

Udział mikroorganizmów w przebiegu procesów biogeochemicznych w geologicznych środowiskach przypowierzchniowych. Część I – mikroorganizmy tlenowe

Dorota Wolicka¹



Participation of microorganisms in biogeochemical processes in geological near-surface environments. Part I – Aerobic microorganisms. Prz. Geol., 58: 1010–1013.

A b s t r a c t. Microorganisms activity have large influence on composition of minerals and rocks due to biogeochemical processes in the lithosphere weathering zone. In each environment specific autochthonous microorganisms occur and knowledge of their activity and certain biochemical processes is very important in understanding the geochemical cycles of elements, minerals and organic compounds. Physical and chemical conditions of environment strongly influence the composition of bacterial communities. Depending on their properties, the activity of one group of microorganisms, may affect the chemical reactions on significant way and can moderate the direction of biogeochemical processes.

The paper is focused on the role of aerobic microbial communities and products of their metabolism in biogeochemical conditions at the weathered zone.

Keywords: aerobic microorganisms, biogeochemical processes and crystallization of minerals

W ostatnich latach coraz większą uwagę zwraca się na rolę mikroorganizmów i ich wpływ na przebieg i skutki procesów geochemicznych i mineralogicznych zachodzących w środowiskach antropogenicznych. Obecna wiedza na temat udziału makro- i mikroorganizmów w powstawaniu minerałów i skał jest rozległa i obejmuje wiele aspektów, ale w dalszym ciągu brakuje szczegółowych informacji dotyczących udziału mikroorganizmów w wielu procesach geochemicznych. Szczątki pochodzenia organicznego są często głównym, a niekiedy jedynym lub też znaczącym składnikiem skał osadowych i kopalin organogenicznych. Określenie modelu przebiegu procesów biogeochemicznych stanowi jedynie mniejsze lub większe przybliżenie stanu rzeczywistego, zwłaszcza gdy dotyczy odległego czasu i zależy od kompleksowego rozpoznania przyczyn i warunków ich przebiegu. Wymusza to konieczność łączenia wiedzy i metod badawczych z różnych dziedzin nauki i tym samym realizacji badań interdyscyplinarnych. Stąd w coraz większym stopniu przedmiotem zainteresowania geologii stają się mikroorganizmy, gdyż odgrywają one często kluczową rolę, także w środowisku strefy hipergenicnej. Powyższe zagadnienia leżą w polu zainteresowań geomikrobiologii – dyscypliny naukowej przeżywającej obecnie bardzo burzliwy rozwój. Zamiarem autorki jest pełniejsze zapoznanie środowiska geologicznego z głównymi zastosowaniami geomikrobiologii w procesach zachodzących w strefie hipergenicnej.

W niniejszej pracy scharakteryzowano rolę mikroorganizmów tlenowych oraz wpływ produktów ich metabolizmu na środowisko przypowierzchniowych warstw litosfery. Tematem drugiego w cyklu artykułu będzie rola mikroorganizmów beztlenowych w procesach biogeochemicznych zachodzących w przypowierzchniowych warstwach litosfery.

Mikroorganizmy a środowisko geologiczne

Mikroorganizmy to jedna z najstarszych form życia na Ziemi; ślady życia organicznego bakterii, sinic i glonów pochodzą sprzed 3500 mln lat i dokumentują już na tym

etapie istnienie zróżnicowanych jego form (Grotzinger & Knoll, 1999; Hofmann, 1999). To zróżnicowanie wiązało się m.in. z wykształceniem różnych szlaków metabolicznych, będących ogółem procesów biochemicznych zachodzących w organizmach żywych, warunkujących ich funkcjonowanie i wzrost. Wyróżnia się dwa rodzaje tych procesów: anaboliczne – prowadzące do łączenia się związków prostych w złożone oraz kataboliczne, w wyniku których następuje dysymilacja związków chemicznych na prostsze z jednoczesnym wydzielaniem się energii. Mikroorganizmy do wzrostu i budowy elementów komórki potrzebują różnych pierwiastków biogenych, takich jak C, H, N, P i S. W mniejszych ilościach niezbędne są również Na, K, Ca, i Mg, a w stężeniach mikromolarnych: Fe, Zn, Mo, Co, Cu, Mn i in. Te ostatnie są potrzebne m.in. do właściwego funkcjonowania enzymów.

