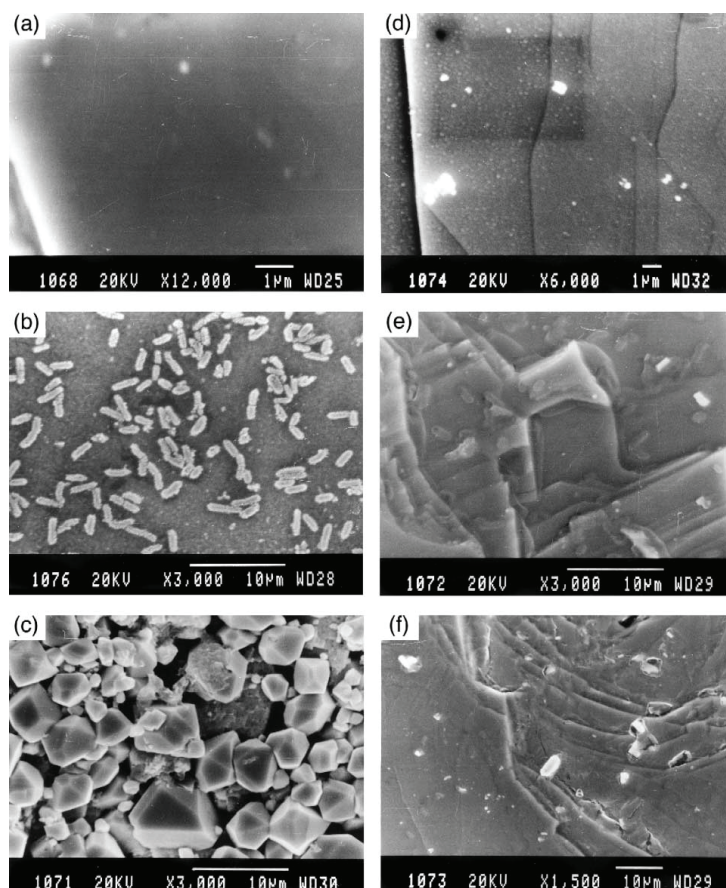
Tab. 1. Różne układy bakteria-minerał
Tab. 1. Different bacteria-mineral systems

Gatunek/Szczep Species/Strain	Mineral/układ mineralny	Literatura/Reference
<i>Bacillus subtilis</i>	hematyt/korund/kwarc/kalcyt dolomit/apatyt hematyt/kaolinit	Sarvamangala i inni, 2011, Yee N. i inni, 1999 Zheng i inni, 2001 Poorni i inni, 2014
<i>Bacillus mucilaginosus</i>	piroluzyt/kwarc	Yang i inni, 2014
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	galena/sfaleryt	Santhiya i inni, 2001
<i>Rhodococcus opacus</i>	kalcyt/magnezyt; hematyt/kwarc	Botero i inni, 2007,2008; de Mesquita i inni, 2003
<i>Bacillus polymyxa</i> / <i>Paenibacillus polymyxa</i>	hematyt/kwarc kalcyt/hematyt/korund/kwarc kalcyt/hematyt/korund/kwarc/kaolinit chalkopiryt/piryt chalkopiryt/kwarc/kalcyt piryt/kwarc/kalcyt galena/sfaleryt kwarc/piryt/chalkopiryt/ sfaleryt/galena	Shashikala i inni, 2002; Deo i inni, 1997a, 1998, 2001; Natarajan i inni, 2001 Sharma i inni, 2003 Patra P., Natarajan, K.A., 2003,2004, 2008 Subramanian i inni, 2003
<i>Bacillus circulans</i>	serpentyt/kwarc	Didyk, A. M. , Sadowski, Z., 2012
<i>Streptomyces sp</i>	serpentyt/kwarc	Didyk, A. M. , Sadowski, Z., 2012
<i>Aspergillus niger</i>	odpady magnezytowe lepidolit	Gawel i inni, 1997 Marcinčáková i inni, 2014
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i> / <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	węgiel/piryt piryt/chalkopiryt/siarka arsenopiryt/piryt chalkopiryt/piryt/arsenopiryt ruda Zn-Pb/piryt porfirowa ruda miedzi/ piryt/chalkopiryt/ chalkopiryt lepidolit	Attia i inni, 1993 Ohmura i inni, 1993 Natarajan, K.A., Das, A., 2003 Mehrabani i inni, 2010,2011 Chandraprabha i inni, 2004a,b; 2005, 2013 Hosseini i inni, 2005 Wang i inni, 2012 Marcinčáková i inni, 2015
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	kwarc/hematyt	Prakasan i inni, 2010
<i>Mycobacterium phlei</i>	miał węglowy/piryt/popiół piryt/sfaleryt dolomit/apatyt	Raichur i inni, 1996 Jia i inni, 2011 Zheng i inni, 2001
<i>Rhodococcus opacus</i>	malachit	Kim i inni, 2015
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	piryt/chalkopiryt	Vilinska i inni, 2008
<i>Rhodococcus erythropolis</i>	hematyt/kwarc/kaolin/apatyt	Yang i inni, 2013
<i>Escherichia coli</i>	kwarc/hematyt/korund	Farahat i inni, 2009
<i>Rhodococcus ruber</i>	hematyt	Lopez i inni, 2015
EPS z procesu biologicznego	chalkopiryt/piryt	Yageshni i inni, 2011



