

BOGUSŁAW BAGIŃSKI

*Instytut Geochemii, Mineralogii i Petrologii
Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego
Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa
E-mail: b.baginski1@uw.edu.pl*

W JAKICH MIEJSCACH NA ZIEMI POJAWIAJĄ SIĘ WULKANY?

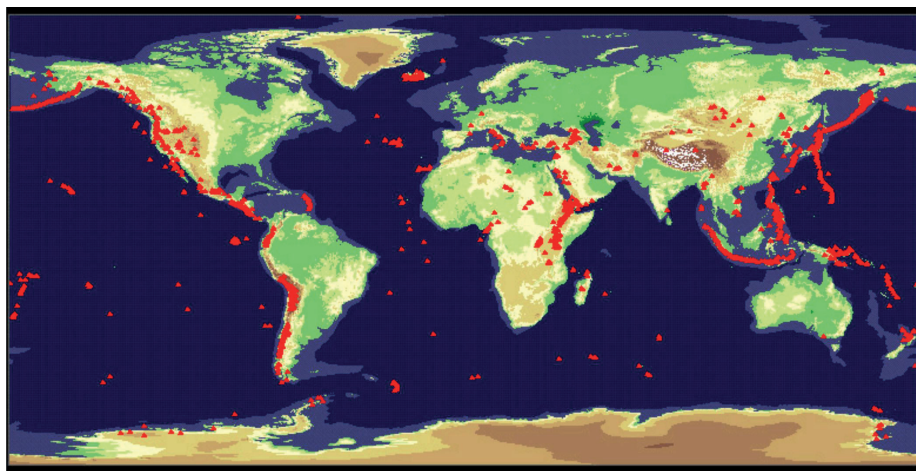
WSTĘP

Wydarzenia związane z erupcjami wulkanów w ostatnich latach i miesiącach (Eyjafjallajökull w kwietniu 2010 r. i Grímsvötn w maju 2011 r. na Islandii, Puyehue w czerwcu 2011 r. w Chile) spowodowały poważne zakłócenia lotów międzynarodowych i międzykontynentalnych i znalazły się na kilka dni w centrum uwagi mediów. Czy sytuacja związana z ostatnimi erupcjami jest nowa i zaskakująca, czy też rozwój cywilizacyjny doprowadził do sytuacji, że zwracamy na te wydarzenia szczególną uwagę, a mieszczą się one wciąż w tzw. „normie geologicznej”?

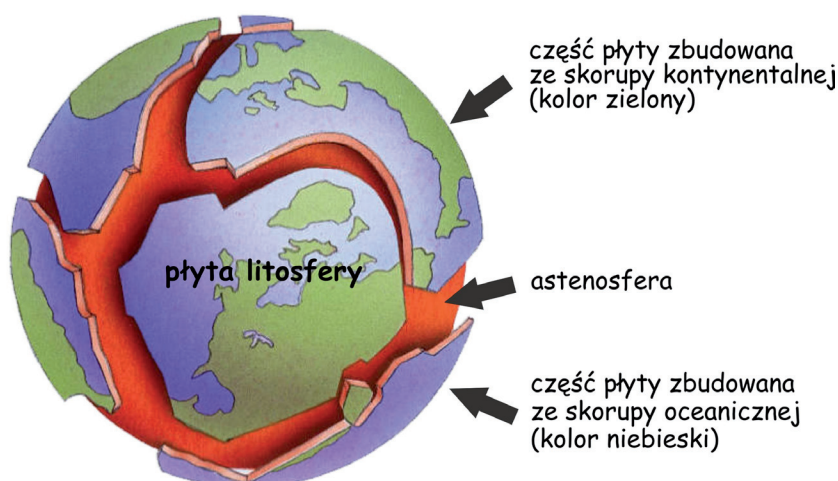
Aby odpowiedzieć na to pytanie, jak i drugie, zawarte w tytule należy przyrzeć się szeregu faktom. Otóż na świecie aktywnych

