

Smokery — tajemnice głębin oceanów

Zdzisław M. Migaszewski*, Agnieszka Gałuszka**

Smokery (oceaniczne źródła hydrotermalne) występują przeważnie w strefach spredingu, czyli narodzin i rozchodzenia się płyt oceanicznych. Roztwory hydrotermalne wymienionych źródeł osiągają temperaturę powyżej 400°C. Ich skład chemiczny jest bardzo zróżnicowany — odmiany czarne (black smokers) zawierają znaczne ilości siarkowodoru i metali ciężkich, natomiast białe (white smokers) głównie metali alkalicznych, baru, strontu, krzemu, itp. Działalność smokersów prowadzi do powstania złóż siarczków i tlenków metali, szczególnie miedzi i cynku. Oceaniczne źródła hydrotermalne są również miejscami występowania unikalnych ekosystemów. Podstawę łańcucha pokarmowego stanowią bakterie chemosyntetyzujące (wytwarzające węglowodany z siarkowodoru i siarczków metali). Około 95% odkrytych gatunków nie było dotąd znanych nauce. Wśród nich na szczególną uwagę zasługują robaki rurkowe z gromady Vestimentifera (np. Riftia pachyptila) osiągające 3 m długości oraz małże (Calyptogena magnifica, Bathymodiolus thermophilus) o średnicy do 30 cm. Poszczególne ekosystemy smokersów cechuje niska bioróżnorodność oraz obecność odmiennych gatunków. Są one źródłem nieznanych dotąd genów, enzymów i związków chemicznych. Organizmy zasiedlające omawiane ekosystemy reprezentują alternatywny model rozwoju życia o licznych implikacjach w zakresie ewolucji poszczególnych gatunków.

Słowa kluczowe: smokery — skład mineralny i izotopowy oraz ekosystemy hydrotermalne

Zdzisław M. Migaszewski & Agnieszka Gałuszka — **Smokers — Mysteries of oceanic deeps.** Prz. Geol., 47: 175–180.

Summary. Smokers (oceanic hydrothermal springs) occur primarily within the spreading zones, e. g., where oceanic plates are being formed and pulled apart. The hydrothermal vent fluids reach a temperature of more than 400°C. Their chemical composition is highly diverse; black smokers contain a considerable amount of hydrogen sulfide and heavy metals, whereas white smokers are enriched in alkaline metals, barium, strontium, silicon, etc. The activity of sea-floor springs leads to forming different metal sulfide and oxide deposits, especially copper and zinc ones. They are also a source of unique ecosystems. The base of food chain is taken up by chemolithoautotrophic sulfur bacteria (producing carbohydrates from hydrogen sulfide and metal sulfides). About 95% of newly discovered species have not been known to the science. Of these ones, a special position is held by Vestimentiferan tube worms (e. g., Riftia pachyptila) as much as 3 m long, as well as clams and mussels (Calyptogena magnifica, Bathymodiolus thermophilus) up to 30 cm in diameter. Each smoker ecosystem is featured by the low biodiversity and the presence of different species. They have been a source of the hitherto unknown gene, enzymes and chemicals. Organisms that occupy the ecosystems discussed represent an alternative model of life with many implications affecting the evolution of different species.

Key words: smokers — mineral and isotopic composition, vent ecosystems

Smokery (oceaniczne źródła hydrotermalne) zostały odkryte w rejonie Ryftu Galapagos przy użyciu sonaru i holowanej automatycznej kamery fotograficznej w ramach ekspedycji „Pleiades” w 1976 r. (Weiss i in., 1977). W rok później wymieniony obszar został spenetrowany przez wyprawę żaglową „Alvina” (Corliss & Ballard, 1977). Te pierwsze napotkane źródła występowały na głębokości ok. 2500 m, a temperatura ich roztworów wynosiła ok. 10–30°C. Kolejne odkrycia smokersów otworzyły nowy rozdział w eksploracji głębin oceanów z implikacjami wybiegającymi znacznie poza tradycyjnie pojmowaną geologię i biologię mórz i oceanów.

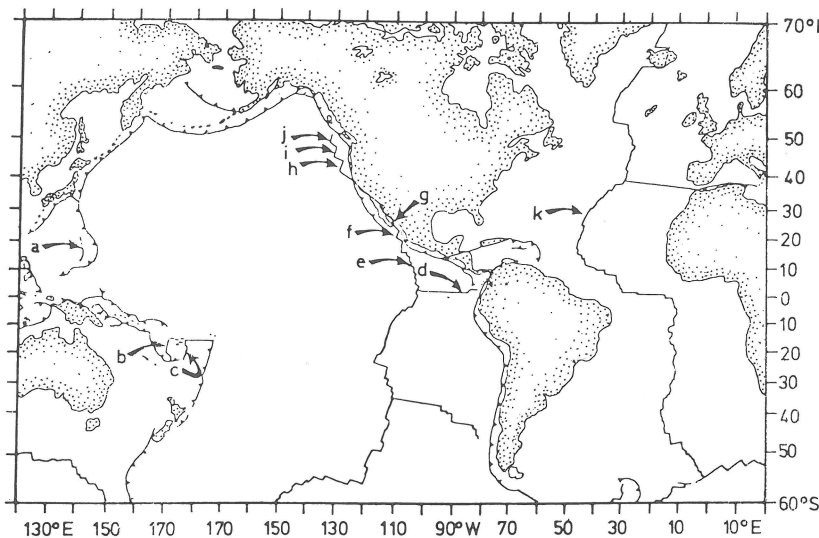
Największą liczbę źródeł oceanicznych stwierdzono w strefach spredingu, położonych między dwiema rozchodzącymi się płytami, czyli w miejscach gdzie rodzi się skorupa ziemska (ryc. 1). Wymienione strefy akrecji składają się ze śródoceanicznego grzbietu górskiego i centralnej doliny ryftowej. Przykładami są: Grzbiety Juan de Fuca, Gorda i Explorer oraz Wyniesienie Wschodniopacyficzne i Środkowoatlantyckie. Wszystkie wymienione struktury są przykryte oceanami. Jedynymi wyjątkami są Islandia i Wyspa Wniebowstąpienia, gdzie grzbiet górski (wraz z czynnymi wulkanami) odsłania się na powierzchni. Struktura ryftowa jest miejscem, gdzie wydobywa się lava bazaltowa o temperaturze powyżej 1000°C oraz zachodzi działalność hydrotermalna. Rocznie przybywa od 2,5 cm

