

ZIEMIA – PLANETA BAKTERII

Mateusz Sydow, Łukasz Chrzanowski (Poznań)

Ocenia się, że całkowita liczba człekomimicznych i ludzi, którzy zamieszkiwali i zamieszkują Ziemię osiągnęła 40 mld osobników. Z punktu widzenia ludzkiej zdolności pojmowania liczb to niewątpliwie liczba trudna do bezpośredniego wyobrażenia. Gdyby ustawiać w szeregu człowieka za człowiekiem, tak aby plecy dotykały brzucha kolejnej osoby to około 160 milionów ludzi wystarczyłoby aby otoczyć równik. A więc na Ziemi można by utworzyć 300–450 takich pętli wokół równika. Chcąc przełożyć liczbę 40 mld osobników na ilość bakterii, okazałoby się, że tyle bakterii może zamieszkiwać 1 ml wody z kałuży. Na Ziemi znajduje się w przybliżeniu 1 260 000 000 000 000 000 000 000 ml wody, czyli tyleż samo razy więcej bakterii niż ludzi. Niektórzy podają nawet, że szacunkowa liczba komórek bakterii na Ziemi to rząd wielkości 10^{30} . Taka liczba jest trudna do wyobrażenia. Skoro Ziemia okrąża Słońce w odległości 150 mln kilometrów, a średnia długość bakterii wynosi 1 μm , to pomiędzy Ziemią a Słońcem zmieści się 15×10^{15} komórek bakteryjnych połączonych w łańcuch. Nadal trudno to sobie wyobrazić, ponieważ takich łańcuchów byłoby wówczas 10^{14} . Znając prędkość poruszania się światła łatwo policzyć jak długo zajmie światłu dotarcie od początku łańcucha do jego końca. W przybliżeniu to około 10 milionów lat świetlnych. Nawet jeżeli powyższe rachunki oparte na szacunkach obarczone są dużym błędem, to nie zmienia to faktu, że ludzki umysł musi operować kosmicznymi wielkościami. Przy czym warto zauważyć, że słowo „kosmos” pasuje w tym przypadku idealnie.

Bakterie a życie

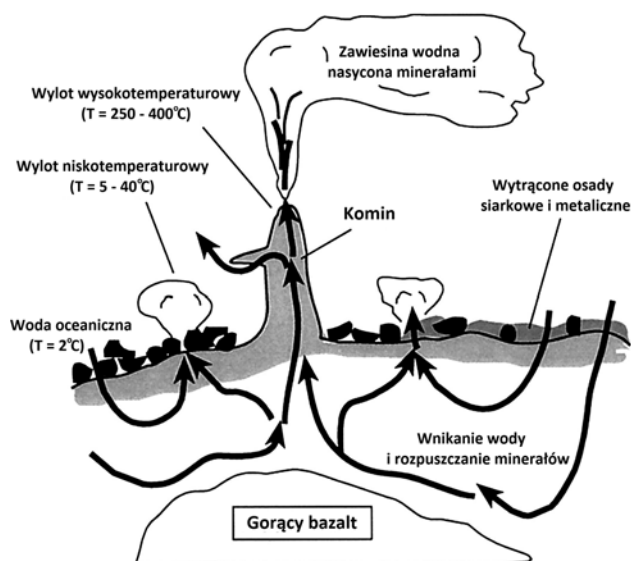
O kosmosie wiadomo równie mało, co o żyjących wokół człowieka bakteriach. Ludzkość powoli stara się pozyskać wiedzę na temat zarówno wszechświata jak i drobnoustrojów. Obecnie ocenia się, że planeta Ziemia liczy około 4,6 miliarda lat. Pierwsze oceany pojawiły się około 4,4 miliarda lat temu. Po upływie od 0,8 do 0,7 miliarda lat pojawiły się pierwsze komórki bakteryjne. Oznacza to, że większość skał, które wydają się być wieczne, jest dużo młodsza od bakterii. Właściwie jedynie ostatnie 500 milionów lat to okres kiedy pojawiły się rośliny, zwierzęta, czyli życie w formie przypominającej tę postrzeganą na co dzień przez człowieka. Przez 3 miliardy lat Ziemię