jest w chwili obecnej co najmniej 20 wulkanów, w ciągu roku wybucha zaś od 50 do 70 (wg „Global Volcanism Program” prowadzony przez Smithsonian). Wulkan aktywny, w nomenklaturze wulkanologicznej, oznacza taki wulkan, który jest aktywny obecnie lub był w czasach historycznych. Część z nich, jak np. Stromboli na Wyspach Liparyjskich (Włochy), jest nieprzerwanie aktywna od kilkudziesięciu tysięcy lat, część wybucha jednokrotnie, a ich aktywność trwa zaledwie kilka dni. Część z wulkanów wyrzuca olbrzymie ilości pyłów na wysokość kilkunastu kilometrów (Eyjafjallajökull na Islandii), z innych lava wypływa spokojnie na podobieństwo płynącej wody (np. Kilauea na Hawajach).

Rodzaj erupcji zależy w dużej mierze od składu chemicznego i mineralnego materiału, który ulega erupcji, to zaś ściśle wiąże się z miejscem pojawienia się wulkanu. Wracamy więc do kwestii zawartej w tytule – w jakich miejscach na Ziemi pojawiają się wulkany? Łatwo zauważyć na Ryc. 1, że pojawianie się wulkanów związane jest z określonymi strefami na naszym globie.



Ryc. 1. Mapa rozprzestrzenienia głównych wulkanów na Ziemi wg Global Volcanism Program (wg SIMKIN i współaut. 2010). Czerwone punkty to miejsca występowania wulkanów.

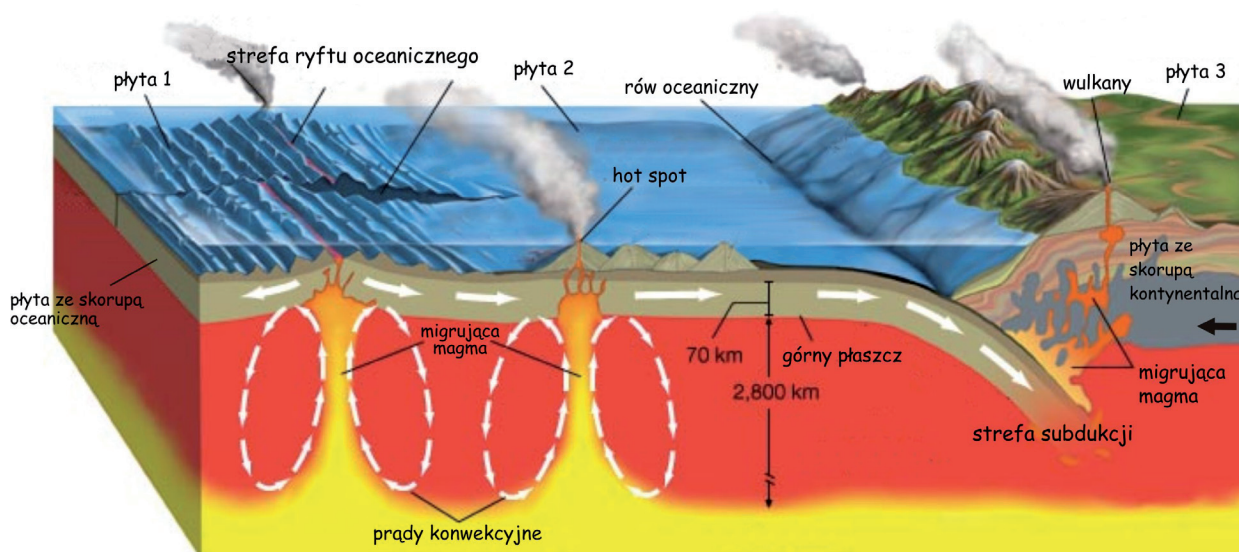


Ryc. 2. Schemat ilustrujący budowę zewnętrznej partii skorupy ziemskiej. Źródło: <http://hamertech.wikispaces.com/Plate+Tectonics>.