Fot. 1. Zdjęcia mikroskopowe w jasnym polu widzenia układu malachit-bakteria. Bakterie w fazie wzrostu wykładniczego (intensywnego wzrostu) wykazują duże, ale luźne agregaty przylegające do powierzchni malachitu, podczas gdy bakterie w fazie równowagi są upakowane wokół malachitu tylko blisko jego powierzchni. W przypadku niższych stężeń bakterii nie pokrywają całej powierzchni malachitu, co wyjaśnia niższą flotowalność (Kim G. et al. 2015)

Fot. 1. Bright field micrographs of malachite-bacteria complex. Bacteria in the mid-exponential phase show big, but loose aggregates adhering to the malachite surface, whereas bacteria in the stationary phase are well-packed around the malachite only near the surface. For lower concentrations of bacteria, the bacteria do not cover the entire surface of the malachite, which explains the lower floatability for lower concentrations of bacteria



Fot. 2. Zdjęcie z mikroskopu skannującego: a. galena przed kontaktem z *T. thiooxidans*, b. galena po 2h kontakcie z *T. thiooxidans*, c. galena po 72h kontakcie z *T. thiooxidans*, d. sfaleryt przed kontaktem z *T. thiooxidans*, e. sfaleryt po 2h kontakcie z *T. thiooxidans*, f. sfaleryt po 72h kontakcie z *T. thiooxidans* (D. Santhiya et al 2001)

Fot. 2. Scanning electron micrographs of a. galena before interaction with *T. thiooxidans*; b. galena after 2-h interaction with *T. thiooxidans*; c. galena after 72-h interaction with *T. thiooxidans*; d. sphalerite before interaction with *T. thiooxidans*; e. sphalerite after 2-h interaction with *T. thiooxidans*; f. sphalerite after 72-h interaction with *T. thiooxidans*

z minerałami, stopień pokrycia powierzchni mineralnej przez biomasę bakteryjną to czynniki, które określają hydrofobowość powierzchni w odniesieniu do procesów flotacji i flokulacji (Sarvamangala i inni, 2011; Yee N. i inni, 1999).

Biowzbogacanie w różnych układach mineralnych

W ostatnich latach mikrobiologicznie wspomagana flotacja i flokulacja była przedmiotem wielu badań. Obiektem zainteresowania była adsorpcja wybranych szczepów mikroorganizmów wpływająca na biomodyfikację powierzchni mineralnej (Fotografie 1 i 2) oraz czynniki wpływające na selektywność i efektywność procesu. W Tabeli 1 zebrano przykłady badanych układów mineralnych wraz z odniesieniami literaturowymi. Szczególnie interesujące są bakterie bioługujące – acydofilne gatunki utleniające rudy siarczkowe, które są już stosowane w przemysłowych procesach biohydrometalurgicznych. Bakterie te selektywnie pokrywają powierzchnie minerałów siarczkowych tworząc biofilm lub warstwę EPS. Badania wykazały wysoką skuteczność zastosowanych szczepów jako kolektora w procesach flotacji i flokulacji

wybranych układów mineralnych (Attia i inni, 1993; Ohmura i inni, 1993; Natarajan, K.A., Das, A., 2003; Mehrabani i inni, 2010,2011; Hosseini i inni, 2005; Wang i inni, 2012).