zamieszkiwały tylko i wyłącznie mikroorganizmy. Obecnie istnieje kilka teorii opisujących pochodzenie życia. Wspólną cechą wielu z nich są dwa fakty. Pierwszy stawia tezę, że życie powstało bez obecności tlenu, gdyż przez 2 pierwsze miliardy lat atmosfera Ziemi składała się głównie z metanu, amoniaku, siarkowodoru, pary wodnej, tlenu oraz dwutlenku węgla. Drugim faktem jest wysokie prawdopodobieństwo, że życie wywodzi się z wody. Wszystkie procesy związane z powstawaniem życia, co należy jeszcze raz podkreślić, odbywały się bez obecności tlenu cząsteczkowego. Pierwsze mikroorganizmy, czy ich prekursorzy były więc typowymi chemotrofami, wykorzystującymi energię chemicznego utleniania pewnych związków. Dużą rolę odgrywały procesy metanogenezy. Nikt nie jest w stanie odpowiedzieć na pytanie, gdzie dokładnie powstało życie. Tym bardziej, że dopiero ostatnie dziesięciolecia przynoszą odkrycia, które nas nie tyle zadziwiają, co zmieniają nasz sposób pojmowania świata.

Na samym dnie

Przykładowo w roku 1977 naukowcy z Scripps Institution of Oceanography szukając dowodów na poparcie teorii, która zrodziła się z potrzeby wyjaśnienia pochodzenia rowu Mariańskiego, na dnie Pacyfiku odkryli kominy hydrotermalne. Na skutek zaburzeń w warstwowej budowie skorupy ziemskiej, ogrzana do bardzo wysokich temperatur woda pod ogromnym ciśnieniem, wydostaje się z wnętrza Ziemi poprzez kominy hydrotermalne i miesza się z wodą oceaniczną. Na tym etapie uczeni potwierdzili fragment swojej hipotezy badawczej, jednak równocześnie odkryli coś czego nikt się nie spodziewał. Dzięki bardzo wysokiej temperaturze i ciśnieniu wydostająca się woda jest bogata w składniki mineralne. Po zmieszaniu z zimną wodą oceaniczną, obniża się rozpuszczalność tych minerałów w wodzie i większość z nich ulega wytrąceniu i osadzeniu na dnie (Ryc. 1). Pozostałe w wodzie substancje są wykorzystywane przez mikroorganizmy do wzrostu. Nie byłoby w tym nic dziwnego, gdyby nie prosta uwaga, że dzieje się to wszystko na głębokości od 2000 do 5000 m poniżej poziomu morza, a temperatura wydostającej się z kominów wody w miejscu mieszania nadal sięga od 270 do 380°C. Należy dodać jeszcze ciśnienie na dnie,

które nie dopuszcza wody do wrzenia, oraz odczyn silnie kwaśny. Ocenia się, że każdego roku od 1,0 do $1,5 \times 10^{14}$ kg wody przepływa przez kominy hydrotermalne. Mikroorganizmy idealnie dostosowały się do panujących tam warunków. Wysokie ciśnienie oraz silnie kwaśny odczyn środowiska nie stanowią dla nich przeszkody. Kolonizują wody w obszarze temperatur do 120–130°C oraz powierzchnie kominów hydrotermalnych. Należy wyraźnie podkreślić, że większość tych mikroorganizmów nie rośnie w in-



Ryc. 1. Schemat budowy komina hydrotermalnego, wg. Edwards K. J., Bach W., Rogers D. R., *Geomicrobiology of the Ocean Crust: A Role for Chemoautotrophic Fe-Bacteria*, *The Biological Bulletin*, 204: 180–185, Kwiecień 2003, modyfikacje – autorzy.