Z uwagi na to, że mikroorganizmy występują prawie we wszystkich przypowierzchniowych środowiskach geologicznych, włącznie z tymi, które zostały zmienione w wyniku działalności człowieka, powstające podczas procesów biogeochemicznych fazy mineralne mogą w znaczący sposób wpływać na właściwości fizykochemiczne środowiska. Klasycznym przykładem środowisk, w których znacząca rolę mogą odgrywać procesy biogeochemiczne są np.: złoża ropy naftowej, wody złożowe, wyrobiska górnicze, wypływy wód kopalnianych, odcieki pochodzące ze składowisk odpadów górniczych, jak również tereny skażone ropą naftową (Wolicka i in., 2009, 2010).

Zarówno w przypadku wietrzenia mechanicznego, jak i chemicznego dużą rolę odgrywają czynniki natury biologicznej, zwłaszcza mikroorganizmy. Do tej pory w literaturze naukowej dotyczącej procesów powstawania faz mineralnych przeważał pogląd, iż większość procesów geochemicznych w przypowierzchniowych częściach litosfery zachodzi na drodze abiotycznej. Obecnie coraz częściej dostrzega się kluczową rolę mikroorganizmów w tych procesach. Nadal jednak odczuwa się brak pełniejszego udokumentowania tych zagadnień od strony geomikrobiologicznej. Mało jest danych o fizykochemicznych i zara-

¹Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Geochemii, Mineralogii i Petrologii, Zakład Mineralogii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; d.wolicka@uw.edu.pl

zem mikrobiologicznych uwarunkowaniach powstawania faz mineralnych na drodze różnych procesów biogeochemicznych. Należy wspomnieć, że niektóre skały, złoża wielu eksploatowanych dziś surowców: węgla, ropy naftowej, gazu ziemnego, siarki, siarczków metali, węglanów, a także stromatolity, powstały częściowo lub całkowicie w wyniku działalności życiowej mikroorganizmów. Mikroorganizmy występujące w przypowierzchniowych warstwach litosfery mogą uczestniczyć w procesach tworzenia nowych minerałów i skał zarówno w warunkach tlenowych, jak i beztlenowych (Wey & Laskman, 1976).

Aktywność mikroorganizmów tlenowych i jej konsekwencje w przypowierzchniowych warstwach litosfery

Mikroorganizmy są w stanie przeprowadzać różne procesy biochemiczne w zależności od środowiska, w którym występują i panujących w nim warunków fizykochemicznych. Biorąc pod uwagę rodzaj przeprowadzanych reakcji mikroorganizmy możemy podzielić na kilka grup. I tak, pod względem wykorzystywania głównego źródła energii, mikroorganizmy podzielono na:

- fototrofy – w procesach metabolicznych wykorzystujące energię światła,
- chemotrofy – w procesach metabolicznych wykorzystujące energię wiązań chemicznych.

Ze względu na rodzaj stosowanych donorów elektronów wyróżniamy:

- litotrofy, które uzyskują energię ze związków nieorganicznych,
- organotrofy czerpiące energię ze związków organicznych.

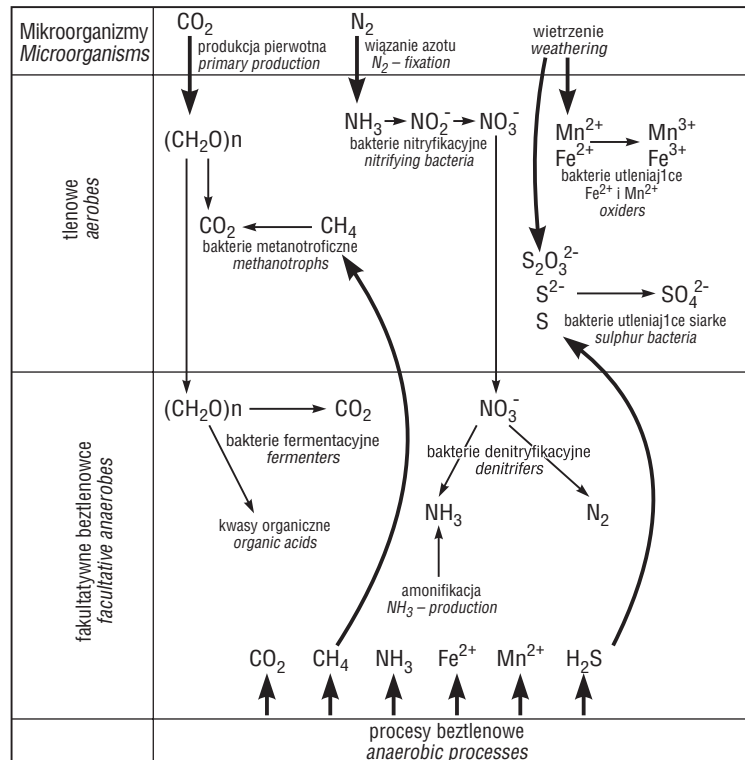
Ze względu na rodzaj wykorzystanego w reakcjach biosyntezy źródła węgla wydzielamy:

- autotrofy – uzyskujące węgiel z dwutlenku węgla,
- heterotrofy – utleniające związki organiczne.

Między mikroorganizmami żyjącymi w środowisku przyrodniczym zachodzą pewne, często syntroficzne, zależności. Przykładowe procesy przedstawiono na ryc. 1.

Wiele grup bakterii tlenowych potrafi wykorzystywać zawarte w skałach związki nieorganiczne i ich specjacje, np. jony NH_4^+ , NO_2^- , SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, S^{2-} , Fe^{2+} , jak również S^0 lub H_2 jako donory elektronów, uzyskując w wyniku ich utlenienia energię niezbędną do przeprowadzenia procesów syntezy. Ten typ metabolizmu autotroficznego nazywany jest chemosyntezą, a dokładniej chemolitoautotrofią, która, jak się uważa, jest najstarszym procesem biochemicznym na Ziemi. W przemianach wymienionych powyżej związków i jonów uczestniczy wiele grup mikroorganizmów. Można tu wymienić m.in. bakterie nityfikacyjne, siarkowe, żelazowe i wodorowe. Grupy bakterii chemolitoautotroficznych oraz przeprowadzane przez nie przykładowe procesy przedstawia tabela 1.

Z zestawienia w tabeli 1 wynika, że część produktów działalności mikroorganizmów to kwasy nieorganiczne, m.in. kwas siarkowy (VI) i kwas azotowy (III i V). Związki te są mocnymi elektrolitami i często mogą wywierać negatywny wpływ na środowisko przyrodnicze, np. intensyfikując rozkład hydrolityczny minerałów, zakwaszając gleby, uruchamiając toksyczne metale. Bardzo ważną grupą wśród bakterii chemosyntetyzujących są bakterie nity-



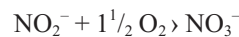
Ryc. 1. Schemat interakcji pomiędzy mikroorganizmami w środowiskach tlenowych

Fig. 1. The diagram of interaction between aerobic microorganisms

fikacyjne. Biorą one udział w utlenianiu jonów amonowych do azotanów (III), a następnie do azotanów (V) wg schematycznych reakcji:



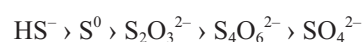
Nitrosomonas europaea, Nitrosococcus oceanus



Nitrobacter winogradskyi, Nitrobacter agilis

Wynikiem aktywności tej grupy bakterii są np. procesy niszczenia elementów architektonicznych wykonanych ze skał węglanowych lub betonu przez kwas azotowy (V).

Kolejną grupą bakterii chemolitoautotroficznych są bakterie siarkowe (BS). Występują w środowiskach, gdzie obecny jest okresowo siarkowodor i/lub inne zredukowane związki siarki, np. w płytkich jeziorach, wodach powierzchniowych, glebach i oceanach. Spotykane są również w środowiskach ekstremalnych, np. gorących źródłach, środowiskach acydofilnych takich jak kwaśne jeziora (Wolicka & Borkowski, 2007) oraz kominy hydrotermalne (Pfennig i.in., 1981). Bakterie siarkowe są szczególnie godne uwagi ze względu na znaczącą rolę jaką odgrywają w procesach geologicznych, m.in. w powstawaniu złóż siarki rodzimej i jej związków (Edwards i in., 2005). Stwierdzono, iż BS biorą udział w procesach tworzenia i rozkładu minerałów (Ehrlich, 1998). Bakterie te należą do mikroorganizmów przeważnie wymagających do wzrostu tlenu, a energię potrzebną do życia uzyskują z utleniania zredukowanych związków siarki, takich jak siarkowodor lub siarka elementarna, do jonów siarczanowych (VI) według reakcji (Clark & Paul, 2000):

