

Dorota Wolicka

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Warszawa

Mikroorganizmy występujące w ropie naftowej i w wodach złożowych

Wprowadzenie

Skład chemiczny danego środowiska, jak również jego charakter i właściwości fizyczne decydują o możliwości życia odpowiednich mikroorganizmów, ich przetrwania i rozwoju. Należy zaznaczyć, że w każdym środowisku występują właściwe dla niego mikroorganizmy, które stanowią tzw. mikroflorę autochtoniczną. Każde środowisko przyrodnicze charakteryzują inne

czynniki fizykochemiczne, które wpływają na istnienie i rozwój określonej grupy mikroorganizmów. O tym, która grupa bakterii rozwinie się w danych warunkach decyduje wiele czynników chemicznych, takich jak dostępność akceptorów i donorów elektronów, oraz fizycznych, takich jak: temperatura, ciśnienie, zasolenie, pH itp.

Charakterystyka ropy naftowej i wód złożowych

Ropa naftowa stanowi mieszaninę około tysiąca różnych związków; zarówno organicznych, jak i nieorganicznych, wśród których możemy wyróżnić m.in.: węglowodory alifatyczne i aromatyczne (stanowiące średnio 75% jej składu), żywice oraz asfalty [3]. W ujęciu pierwiastkowym w skład ropy naftowej wchodzi przede wszystkim pierwiastki biogenne: węgiel (83–87%), wodór (11–14%), siarka (0,5–6%), tlen (0,1–4%), azot oraz jony metali ciężkich, takich jak: ołów, cyna, arsen, rtęć, german, antymon, tal, wanad, żelazo, glin, nikiel, a także metale alkaliczne, takie jak np. wapń i magnez [10]. W większości rodzajów ropy naftowej stwierdza się też śladowe ilości fosforu, arsenu i selenu. Pierwiastki biogenne, takie jak siarka, azot i tlen, stanowią zwykle mniej niż 3% zawartości ropy naftowej i występują głównie w postaci związków heterocyklicznych (tiofeny, pirydyna, pirole, benzofurany, fenole). Siarka w ropie naftowej może występować w postaci: siarki elementarnej (bardzo rzadko), siarkowodoru, merkaptanów, siarczków, disiarczków, tiofenów oraz benzo- i nafto-tiofenów. Bardzo ważnym pierwiastkiem biogennym występującym w ropie jest azot – jego średnia ilość waha się od 0,01% do 2%. Występuje on głównie w pochodnych pirydyny, choliny, akrydyny, pirolu, indolu czy karbazolu.

Połączenia tlenowe w ropie występują przede wszystkim w fenolach, kwasach karboksylowych czy furanach [25]. Należy zaznaczyć, że prawie wszystkie wyżej wymienione związki organiczne mogą stanowić donor elektronów dla różnych grup mikroorganizmów autochtonicznych występujących w ropie naftowej [34].

Wody otaczające złożę ropy charakteryzują się dużą zmiennością pod względem składu chemicznego i warunków fizycznych. Odczyn wód złożowych waha się w szerokim zakresie, przyjmując wartości pH w przedziale 4–9. Wartości zasolenia tych wód również mogą być bardzo zmienne; praktycznie od 0%, do roztworu nasyconego (badania własne). Ograniczone występowanie związków organicznych w wodach złożowych często jest czynnikiem limitującym wzrost mikroorganizmów, z drugiej zaś strony środowisko to może odzwierciedlać, poprzez produkty aktywności metabolicznej, procesy mikrobiologiczne zachodzące w układzie ropa naftowa-płyny złożowe. Biorąc pod uwagę czynniki fizykochemiczne charakteryzujące wody złożowe, z pewnością można stwierdzić, że jest to środowisko ekstremalne dla rozwoju i występowania mikroorganizmów – podobnie jak ropa naftowa.

Charakter omawianego układu ropa naftowa-wody złożowe w znacznym stopniu wpływa na selekcję, występowanie i możliwości rozwoju takich grup mikroorganizmów, które są

zdolne do wykorzystywania dostępnych w tym środowisku związków organicznych (jako źródła węgla) i zdolne do życia w warunkach zarówno tlenowych, jak i beztlenowych.