nych warunkach, co oznacza, że jest to ich optymalna nisza ekologiczna. Równocześnie pojawiła się hipoteza, że życie mogło powstać właśnie w takim środowisku. Im większa głębokość tym wyższe ciśnienie hydrostatyczne, które działa na otoczenie, w tym również na mikroorganizmy. Z pewnymi wyjątkami powszechnie przyjmuje się, że głębokości do 4000 metrów (co odpowiada ciśnieniu rzędu 400 atmosfer) zamieszkują mikroorganizmy tolerujące wysokie ciśnienia. To znaczy, że posiadają zdolność rozwoju w warunkach podwyższonego ciśnienia, ale również dobrze rozwijają się pod ciśnieniem 1 atmosfery. Wynika to również z relatywnie wysokiego prawdopodobieństwa wymiany wód. Na głębokości od 5000 do 6000 metrów występują mikroorganizmy barofilne, czyli takie, które zdecydowanie rozwijają się pod ciśnieniem rzędu od 500 do 600 atmosfer, jednocześnie tracąc tę zdolność przy ciśnieniach niższych. Najgłębsze wody rowów oceanicznych zamieszkiwane są przez ekstremalne mikroorganizmy barofilne, które wykazują optimum wzrostu pod ciśnieniem 700 atmosfer tolerując nawet ciśnienie powyżej 1000

atmosfer. Mikroorganizmy o tym charakterze należą do gatunku *Moritella yayanosii* i zostały wyizolowane z osadów oceanicznych. Optymalne warunki wzrostu dla bakterii tego gatunku to temperatura 4°C oraz ciśnienie powyżej 500 atmosfer. Rów Mariański jest najgłębszym miejscem na Ziemi, którego głębokość wynosi więcej niż 10900 metrów a ciśnienie może sięgać nawet 1100 atmosfer. Nawet tam napotkać można na życie, które doskonale egzystuje w całkowitych ciemnościach.

W stronę światła

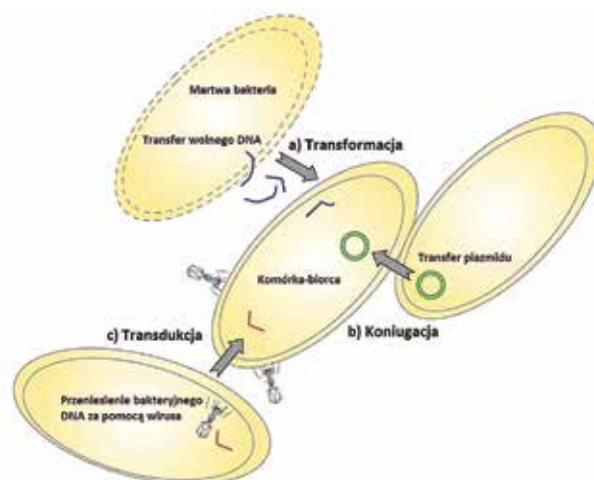
Przeciwnieństwem ciemności jest światło, którego największym znanym nam dostarczycielem jest oczywiście Słońce. Około 4 miliardy lat temu promienie słoneczne docierające do powierzchni nowo powstałych oceanów przyczyniły się do rozjaśniania przypowierzchniowych mas wody. Natężenie emisji promieniowania słonecznego obniżało się przy przechodzeniu przez kolejne warstwy wody. W zależności od szerokości geograficznej, światło pada pod różnym kątem i może ulegać odbiciu od powierzchni. Również zawiesiny zawarte w wodzie mogą wpływać negatywnie na głębokość do jakiej dociera światło. Przyjmuje się, że wierzchnie warstwy są prześwietlone, a poniżej dociera jedynie światło rozproszone. Granica mroku określona jest pomiędzy 200 a 1000 metrem głębokości. Nic więc dziwnego, że w toku ewolucji pojawiły się mikroorganizmy takie jak bakterie purpurowe, zdolne do wykorzystywania energii promieniowania słonecznego do syntezy wewnątrzkomórkowych nośników energii. Wywodzące się z bakterii purpurowych cyjanobakterie zaczęły wytwarzać tlen. Stopniowo atmosfera ziemską wzbogacała się w tlen cząsteczkowy, dzięki czemu ewolucja organizmów jedno- i wielokomórkowych rozwinęła się w kierunku pozyskiwania energii w procesach tlenowych.