Wnioski

Mikroorganizmy oraz produkty ich przemiany materii mogą znacząco zmieniać właściwości powierzchni mineralnej, tym samym mogą być wykorzystywane w procesach biowzbogacania w celu uzyskania selektywnej separacji. Jednakże, mimo że wstępne badania wykazują niektóre potencjalne zastosowania procesów biologicznych w procesach inżynierii mineralnej, bardzo niewiele z nich jest stosowanych w procesach przemysłowych. Wydaje się jednak, że istnieje wyraźna potrzeba opracowania metodyki selektywnej biomodyfikacji powierzchni mineralnej w celu pełnego wykorzystania potencjału mikroorganizmów w procesach wzbogacania surowców mineralnych.

Artykuł powstał w ramach projektu o numerze 16.16.100.215

Literatura – References

1. Attia Y. A., Elzaky M., 1993. Enhanced separation of pyrite from oxidized coal by froth flotation using biosurface modification. *Int J Miner Process.*, 37, 61-71
2. Boström, M., Deniz, V., Franks, G.V., Ninham, B.W., 2006. Extended DLVO theory: electrostatic and non-electrostatic forces in oxide suspensions. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 16, 123-126
3. Botero Ana Elisa Casas, Torem Mauricio Leonardo, de Mesquita Luciana Maria Souza, 2007. Fundamental studies of *Rhodococcus opacus* as a biocollector of calcite and magnesite. *Minerals Engineering*, 20, 1026–1032
4. Botero Ana Elisa Casas, Torem Mauricio Leonardo, de Mesquita, 2008. Surface chemistry fundamentals of biosorption of *Rhodococcus opacus* and its effect in calcite and magnesite flotation. *Minerals Engineering*, 21, 83–92
5. Chandraprabha M.N., Natarajan K.A., Jayant M. Modak, 2004b. Selective separation of pyrite and chalcopryrite by biomodulation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 37, (3–4), 93-100
6. Chandraprabha M.N., Natarajan K.A., 2013. Role of outer membrane exopolymers of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in adsorption of cells onto pyrite and chalcopryrite. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 123, 152-157
7. Chandraprabha M.N., Natarajan K.A., Somasundaran P., 2004a. Selective separation of arsenopyrite from pyrite by biomodulation in the presence of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 276, (2), 323-332
8. Chandraprabha M.N., Natarajan K.A., Somasundaran P., 2005. Selective separation of pyrite from chalcopryrite and arsenopyrite by biomodulation using *Acidithiobacillus ferrooxidans* *International Journal of Mineral Processing*, Vol 75, (1–2), 113-122
9. de Mesquita L.M.S., Linsb F.F., Torem M.L., 2003. Interaction of a hydrophobic bacterium strain in a hematite–quartz flotation system. *Int. J. Miner. Process.*, 71, 31– 44
10. Deo Namita; Natarajan K.A; Somasundaran P., 2001. Mechanisms of adhesion of *Paenibacillus polymyxa* onto hematite, corundum and quartz. *Int. J. Miner. Process.*, 62, 27–39
11. Deo, N., Natarajan, K.A., 1997. Interaction of *Bacillus polymyxa* with some oxides minerals with reference to mineral beneficiation and environmental control. *Minerals Engineering*, 10 (12), 1339–1354
12. Deo, N., Natarajan, K.A., 1998. Studies on interaction of *Paenibacillus polymyxa* with iron ore minerals in relation to beneficiation. *Int. J. Miner. Process.*, 55, 41–60
13. Didyk, A. M. , Sadowski, Z., 2012. Flotation of serpentinite and quartz using biosurfactants. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Vol. 48, (2), 607-618
14. Gawel J., I. Maliszewska, Z. Sadowski, 1997. The effect of biopretreatment on the flotation recovery of magnesite tailings. *Minerals Engineering*, 10, (8), 813-824
15. Hołda A., Młynarczykowska A., 2014. Bioflotation as an Alternative Method for Desulphurization of Fine Coals - Part I; *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 34, (2) 263-268
16. Hosseini, T.R., Kollahdoozan, M., Tabatabaei, Y.S.M., Oliazadeh, M., Noaparast, M., Eslami, A., Manafi, Z., Alfanzazi, A., 2005. Bioflotation of Sarcheshmeh copper ore using *Thiobacillus ferrooxidans* bacteria. *Minerals Engineering*, 18, (3), 371–374.
17. Jia C.Y., Wei D.Z., Li P.J., Li X.J., Tai P.D., Liu W., Gong Z.Q., 2011. Selective adsorption of *Mycobacterium phlei* on pyrite and sphalerite. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 83, 214–219
18. Jucker B. A., Harms H., Zehnder A. J., 1996. Adhesion of the positively charged bacterium *Stenotrophomonas (Xanthomonas) maltophilia* 70401 to glass and Teflon. *J. Bacteriol.*, 178, (18), 5472–5479
19. Kim Gahee; Kyuhyeong Park, Junhyun Choi, Allan Gomez-Flores, Yosep Han, Siyoung Q. Choi, Hyunjung Kim, 2015. Bioflotation of malachite using different growth phases of *Rhodococcus opacus*: Effect of bacterial shape on detachment by shear flow. *International Journal of Mineral Processing* , 143, 98–104
20. Lopez L.Y. Antonio G. Merma, Mauricio L. Torem, Gabriela H. Pino, 2015. Fundamental aspects of hematite flotation using the bacterial strain *Rhodococcus ruber* as bioreagent. *Minerals Engineering*, 75, 63–69
21. Marcinčáková R., Mražíková A, Velgosová O., Kaduková J., Vojtko M., Holub M., 2014. The Influence of Spore Age of *Aspergillus Niger* on Lithium Dissolution from Lepidolite; *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 34, (2), 211-216
22. Marcinčáková R., Kaduková J., Mražíková A., 2015. Biorecovery of Lithium from Lepidolite by the Mixture of *Rhodotorula Rubra* and *Acidithiobacillus Ferrooxidans*. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 36, (2), 85–88.