Ropa naftowa i płyny złożowe jako środowiska ekstremalne

Warunki występujące w złożu ropy naftowej znacząco odbiegają od warunków typowych dla występowania organizmów żywych spotykanych na powierzchni Ziemi. Potencjał redoks jest bardzo niski, panuje tam wysokie ciśnienie i temperatura, a często także nawet kilkunastoprocentowe zasolenie. Ponadto brak jest tu typowych – dla większości mikroorganizmów – akceptorów elektronów, takich jak tlen; są za to obecne siarczany i węglany [32], zaś wachlarz dostępnych donorów elektronów dla mikroorganizmów jest bardzo szeroki. Oprócz węglowodorów ropy naftowej, które są głównym źródłem węgla dla mikroorganizmów, wyróżnia się wśród nich liczne związki organiczne będące produktami biodegradacji ropy naftowej. Możemy do nich zaliczyć m.in. kwasy organiczne, takie jak: kwas octowy, benzoesowy, masłowy, mrówkowy, propionowy, czy też kwasy naftenowe – w ilości do 100 mM [15]. Donorami elektronów może być H_2 , a w niedojrzałej ropie – żywice i asfalteny, których metaboliczną przydatność może

wyjaśniać fakt, iż anaerobowe mikroorganizmy mogą rozwijać się w hodowlach z ropą naftową bez żadnych modyfikacji jej składu.

Wiadomym jest, że większość węglowodorów występujących w ropie naftowej wykazuje działanie toksyczne, które wynika przede wszystkim ze struktury związków [16]. Do węglowodorów tych możemy zaliczyć zarówno węglowodory alifatyczne, jak i aromatyczne, a także wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), których toksyczność wzrasta wprost proporcjonalnie do liczby atomów węgla. Szczególnie negatywne oddziaływanie wykazują wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) o więcej niż czterech pierścieniach benzenowych w cząsteczce.

Mimo to, zarówno z ropy naftowej, jak i z płynów złożowych udało się wyizolować i zidentyfikować bardzo wiele różnych grup bakterii. Wśród nich należy wymienić m.in. bakterie redukujące siarczany (BRS), bakterie fermentacyjne oraz archeony metanogenne.

Mikroorganizmy w układzie ropa naftowa–płyny złożowe

Cały układ ropa naftowa–inne płyny złożowe jest otwarty i niestabilny. Kontakt między poszczególnymi elementami następuje wskutek przepływu wód meteorycznych przez system spękań i uskoków tektonicznych występujących w skałach. Wody meteoryczne, w zależności od ich składu, dostarczają różnych związków chemicznych, a ponadto transportują substancje, które krążą w całym systemie, ulegając procesom biogeochemicznym.

W środowiskach takich jak ropa naftowa i inne płyny złożowe, biodegradacja związków organicznych może być przeprowadzana głównie przez co najmniej trzy grupy mikroorganizmów, działające jedna po drugiej. Pierwsza z nich to bakterie fermentacyjne, druga – bakterie redukujące siarczany (BRS), przeprowadzające całkowite utlenianie związków organicznych do CO_2 lub niecałkowite do octanu, a trzecia grupa to archeony metanogenne, których produktem działalności jest metan. Wszystkie te grupy mikroorganizmów były izolowane z ropy naftowej i płynów złożowych przez wielu badaczy [4, 20, 28]. Jeżeli w skład ropy naftowej i płynów złożowych wchodzi np. żelazo (III) i utlenione związki azotu, to wówczas również rozwijają się odpowiednio: bakterie redukujące żelazo i bakterie denitryfikacyjne [3].

Ropa naftowa jest również środowiskiem występowania bakterii fermentacyjnych [18]. Mikroorganizmy te mają zdolność do redukcji tiosiarczany ($S_2O_3^{2-}$), a także siarki pierwiastkowej (S^0) oraz wykorzystywania różnych związków organicznych – takich jak węglowodory i białka, oraz nieorganicznych – jak np. CO_2 , a także cząsteczkowego wodoru. Wśród mezofilnych bakterii fermentacyjnych można wymienić m.in.: *Haloanaerobium acetoethylicum*, *H. congolense*, *Spirochaeta smaragdinae*, *Acetoanaerobium romaskovii* oraz *Dethiosulfovibrio peptidovarians*, która ma zdolność do redukcji tiosiarczany i powoduje korozję żelaza [15].

Do tej pory wyizolowano i opisano również wiele gatunków mikroorganizmów termofilnych, które dzięki termostabilnym enzymom są w stanie przetrwać temperatury nawet nieco przekraczające $100^\circ C$ [1]. Wśród tych mikroorganizmów można wymienić m.in. *Thermotoga elfii*, *T. subterranea*, *T. hypogea*, które posiadają zdolność do redukcji tiosiarczany do siarczków. Należy tu także wspomnieć bakterie z rodzaju *Geotoga* i *Petrotoga* (*Thermotogales*), które są umiarkowanymi termofilami i zostały opisane po raz pierwszy w złożach w Teksasie i Oklahomie [17].