Nieograniczone możliwości

W ten sposób, na skutek ustawicznego dostosowywania się do zmieniających się warunków środowiskowych mikroorganizmy skolonizowały wszelkie środowiska. Nie ma praktycznie na kuli ziemskiej miejsca, w którym nie byłoby mikroorganizmów. Z punktu widzenia człowieka, życie w pewnych środowiskach wydaje się być niemożliwe. Biorąc pod uwagę niektóre parametry fizyczne i chemiczne, popełnia się często błędy zakładając, że środowiska niegościnnie dla ludzi są równie niegościnnie dla innych form życia. Drugim a może najważniejszym zjawiskiem,

o którym się zapomina jest fakt, że mikroorganizmy posiadają zdolność do głębokich zmian w środowisku. Warto dokonać krótkiego przeglądu czynników, według których pewne środowiska określa się mianem ekstremalnych. Biorąc pod uwagę stężenie jonów wodorowych można wyróżnić środowiska o niskim pH od 1 do 4, czyli powszechnie określane jako kwaśne oraz środowiska zasadowe o wysokim pH od 10 do 14. Neutralne pH o wartości 7 jest wykładnikiem środowiska obojętnego. Mikroorganizmy dostosowały się do każdego stężenia jonów wodorowych i obecne są m.in. w wodach kopalnianych czy odciekach z hałd górniczych, które nie tylko są bardzo kwaśne, ale również zawierają cały szereg metali ciężkich takich jak np. ołów, miedź, cynk, kadm czy arsen. Doskonałym przykładem mogą być bakterie gatunku *Ferroplasma acidarmanus* z optymalną temperaturą rozwoju wynoszącą 40°C, pH równym 1,2 oraz stężeniem wyżej wymienionych metali na poziomie kilkudziesięciu gramów na litr (> 50g/L). Absolutnym przeciwieństwem są gatunki bakterii zamieszkujących zasadowe jeziora tzw. „soda lake” na pustyni Mojave w Kalifornii, których odczyn pH może wynosić nawet 12. Kolejnym ważnym czynnikiem jest stężenie soli w środowisku. W dawnych stuleciach, kiedy nie znano konserwantów, jedynym sposobem zabezpieczenia mięsa tak, aby można je przechowywać przez długi okres czasu było solenie. Beczki z rybami wypełniano solanką a płaty mięsa otaczano solą. Takie zabezpieczenie żywności powodowało, że nie była ona atakowana przez mikroorganizmy. Sól a konkretnie jony sodu i chloru w roztworach wodnych otaczają się cząsteczkami wody. Oddziaływania są tak silne, że w nasyconych roztworach soli praktycznie nie ma wody dostępnej dla mikroorganizmów powodujących psucie się produktów spożywczych. Wydawać by się mogło, że w takich warunkach nie ma prawa żyć. A jednak organizmy halofilne przystosowały się do życia właśnie w środowiskach mocno zasolonych. Doskonałym przykładem jest gatunek bakterii *Haloarcula marismortui* występujący w Morzu Martwym. Zasolenie w tym morzu osiąga wartość nawet ok. 340 ‰. Dla porównania w Morzu Bałtyckim wartość ta średnio nie przekracza 8‰. Największym zaskoczeniem dla naukowców były jednak mikroorganizmy, które uwięzione w kryształach soli przetrwały do chwili obecnej. Pierwsze takie odkrycia przedstawiono na początku lat 60. ubiegłego wieku. Od tamtego czasu opisano gatunki takie jak: *Halococcus salifodinae*, *Halococcus dombrowskii* czy *Halobacterium noricense*, przy czym wiek kryształów soli, z których je wyizolowano określono na około 200–250 milionów lat a najstarszych nawet na

419 milionów lat. Tak więc uwięzione w kryształach mikroorganizmy są dużo starsze niż dinozaury. Dzięki warstwie soli, są ponadto chronione przed wieloma czynnikami środowiskowymi np. promieniowaniem UV. Kryształy z mikroorganizmami należy jednak traktować jako poczekalnie, w których mikroorganizmy zachowały zdolność do rozwoju w przypadku pojawienia się sprzyjających warunków. Według naukowców średnia zawartość mikroorganizmów w kryształach waha się od 1 do 2 komórek na kg soli dla próbek pobranych w kopalniach na terenie Wielkiej Brytanii do 100000 w przypadku soli odnajdywanej w skałach alpejskich.