23. Marshall K. C., Stout R., Mitchell R., 1971. Mechanism of the Initial Events in the Sorption of Marine Bacteria to Surfaces. *Microbiology*, 68, 337-348
24. Mehrabani J.V., Mousavi S.M., Noaparast M., 2011. Evaluation of the replacement of NaCN with *Acidithiobacillus ferrooxidans* in the flotation of high-pyrite, low-grade lead-zinc ore. *Separation and Purification Technology*, 80, 202-208
25. Mehrabani J.V., Noaparast M., Mousavi S.M., Dehghan R., Rasooli E., Hajizadeh H., 2010. Depression of pyrite in the flotation of high pyrite low-grade lead-zinc ore using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Miner. Eng.*, 23, 10-16
26. Natarajan K.A., Namita Deo, 2001. Role of bacterial interaction and bioreagents in iron ore flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 62, 143-157
27. Natarajan, K.A., Das, A., 2003. Surface chemical studies on 'Acidithiobacillus' group of bacteria with reference to mineral flocculation. *International Journal of Mineral Processing*, 72, 189-198.
28. Ohmura N., Kitamura K., Saiki H., 1993. Mechanism of microbial flotation using *Thiobacillus ferrooxidans* for pyrite suppression. *Biotechnol. Bioeng.*, 41, 671-676
29. Patra P., Natarajan K.A., 2008. Role of mineral specific bacterial proteins in selective flocculation and flotation. *Int. J. Miner. Process.*, 88, 53-58
30. Patra, P., Natarajan, K.A., 2003. Microbial-induced flocculation and flotation for pyrite separation from oxide gangue minerals. *Minerals Engineering*, 16, 965-973.
31. Patra, P., Natarajan, K.A., 2004. Microbially induced flocculation and flotation for separation of chalcopyrite from quartz and calcite. *International Journal of Mineral Processing*, 74, 143-155.
32. Poorni S., Natarajan K.A., 2014. Flocculation behaviour of hematite-kaolinite suspensions in presence of extracellular bacterial proteins and polysaccharides. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 114, 186- 192
33. Poortiga, A., Boss, R., Norde, W., Bussher, H., 2002. Electric double layer interactions in bacterial adhesion to surfaces. *Surface Science Reports*, 47, 1-32.
34. Prakasan M.R. Sabari, Natarajan K.A., 2010. Microbially induced separation of quartz from hematite using sulfate reducing bacteria. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 78, 163-170
35. Raichur, A.M., Misra, M., Bukka, K., Smith, R.W., 1996. Flocculation and flotation of coal by adhesion of hydrophobic *Mycobacterium phlei*. *Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces*, 8, 13- 24.
36. Rawlings D.E., 1997. *Biomining. Theory, Microbes and Industrial Processes*. Springer
37. Rijnaarts Huub H.M., Norde W., Bouwer E.J., Lyklema J., Zehnder A.J.B., 1995. Reversibility and mechanism of bacterial adhesion. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 4, 5-22
38. Santhiya D., S. Subramanian, K.A. Natarajan, K. Hanumantha Rao, Forssberg K.S.E., 2001. Bio-modulation of galena and sphalerite surfaces using *Thiobacillus thiooxidans*. *Int. J. Miner. Process.*, 62, 121-141
39. Sarvamangala H., Natarajan K.A., 2011. Microbially induced flotation of alumina, silica/calcite from haematite. *International Journal of Mineral Processing*, 99, 70-77
40. Sharma P.K., Hanumantha Rao K., 2003. Adhesion of *Paenibacillus polymyxa* on chalcopyrite and pyrite: surface thermodynamics and extended DLVO theory. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 29, 21-38
41. Sharma, K.E., Rao, Hunumantha K., 2002. Analysis of different approaches for evaluation of surface energy of microbial cells by contact angle goniometry. *Advances in Colloids and Interfaces Science*, 98, 341-463.
42. Sharma, P.K., Rao, H., Natarajan, K.A., Forssberg, K.S.E., 2001. Surface chemical characterisation of *Paenibacillus polymyxa* before and after adaptation to sulfide minerals. *Int. J. Miner. Process.*, 62, 3-25
43. Shashikala, A.R., Raichur, A.M., 2002. Role of interfacial phenomena in determining adsorption of *Bacillus polymyxa* onto hematite and quartz. *Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces*, 24, 11 -20
44. Smith, R.W., Miettinen, M., 2006. Microorganisms in flotation and flocculation: Future technology or laboratory curiosity? *Minerals Engineering*, 19, 548-553.
45. Somasundaran P., Yunzhi Ren, Mirajkar Yelloji Ran, 1998. Applications of biological processes in mineral processing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect*, 133, 13-23
46. Subramanian, S., Santhiya, D., Natarajan, K.A., 2003. Surface modification studies on sulphide minerals using bioreagents. *International Journal of Mineral Processing*, 72, (1-4), 175-188.
47. Vilinska A., Hanumantha K. Rao, 2008. *Leptosirillum ferrooxidans*-sulfide mineral interactions with reference to bioflotation nad bioflocculation. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 18