Przedstawienie głównych stref występowania aktywności wulkanicznej na Ziemi wymaga krótkiego wstępu odnośnie tzw. teorii tektoniki płyt. Jej prekursorem był Alfred Wegner, niemiecki geofizyk, który na początku ubiegłego wieku przedstawił teorię dryftu kontynentów. W latach 70. została sformułowana teoria tektoniki płyt, która zakłada powolny ruch (dryft) nie tylko ruch płyt litosferycznych, lecz również ich przyrastanie (w strefach ryftów) i zanikanie (w strefach subdukcji). Chłodne i sztywne płyty litosfery przemieszczają się po astenosferze zbudowanej z

materiału cięższego, gorętszego i bardziej elastycznego (Ryc. 2). Istnieją dwa zasadnicze rodzaje składników litosfery, składających się na płyty. Grubsza jest skorupa kontynentalna (ok. 30–80 km miąższości), zbudowana głównie z tzw. materiału kwaśnego, na który składają się przede wszystkim takie składniki mineralne jak kwarc, skalenie alkaliczne oraz łuszczyki (przede wszystkim muskowit oraz biotyt). Drugi rodzaj, to skorupa oceaniczna, wyraźnie cieńsza (zwykle ok. 7–8 km miąższości), ale zawierająca w swoim składzie cięższe i bardziej zasadowe składniki, takie jak pirokseny, oliwiny, zasadowe plagioklasy czy

amfibole. Ruch płyt litosferycznych stanowi o globalnych zjawiskach geologicznych zachodzących w litosferze, a spowodowany on jest konwekcją ciepła z głębszych partii Ziemi ku powierzchni (Ryc. 3). Ruch płyt litosfery względem siebie, ich wzajemne kolizje, zjawiska rozpadu płyt (ryfting) prowadzą do szeregu zjawisk geologicznych, w tym wulkanizmu. Właśnie na ten aspekt chciałbym zwrócić baczniejszą uwagę Czytelnika. Aby usystematyzować nieco procesy prowadzące do poja-



Ryc. 3. Schemat wycinka zewnętrznej partii skorupy ziemskiej z zaznaczeniem podstawowych zjawisk geotektonicznych zachodzących pomiędzy różnymi typami płyt litosfery (Encyklopedia Britannica. 2007).

wienia się działalności wulkanicznej na powierzchni Ziemi (lub pod przykryciem wód oceanicznych) należy połączyć je z podstawowymi procesami geotektonicznymi z udziałem płyt litosfery.

Procesy wulkanizmu zachodzą, najprościej rzecz ujmując, w tych miejscach skorupy ziemskiej, gdzie roztopione skały lub ich de-

rywaty (pył wulkaniczny, gazy wulkaniczne) mogą wydobywać się na powierzchnię Ziemi. Tymi miejscami są zwykle strefy styku płyt litosfery (Ryc. 3), lub strefy ich fragmentacji (rozpadu dużych płyt na mniejsze). Prześledźmy pokrótce jak różne sytuacje tektoniczne wpływają na pojawienie się stopów magmowych i rozwój procesów wulkanicznych.

PROCESY SUBDUKCJI (WCIAĞANIA PŁYTY POD PŁYTĘ I KOLIZJI)

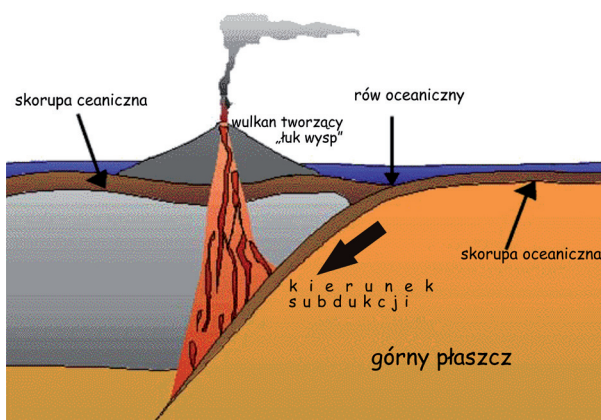
SUBDUKCJA PŁYTY OCEANICZNEJ POD PŁYTĘ OCEANICZNĄ