Ryc. 2. Schematyczne wyjaśnienie mechanizmów horyzontalnego transferu genów – transformacji, koniugacji i transdukcji, wg. Jang J., Becq. J., Gicquel B., Deschavanne P., Neyrolles O., Horizontally acquired genomic islands in the tubercle bacilli, *Trends in Microbiology*, 16(7): 303-308, Lipiec 2008, modyfikacje – autorzy.

W skalnym podłożu

Wspominając o skałach, nie można pominąć organizmów endolitycznych, żyjących w skalnym podłożu, a konkretnie w wolnej przestrzeni pomiędzy ziarnami minerałów tworzących skały. Odnajduje się je np. w bazaltach tworzących dno Oceanu Indyjskiego, pobranych z głębokości 1200 metrów, jak również z próbek skał powierzchniowych zebranych w Alpach, Górach Skalistych czy na Antarktydzie. Wyizolowano szczepy są zdolne do rozwoju w temperaturze 121°C, co przekłada się na głębokość od 4,0 do 4,5 km na lądzie i od 7,0 do 7,5 km poniżej powierzchni dna oceanu. Odżywiają się one substancjami mineralnymi, które występują w skałach, przy czym w zależności od budowy geologicznej mogą wykorzystywać również substancje rozpuszczone w wodzie, jeśli taka w danym miejscu występuje. Obecnie wiadomo stosunkowo mało na ich temat, głównie ze względu na koszty pozyskania próbek badawczych z głębin.

Mikroorganizmy zamknięte w skałach są również doskonale chronione przed promieniowaniem UV, a zabezpieczone obecnością pożywienia są praktycznie samowystarczalne, co nakierowało naukowców na myśl, że prawdopodobna jest hipoteza przemieszczania się życia zamkniętego w meteorytach. Od lat naukowcy z NASA i szeregu innych ośrodków naukowych sprawdzają realność takiej hipotezy. Interesuje ich także czy mikroorganizmy mogą przetrwać w warunkach próżni, czy przeżyłyby przejście przez atmosferę, zderzenie z jej powierzchnią. Istnieją dowody, że bakterie przeżywają zderzenia, przy których generowane jest ciśnienie rzędu 50 GPa, czyli pół miliona wyższe od ciśnienia atmosferycznego. Dodatkowo potrafią przeżyć w próżni krótkotrwałe skoki temperatury do 250°C.

Samoobrona w skali mikro

W kosmosie, ale również na Ziemi, czynnikiem determinującym przetrwanie organizmów żywych jest skuteczna ochrona przed promieniowaniem, zwłaszcza jonizującym. Nie wnikając szczegółowo w naturę i różnorodność promieniowania, któremu poddawane mogą być komórki warto przywołać populację bakterii, które swoją opornością, zadziwiają wszystkich. Zostały wykryte w roku 1956 podczas prób sterylizacji puszkowanej żywności promieniami gamma. Jak się okazało pewne bakterie, po identyfikacji gatunkowej określone jako *Deinococcus radiodurans* potrafiły przetrwać to zabójcze promieniowanie. Drobnoustroje te są średnio 1000 razy bardziej odporne niż powszechnie uznawane za odporne karaluchy i około 3000 razy bardziej odporne od ludzi. Naukowcy nadali temu gatunkowi bakterii nawet przydomek „Conan the Bacterium”. Okazało się również, że ten gatunek doskonale rozwija się w niskich temperaturach. Wynika to m.in. z faktu, że został odnaleziony w warunkach naturalnych na Biegunie Północnym. Wśród naukowców rozgorzała dyskusja, po co bakteriom aż tak sprawny mechanizm ochronny przed promieniowaniem. Wyjaśnienie było zaskakujące, gdyż okazało się, że wykształcony mechanizm ma bronić komórki w wyższym stopniu przed odwodnieniem niż promieniowaniem, zwłaszcza, że jego natężenie użyte podczas badań nie występuje w środowisku naturalnym. Należące do tego samego rodzaju bakterie gatunku *Deinococcus deserti* wyizolowano z próbek pobranych na Saharze, co w pewien sposób potwierdza rolę mechanizmu obronnego tej grupy mikroorganizmów. Mechanizm naprawczy *Deinococcus radiodurans* bez problemu radzi sobie z około 200 uszkodzeniami DNA, podczas gdy ten sam mechanizm występujący

