

Dorota Wolicka*, Agnieszka Rożek*, Ludwina Jarzynowska*

MIKROBIOLOGICZNA STYMULACJA PROCESÓW GEOLOGICZNYCH W ŚRODOWISKU HIPERGENICZNYM

MICROBIOLOGICAL STIMULATION OF GEOLOGICAL PROCESSES IN HYPERGENIC ENVIRONMENT

Słowa kluczowe: procesy geomikrobiologiczne, mikroorganizmy.

Key words: geomicrobiological processes, microorganisms.

Microorganisms participate in the direct conversion of minerals and rocks during the processes occurring in the top layers of the lithosphere, which play a key role in geochemical transformations. Effects on microbial composition of the teams are primarily physicochemical conditions occurring in the environment such as pH value, the durability and availability of organic compounds.

An example of microbial activity in the geological environment are mixed populations of sulfate-reducing bacteria that have the ability to precipitate a variety of minerals such as carbonates such as calcite, dolomite and siderite [Perry, Taylor 2006], phosphate – such as apatite [Wolicka, Kowalski 2006], elemental sulfur [Wolicka, Kowalski 2006] and sulfides [Labrenz et al. 2000]. They shall also take an active role in biogeochemical processes occurring in crude oil and the formation waters. Current knowledge on the involvement of macro-and microorganisms in geological processes is multifaceted, but there is still no detailed information on participation and influence of microorganisms on many geochemical processes in the zone hypergenic.

1. WPROWADZENIE

Obecnie coraz częściej w naukach geologicznych dostrzega się znaczącą rolę czynników biotycznych w procesach geochemicznych czy skało- i minerałotwórczych. Spowodowane

* Dr Dorota Wolicka, mgr Agnieszka Rożek, mgr Ludwina Jarzynowska – Wydział Geologii, Instytut Geochemii, Mineralogii i Petrologii, Uniwersytet Warszawski, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: d.wolicka@uw.edu.pl, a.gojska@student.uw.edu.pl, l.jarzynowska@student.uw.edu.pl

jest to przede wszystkim rozwojem różnych metod analitycznych, dzięki którym można jednoznacznie potwierdzić udział np. mikroorganizmów w analizowanych procesach. Mikroorganizmy występują w różnych środowiskach – w glebie, w wodzie, w lodach Arktyki, w gorących źródłach czy w kwaśnych wodach kopalnianych. Ich obecność stwierdza się także w środowiskach ekstremalnych, takich np. jak złoża ropy naftowej, gdzie temperatura często osiąga ponad 80°C, istnieje znaczne ciśnienie oraz wysokie zasolenie. Kluczową wręcz rolę mikroorganizmów podkreślają geolodzy naftowi, szczególnie w procesie powstawania ropy naftowej, w drodze migracji ze skał macierzystych do zbiornikowych oraz w procesie jej biodegradacji.

W zależności od warunków środowiska działalność życiowa mikroorganizmów wywiera znaczący wpływ na skład chemiczny ropy naftowej, jak również na jej właściwości. Powoduje to zmianę wartości ekonomicznej surowca, jak również warunków eksploatacji. Z jednej strony mikroorganizmy mogą powodować zmniejszenie lepkości ropy, co ułatwia wydobycie tego surowca i jest efektem pożądanym, ale mogą również – poprzez produkty swej działalności – powodować korozję urządzeń wiertniczych.

2. UDZIAŁ MIKROORGANIZMÓW W PROCESACH MINERAŁO- I SKAŁOTWÓRCZYCH

Wiedza na temat udziału czynników biotycznych w procesach geologicznych często jest ograniczona jedynie do znajomości udziału sinic w procesach tworzenia stromatolitów. W literaturze geochemicznej jednak w dalszym ciągu można spotkać poglądy, według których większość procesów geochemicznych w przypowierzchniowych częściach litosfery zachodzi w drodze abiotycznej.

Należy zaznaczyć, że często produkty przemian metabolicznych powstające w wyniku aktywności jednej grupy mikroorganizmów stają się substratami grupy następnej. Warunki życia mikroorganizmów w środowiskach, gdzie występuje tlen, są inne niż w środowiskach ubogich w ten pierwiastek lub też pozbawionych go. Mimo to środowiska beztlenowe nie są pozbawione życia, a zachodzące w nich procesy biochemiczne są wywołane przez wiele wyspecjalizowanych grup mikroorganizmów, do których zaliczane są m.in.: bakterie fotosyntetyzujące, bakterie denitryfikacyjne, bakterie redukujące żelazo (III), bakterie redukujące siarczany i archeony metanogenne.