(Grzbiet Arktyczny) do 25 cm (Wyniesienie Wschodniopacyficzne), o objętości ok. 20 km³ skorupy oceanicznej. Kolejne iniekcje magmy powodują powstanie nowych grzbietów i centralnych dolin ryftowych oraz rozchodzenie się starszych struktur na zewnątrz od osi nowopowstałych. Śródoceaniczne grzbiety górskie tworzą jeden gigantyczny globalny system o długości ponad 75 000 km i wysokości ok. 4500 m. Jest to najwyraźniej zaznaczona struktura morfologiczna Ziemi (Simkin i in., 1994; Kious & Tilling, 1995).

Woda morska przenika przez szczeliny znajdujące się w skorupie oceanicznej, docierając do jej podłoża lub też w rejonie komory magmowej, znajdującej się w osi doliny ryftowej. Ogrzana woda zawierająca Mg i SO₂ reaguje ze składnikami chemicznymi występującymi w bazalcie (głównie z SiO₂ i siarczkami metali) i przemieszcza się ku górze. W strefie ryftowej przegrzany roztwór przebija dno oceanu dając początek źródłom hydrotermalnym. Mimo bardzo wysokiej temperatury (przekraczającej niekiedy 400°C), roztwór ten nie przechodzi w parę, z uwagi na ekstremalne ciśnienia (ok. 200–400 atm), panujące na głębokości 2000–4000 m. Miesza się on z zimną, alkaliczną i wzbogaconą w tlen wodą morską, co prowadzi do wytrącenia cząstek siarczków i tlenków metali. Cała objętość wody oceanicznej podlega jednorazowej wymianie poprzez system grzbietów śródoceanicznych w ciągu 10 milionów lat (Wolery & Sleep, 1976). Mimo, że objętość roztworów hydrotermalnych nie przekracza 0,5% objętości wszystkich wód kontynentalnych, to jednak ich wpływ na skład chemiczny oceanów jest prawie taki sam (Stowe, 1983).

*Oddział Świętokrzyski, Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Zgoda 21, 25-953 Kielce

**Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katolicki Uniwersytet Lubelski, al. Raławickie 14, 20-031 Lublin



Ryc. 1. Lokalizacja stref smokersów omówionych w tekście

a–c — strefy subdukcji z łukami wysp zachodniego Pacyfiku (Baseny Mariański, Fidzi i Lau), d — Ryft Galapagos, e — Wyniesienie Wschodniopacyficzne 13°N, f — Wyniesienie Wschodniopacyficzne 21°N, g — Basen Guaymas, h — Grzbiet Gorda i Grzbiet Juan de Fuca, j — Grzbiet Explorer, h — Wyniesienie Środkowoatlantyckie

Fig. 1. Location of smoker zones discussed in the text

a–c — subduction zones with island arc of the West Pacific (Marianas, Fiji and Lau Basins, d — Galapagos Rift, e — East Pacific Rise 13°N, f — East Pacific Rise 21°N, g — Guaymas Basin, h — Gorda Ridge, i — Juan de Fuca Ridge, j — Explorer Ridge, h — Mid-Atlantic Range

Obecnie większość badaczy używa terminu oceaniczne (podmorskie) źródła hydrotermalne (*sea-floor hot springs, geothermal vents* lub *hydrothermal vents*). Używany jest też termin smokersy (*smokers, smokies*). Ten ostatni jest typowym amerykańizmem, wprowadzonym przed odkrywców gorących źródeł w obrębie Grzbietu Wschodniopacyficznego, dla podkreślenia ich podobieństwa do dymiących kominów fabrycznych. Obecnie używany jest on także w odniesieniu do źródeł występujących w szczelinach bazaltu, z których wydzielają się bezpośrednio roztwory przezroczyste o temperaturze ok. 2–30°C (*clear smokers*). Termin gorące źródło (*hot spring*) jest pojęciem szerszym i stosuje się do wszystkich źródeł naturalnych o różnicowanej genezie, w których temperatura wody przekracza temperaturę ciała ludzkiego. Przykładem jest obszar Parku Narodowego Yellowstone, gdzie stwierdzono obecność licznych odmian źródeł o zróżnicowanych temperaturach, pH i składzie chemicznym (Migaszewski & Trela, 1996). Ich geneza jest związana z obecnością tzw. „gorącej plamy” (*hot spot*), zlokalizowanej w górnym płaszczu Ziemi, bezpośrednio w podłożu parku.