u człowieka potrafi naprawiać maksymalnie kilka takich uszkodzeń. Wracając jednak do pustyni, która z punktu widzenia człowieka nie zapewnia możliwości przeżycia, dla mikroorganizmów jest zupełnie prawidłowa i często stanowi jedyne środowiskiem, w którym mogą żyć. Wysoka temperatura, promieniowanie UV, brak wody czy ekstremalne stężenia soli (np. w wyschniętych słonych jeziorach) nie stanowią dla mikroorganizmów czynników nie do pokonania.

Bakterie w świetle ludzi

Nowoczesny, zurbanizowany świat, często jest określany mianem betonowej pustyni, pełnej wybetonowanych i wyasfaltowanych powierzchni. Beton pozornie wydaje się odporny na działalność mikroorganizmów, jednak znane są przypadki, kiedy porastające jego powierzchnię bakterie względnie beztlenowe w obecności ścieków wytwarzały siarkowodor, który był następnie utleniany przez bakterie tlenowe do kwasu siarkowego. Jego obecność nie pozostaje bez wpływu na wyroby cementowe – obserwowane jest zjawisko korozji siarczanowej, czyli niekorzystnej konwersji betonu do gipsu w wyniku działania kwasu siarkowego. Przyglądając się bliżej asfaltowi, można zauważyć, że nawet on jest środowiskiem, w którym obecne jest życie. Szereg bakterii gatunków takich jak: *Pseudomonas mendocina*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter calcoaceticus*, *Alcaligenes denitrificans* czy *Flavimonas oryzihabitans* doskonale wykorzystuje związki chemiczne wchodzące w skład asfaltów, a konkretnie lepiszcza (najczęściej produktu petrochemicznego) spajającego kruszywo. Podobne bakterie odkryto także w próbkach pobranych z tzw. jezior asfaltowych np. z terenu liczącego około 28 tys. lat „La Brea Tar Pits” w okolicy Los Angeles. Asfalty to z chemicznego punktu widzenia głównie węglowodory, a te w środowisku najczęściej występują jako ropa naftowa. W tej mieszaninie około 20 000 związków chemicznych o odmiennej strukturze, różne gatunki mikroorganizmów wykorzystują innego rodzaju źródła węgla, począwszy od prostotańcuchowych alkanów aż po wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne. Nic więc dziwnego, że zarówno sama ropa naftowa jak i powstające z niej paliwa np. olej napędowy są degradowane przez mikroorganizmy. Ciekawy jest fakt, że mikroorganizmy współtowarzyszą ropie naftowej zarówno podczas wydobywania, przerobu jak i w świeżych, nieeksploatowanych złożach zalegających na głębokościach od 4000 do 5000 metrów. Stosownym wydaje się być stwierdzenie, że mikroorganizmy i ropa naftowa to nierozdzielny duet. Drobnoustroje rozkładają