Mikroorganizmy występujące w środowiskach beztlenowych odgrywają ogromną rolę w biogeochemicznym obiegu pierwiastków w przyrodzie, a także w utrzymaniu równowagi w biosferze [Jørgensen 1982]. Mikroorganizmy beztlenowe wykorzystują jako akceptor elektronów azotany (V), siarczany (VI), siarkę elementarną, węglany oraz żelazo (III). Końcowym produktem redukcji azotanów jest azot cząsteczkowy, redukcji siarczanów i siarki elementarnej – siarkowodór, węglanów – kwas octowy lub metan, a żelaza (III) – żelazo (II).

W badaniach geologicznych w coraz większym stopniu uwzględnia się rolę mikroorganizmów, mają one bowiem wpływ na przebieg procesów geologicznych w środowisku hi-

pergenicznym. Powstające w wyniku procesów biologicznych różne fazy mineralne mogą w istotny sposób wpływać na aktywność i metabolizm mikroorganizmów, a także na właściwości fizykochemiczne środowiska. W wielu publikacjach dotyczących zagadnień krystalizacji faz mineralnych, przebiegu procesów skało- i złożotwórczych oraz sedymentacji w warunkach hipergenicznych pojawiają się informacje dotyczące roli mikroorganizmów w tworzeniu węglanów, siarczków czy siarki elementarnej w warunkach beztlenowych, są to jednak dane fragmentaryczne, często sygnalizujące tylko istnienie problemu [Popa i in. 2004; Wolicka, Borkowski 2008a].

Znaczna część procesów geochemicznych zachodzących w litosferze może być związana z aktywnością organizmów żywych. Na procesy te mają wpływ przede wszystkim fizykochemiczne czynniki środowiska, które w znacznym stopniu decydują o występowaniu konkretnych faz mineralnych. Ponieważ reakcja wytrącania np. węglanów zależy m.in. od stężenia dwutlenku węgla, który powstaje w wyniku utleniania związków organicznych przez różne mikroorganizmy, proces ten w znacznym stopniu zależy od aktywności biologicznej [Wolicka, Borkowski 2011].

Biologiczne powstawanie węglanów jest wynikiem metabolicznej aktywności wielu różnych grup mikroorganizmów, zarówno tlenowych, jak i beztlenowych. Węglany mogą powstawać jako produkt uboczny różnych procesów biologicznych, m.in. fotosyntezy, np. u sinic, czego dowodem są stromatolity, jak i u bakterii fotosyntetyzujących, czy też przy beztlenowej redukcji siarczanów [Dupraz, Visscher 2005; Wolicka, Borkowski 2008b]. Bakterie redukujące siarczany uczestniczą także w biotransformacji różnych związków nieorganicznych, której przejawem jest np. powstawanie siarczków metali. Produktem biotransformacji FeSO_4 w hodowlach BRS może być np. piryt FeS_2 , malachitu $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ – covellin CuS , a smithsonitu ZnCO_3 – sfaleryt ZnS .

3. MIKROORGANIZMY W GEOLOGII NAFTOWEJ

Ropa naftowa jest jednym z najważniejszych surowców energetycznych na świecie. Ocenia się, że udział ropy naftowej w produkcji energii pierwotnej stanowi ok. 1/3. Z jednej strony ropa jest naturalnym elementem środowiska, który stanowią złoża ropy i gazu ziemnego, z drugiej zaś strony stanowi jego niepożądany element, kiedy np. mamy do czynienia z zanieczyszczeniami środowiska ropą naftową i produktami ropopochodnymi. Należy pamiętać również, że ropa naftowa stanowi doskonały substrat w wielu gałęziach przemysłu – jest np. surowcem dla przemysłu petrochemicznego, z którego otrzymuje się takie produkty, jak benzyna, nafta, oleje, parafiny, smary, asfalt, mazut, wazelina i polimery.