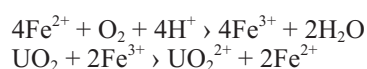


Do bakterii siarkowych zaliczamy m.in. *Beggiatoa*, *Thioploca*, *Thiospirillopsis*, *Thiothrix*, *Thiospira* (Clark & Paul, 2000), ale zdolność do utleniania minerałów siarczkowych posiadają przede wszystkim bakterie z rodzaju *Acidithiobacillus*, np. *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans* oraz *Thiobacillus denitrificans* i *Thiobacillus thioparus* (Nordstrom & Southam, 1997). Zdolność tych kwasolubnych bakterii, utleniających żelazo i siarkę, do przeprowadzania rud siarczkowych w rozpuszczalne w wodzie siarczany metali ciężkich wykorzystuje się w procesie biolugowania (Xia Le-Xian i in., 2008).

Udział bakterii siarkowych w procesie wietrzenia minerałów siarczkowych stwierdzono już dość dawno, w przypadku utleniania takich minerałów jak piryt (Howarth, 1979; Pinka, 1991), bornit (Landesman i in., 1966) chalkopiryt (Torma i in., 1976; Lorenzo i in., 1997), czy kowelin (Gramp i in., 2006; Anwar i in., 2000). Wiadome jest, że w strefach wietrzenia siarczków mikroorganizmy biorą udział w reakcjach prowadzących do powstania siarczanów i przeprowadzenia Fe^{2+} do Fe^{3+} . Wyniki badań dotyczących udziału mikroorganizmów w biogeochemicznym obiegu siarki na terenie nieczynnych kopalni łupków pirytowych w Wieściszowicach (Rudawy Janowickie) wskazały na znaczącą rolę mikroorganizmów autochtonicznych w wyżej wymienionych procesach (Wolicka & Borkowski, 2007a; Borkowski, 2009). Środowisko to jest bardzo interesujące ze względu na zachodzące tam procesy geochemiczne wietrzenia skał zawierających minerały siarczkowe oraz występowanie wielu grup mikroorganizmów. Badania genetyczne przeprowadzone w celu identyfikacji mikroorganizmów wchodzących w skład zespołów izolowanych z Wieściszowic wskazują na występowanie tlenowych bakterii chemolitoautotroficznych typowych dla środowisk utleniania związków mineralnych. Wykazano obecność mikroorganizmów należących do rodzajów: *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Thioploca*, *Acidithiobacillus* oraz beztlenowych bakterii redukujących siarczany (Wolicka, dane niepublikowane).

W procesach geologicznych zachodzących w strefie hipergeniczej ważną rolę odgrywają również mikroorganizmy, których metabolizm wiąże się z manganem. Już na początku XX wieku Jackson (1901) i Beijerinck (1913) jako pierwsi opisali bakterie utleniające mangan. Pierwiastek ten może występować na kilku stopniach utleniania 0, +2, +3, +4, +6, i +7, jednak w środowisku naturalnym najczęściej występuje w postaci specjacji Mn^{2+} , Mn^{3+} i Mn^{4+} (Mustoe, 1981). Bakterie chemolitoautotroficzne posiadają również zdolność utleniania manganu – np. *Leptothrix doscophorus* utlenia Mn^{2+} do Mn^{4+} .

Część mikroorganizmów posiada zdolność do utleniania Co^{2+} , Cu^{1+} , AsO_2^- , Se^0 lub SeO_3^{2-} , jak również redukcji Mn^{4+} , Fe^{3+} , Co^{3+} , AsO_4^{2-} , SeO_4^{2-} , czy SeO_3^{2-} (Ehrlich, 2002). Niektóre gatunki bakterii są w stanie przeprowadzać biotransformację kationów metali toksycznych dla samych bakterii, takich jak np. Hg^{2+} czy Ag^+ , odpowiednio do Hg^0 czy Ag^0 (Frischmuth i in., 1993). Röhrlich i in. (1992) wykorzystali bakterie *Aeromonas hydrophila* HGS2 do usuwania rtęci z roztworu $HgCl_2$. Etap gromadzenia rtęci na zewnątrz komórek bakteryjnych zachodził po redukcji Hg^{2+} do Hg^0 . U pewnych szczepów *A. ferrooxidans* opisano enzym – reduktazę rtęciową, odpowiedzialną za redukcję jonów Hg^{2+} . Stwierdzono również, że bakterie z rodzaju *Acidithiobacillus* mają istotny wpływ na ługowanie rud uranowych, głównie poprzez silne zakwaszenie środowiska oraz utlenianie jonów żelaza (II). Prawdopodobnie *A. ferrooxidans* ma także zdolność do katalizowania reakcji bezpośredniego utleniania jonów UO_2 .