ropę naftową zarówno w warunkach tlenowych jak i beztlenowych oraz w szerokim zakresie temperatur. Zjawisko to znalazło zastosowanie w praktyce do oczyszczania terenów skażonych substancjami ropopochodnymi w procesie bioremediacji. Techniki bioremediacyjne polegają na wprowadzeniu komórek odpowiednio wyselekcjonowanych szczepów bakteryjnych wraz z pożywką do zanieczyszczonej gleby. Charakteryzują się niską szkodliwością dla środowiska oraz niską ceną. Do wad należy zaliczyć długi czas oczyszczania gruntu. Dla ludzi a także dla większości zwierząt substancje ropopochodne to trucizny, które w razie kontaktu mogą prowadzić do śmierci lub szeregu poważnych chorób. Dla bakterii to tylko substancja, którą można przetworzyć na dwutlenek węgla i wodę, pozyskując jednocześnie energię niezbędną do przeżycia. Podobne relacje występują w przypadku środków ochrony roślin, które są również skutecznie rozkładane przez mikroorganizmy. Dzieje się tak, gdyż dzięki miliardom lat ewolucji, mikroorganizmy wytworzyły skomplikowane mechanizmy adaptacyjne, które umożliwiają im szybkie przystosowanie się do zmieniających się warunków środowiskowych.

Ludzie w świecie bakterii

Jednym z mechanizmów adaptacyjnych wytworzonych przez bakterie jest Horizontal Gene Transfer (HGT), czyli przekazywanie fragmentów materiału genetycznego pomiędzy niespokrewnionymi organizmami na drodze transdukcji, koniugacji lub transformacji (Ryc. 2). Doskonałym przykładem jest głośny ostatnio przypadek pewnych szczepów bakterii *Escherichia coli*, których lekooporność stanowi ogromny problem. Naukowcy badając pacjenta zainfekowanego bakteriami gatunku *Klebsiella pneumoniae*, hospitalizowanego w New Delhi w roku 2009, odkryli gen odpowiedzialny za wytwarzanie enzymów (New Delhi Metallo-beta-lactamase (NDM-1)), warunkujących oporność bakterii na dużą liczbę antybiotyków. Taki gen, z chemicznym przepisem obrony przed antybiotykami, może być wybiórczo przekazywany nie tylko bakteriom tego samego gatunku ale także innym – w tym przypadku *Escherichia coli* - czyniąc je również opornymi na antybiotyki. Niezwykłość HGT można by zilustrować przykładem wybitnego sportowca, którego umiejętności odpowiednio zapisane

w formie chemicznej zawarto w „tabletkce”. Każda osoba, która zażyłaby taką tabletkę mogłaby posiadać jego talent. Również potomstwo tej osoby mogłoby wykazywać nadzwyczajne umiejętności. Coś co wydawać się może pomysłem rodem z filmów science-fiction, jest codziennie realizowane w świecie mikroorganizmów. Jak mało o tym świecie wiadomo, świadczy zmieniające się podejście badaczy, którzy dopiero w ostatnich dziesięcioleciach zaczęli postrzegać mikroorganizmy jako skomplikowane układy biologiczne o wyraźnej tendencji do funkcjonowania w strukturach grupowych. Potrafią one nie tylko analizować warunki panujące w środowisku, ale także aktywnie wpływać na jego kształt. Nie należy jednak postrzegać bakterii jako wszechobecnego wroga ludzkości. Są obecne w przewodzie pokarmowym każdego człowieka i umożliwiają jego prawidłowe funkcjonowanie. W postaci osadów czynnych rozkładają ksenobiotyki w oczyszczalniach ścieków. Produkowane przez drobnoustroje metabolity znajdują ponadto zastosowanie w biotechnologii przy produkcji aktywnych substancji leków. Ostatecznie należy pamiętać, że to one zapewniają równowagę ekologiczną w ekosystemach na całym świecie, rozkładając martwą materię organiczną oraz zanieczyszczenia substancjami ropopochodnymi. Kompletnie zestawienie pozytywnych aspektów funkcjonowania drobnoustrojów wymagałoby jednak napisania odrębnego, wyczerpującego artykułu. Biorąc pod uwagę, że dotychczas poznano dopiero część mechanizmów, które pozwalają przystosować się mikroorganizmom do warunków środowiskowych, a każdego roku pojawiają się nowe odkrycia naukowe, to trafnym wydaje się stwierdzenie, że to ludzie żyją w świecie bakterii a nie bakterie w świecie ludzi.