Geologia naftowa jest dziedziną, w której wykorzystuje się różne metody badawcze, m.in. analizę izotopową, chromatografię, jak również analizę biomarkerów – związków o niezmienionym w wyniku procesów geochemicznych szkieletie węglowym, wytworzonych przez organizmy żywe. To właśnie na podstawie identyfikacji biomarkerów występu-

jących w ropie naftowej określono jej organiczne pochodzenie. Do biomarkerów możemy m.in. zaliczyć terpeny, porfiryny czy metaloporfiryny. Na tej podstawie stwierdzono, że większość węglowodorów o nieparzystej liczbie atomów węgla, syntetyzowanych przez rośliny, występuje w tzw. młodej ropie.

4. MIKROBIOLOGICZNE METODY ZWIĘKSZANIA WYDOBYCIA

Naturalna aktywność mikrobiologiczna wykorzystywana jest także w sposób aplikacyjny jako jedna z metod intensyfikacji wydobywania. Produkty działalności życiowej bakterii autochtonicznych lub wprowadzonych z zewnątrz do skały zbiornikowej, stanowią podstawę mikrobiologicznych metod zwiększania wydobywania (MMZW) w wyeksploatowanych już złożach. Ponieważ brak jest obecnie rozsądnej alternatywy w odniesieniu do ropy naftowej jako surowca energetycznego, a której złoża ulegną wyczerpaniu w przeciągu kilku dziesięcioleci, każda metoda pozwalająca zwiększyć efektywność wydobywania z już udostępnionych złóż ropy naftowej i przedłużyć ich eksploatację jest nie tylko cenna, ale wręcz pożądana.

W ropie naftowej występuje wiele grup mikroorganizmów autochtonicznych [Wolicka i in. 2010; Wolicka, Borkowska 2011]. Możemy do nich zaliczyć m.in. bakterie redukujące siarczyn (BRS), bakterie redukujące żelazo (III) czy archeony metanogenne. Sama ich obecność, jak również możliwość przetrwania i namnażania na obszarze występowania złóż ropy naftowej, umożliwiają zastosowanie metod MEOR (Microbial enhanced oil recovery), zwanych też MIOR (Microbial improved oil recovery), pozwalających na wzrost wydobywania i eksploatację zasobów.

Według Mokhatab [2006] wzrost intensyfikacji wydobywania można uzyskać różnymi metodami. Po pierwsze przez hodowle bakterii, które mogą wytwarzać biopolimery i inne substancje, które potem są zatłaczane do złoża. W wyniku procesów metabolicznych przeprowadzanych przez mikroorganizmy powstają różne gazy, np. CO_2 , CH_4 , H_2 , dzięki obecności których następuje wzrost ciśnienia złożowego, co w efekcie może prowadzić do intensyfikacji wydobywania. Głównymi zaletami tej metody jest przede wszystkim czynnik ekonomiczny i możliwość zastosowania jej niezależnie od aktualnych cen ropy na rynku. Mniejsze koszty procesu są spowodowane tym, że liczba mikroorganizmów wtłoczonych do odwiertu rośnie wykładniczo, co w efekcie końcowym prowadzi do sytuacji, w której uzyskujemy zespoły mikroorganizmów autochtonicznych zwiększające ilość wydobytego surowca. Do mikroorganizmów znacząco wpływających na efektywność procesu wydobywania możemy zaliczyć np.: *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus licheniformis*, *Xanthomonas campestris* oraz *Desulfovibrio desulfuricans* [Singh i in. 2007].

W odniesieniu do tzw. rop ciężkich bardzo często stosuje się nieco inne podejście, polegające na zastosowaniu wyspecjalizowanych szczepów bakterii mających zdolność utleniania wybranych (cięższych) węglowodorów ropy naftowej, co w efekcie powoduje „upłynnienie ropy ciężkiej” i uruchamianie złogów asfaltenowo-żywicowo-parafinowych. Dzięki temu możliwa jest dalsza eksploatacja złóż ropy ciężkiej.