Z drugiej jednak strony wiele mikroorganizmów jest zdolnych do redukcji U^{6+} do U^{4+} , szczególnie w warunkach beztlenowych. Pierwsze prace dotyczące tego zagadnienia przedstawili Woolfolk i Whiteley (1962). Do mikroorganizmów redukujących związki uranu należą m.in.: szczep GS15 *Geobacter metallireducens* (Lovely i in., 1993), *Desulfovibrio desulfuricans* (Lovely & Philips, 1992), *Desulfovibrio* sp. (Pietzsch i in., 1999). Izolacja bakterii z osadów morskich i rzecznych sugeruje, że aktywność mikrobiologiczna odgrywa ogromną rolę w unieruchamianiu uranu i jego akumulacji w skałach osadowych.

Mikroorganizmy biorą również udział w powstawaniu węglanów. Procesy powstawania węglanów w wyniku aktywności cyjanobakterii związane są przede wszystkim ze stromatolitami, czyli warstwowymi matami mikrobiologicznymi, w których powstawanie węglanów może, ale nie musi, być związane z aktywnością fotosyntetyczną cyjanobakterii. Jedną z możliwych dróg powstawania stromatolitów jest wychwytywanie już wcześniej wytworzonego węglanu wapnia i odkładanie go w strukturach maty mikrobiologicznej. Innym procesem powstawania stromatolitów jest mineralizacja substancji obficie wydzielanych przez mikroorganizmy tworzące matę mikrobiologiczną (Dupraz i in., 2004; Dupraz & Visscher, 2005). W środowiskach takich jak hipersłone jeziora może dochodzić do mineralizacji zewnątrzkomórkowych substancji polimerowych (EPS) wydzielanych przez rosnące cyjanobakterie, co razem z aktywnością bakterii heterotroficznych może być

Tab. 1. Przykłady bakterii chemolitoautotroficznych oraz przeprowadzanych przez nie procesów (według Madigan & Martinko, 2006)

Table 1. Examples of chemolithoautotrophic bacteria and their activity (after Madigan & Martinko, 2006)

Grupa bakterii Group of bacteria	Gatunki reprezentatywne Representative species	Substrat Substrate	Produkt utlenienia Product of oxidation
Utleniające amoniak Nitrifying bacteria	<i>Nitrosomonas europaea</i>	NH_3	NO_2^-
Utleniające azotany (III) Nitrifying bacteria	<i>Nitrobacter winogradskyi</i>	NO_2^-	NO_3^-
Utleniające siarkę Sulphur bacteria	<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	$S, S^{2-}, S_2O_3^{2-}$	SO_4^{2-}
Żelazowe Iron bacteria	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Fe^{2+}	Fe^{3+}
Utleniające wodór Hydrogen bacteria	<i>Alcaligenes eutrophus</i>	H_2	H_2O
Karboksylobakterie CO – oxidizing bacteria	<i>Pseudomonas carboxydovorans</i>	CO	CO_2

przyczyną powstawania mineralnych naskorupień i warstwowych struktur przypominających stromatolity.

W wodach nasyconych węglanami (np. w płytkich jeziorach) proces wytrącania się węglanu wapnia najczęściej związany jest z aktywnością cyjanobakterii osiadłych na powierzchniach skał, albo na dnie zbiorników, w miejscach, gdzie bez przeszkód dociera światło słoneczne. Typowymi mikroorganizmami biorącymi udział w omawianym procesie są *Synechococcus* i *Scytonema* (Dittrich i in., 2004). Z odkładaniem węglanu wapnia w jeziorach wiąże się również możliwość kumulowania gipsu w bezpośrednim otoczeniu komórek cyjanobakterii, szczególnie wtedy, gdy w wodzie występują znaczne ilości siarczanów. Jony wapnia związane z powierzchnią cyjanobakterii mogą reagować z jonami siarczanowymi, pochodzącymi ze środowiska i jonami węglanowymi generowanymi w procesie fotosyntezy CO₂. Thompson i Ferris (1990) sugerują, że kalcyt może zastępować gips podczas rozwoju biohermy właśnie w wyniku aktywności fotosyntetycznej.