Innymi mikroorganizmami występującymi w warunkach wysokotemperaturowych są *Thermoanaerobacter* i *Thermoanaerobacterium*, z rodziny *Thermoanaerobiaceae*, izolowane często z gorących i słabo zasolonych złóż. Pierwsza z nich posiada zdolność do redukcji tiosiarczynu do siarczków, a druga – tiosiarczynu do siarki pierwiastkowej [12]. Znana jest także *Anaerobaculum thermoterrenum*, rozwijająca się optymalnie w temperaturze 55°C na podłożu z cukrami i kwasami organicznymi. Akceptorami elektronów może być zarówno tiosiarczan, jak i siarka pierwiastkowa. W warunkach szczególnie wysokich temperatur występują hipertermofilne fermentujące *Archaea*, takie jak *Thermococcus celer* czy *T. litoralis* – preferujące temperaturę 85°C oraz *Pyrococcus litotrophicus* – żyjący w 100°C [22].

Najczęściej jednak izolowaną grupą bakterii; zarówno z ropy naftowej, jak i z wód złożowych, są bakterie redukujące siarczany [21, 28, 32, 36]. Odgrywają one bardzo ważną rolę w układzie ropa–wody złożowe, głównie ze względu na zdolność metabolizowania różnych związków organicznych, w tym węglowodorów alifatycznych, aromatycznych i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). W ekosystemach beztlenowych proces mineralizacji materii organicznej jest zazwyczaj bardziej złożony niż w warunkach tlenowych i wymaga współdziałania różnych grup mikroorganizmów. Każda z grup przeprowadza określony etap utleniania substratów, a produkty końcowe są metabolizowane przez następne ogniwa łańcucha pokarmowego – aż do całkowitej ich mineralizacji.

Z danych literaturowych wynika, że wyizolowane do tej pory z ropy naftowej i wód złożowych bakterie redukujące siarczany charakteryzują się szerokim zakresem tolerancji w stosunku do zasolenia (0–17%) oraz temperatury (4–85°C) [22]. Dane stwierdzające obecność tej grupy bakterii w solankach pól naftowych pochodzą z roku 1926 i stanowią pierwszą próbę wyjaśnienia stałej

obecności siarczków w zbiornikach ropy naftowej [5]. Z obecnością BRS na polach naftowych i terenach wydobycia ropy naftowej wiąże się przede wszystkim proces biokorozji urządzeń wiertniczych, jak również charakterystyczny zapach produkowanego przez BRS siarkowodoru. Bakterie redukujące siarczany zawsze towarzyszą ropie naftowej i przez długi okres czasu były uznawane za organizmy wskaźnikowe przy poszukiwaniu nowych złóż [19]. Oczywiście sytuacja taka miała miejsce wtedy, gdy środowisko przyrodnicze nie było tak powszechnie skażone substancjami ropopochodnymi jak obecnie.

Ponadto BRS są grupą mikroorganizmów, które odgrywają bardzo ważną rolę w procesie biodegradacji związków organicznych w warunkach beztlenowych oraz w biogeochemicznym obiegu wielu pierwiastków, np. węgla i siarki [8, 31]. Szacuje się, że udział BRS w końcowych etapach mineralizacji materii organicznej osadów morskich wynosi ponad 70% [7]. Bakterie redukujące siarczany włączają się w beztlenową biodegradację związków organicznych zazwyczaj na poziomie związków o małym ciężarze cząsteczkowym, takich jak kwasy organiczne (np. octowy, propionowy, mrówkowy) czy alkohole (np. etanol, propanol, butanol i inne), gdyż większość z nich nie wytwarza enzymów hydrolitycznych [2, 33].

W tabelicy 1 przedstawiono gatunki mikroorganizmów redukujących siarczany wyizolowane z terenów wydobycia ropy naftowej.

Do najczęściej spotykanych gatunków wśród mezofilnych BRS należą: *Desulfotomaculum halophilum*, *D. vietnamensis* i *D. longus*, *Desulfotomaculum halophilum*,

Tablica 1. Gatunki mikroorganizmów redukujących siarczany, wyizolowane z terenów wydobycia ropy naftowej (na podstawie danych literaturowych)

Gatunek	Zasolenie [%]	T [°C]	Miejsce występowania
<i>Desulfotomaculum nigrificans</i>	0–4	40–70	Złoże ropy
<i>Desulfacinum infernum</i>	0–5	40–65	
<i>Thermodesulfobacterium mobile</i>	Brak danych	45–85	
<i>Thermodesulforhabdus norvegicus</i>	0–5,6	44–74	
<i>Archaeoglobus fulgidus</i>	0,02–3	60–85	Wody złożowe
<i>Desulfomicrobium apsheronum</i>	0–8	4–40	
<i>Desulfotomaculum halophilum</i>	1–17	15–40	
<i>Desulfotomaculum longus</i>	0–8	10–40	
<i>Desulfotomaculum vietnamensis</i>	0–10	12–45	
<i>Desulfobacterium cetonicum</i>	0–5	20–37	Zawodniony poziom roponośny
<i>Desulfotomaculum halophilum</i>	1–14	30–40	Świder wiertniczy
<i>Desulfobacter vibrioformis</i>	1–5	5–38	Separator ropy od wody
<i>Desulfotomaculum thermocisternum</i>	0–5	41–75	Osady morskie