Aspekty złożowe, związane z działalnością współczesnych smokersów, zostały szczegółowo omówione w licznych publikacjach (m. in. Spiess i in., 1980; Hekinian i in., 1980; Lonsdale i in., 1980; Haymon & Kastner, 1981; Edmond i in., 1982; Rona, 1986; Migaszewski, 1989; Depowski i in., 1998). Strefy występowania smokersów są obszarami, gdzie geologia i chemia „spotykają się” z biologią. Nigdzie też rozwój życia nie jest tak silnie związany z procesami geologicznymi, zachodzącymi w litosferze i płaszczu Ziemi. Smokersy są dla geochemików dodatkowym (obok kontynentów) źródłem zasilania oceanów w związki chemiczne, dla biologów natomiast miejscami występowania niezwykle gatunków, izolowanych od znanych dotąd ścieżek ewolucji. Występujące tam organi-

zmy rozwijają się w całkowitej ciemności, a podstawą ich egzystencji są związki chemiczne dostarczane przez źródła hydrotermalne. Zagadnienia dotyczące biologii współczesnych smokersów zostały szczegółowo omówione w publikacjach Grassle (1986) i Tunnicliffe (1991).

Skład chemiczny i izotopowy smokersów

Opisane dotąd gorące źródła występują w oceanach do głębokości 3,5 km. Tworzą one czynne kominy (*active chimneys*) lub wygasłe kopuły (*dead mounds*) wysokości od 1 do 50 m, grupujące się w polach o średnicy do 250 m. Czynne kominy wydzielają roztwory z prędkością do 5 m/sek, które następnie dryfują poziomo w postaci „chmur” na wysokość do kilkuset metrów powyżej dna oceanu. Niektóre z nich (tzw. „*megaplumes*”) osiągają grubość 700 m i szerokość 20 km, co zaobserwowano w południowej części Grzbietu Juan de Fuca (Baker & Massoth, 1986). Barwa roztworu jest uzależniona od jego składu chemicznego i zmienia się od czarnej (*black smokers*) poprzez białą (*white smokers*) do całkowicie przezroczystej (*clear smokers*).

Czarne kominy wydzielają roztwory wzbogacone w H_2S , Zn, Cu, Pb, Fe, itp, natomiast białe odpowiednio w SO_2 , Ba, Si, podrzędnie H_2S i metale ciężkie. Temperatury roztworów białych wynoszą ok. 200–330°C, natomiast czarnych odpowiednio ok. 300–400°C. Skład chemiczny oraz temperatury roztworów podlegają znacznej fluktuacji w krótkich przedziałach czasowych (od kilku dni do kilku sekund), co nie pozostaje bez wpływu na rozwój organizmów zasiedlających ekosystemy smokersów. Same kominy lub kopuły są zbudowane głównie z siarczków Cu, Fe i Zn (czarne formy strukturalne) lub z barytu, krzemionki, minerałów ilastych (nontronitu), uwodnionych tlenków i wodorotlenków żelaza i manganu (białe formy strukturalne) (ryc. 2). Tempo akumulacji minerałów siarczkowych w pojedynczych kominach może osiągać objętość kilku dm^3 /dziennie (Hekinian i in., 1980). Gaill i Hunt (1986) opisali interesującą formę strukturalną z Wyniesienia Wschodniopacyficznego 13°N, zbudowaną z wieloszczetów gatunku *Alvinella pompejana*, zcementowanych siarczkami żelaza z domieszką krzemionki. Akumulacja siarczków zachodzi również na powierzchniach organizmów. Sztynne rurki wymienionego rodzaju *Alvinella* mogą zmieniać porowatość kominów, otwierając boczne kanały dla przesączających się roztworów. W końcówkach rurek osadza się też krzemionka (Desbruyres i in., 1985).

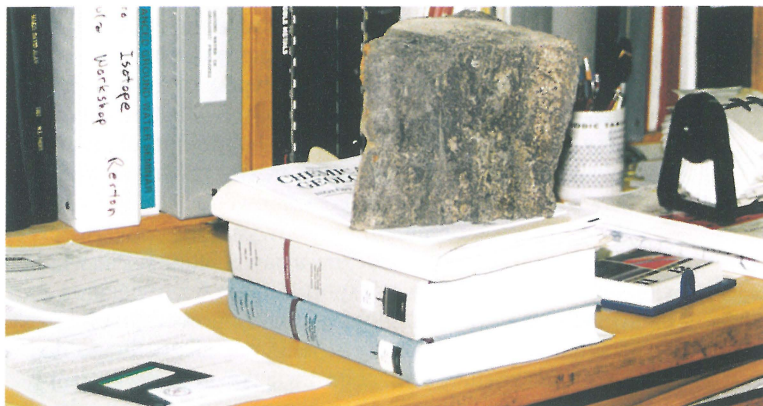
Strefy spreduingu mogą być przykryte osadami (Basen Guaymas 27°N w centralnej części Zatoki Kalifornijskiej) lub też pozbawione pokrywy osadowej (Ryft Galapagos 00°48'N, 86°13'N). Najbardziej interesującą jest pierwsza z wymienionych stref, charakteryzująca się obecnością intruzji bazaltowych w obrębie ponad 500-metrowej miąższości kompleksu hemipelagicznych osadów biogenicznych (okrzemkowych) i terygenicznych, jak również odslaniających się form kominowych i kopułowych, zbudowanych z węglanów (głównie kalcytu), anhydrytu, bary-

tu, krzemionki, pirotynu, sfalerytu, galeny, wircytu, itp. (Lonsdale i in., 1980; Lonsdale & Becker, 1985; Peter & Shanks, 1992). W wyniku przesączania się przez osady rozтворów hydrotermalnych dochodzi do tworzenia się węglowodorów z rozproszonej substancji organicznej.