Podsumowanie

Środowiska przypowierzchniowe są miejscem występowania licznych i różnorodnych zespołów mikrobialnych, które w znaczący sposób mogą wpływać na wiele procesów geochemicznych zachodzących w środowiskach przypowierzchniowych. Z uwagi na wielką różnorodność przeprowadzanych szlaków metabolicznych, mikroorganizmy poprzez produkty swojej aktywności mogą istotnie modyfikować przebieg procesów chemicznych i być przyczyną powstawania lub rozkładu wielu faz mineralnych. Klasycznym tego przykładem jest powstawanie i rozpuszczanie węglanów, a także utlenianie siarczków metali, w zależności od aktywności mikroorganizmów, wartości pH i potencjału redoks, składu chemicznego i mineralnego ośrodka skalnego.

Wskazane powyżej i pokrótce scharakteryzowane przykłady jasno dowodzą, że w kompleksowej analizie procesów geochemicznych nie należy pomijać roli czynników biotycznych, w tym działalności mikroorganizmów tlenowych.

Literatura

ANWAR M.A., IQBAL M., QAMAR M.A., REHMAN M. & KHALID A.M. 2000 – Technical communication: Determination of cuprous ions in bacterial leachates and for environmental monitoring. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 16: 135–138.

BEIJERINCK M.W. 1913 – Oxydation des mangancarbonates durch bakterien und schimmelpilze. *Folia Microbiol. (Delft)*, 2: 123–134.

BORKOWSKI A. 2009 – Rola bakterii cyklu siarkowego w kształtowaniu strefy wietrzenia łupków pirytonośnych w Wieściszowicach (Rudawy Janowickie). Rozprawa doktorska, Wydział Geologii UW.

CLARK F.E. & PAUL E.A. 2000 – Mikrobiologia i biochemia gleb. Lublin. Wydawnictwo UMCS.

DITTRICH M., KURZ P. & WEHRLI B. 2004 – The role of autotrophic picocyanobacteria in calcite precipitation in an oligotrophic lake. *Geomicrobiology Journal*, 21: 45–53.

DUPRAZ C. & VISSCHER P.T. 2005 – Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology*, 13: 429–438.

DUPRAZ C., VISSCHER P.T., BAUMGARTNER L.K. & REID R.P. 2004 – Microbe-mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). *Sedimentology*, 51: 745–765.

EDWARDS K.J., BACH W. & MCCOLLOM M.T. 2005 – Geomicrobiology in oceanography: microbe-mineral interactions at and below the seafloor. *Trends in Microbiology*, 13: 449–456.

EHRlich H. L. 1998 – Geomicrobiology: its significance for geology. *Earth-Science Reviews*, 45: 45–60.

EHRlich H.L. 2002 – Geomicrobiology. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel.

FRISCHMUTH A., WEPPE P. & DECKWER W.D. 1993 – Microbial transformation of mercury(II): I. Isolation of microbes and characterization of their transformation capabilities. *Journal of Biotechnology*, 29: 39–55.

GRAMP J.P., SASAKI K., BIGHAM J.M., KARNACHUK O.V. & TOUVINEN O.H. 2006 – Formation of covellite (CuS) under biological sulfate-reducing conditions. *Geomicrobiology Journal*, 23: 613–619.

GROTZINGER J.P. & KNOLL A.H. 1999 – Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipstick? *Ann.Rev.Earth Planet.Sci.*, 27: 313–358.

HOFMANN H.J. 1999 – Origin of 3.45 Ga coniform stromatolites in Warrawoona Group, Western Australia. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 111: 1256–1262.

HOWARTH R.W. 1979 – Pyrite: Its rapid formation in a salt marsh and its importance in ecosystem metabolism. *Science*, 203: 49–51.

JACKON D.D. 1901 – The precipitation of iron, manganese, and aluminium by bacterial action. *J. Soc. Chem. Ind.*, 21: 681–684.

LANDESMAN J., DUNKAN D.W. & WALDEN C.C. 1966 – Oxidation of inorganic sulfur compounds by washed cell suspension of by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Can. J. Microbiol.*, 12: 957–964.