Przedstawiona metoda nie jest jednak idealna i ma kilka ograniczeń. Po pierwsze, konieczne jest dokładne rozpoznanie warunków panujących w złożu, takich jak temperatura, ciśnienie, zasolenie. Uzyskanie pożądanego efektu może być bardzo trudne ze względu na konieczność zapewnienia odpowiednich warunków występującym w złożu mikroorganizmom, biorącym udział w szeregu przemianach metabolicznych. Kolejny problem, z którym można się zetknąć stosując tą metodę, to konieczność usunięcia produktów działalności bakterii, jak również samych bakterii, w celu uniknięcia dalszych zmian składu chemicznego ropy naftowej. Poważnym utrudnieniem jest także pewna nieprzewidywalność metody. Mikroorganizmy występujące w złożu konkurują ze sobą o pewne produkty pośrednie powstające podczas biodegradacji ropy naftowej. Czasem może tak się zdarzyć, że konkurencję tę wygrywają bakterie redukujące siarczany, które w środowisku są głównym producentem siarkowodoru. Pojawienie się tego gazu w złożach ropy naftowej jest wielce niepożądane. Prowadzi to w efekcie do konieczności zastosowania odsiarczania ropy, a nie do wzrostu intensyfikacji jej wydobycia.

Inne problemy, na jakie natrafić można przy stosowaniu biologicznych metod zwiększających wydobycie, to zatykanie porów skały zbiornikowej przez biomasę bakteryjną i produkowane przez nią biopolimery w niepożądanych miejscach, co prowadzi w efekcie do zmniejszenia porowatości skały zbiornikowej i zahamowanie procesu wydobycia. Biopolimery umożliwiają bakteriom tworzenie biofilmów, co ułatwia im pozyskiwanie substancji odżywczych i zmniejsza wrażliwość na substancje toksyczne [Mokhatab 2006]. Początkowo biofilm osadza się w porach skały zbiornikowej, a następnie przemieszcza się.

Od biofilmu mogą oddzielać się pojedyncze bakterie, jak również jego fragmenty, a nawet może zachodzić przemieszczanie całej struktury.

Produkowane przez mikroorganizmy biopolimery mają wiele pożądaných właściwości, takich jak: wytrzymałość na ścinanie, dużą lepkość, kompatybilność z wodami złożowymi, stała lepkość w szerokim zakresie pH, temperatury i ciśnienia, a także odporność na biodegradację w środowisku złoża ropy [Mokhatab 2006].

Należy również wspomnieć o możliwości wystąpienia niekorzystnego zjawiska – korozji urządzeń wiertniczych przez siarkowodor wytwarzany w złożu [Almeida i in. 2004].

5. BIODEGRADACJA SKŁADNIKÓW ROPY NAFTOWEJ

Biodegradacja węglowodorów ropy naftowej zachodzi nie tylko w gruntach czy na powierzchni wody, ale również w złożach i zbiornikach ropy naftowej. W takiej sytuacji proces ten ma znaczący wpływ na skład chemiczny eksploatowanego surowca. Stopień biodegradacji ropy naftowej można ustalić na podstawie 10-stopniowej skali zaproponowanej przez Petersa i Moldowana [1993]. W skali tej zero oznacza niezmienną chemicznie ropę, pięć – biodegradację umiarkowaną, a 10 – zaawansowaną.

Inny sposób, który można wykorzystać w celu określenia stopnia biodegradacji ropy naftowej polega na określeniu stosunku:

1) pristanu i fytanu ($Pr+Ph$) do $nC_{17} + nC_{18}$,

2) C_{30} alfabetahopanu do $Pr + Ph$

oraz

3) C_{25} i C_{29} alfabetahopanu do C_{30} alfabetahopanu.

W zależności od postępu procesu biodegradacji inne są proporcje poszczególnych węglowodorów w ropie, co jest związane także z ich różną podatnością na biodegradację.

Czynnikiem, który może w znacznym stopniu skomplikować interpretację uzyskanych wyników dotyczących stopnia zaawansowania biodegradacji, jest nowy dopływ ropy naftowej ze skał macierzystych. Można założyć sytuację, w której początkowo istniejąca frakcja ropy była w pewnym stopniu zbiodegradowana, a następnie do skały zbiornikowej dopłynęła nowa porcja ropy naftowej. Wynik dotyczący tempa biodegradacji, który uzyskamy, będzie bardzo zmienny i mało wiarygodny. Ponadto będą występować różnice we właściwościach fizycznych, takich np. jak lepkość. Według obecnej wiedzy nawet w geologicznej skali czasu nie jest możliwe całkowite zhomogenizowanie ropy naftowej i ujednoczenie jej składu chemicznego. Skład ropy naftowej może być jednolity tylko lokalnie. Należy zaznaczyć, że biodegradacja ropy naftowej zachodzi głównie w strefie kontaktu ropy z wodą złożową, ponieważ jest to optymalne miejsce do wzrostu i rozwoju mikroorganizmów, które preferują wzrost na granicy faz. Biodegradacji aktywnej i efektywnej w skali złoża sprzyja płytkość jego położenia i umiarkowana temperatura.