48. Wang Zhao-hui, Xie Xue-hui, Liu Jian-she, 2012. Experimental measurements of short-term adsorption of *Acidithiobacillus ferrooxidans* onto chalcopyrite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22, (2), 442–446
49. Yageshni Govender, Gericke Mariekie, 2011. Extracellular polymeric substances (EPS) from bioleaching systems and its application in bioflotation. *Minerals Engineering*, 24, 1122–1127
50. Yang Huifen, Qiongyao Tang, Chuanlong Wang, Jinlong Zhang, 2013. Flocculation and flotation response of *Rhodococcus erythropolis* to pure minerals in hematite ores. *Minerals Engineering*, 45, 67–72
51. Yang Zhi-chao, Feng Ya-li, LI Hao-ran, Wang Wei-da, Teng Qing, 2014. Effect of biological pretreatment on flotation recovery of pyrolusite. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24, 1571–1577
52. Yee N., Fein J. B., Daughney C. J., 1999. Experimental study of the pH, ionic strength, and reversibility behavior of bacteria–mineral adsorption. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 64, (4), 609–617
53. Zheng X.-P, P.J. Arps, R.W. Smith, 2001. Adhesion of two bacteria onto dolomite and apatite: their effect on dolomite depression in anionic flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 62, 159–172

Biobenefication of Mineral Resources – Microbe-Mineral Interaction

Biological processes in mineral processing are beneficial alternative for traditional physicochemical beneficiation methods. They create possibilities to process ores of lower quality as well processing wastes containing useful metals. They also support environmental protection minimizing negative influence of mining activity. Biobenefication cover processes of bioflotation and bioflocculation which are selective separation of mixture components under influence of adhesion of bacteria cells on mineral surfaces. The effect of these processes are modification of mineral surface and selective dissolution of mineral components, bioaccumulation of dissolved metal ions and creation or conversion of various mineral forms. The paper presents wide review of world scientific literature connected with topic of applying bacteria in mineral engineering. The examples of using certain microorganisms to certain mineral raw materials were provided.

Keywords: biobenefication, bioflotation, bioflocculation,