Desulfovibrio, *Desulfomicrobium apsheronum*, *Desulfobacter vibrioformis* oraz *Desulfobacterium cetonicum* [15, 28]. Uważa się, że termofilne BRS są przede wszystkim odpowiedzialne za procesy przemiany ropy *in situ*. Należy tu wymienić m.in.: *Desulfotomaculum kuznetsovii*, *D. thermocisternum*, *D. nigrificans – salinus*, *Desulfacinum infernum*, *Termodesulforhabdus norvegicus* i *Thermodesulfobacterium mobile*, *T. norvegicus*. W zakresie temperatur 80–85°C (optimum 60–65°C) żyją termofilne bakterie z rodzaju *Thermodesulfobacterium*: *T. mobile* oraz *T. commune*, a w wyższych temperaturach występują heterotroficzne mikroorganizmy hipertermofilne z rodzaju *Archaeoglobus* [24].

W dostępnej literaturze na temat występowania różnych grup mikroorganizmów w ropie naftowej i płynach złożowych, niewiele jest prac dotyczących izolacji bakterii z ropy naftowej i wód złożowych z terenu Polski [28, 35]. Z rop naftowych i płynów złożowych wybranych sześciu złóż ropy naftowej: Nosówki, Jastrząbki, Grobli, Brzezówki, Pławowic i Bóbrki, udało się wyizolować różne grupy bakterii, w tym bakterie redukujące żelazo (III), bakterie redukujące siarczany oraz archeony metanogenne, zdolne do biodegradacji ropy naftowej oraz wybranych monopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. Na podstawie wstępnej identyfikacji stwierdzono, że wyizolowane zespoły bakterii redukujących siarczany należą do rodzajów *Desulfobulbus*, *Desulfovibrio* i *Desulfococcus*. W kilku próbkach badanego materiału stwierdzono również obecność *Desulfonema* sp. oraz *Bacillus* sp.

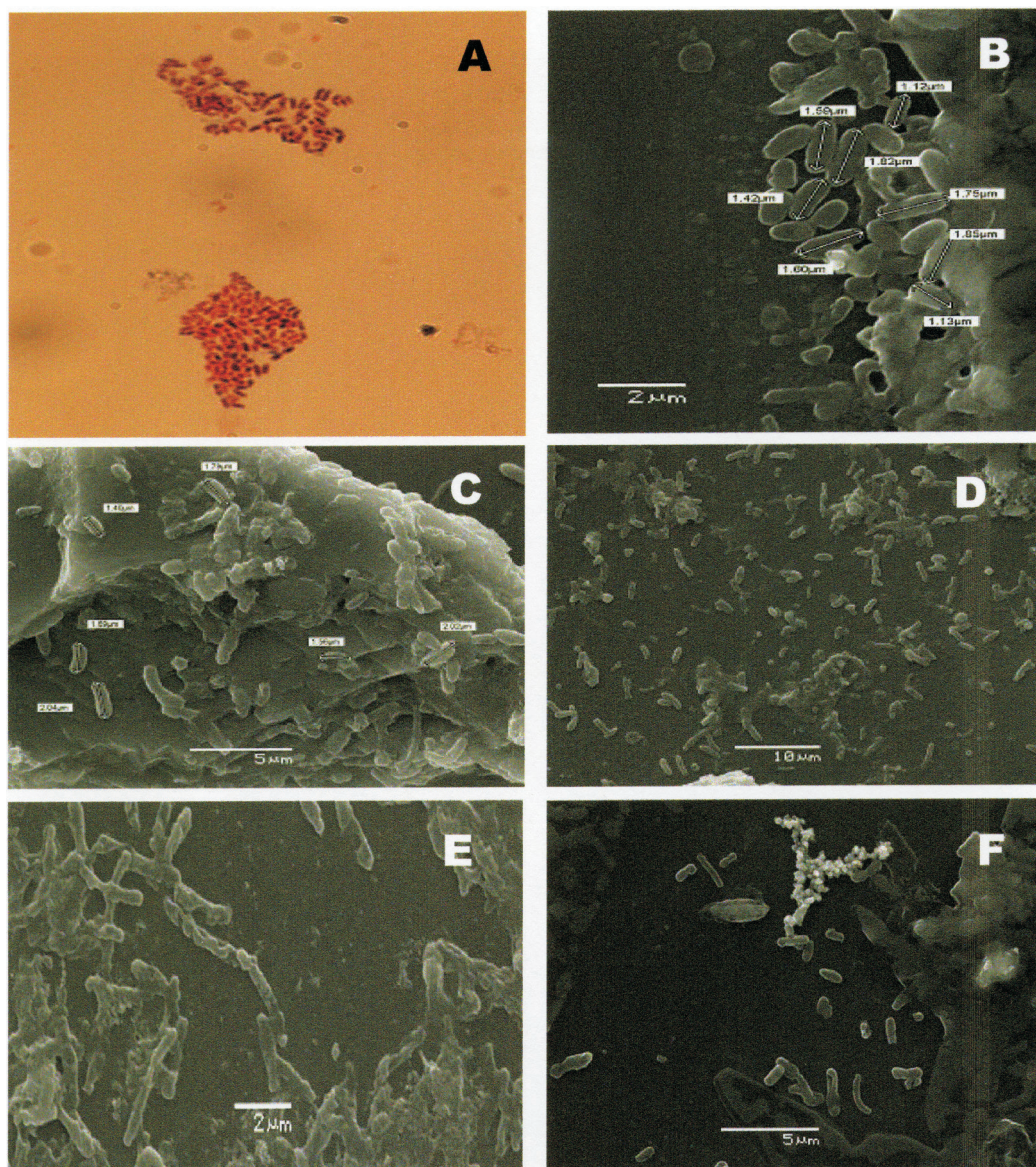
Na podstawie badań własnych (dane niepublikowane), podczas identyfikacji mikroorganizmów metodami molekularnymi (16SrRNA), w hodowlach stwierdzono sekwencje charakterystyczne dla gatunków bakterii redukujących siarczany z rodzajów *Desulfovibrio*, *Desulfohalobium*, *Desulfuromonas*, *Desulfonatronospira* i *Desulfomicrobium*. Tą metodą zidentyfikowano: *Desulfovibrio desulfuricans* str ATCC27774, *Desulfohalobium retbaense* DSM 5692, *Desulfuromonas acetooxidans* DSM 684, *Desulfonatronospira thiodismutans* Aso3-1, *Desulfomicrobium baculatum* DSM 4028 oraz *Desulfovibrio vulgaris* subsp. *Hildenborough*. Interesująca jest również analiza genetyczna wyizolowanego DNA z hodowli, pod kątem pozostałych mikroorganizmów towarzyszących bakteriom redukującym siarczany. Wykryte fragmenty zsekwencjonowanego genu wykazują podobieństwo do analogicznych fragmentów genomu takich mikroorganizmów, jak: *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Thioalkalivibrio* sp., *Ralstonia* sp., *Shewanella* sp. czy *Methanococcus* sp.