LORENZO P., GÓMEZ E., ISABEL DE SILÓNIZ M., BALLESTER A. & PERERA J. 1997 – Chalcopyrite bioleaching and thermotolerance of three acidophilic, ferrous-oxidising bacterial isolates *Biotechnology Letters*, 19: 1197–1200.

LOVELY D.R. & PHILLIPS E.J.P. 1992 – Reduction of uranium by *Desulfovibrio desulfuricans*. *Environmental Science and Technology*, 26: 2228–2234.

LOVELY D.R., GIOVANNONI S.J., WHITE D.C., CAMPINE J.E., PHILLIPS E.J.P., GORBY Y.A. & GOODWIN I.S. 1993 – *Geobacter metallireducens* gen. nov. sp. nov., a microorganism capable of coupling the complete oxidation of organic compounds to the reduction of iron and other metals. *Archives of Microbiology*, 159: 336–344.

MADIGAN M.T. & MARTINKO J.M. 2006 – Biology of Microorganisms. Southern Illinois University, Carbondal.

MUSTOE G.E. 1981 – Bacterial oxidation of manganese and iron in a modern cold spring. *GSA Bulletin*, 92: 147–153.

NORDSTROM D.K. & SOUTHAM G. 1997 – Geomicrobiology of sulphide minerals oxidation, [In:] Banfield JF and Neelson KH (eds) *Geomicrobiology: Interaction between microbes and minerals*. Mineralogical Society of America, s. 361–390.

PFENNIG N., WIDDEL F. & TRUPER H.G. 1981 – The dissimilatory sulfate-reducing bacteria, [In:] *The Prokaryotes*, s. 926–940.

PIETZSCH K., HARD B.C. & BABEL W. 1999 – A *Desulfovibrio* sp. capable of growing by reducing U(VI). *J. Basic Microbiol.*, 39: 365–372.

PINKA J. 1991 – Bacterial oxidation of pyrite and pyrrothite. *Erzmetall*, 44: 571–573.

RÖHRICHT M., HOSEAS B., WEPPE P., DECKWER W.D. 1992 – Active microbial processes in eliminate mercury form wastewaters. *Dechema Biotechnology Conference 5*, VCH, Verlagsgesellschaft.

THOMPSON J.B. & FERRIS F.G. 1990 – Cyanobacterial precipitation of gypsum, calcite and magnesite from natural alkaline lake waters. *Geology*, 18: 995–998.

TORMA A.E., GABRA G.G., GUAY R. & SILVER M. 1976 – Effect of surface active agents on the oxidation of chalcopyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometall.*, 1: 301–309.

WEY T.J.E. & LASKMANAN V.I. 1976 – The Minerals. Metals & Materials Society, s. 1–11.

WOLICKA D., SUSZEK A., BORKOWSKI A. & BIELECKA A. 2009 – Application of aerobic microorganisms in bioremediation in situ of soil contaminated by petroleum products. *Bioresource Technology*, 3221–3227.

WOLICKA D. & BORKOWSKI A. 2007 – Activity of a sulphate reducing bacteria community isolated from an acidic lake. *EANA 07*, 7th European Workshop on Astrobiology, Turku, Finland, October 22–24 2007, s.98.

WOLICKA D. & BORKOWSKI A. 2007a – Microbiological and mineralogical characteristics of a community of microorganisms isolated from an acidic lake in Wieściszowice. *Electron Microscopy and Microanalysis Conference*, Kraków, 17–18 September 2007, s.70.

WOLICKA D., BORKOWSKI A. & DOBRZYŃSKI D. 2010 – Interactions between microorganisms, crude oil and formation waters. *Geomicrobiology Journal*, 27: 43–52.

WOOLFOLK C. A. & WHITELEY H. R. 1962 – Reduction of inorganic compounds with molecular hydrogen by *Micrococcus lactilyticus*. I. Stoichiometry with compounds of arsenic, selenium, tellurium, transition and other elements. *J. Bacteriol.* 84: 647–658.

XIA LE-XIAN, LIU JIAN-SHE, XIAO LI, ZENG JIA, LI BAN-MEI, GENG MEI-MEI, QIU GUAN-ZHOU. 2008 – Single and cooperative bioleaching of sphalerite by two kinds of bacteria – *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 18: 190–195.

Praca wpłynęła do redakcji 12.02.2010 r.

Po recenzji akceptowano do druku 22.03.2010 r.