W badaniach smokersów dużą rolę odgrywają oznaczenia stabilnych izotopów wodoru, węgla, tlenu i siarki (Böhlke & Shanks, 1994; Shanks i in., 1995). Izotopy wodoru i tlenu, służą do określenia tempa przebiegu procesów hydrotermalnych zachodzących między rozтворem a

skąłą. Wartości ΔD_{HT-SW} (różnica między δD wysokotemperaturowego rozтворu hydrotermalnego a δD lokalnej wody morskiej) wahają się od $-2,6$ do $4,1\text{‰}$, natomiast $\Delta^{18}O_{HT-SW}$ od $0,2$ do $2,1\text{‰}$. Wyniki tych oznaczeń ujawniają, że w systemach hydrotermalnych dominującą rolę odgrywają reakcje wysokotemperaturowe, zachodzące w pobliżu osiowych partii komór magmowych.

Badania izotopów siarki ($\delta^{34}S$) wskazują na istnienie dwóch podstawowych źródeł tego pierwiastka: siarczanów morskich ($21 \pm 0,2\text{‰}$) oraz siarki bazaltowej ($0,3 \pm 0,5\text{‰}$). Zarówno siarkowodor występujący w rozтворach hydrotermalnych, jak również minerały siarczkowe budujące różne formy strukturalne, ujawniają $\delta^{34}S$ w przedziale od 1 do 7‰ . Wymienione wartości wskazują na siarkę bazaltową oraz częściowo siarkę z siarczanów morskich — te ostatnie podlegające nieorganicznej redukcji do H_2S . W osadach w sąsiedztwie kominów hydrotermalnych występują również siarczki bakteriogeniczne, wyraźnie wzbogacone w lżejszy izotop siarki ($\delta^{34}S = -35$ do -15‰). Uwolniona z nich siarka przechodzi z osadów do systemów hydrotermalnych. Wartości $\delta^{34}S$ w małżach i robakach rurkowych (Vestimentifera), zamieszkujących ekosystemy gorących źródeł, wahają się odpowiednio od $-1,7$ do $0,4\text{‰}$ oraz od $-4,7$ do $4,7\text{‰}$ (Fry i in., 1983). Świadczy to o tym, że proces utleniania siarkowodoru przez bakterie i obieg siarki biogenicznej w łańcuchu pokarmowym nie prowadzi do wyraźnego frakcjonowania izotopowego, jak to ma miejsce w



Ryc. 2. Fragment kominu smokersu złożony z krzemionki oraz siarczków cynku i żelaza (z kolekcji dr W. C. Shanksa). Fot. Z. M. Migaszewski

Fig. 2. A fragment of the smoker chimney composed of silica, and zinc and iron sulfides (from Dr. W. C. Shank's III collection). Photo by Z. M. Migaszewski



Ryc. 3. Robaki rurkowe z gromady Vestimentifera, gigantyczne małże i kraby oraz przypominające płatki śniegu obunogi z rzędu Amphipoda — to niektóre z organizmów zasiedlających czynne strefy smokersów. Autorką ryc. jest A. Gałuszka

Fig. 3. Tube worms of the phylum Vestimentifera, gigantic clams and crabs and snowflake-shaped Amphipods — these are some of the organisms that inhabit active smoker zones. Picture by A. Gałuszka

przypadku redukcji siarczanów do siarczków (Kennicutt i in., 1992).

Wartości $\delta^{13}\text{C}$ w CO_2 rozpuszczonym w roztworach hydrotermalnych, wydobywających się z kominów w strefach spreduingu pozbawionych osadów, wynoszą ok. -7% , natomiast w CH_4 wahają się one od $-20,8$ do $-15,0\%$, co wskazuje na wysokie temperatury. W obrębie grzbietów śródoceanicznych pokrytych osadami, jak np. *Guaymas Basin*, wartości te dla CO_2 i CH_4 wynoszą odpowiednio od $-10,5$ do $-1,5\%$ oraz od $-50,8$ do $-43,2\%$. Kalcyt z kominów hydrotermalnych ($\delta^{13}\text{C}$ = od $-14,0$ do $-9,6\%$) zawiera węgiel pochodzący z osadów (CO_3^{2-}) lub wody morskiej (HCO_3^-) oraz utlenionej termokatalitycznie, rozłożonej substancji organicznej. Wartości $\delta^{13}\text{C}$ w organizmach, występujących w pobliżu czynnych kominów smokersów z Ryftu Galapagos i Wyniesienia Wschodniopacyficznego, wynoszą odpowiednio od $-39,9$ do $-28,9\%$ (małże) oraz od -16 do -8% (*Vestimentifera*) (Shanks i in., 1995).

Ekosystemy smokersów

Większość ekosystemów morskich występuje w strefie litoralnej, czego najlepszym przykładem jest Wielka Rafa Koralowca rozciągająca się na długości ok. 2000 km w pobliżu NE wybrzeży Australii. Przed odkryciem pierwszych smokersów uważano, że rozwój organizmów jest w dużym stopniu uzależniony od energii słonecznej, niezbędnej w procesie fotosyntezy. Brak tej energii na głębokości poniżej 300 m (strefa afotyczna) oraz dodatkowo spadek temperatury wód jest, jak sądzono, główną przyczyną uniemożliwiająca rozwój bujnego życia organicznego.