Wyniki analizy genetycznej wskazują na obecność bakterii redukujących siarczany zarówno w ropie, jak

i w wodach złożowych, jednak nie były one stwierdzane we wszystkich prowadzonych hodowlach – pomimo sprzyjających warunków dla rozwoju BRS. Należy tu podkreślić, że zastosowana analiza fragmentu genu 16S rRNA pokazuje tylko procent podobieństwa obecnego w badanym materiale DNA, do dostępnych w bazie zsekwencjonowanych fragmentów znanych szczepów mikroorganizmów. Nie ulega wątpliwości, że wynik tej analizy wskazuje tylko na te mikroorganizmy, które posiadają podobny fragment genu 16S rRNA zamieszczonego w bazie danych i mogą posiadać także podobne właściwości fizjologiczne. Dzięki analizie genetycznej, oprócz BRS udało się również stwierdzić obecność wielu innych mikroorganizmów – poza dosyć powszechnie występującymi w przyrodzie bakteriami, takimi jak *Pseudomonas putida*, czy *Pseudomonas fluorescens*, obecne są także mikroorganizmy, które można wiązać ze środowiskami ściśle beztlenowymi, np.: *Methanococcus* sp., *Thioalkalivibrio* sp., *Thermotoga petrophila* RKU-1, *Thermotoga* sp. 4359, czy też bakterie związane z procesami oksydoredukcyjnymi metali, takie jak *Ralstonia eutropha* – zdolna także do biodegradacji fenolu [11, 13, 26]. Z kolei inne wykryte sekwencje charakteryzują się dużym podobieństwem do sekwencji bakterii takich jak *Shewanella* sp. – fakultatywnie beztlenowych, zdolnych do redukcji niektórych metali (np. żelaza) [9, 14]. Następnie wykonano obserwacje w mikroskopie optycznym, po wcześniejszym wykonaniu barwienia Grama (rysunek 1A), oraz obserwacje w skaningowym mikroskopie skaningowym, po wcześniejszym napyleniu preparatu złotem (rysunek 1B-F). Przykładowe zdjęcia wyselekcjonowanych zespołów mikroorganizmów beztlenowych przedstawiono na rysunku 1.