Według Vieth i Wilkes [2005] w złożach ropy naftowej może zachodzić biodegradacja *in situ* lekkich frakcji węglowodorów w tym n-parafin, izo-parafin, cykloalkanów, a także benzenu. Wszystkie te związki mogą ulegać biodegradacji w warunkach beztlenowych, jakie na ogół panują w złożach ropy naftowej. Jednak mikroorganizmy, które przeprowadzają te procesy, wykazują dużą selektywność metabolizmu – na przykład do tej pory nie znaleziono drobnoustrojów, które jednocześnie rozkładałyby węglowodory aromatyczne i parafiny. Można ustalić pewnego rodzaju kolejność biodegradacji poszczególnych związków wchodzących w skład ropy naftowej. I tak, przyjmuje się, że spośród niearomatycznych węglowodorów, najszybciej wykorzystywane są n-parafiny, a potem izoparafiny. Należy nadmienić, że usuwanie lekkich frakcji ropy w wyniku biodegradacji jest niekorzystnym zjawiskiem, ponieważ przyczynia się do zmniejszenia ekonomicznej wartości surowca [Vieth, Wilkes 2005].

Biodegradacja ropy naftowej zachodząca w obrębie skały zbiornikowej może przyczynić się także do powstania nad ropą czapy gazowej, utworzonej głównie z CH_4 . Ale jeżeli ropa zawiera duże ilości siarki, to w wyniku działalności bakterii redukujących siarczyn powstanie H_2S , który w gazie może występować w ilości stanowiącej nawet kilka procent. W wyniku działalności mikroorganizmów może także dojść do przekształcenia pierwotnie mokrego gazu w gaz suchy, zawierający ponad 90% metanu.

6. ZANIECZYSZCZENIE GÓRNYCH WARSTW LITOSFERY ROPĄ NAFTOWĄ

Ropa naftowa w wyniku działalności człowieka może pojawić się również na powierzchni ziemi. Niekontrolowane odwierty lub awarie ropociągów ropy naftowej i produktów ropopochodnych stanowią główną przyczynę zanieczyszczenia profilu glebowego, jak również mogą doprowadzić do powstania na pewnej głębokości nieprzepuszczalnej warstwy pływającego produktu.

Wiele heterotroficznych mikroorganizmów ma naturalną zdolność do wykorzystywania węglowodorów ropy naftowej jako jedyne źródła węgla [Wolicka i in. 2009]. Produktem końcowym tych przemian są w większości związki nietoksyczne dla środowiska, takie jak dwutlenek węgla i woda.

Rola bakterii w rejonach wydobywania ropy naftowej nie ogranicza się jedynie do przytoczonych aspektów. Aktywność mikroorganizmów może posłużyć do likwidacji skażenia gruntów i wód gruntowych oraz morskich ropą i substancjami ropopochodnymi, pojawiającymi się zarówno w pobliżu miejsc eksploatacji tych złóż, jak i w pobliżu nieszczelnych ropociągów, oraz w rozproszonych lokalizacjach, takich jak stacje benzynowe czy pobocza dróg.

7. PODSUMOWANIE

Mikroorganizmy biorą udział w stymulacji wielu procesów geologicznych, powstawania różnych minerałów, jak również zmian środowiskowych na terenach eksploatacji ropy naftowej. Rola bakterii w rejonach wydobywania ropy naftowej polega na całym szeregu złożonych oddziaływań, zarówno na sam surowiec, jak i na środowisko, w którym on występuje.

Bakterie mogą wpływać na skład chemiczny ropy naftowej, jak również na warunki jej eksploatacji *in situ*, poprzez rozkład niektórych frakcji ropy, wytwarzanie produktów metabolizmu, takich jak: biopolimery, biosurfaktanty, kwasy organiczne, gazy (CH_4 , CO_2 , H_2S i inne), czy też zmieniać właściwości skały zbiornikowej przez samą obecność komórek bakterii.