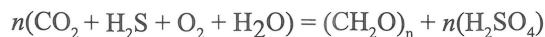
Pierwsze badania prowadzone w dolinach ryftowych Grzbietów Galapagos i Wschodniopacyficznego ujawniły obecność unikalnych ekosystemów rozwiniętych wokół czynnych kominów smokersów (ryc. 3). Mimo skrajnie niedogodnych warunków fizycznych i chemicznych (wysokich temperatur i ciśnień oraz wysokich koncentracji siarkowodoru i metali ciężkich), gorące źródła są miejscami bujnego rozwoju życia (Grassle, 1986; Tunnicliffe, 1991; Lutz, 1991; Lutz & Kennish, 1993; Grassle & Petrecca, 1994; McMillan & Musick, 1997). Około 95% organizmów zasiedlających ekosystemy smokersów nie było dotychczas znanych nauce. W sumie odkryto ponad 20 nowych rodzin, 90 rodzajów i 300 nowych gatunków (Tunnicliffe, 1991). Wiele z nich ujawniało tak duże zróżnicowanie w stosunku do znanych dotąd form, że trzeba było utworzyć nowe gupy taksonomiczne.

W bliskim sąsiedztwie smokersów zarejestrowano obecność licznych organizmów, począwszy od symbiotycznych chemosyntetyzujących bakterii, utleniających siarkowodor i siarczki metali, aż do prawie 3-metrowej długości (i średnicy 2–5 cm) robaków rurkowych (np. *Riftia pachyptila*). Wśród innych organizmów wyróżniają się gigantyczne małże (*Calyptogena magnifica*, *Bathymodiolus thermophilus*) średnicy do 30 cm, kraby (*Munidopsis subsquamosa*), w tym o kształcie pajaków (*Macroregonia macrochira*), przypominające płatki śniegu obunogi (rzęd Amphipoda), gąbki o kształcie grzybów, ośmiornice, itp.

Podstawę struktury troficznej ekosystemów smokersów stanowią bakterie chemolitoautotroficzne, występujące w roztworach i cząstkach mineralnych, w postaci mat oraz w związku symbiotycznym z dużymi bezkręgowcami. Wymienione populacje mikroorganizmów reprezen-

towane są przez bakterie utleniające siarkowodor, metan oraz związki żelaza i manganu.

Źródłem energii podtrzymującym omawiane ekosystemy są przede wszystkim reakcje chemiczne (chemosynteza) zachodzące w bakteriach. Siarkowodor zawarty w roztworach hydrotermalnych reaguje z rozpuszczonymi w wodzie morskiej dwutlenkiem węgla i tlenem dając węglowodany (German i in., 1996):



Proces chemosyntezy jest bardzo wydajny. Niektórzy badacze oceniają, że bakterie produkują trzykrotnie więcej węglowodanów niż fitoplankton w przypowierzchniowych partiach oceanów. Odkrycie w latach osiemdziesiątych błysków „naturalnego” światła u wylotu niektórych kominów wskazuje również na pewien udział procesów fotosyntezy u podstawy łańcucha pokarmowego.

W większości organizmów podwyższone zawartości siarki powodują efekty toksyczne, a nawet letalne. Pierwiastek ten blokuje bowiem transport tlenu przez związanie z centrum hemowym hemoglobiny, a także powoduje blokadę oksydazy cytochromowej — enzymu niezbędnego do syntezy wysokoenergetycznego związku adenosyno-trójfosforanu (ATP). Ponieważ organizmy żyjące w ekosystemach smokersów są stale narażone na ekstremalnie wysokie zawartości siarkowodoru i siarczków metali, dlatego też musiały one wykształcić mechanizmy ochronne, które ograniczają toksyczność siarki. Obecność takich mechanizmów zaobserwowano u przedstawicieli dwóch gatunków *Riftia pachyptila* i *Calyptogena magnifica*. Komórki tych organizmów zawierają białko wiążące siarkę. Stwierdzono też obecność systemu enzymów w utleniających siarkowodor i siarczki metali zewnętrznych warstwach komórek mięśniowych (Somero i in., 1983 — cyt. Lutz & Kennish, 1993).

Najbardziej spektakularnie wyglądają bajecznie kolorowe robaki rurkowe, zaliczone przez biologów do oddzielnej gromady *Vestimentifera* („noszące płaszcz”) (Jones, 1985). Obrastają one jak „rafy” kominy czynnych smokersów. Ich krwistoczerwone (od zawartości hemoglobiny) zakończenia długości do 10 cm wysuwają się celem pobierania wody morskiej bogatej w siarkowodor. Robaki rurkowe nie rozwinęły układu pokarmowego, a jego funkcje przejęły żyjące w symbiozie bakterie. Te ostatnie stanowią do 50% wagi swojego gospodarza. Składniki odżywcze (węgiel i azot) wytwarzane przez bakterie, jak również same bakterie stanowią pożywienie robaków rurkowych. Ostatnie z wymienionych dostarczają bakteriom tlen, dwutlenek węgla, siarkowodor (siarczki metali).

Utleniające siarkę bakterie symbiotyczne występują również w licznych organizmach, np. w wieloszczetach i małżach. Bakterie gromadzą się w tkankach (*Vestimentifera*) lub w partiach zewnętrznych (*Alvinellidae*). Wymienione robaki rurkowe stanowią pożywienie ryb i krabów. Stwierdzono obecność krabów oraz wieloszczetów z gatunku *Alvinella pompejana* przy ujściach źródeł w warunkach bardzo wysokich temperatur (ok. 350°C). Ostatnie z wymienionych budują nawet złożone struktury biogeniczne. Zagadką stanowi tu fakt, w jaki sposób wymienione organizmy są w stanie znieść temperatury powyżej 100°C .