Uzyskane heterogenne zespoły mikroorganizmów składały się zarówno z pałeczek, laseczek, jak i ziarniaków. W sąsiedztwie mikroorganizmów stwierdzono obecność zewnątrzkomórkowej substancji oraz różnych faz mineralnych, np. węglanów, które mogą powstawać w wyniku działalności mikroorganizmów beztlenowych [28, 29, 30].

Kolejną istotną grupą mikroorganizmów zasiedlających złoża ropy naftowej są archeony metanogenne. Mikroorganizmy te uczestniczą w końcowych etapach przemiany ropy naftowej. Wydaje się, że jako podstawowe źródło energii wykorzystują one w głównej mierze wodór i dwutlenek węgla [6, 27]. Spośród archeonów metanogennych należy wymienić *Methanococcoides* (*Methanohalophilus*) *euhalobius*, *Methanosarcina siciliae* HI, *Methanosarcina mazei*, *Methanococcus termolittotrophicus*, *Methanoplanus petrolearius*, *Methanocalculus halotolerans*, *Methanobacterium thermoautotrophicum*, *M. Bryantii*, *M. ivanovii*,



Rys. 1. Wyselekcjonowane zespoły mikroorganizmów sulfidogennych, wyizolowane z wybranych złóż ropy naftowej (A – Nosówka, B – Jastrząbka, C – Grobla) i wód złożowych (D – Brzeźówka, E, F – Pławowice) południowo-wschodniej Polski

a także pewne odmiany *M. thermoaggregans* i *M. thermoalcaliphilum*, *M. thermoaggregans*, *Methanocalculus halotolerans* oraz *Methanococcus*. Generalnie Archeony metanogenne uważa się za mikroorganizmy, które mogą licznie występować w warunkach ekstremalnych pod względem warunków fizykochemicznych, takich jak np. zasolenie i temperatura [23, 24].

W ropie naftowej i wodach złożowych występują również bakterie redukujące żelazo (III). Obecne są one w mniejszej ilości niż bakterie redukujące siarczany i Archeony metanogenne, aczkolwiek ich roli w omawianym środowisku nie można pominąć. Wśród bakterii redukujących żelazo (III) opisana została *Shewanella putrefaciens*, która oprócz zdolności redukcji żelaza (III) może także

uczestniczyć w redukcji siarki elementarnej, siarczynów i tiosiarczynu do siarczków, oraz *Deferribacter thermophilus*, która posiada zdolność redukcji manganu (IV) i azotanu (V) [9].

W soczewkach ropy mogą występować bakterie autochtoniczne (obok tych naniesionych z zewnątrz, czyli zymogennych) w wyniku np. infiltracji wód powierzchniowych. Odróżnienie ich od siebie może być jednak bardzo trudne, szczególnie dla środowisk o małym zasoleniu i niskiej temperaturze, ponieważ mogą w nich występować szczepy znacząco nie różniące się od tych spotykanych w warunkach powierzchniowych. Przyjmuje się, że jedynie całkowicie anaerobowe mikroorganizmy, których charakterystyka fizjologiczna wskazuje na przystosowanie

do warunków panujących *in situ* są rzeczywiście autochtoniczne dla tego środowiska i jedynie one wykazują w nim znaczącą aktywność. Nie wiadomo jednak, czy ich zespoły

są dla tego ekosystemu charakterystyczne i co mogłyby być czynnikiem powodującym zarówno stymulację wzrostu, jak i jego inhibicję.

Podsumowanie

Mikroorganizmy są obecne prawie we wszystkich środowiskach, w tym także w środowiskach ekstremalnych, takich jak np. ropa naftowa czy płyny złożowe. Skład chemiczny środowiska wpływa na rozwój określonej grupy bakterii, z drugiej zaś strony, mikroorganizmy są w stanie modyfikować skład chemiczny środowiska poprzez produkty swojej aktywności. W przypadku złóż ropy naftowej mamy do czynienia z trzema składnikami występującymi

względem siebie w stanie biogeochemicznej równowagi dynamicznej: ropą naftową, wodą złożową oraz obecnymi w tych mediach mikroorganizmami. Stan ten jest *quasi* stabilny. W określonych warunkach fizykochemicznych elementem destabilizującym są mikroorganizmy, które w wyniku swojego metabolizmu wprowadzają do układu powolne zmiany, poprzez dostarczanie do niego nowo wytwarzanych produktów ich funkcji życiowych.

Podziękowania:

Autorka serdecznie dziękuje Dyrekcji Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa S.A., Oddział w Sanoku za udostępnienie informacji geologicznej.

Artykuł nadesłano do Redakcji 12.01.2010 r. Przyjęto do druku 15.02.2010 r.