Wpływ na takie parametry, jak napięcie międzyfazowe, lepkość i przepuszczalność skał jest podstawą mikrobiologicznych metod zwiększania wydobywania (MMZW), które zastosowano z powodzeniem w wielu krajach świata.

Badania dotyczące biostymulacji procesów geologicznych są prowadzone w Pracowni Geomikrobiologicznej na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego i są częściowo finansowane z grantu IGMiP-20-2011.

PIŚMIENNICTWO

- ALMEIDA P.F., MOREIRA R.S., ALMEIDA R. C.C., GUIMARAES A.K., CARVALHO A.S., QUINTELLA C., ESPERIDIA M.C.A., TAFT C.A. 2004. Selection and application of microorganisms to improve oil recovery. *Eng. Life Sci.* 4: 319–325.
- DUPRAZ C., VISSCHER P.T. 2005. Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends Microbiology* 13: 429–438.
- JØRGENSEN B.B. 1982. Mineralization of organic matter in the sea-bed – the role of sulphate reduction. *Nature* 296: 643–645.
- LABRENZ M., DRUSCHEL G.K., THOMSEN-EBERT T., GILBERT B., WELCH S.A., KEMMER K.M., LOGAN G.A., SUMMONS R.E., DE STASIO G., BOND P.L., LAI B., KELLY S.D., BANFIELD J.F. 2000. Formation of sphalerite (ZnS) deposits in natural biofilms of sulfate-reducing bacteria. *Science* 290: 1744–1747.
- LARTER S., PRIMIO R. 2005. Effects of biodegradation on oil and gas field PVT properties and the origin of oil rimmed gas accumulations. *Organic Geochemistry* 36: 299–310.
- MOKHATAB S. 2006. Microbial enhanced oil recovery techniques improve production, bacteria may be valuable in offering cost-effective and environmentally benign EOR. *World Oil*.
- PERRY C.T., TAYLOR K.G. 2006. Inhibition of dissolution within shallow water carbonate sediments: impacts of terrigenous sediment input on syn-depositional carbonate diagenesis. *Sedimentology* 53: 495–513.
- PETERS K.E., MOLDOVAN J.M. 1993. *The Biomarker Guide, Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*. Prentice Hall.
- POPA R., KINKLE B.K., BADESCU A. 2004. Pyrite framboids as biomarkers for iron-sulfur systems. *Geomicrobiology Journal* 21: 193–206.
- SINGH A., VAN HAMME J.D., WARD O.P. 2007. Surfactants in microbiology and biotechnology: Part 2. Application aspects. *Biotechnology Advances* 25: 99–121.
- VIETH A., WILKES H. 2006. Deciphering biodegradation effects on light hydrocarbons in crude oils using their stable carbon isotopic composition: A case study from the Gullfaks oil field, offshore Norway. *Geochimica* 70: 651–665.
- WOLICKA D. 2010. Mikroorganizmy występujące w ropie naftowej i w wodach złożowych. *Nafta-Gaz* 4: 267–273.
- WOLICKA D., KOWALSKI W. 2006a. Biotransformation of phosphogypsum on distillery decoctions (preliminary results). *Polish Journal of Microbiology* 55: 147–151.
- WOLICKA D., KOWALSKI W. 2006b. Biotransformation of phosphogypsum in petroleum-refining wastewaters. *Polish Journal of Environmental Studies* 15: 355–360.
- WOLICKA D., BORKOWSKI A. 2008a. Participation of sulphate reducing bacteria in formation of carbonates. *International Kalkowsky-Symposium Göttingen, Germany*. Abstract

- Volume (Göttingen University Press) Special Volume in a Geobiological Journal: 130–131.
- WOLICKA D., BORKOWSKI A. 2008b. Influence of the types of nitrogen on carbonate precipitation in sulphate reducing conditions (preliminary results). Abstract Volumes Chennai, India, February 17–25: 365–369.
- 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., DOBRZYŃSKI D. 2010. Interactions between microorganisms, crude oil and formation waters. Geomicrobiology Journal 27: 430–452.
- WOLICKA D., BORKOWSKI A. 2011. Participation of CaCO₃ under sulphate – reduction condition. Reitner i in. (red.), Advances in Stromatolite Geobiology, Lecture Notes in Earth Sciences 131: 151–160.