Izolowane strefy smokersów są podmorskimi oazami wśród jałowych równin głębokomorskich. Charakteryzują się one bardzo wysoką objętością biomasy oraz dużym

zagęszczeniem populacji. Objętość biomasy jest do 1000 razy większa niż odpowiednio w ekosystemach głębokich oceanów nie związanych ze smokersami (Tunnicliffe, 1991). W przypadku *R. pachyptila* dochodzi ona do 15 kg/m² (Somero i in., 1983 — cyt. Lutz i Kennish, 1993). Poszczególne oazy cechuje zadziwiająco niska bioróżnorodność (niewielka ilość gatunków). Zjawisko to wywołane jest albo większą jednorodnością biologiczną ekosystemów smokersów (z niewielką liczbą unikalnych nisz ekologicznych) lub brakiem podatności gatunków na zmiany ewolucyjne. Organizmy tu zamieszkujące wykazują wyższe tempo przemian metabolicznych, dojrzewania i reprodukcji niż organizmy z ekosystemów głębokich oceanów (Stowe, 1983).

W miarę stopniowego zamierania aktywności smokersów dochodzi przypuszczalnie do zastępowania robaków rurkowych przez małże, o czym mogą świadczyć wyniki dwóch wypraw w 1979 i 1985 r. w rejon tzw. „Rose Garden” w Ryfście Galapagos. Po upływie prawie 6 lat gatunki *C. magnifica* i *B. thermophilus* dominowały już zdecydowanie nad *R. pachyptila* (Hessler i in., 1988 — cyt. Lutz & Kennish, 1993).

Na podkreślenie zasługuje fakt, że zróżnicowanie taksonomiczne zaznacza się nawet wzdłuż tego samego grzbietu oceanicznego, np. w obrębie Wyniesienia Wschodniopacyficznego w rejonach 13°N (brak *C. magnifica*) i 21°N (brak *Vestimentifera* *Tevnia jerichonana*, małży *B. thermophilus*, itp.) liczba wspólnych gatunków dochodzi do 42% (Tunnicliffe, 1991). Jeszcze większe zróżnicowanie notuje się wzdłuż różnych grzbietów tego samego oceanu. Przykładem jest Grzbiet Juan de Fuca, gdzie występuje tylko 20% gatunków wspólnych z Wyniesieniem Wschodniopacyficznym. Wymienione struktury zostały izolowane ok. 25 mln lat temu, w wyniku nasunięcia Płyty Północnoamerykańskiej na Grzbiet Pacyficzny. Największe zróżnicowanie taksonomiczne panuje między ekosystemami smokersów w różnych oceanach. Na przykład, nie stwierdzono obecności wieloszczetów z rodziny Alvinellidae, gigantycznych robaków rurkowych i małży (*clams*) w żadnym z pięciu dotąd odkrytych czynnych stref hydrotermalnych na obszarze północnego Atlantyku. Trzy najbardziej wysunięte na południe „oazy” są skolonizowane przez miliony „ślepych” krewetek *Rimicaris exoculata* i *Chorocaris chacei*.

Ponieważ aktywność hydrotermalna w pojedynczych strefach trwa od kilku do kilkudziesięciu lat (najwyżej do 1000 lat?), dlatego też kluczowym zagadnieniem jest wyjaśnienie sposobu migracji organizmów do nowo powstałych centrów działalności smokersów. Ekspedycje batyskafu „Alvin” zarejestrowały w jednym z badanych obszarów Grzbietu Wschodniopacyficznego wylewy lawy bazaltowej, które doprowadziły do zniszczenia kominów smokersów oraz związanych z nimi ekosystemów. Na uwagę zasługuje fakt, że po upływie dwóch lat wraz z reaktywacją procesów hydrotermalnych doszło tam do odrodzenia życia (informacja Shanksa). Prowadzone obecnie badania koncentrują się, m.in., nad wyjaśnieniem sposobu reprodukcji i migracji organizmów na etapie rozwoju larwalnego. Należy przypuszczać, że niższe organizmy tworzą formy przetrwalnikowe o zwolnionym metabolizmie.

W innych częściach oceanów (West Florida Escarpment, Luisiana Slope, Oregon Subduction Zone, Guaymas Transform Ridge, strefy subdukcji z łukami wysp zachodniej części Pacyfiku, itp.) odkryto również dziwne „oazy” życia, związane z „zimnymi wysiękami”

(*cold-water sulfide/methane seeps*), gdzie termogeniczne węglowodory (kondensaty typu ropy naftowej C₁–C₄₀) wydobywają się z osadu w postaci bąbli (Simoneit i in., 1990; Tunnicliffe, 1991 i literatura tam cytowana). W warunkach niskich temperatur i wysokich ciśnień tworzą się niekiedy bryły zestalonego gazu ziemnego i innych związków chemicznych. Podobnie jak w przypadku smokersów, „zimnym wysiękom” towarzyszą kolonie robaków rurkowych z rodzaju *Riftia*, małży z gatunku *Calyptogena pacifica*, bakterii z rodzaju *Beggiatoa*, wieloszczetów, koralu, itp. Nie odpowiadają one jednak taksonomicznie populacjom zamieszkującym ekosystemy smokersów i reprezentują odmienną ścieżkę ewolucji.