Recenzent: dr Anna Turkiewicz

Literatura

- [1] Fardeau M.L., Salinas M.B., L'Haridon S., Jeanthon C., Verhé F., Cayol J.L., Patel B.K.C., Garcia J.L., Ollivier B.: *Isolation from oil reservoirs of novel thermophilic anaerobes phylogenetically related to Thermoanaerobacter subterraneus: reassignment of T. subterraneus, Thermoanaerobacter yonseiensis, Thermoanaerobacter tengcongensis and Carboxydibrachium pacificum to Caldanaerobacter subterraneus gen., sp. nov., comb. nov. as four novel subspecies*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 54, 467–474, 2004.
- [2] Fauque G., Legall J., Barton L.L.: *Sulfate-reducing and sulfur reducing bacteria. Variations in autotrophic life*. Eds Shively J.M.I Barton L.L. Academic Press Ltd., 1991.
- [3] Fukui M., Harms G., Rabus R., Schramm A., Widdel F., Zengler K., Boreham C., Wilkes H.: *Anaerobic degradation of oil hydrocarbons by sulfate reducing and nitrate-reducing bacteria*. In: Microbial Biosystems: New Frontiers. Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology. Bell C.R., Brylinsky M., Johnson-Green P. (ed.), Halifax, Canada: Atlantic Canada Society for Microbial Ecology, 1999.
- [4] Grigoryan A.A., Voordouw G.: *Microbiology to help solve our energy needs: Methanogenesis from oil and impact of nitrate on the oil field sulfur cycle*. In: Incredible anaerobes: From physiology to genomics to fuels. Wiegel J., Maier R., Adams M. (ed.), Annals of the New York Academy of Sciences, pp. 345–352, 2008.
- [5] Jenneman G.E., Gevertz D.: *Identification, characterization and application of sulfide-oxidizing bacteria in oil fields*. In: Microbial Biosystems: New Frontiers. Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology. Bell C.R., Brylinsky M., Johnson-Green P. (ed.), Atlantic Canada Society for Microbial Ecology, Halifax, Canada, pp 1–6, 1999.
- [6] Jørgensen B.B., Weber A., Zopf J.: *Sulfate reduction and anaerobic methane oxidation in Black Sea sediments*. Deep Sea Research Part I: Oceanography. Research Papers, 48, 2097–2120, 2001.
- [7] Jørgensen B.B.: *Ecology of the bacteria of the sulphur cycle with special reference to anoxic-oxic interface environments*. Philosophical Transactions of the Royal Society, 298, 543–561, 1982.
- [8] Jørgensen B.B.: *Mineralization of organic matter in the sea bed—the role of sulphate reduction*. Nature, 296, 643–645, 1982.
- [9] Kim H.J., Park H.S., Hyun M.S., Chang I.S., Kim M., Kim B.H.: *A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, Shewanella putrefaciens*. Enzyme and Microbial Technology, 30, 145–152, 2002.
- [10] Kwapisz E.: *Problemy biodegradacji ropy naftowej*. I Krajowy Kongres Biotechnologii, 14 sekcja: Biotechnologia w ochronie środowiska. Wrocław, 23–24.09.1999, s. 227–229.
- [11] L'Haridon S., Miroschnichenko M.L., Hippe H., Fardeau M.L., Bonch-Osmolovskaya E.A., Stackebrandt E., Jeanthon C.: *Petrotoga olearia sp. nov. and Petrotoga sibirica sp. nov., two thermophilic bacteria isolated from a continental petroleum reservoir in Western Siberia*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 52, 1715–1722, 2002.
- [12] Lee Y.L., Dashti M., Prange A., Rainey F.A., Rohde M., Whitman W.B., Wiegel J.: *Thermoanaerobacter sulfuri-gignens sp. nov., an anaerobic thermophilic bacterium that reduces 1 M thiosulfate to elemental sulphur and tolerates 90 mM sulfite*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 57, 1429–1434, 2007.
- [13] Leonard D., Lindley N.D.: *Growth of Ralstonia eutropha on inhibitory concentrations of phenol: diminished growth*