Źródła hydrotermalne związane genetycznie z „gorącymi plamami” (np. Loihi Seamount w SE części Hawajów) lub nadbrzeżnymi wulkanami podmorskimi (np. Zatoka Kraternaja u wschodnich wybrzeży Rosji), nie zawierają makrofauny typowej dla ekosystemów smokersów. W rejonie Loihi Seamount stwierdzono obecność dwóch pól hydrotermalnych pokrytych tlenkami i wodortlenkami żelaza oraz minerałami ilastymi z grupy smektytu. Źródła występowały na głębokości ok. 980 m, a temperatura wzbogaconych w dwutlenek węgla i żelazo roztworów, nie przekraczała 30°C (Karl i in., 1988). W sąsiedztwie opisanych źródeł rozwijały się maty złożone z bakterii akumulujących żelazo, przy czym same roztwory zawierały także wysokie koncentracje wymienionych mikroorganizmów. Podobne maty algowo-bakteryjne wraz z endemiczną megafauną bezkręgowców zanotowano na głębokości około 20 m w rejonie podmorskich gorących źródeł (do 96°C) Zatoki Kraternaja (Tarazov i in., 1988 — cyt. Tunnicliffe, 1991).

Zakończenie

W oceanach żyją organizmy o łącznej biomase przekraczającej biomasę wszystkich organizmów lądowych i słodkowodnych. Wielu biologów uważa strefę litoralną za korzystne środowisko powstania i rozwoju życia na Ziemi. Strefa ta zawiera duże ilości soli mineralnych, a jej wody są nagrzewane energią słoneczną podtrzymującą reakcje syntezy białka. Źródłami energii cieplnej w oceanach są również źródła hydrotermalne. Ich wysoka temperatura i wzbogacenie w składniki biogenne sprzyjają rozwojowi organizmów. Rodzą się więc pytania — czy energia słoneczna jej niezbędna do istnienia życia? oraz czy adaptacja organizmów do życia w zupełnej ciemności jest cechą nabytą w procesie ewolucji lub też pierwotną, utraconą przez organizmy zasiedlające ekosystemy wodne i lądowe? Jeśli życie powstało w wodzie, to proces biogenezy był przypuszczalnie związany z istnieniem źródeł hydrotermalnych, a nie z energią słoneczną, która jest podstawą funkcjonowania większości obecnie żyjących organizmów. Pierwszym ogniwem łańcucha pokarmowego są producenci. W ekosystemach smokersów nie mogą to być rośliny czynnie fotosyntetyzujące — ze względu na brak światła. Rolę producentów w tych strefach przejęły bakterie chemosyntetyzujące. Chemosynteza jest przypuszczalnie pierwotnym typem odżywiania, z którego w procesie ewolucji powstała fotosynteza.

Badania organizmów związanych z ekosystemami smokersów mogą doprowadzić do odkrycia nowych mikroorganizmów i enzymów, odpornych na wysokie temperatury i ciśnienia. Znajdą one zastosowanie w przemyśle spożywczym, papierniczym, kosmetycznym i farmaceu-

tycznym. Związki wytwarzane przez unikalne organizmy morskie dają szansę na leczenie wielu chorób, m.in. nowotworowych. Odkrycie nowych genów może przynieść więcej korzyści niż eksploatacja podmorskich złóż metali. Badania nowych form życia w głębiach oceanów umożliwią również poznanie tajemnic ewolucji — masowego wymierania grup taksonomicznych oraz perspektyw przetwarzania gatunku ludzkiego.

Opisane ekosystemy smokersów reprezentują alternatywny model rozwoju życia w warunkach całkowicie odmiennych od panujących na powierzchni litosfery. Czy systemy hydrotermalne stref spredingu są kolebką życia na Ziemi? i czy energia geotermiczna a nie słoneczna była tą „iskrą”, która zainicjowała jego rozwój? — pozostają jak na razie pytaniami bez odpowiedzi.

Autorzy składają podziękowanie dr P. Lamothe ze Służby Geologicznej Stanów Zjednoczonych i J. Cook z Brytyjskiej Służby Geologicznej za nadesłaną literaturę. Podobne podziękowania kieruje współautor (Z. M. Migaszewski) do dr W. C. Shanksa III ze Służby Geologicznej Stanów Zjednoczonych za dyskusję i obejrzenie filmów z wypraw „Alvina” w czasie pobytów w Denver w 1995 i 1996 r.