- can be attributed to hydrophobic perturbation of phenol hydroxylase activity. *Enzyme and Microbial Technology*, 25, 271–277, 1999.
- [14] Lower S.K., Hochella M.F., Beveridge T.J.: *Bacterial recognition of mineral surfaces: nanoscale interactions between Shewanella and α -FeOOH*. *Science*, 292, 1360–1363, 2001.
- [15] Magot M., Ollivier B., Patel B.K.C.: *Microbiology of petroleum reservoirs*. *Anton. Leeuw. Int. J. G.*, 77, 103–116, 2000.
- [16] Migaszewski Z., Gałuszka A.: *Podstawy geochemii środowiska*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2007.
- [17] Miranda-Tello E., Fardeau M.L., Thomas P., Ramirez F., Casalot L., Cayol J.L., Garcia J.L., Ollivier B.: *Petrogoga mexicana sp. nov., a novel thermophilic, anaerobic and xylanolytic bacterium isolated from an oil-producing well in the Gulf of Mexico*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54, 169–174, 2004.
- [18] Nazina T.N., Grigor'ian A.A., Feng T., Shestakova N.M., Babich T.L., Pavlova N.K., Ivoilov V.S., Ni F., Wang J., She Y., Xiang T., Mei B., Luo Z., Beliaev S.S., Ivanov M.V.: *Microbiological and production characteristics of the high-temperature Kongdian bed revealed during field trial of biotechnology for the enhancement of oil recovery*. *Mikrobiologiya*, 76, 340–53, 2007.
- [19] Postgate J.R.: *The sulphate reducing bacteria*. Cambridge University Press Cambridge, 1984.
- [20] Ravot G., Magot M., Fardeau M.L., Patel B.K.C., Thomas P., Garcia J.L., Ollivier B.: *Fusibacter paucivorans gen. nov., sp. nov., an anaerobic, thiosulfate-reducing bacterium from an oil-producing well*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 49, 1141–1147, 1999.
- [21] Rozanova E.P., Borzenkov I.A., Tarasov A.L., Suntsova L.A., Dong Ch.L., Belyaev S.S., Ivanov M.V.: *Microbiological Processes in a High-Temperature Oil Field*. *Microbiology*, 70, 102–110, 2001.
- [22] Stetter K.O., Hubber R.: *The role of hyperthermophilic prokaryotes in oil fields*. *Microbial ecology of oil fields*. 1999.
- [23] Stetter K.O., Huber R., Blochl E., Kurr M., Eden R.D., Fielder M., Cash H., Vance I.: *Hyperthermophilic Archaea are thriving in deep North-Sea and Alaskan oil-reservoirs*. *Nature*, 365, 743–745, 1993.
- [24] Stetter K.O., Huber R.: *The role of hyperthermophilic prokaryotes in oil fields*. In: *Microbial Biosystems: New Frontiers*, Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology. Bell C.R., Brylinsky M., Johnson-Green P. (ed.), Halifax, Canada, 2000, pp. 369–375.
- [25] Surygała J.: *Petroleum of specificity processing products*. WNT, Warszawa 2006.
- [26] Tibazarwa C., Wuertz S., Mergeay M., Wyns L., Lelie van der D.: *Regulation of the *cnr* cobalt and nickel resistance determinant of *Ralstonia eutropha* (*Alcaligenes eutrophus*) CH34*. *Journal of Bacteriology*, 182, 1399–1409, 2000.
- [27] Widdel F., Rabus R.: *Anaerobic biodegradation of saturated and aromatic hydrocarbons*. *Current Opinion in Biotechnology*, 12, 259–276, 2001.
- [28] Wolicka D., Borkowski A., Borsuk P., Kowalczyk P.: *Identification of sulphate reducing bacteria isolated from crude oil*. IMOG 24th International Meeting on Organic Geochemistry, Bremen, 493, 2009.
- [29] Wolicka D., Borkowski A., Dobrzyński D.: *Interactions between microorganisms, crude oil and formation waters*. *Geomicrobiology Journal*, 27, 43–45, 2010.
- [30] Wolicka D., Borkowski A.: *Biogeochemistry of CaCO_3 precipitation under reduction condition*. *Advances in Stromatolite Geobiology*, 131, 2010.
- [31] Wolicka D., Borkowski A.: *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, 98.
- [32] Wolicka D., Borkowski A.: *Geomicrobiology petroleum and reservoirs waters*. Conference materials, Petroleum, gas and carbonates in the south of Poland. Czarna 16–18 April, p. 45, 2008.
- [33] Wolicka D., Kowalski W.: *Biotransformation of phosphogypsum in petroleum-refining wastewaters*. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15, 355–360, 2006.
- [34] Wolicka D.: *Biodegradation of BTEX by sulphate reducing bacteria isolated from oil fields*. Book of Abstracts, 4th European Bioremediation Conference, September 3–6 Chania, Crete, Greece, 2008, 44.
- [35] Wolicka D.: *Bioremediacja jako naturalna metoda likwidacji zanieczyszczeń na terenach eksploatacji ropy naftowej*. *Instytut Nafty i Gazu*, Prace, 150, 675–680, 2008.
- [36] Wolicka D.: *Petroleum – an environment of the microorganisms isolation*. Scientific-technical conference Oil, gas and carbonate rocks of southern Poland, Czarna, April 16–18, 2008, p. 44.



Dr Dorota WOLICKA – absolwentka Wydziału Biologii Uniwersytetu Warszawskiego (specjalność mikrobiologia środowisk). Pracę doktorską z zakresu geomikrobiologii obroniła na Wydziale Geologii UW. Adiunkt na Wydziale Geologii UW w Zakładzie Mineralogii, gdzie prowadzi geomikrobiologiczne badania dotyczące udziału mikroorganizmów w procesach geochemicznych.