Literatura

- BAKER E. T. & MASSOTH G. J. 1986 — Hydrothermal plume measurements: a regional perspective. *Science*, 234: 980–982.
- B_HLKE J. K. & SHANKS III W. C. 1994 — Stable Isotope Study of Hydrothermal Vents at Escanaba Trough: Observed and Calculated Effects of Sediment-Seawater Interaction. *US Geol. Surv. Bull.*, 2022: 223–239.
- CORLISS J. B. & BALLARD R. D. 1977 — Oases of life in the cold abyss. *Natl. Geogr.*, 152: 441–453.
- DÉPOWSKI S., KOTLIŃSKI R., RGHLE E. & SZAMAŁEK K. 1998 — Surowce Mineralne Mórz i Oceanów. *Wyd. Nauk. Scholar*: 1–384.
- DESBRUYRES D., GAILL F., LAUBIER L. & FOUQUET Y. 1985 — Polychaetous annelids from hydrothermal vent ecosystems, an ecological overview. *Biol. Soc. Wash. Bull.*, 6: 103–116.
- EDMOND J. M., von DAMM K. L., McDUFF R. E. & MEASURES C. I. 1982 — Chemistry of hot springs on the East Pacific Rise and their effluent dispersal. *Nature*, 297: 187–191.
- FRY B., GEST H. & HAYES J. M. 1983 — Sulfur isotopic composition of deep-sea hydrothermal vent animals. *Nature*, 306: 51–52.
- GAILL F. & HUNT S. 1986 — Tubes of deep sea hydrothermal vent worms *Riftia pachyptila* (Vestimentifera) and *Alvinella pompejana* (Annelida). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 34: 267–274.
- GERMAN C. R., PARSON L. M. & MILLS R. A. 1996 — Mid-Ocean Ridges and Hydrothermal Activity. [W:] *Oceanography. An Illustrated Guide*, C. P. Summerhayes & S. A. Thorpe (eds.): 152–164.
- GRASSLE J. F. 1986 — The ecology of deep-sea hydrothermal vent communities. *Advances in Marine Biology*, 23: 302–363.
- GRASSLE J. F. & PETRECCA R. 1994 — Soft-Sediment Hydrothermal Vent Communities of Escanaba Trough. *US Geol. Surv. Bull.*, 2022: 327–335.
- HAYMON R. M. & KASTNER M. 1981 — Hot spring deposits on the East Pacific Rise at 21°N: preliminary description of mineralogy and genesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53: 363–381.
- HEKINIAN R., FEVRIER M., BISCHOFF J. L., PICOT P. & SHANKS W. C. 1980 — Sulfide deposits from the East Pacific Rise near 21°N. *Science*, 207: 1433–1444.
- JONES M. L. 1985 — On the Vestimentifera, new phylum: six new species, and other taxa, from hydrothermal vents and elsewhere. *Bull. Biol. Soc. Wash.*, 6: 117–158.
- KARL D. M., McMURTRY G. M., MALAHOFF A. & GARCIA M. O. 1988 — Loihi Seamount, Hawaii, a mild-plate volcano with a distinctive hydrothermal system. *Nature*, 335: 532–535.
- KENNICUTT M. C., BURKE R. A., MACDONALD I. R., BROOKS J. M., DENOUEX G. J. & MACKO S. A. 1992 — Stable isotope partitioning in seep and vent organism — chemical and ecological significance. *Chem. Geol.*, 101: 293–310.
- KIOUS W. J. & TILLING R. I. 1995 — This Dynamic Earth: the Story of Plate Tectonics. *US Geol. Surv.*: 1–77.
- LONSDALE P. & BECKER K. 1985 — Hydrothermal plumes, hot springs, and conductive heat flow in the southern trough of the Guaymas Basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 73: 211–225.
- LONSDALE P., BISCHOFF J. L., BURNS V., KASTNER M. & SWEENEY R. E. 1980 — A high-temperature hydrothermal deposit on the seabed at a Gulf of California spreading center. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 49: 8–20.
- LUTZ R. A. 1991 — The biology of deep-sea vents and seeps. *Oceans*, 34: 75–83.
- LUTZ R. A. & KENNISH M. J. 1993 — Ecology of deep-sea hydrothermal vent communities: a review. *Rev. Geophys.*, 31: 211–242.
- McMILLAN B. & MUSICK J. A. 1997 — *Oceans; Life in the deep*. MetroBooks: 1–176.
- MIGASZEWSKI Z. M. 1989 — Smokersy w świetle tektoniki płyt. *Zarys problematyki. Prz. Geol.*, 37: 125–128.
- MIGASZEWSKI Z. M. & TRELA W. 1996 — Procesy hydrotermalnie-postwulkaniczne na przykładzie Parku Narodowego Yellowstone (USA). *Pos. Nauk. Państw. Inst. Geol.*, 53: 140–143.
- PETER J. M. & SHANKS III W. C. 1992 — Sulfur, carbon, and oxygen isotope variations in submarine hydrothermal deposits of Guaymas Basin, Gulf of California, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 2025–2040.
- RONA P. A. 1986 — Mineral deposits from sea-floor hot springs. *Sci. American*, 254: 84–92.
- SHANKS III W. C., BHLKE J. K. & SEAL II R. R. 1995 — Stable Isotopes in Mid-Ocean Ridge Hydrothermal Systems: Interaction between Fluids, Minerals, and Organisms. *American Geophysical Union Monograph*. [W:] *Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions within Hydrothermal Systems*, J. Lupton, L. Mullineaux & R. A. Zierenberg (eds.): 1–27.
- SIMKIN T., UNGER J. D., TILLING R. I., VOGT P. R. & SPALL H. 1994 — This Dynamic Planet: World map of volcanoes, earthquakes, impact craters and world tectonics. *US Geol. Surv.*
- SIMONEIT B. R. T., LONSDALE P. F., EDMONDS J. M. & SHANKS III W. C. 1990 — Deep-water hydrocarbon seeps in Guaymas Basin, Gulf of Mexico. *Applied Geochemistry*, 5: 41–49.
- SPIESS F. N., MACDONALD K. C., ARWATER T., BULLARD R., CARRANZA A., CORDOBA D., COX C., DIAZ GARCIA V. M., FRANCHETEAU J., GUERRERO J., HAWKINS J., HAYMON R., HESSLER R., JUTEAU T., KASTNER M., LARSON R., LUYENDYKE B., MACDOUGALL J. D., MILLER S., NORMARK W., ORCUTT J. & RANGIN C. 1980 — East Pacific Rise hot springs and geophysical experiments. *Science*, 207: 1421–1433.
- STOWE K. 1983 — *Ocean Science*. John Wiley & Sons Inc. New York. Singapore: 1–673.
- TUNNICLIFFE V. 1991 — The biology of hydrothermal vents: ecology and evolution. *Oceanogr. Marine Biol. Ann. Rev.*, 29: 319–407.
- WEISS R. F., LONSDALE P., LUPTON J. E., BAINBRIDGE A. E. & CRAIG H. 1977 — Hydrothermal plumes in the Galapagos Rift. *Nature*, 267: 600–603.
- WOLERY T. J. & SLEEP N. H. 1976 — Hydrothermal circulation and geochemical flux at mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.*, 84: 249–276.