W tej sytuacji (w uproszczeniu) duże ilości skał zasadowych wciągane są (dzieje się to pod dnem oceanu) na głębokość nawet kilkudziesięciu kilometrów pod inną porcję skalną o podobnym składzie (Ryc. 4). Należy zwrócić uwagę, że subdukowana (wciągana w głąb) płyta „niesie na sobie” porcję osadów głębokomorskich o składzie wyraźnie różnym od składu samej skorupy oceanicznej. Razem z materiałem skalnym subdukowane są również znaczne ilości wody morskiej, która ma duże znaczenie w obniżaniu temperatury topnienia pogrążającego się materiału skalnego. Właśnie ten czynnik powoduje, że już na głębokości kilkudziesięciu kilometrów rozpoczyna się generacja stopów o składzie zasadowym i pośrednim, które jako nieco lżejsze od otoczenia, w którym powstają wędrują ku górze dając materiał budujący wulkaniczne łuki wysp (przykładem mogą tu być wyspy japońskie, filipińskie, mariańskie czy Tonga). Wspomniane procesy zachodzą

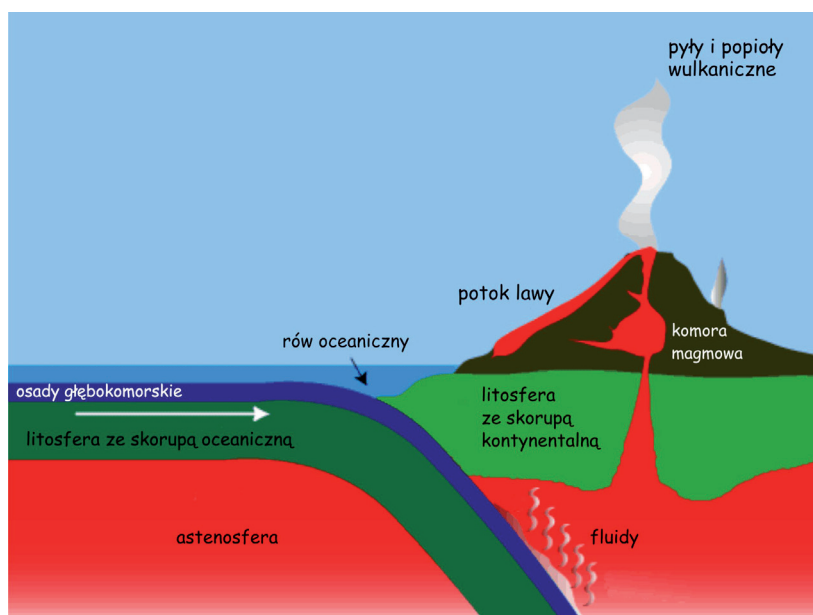
w ciągu tzw. czasu geologicznego, co oznacza, że nie są one zwykle możliwe do zaobserwowania w trakcie naszego życia. Możemy je jednak dość precyzyjnie zmierzyć. Szybkość procesów subdukcji mierzy się zwykle w centymetrach na rok, co oznacza, że zjawiska te trwają miliony lat.

SUBDUKCJA SKORUPY OCEANICZNEJ POD SKORUPĘ KONTYNENTALNĄ

W przypadku pogrążania się litosfery ze skorupą oceaniczną pod płytę, na której znajduje się skorupa kontynentalna wulkanizm jest również ważnym czynnikiem kształtującym powstające struktury (Ryc. 5). Mamy tu jednak zasadniczą różnicę w grubości płyty litosfery oraz jej składzie chemicznym i mineralnym. Magma na swej drodze na powierzchnię ma o wiele dłuższą drogę (nawet ponad 100 km), podczas której mogą zachodzić różne procesy zmieniające jej skład. Przede wszystkim nadtapiana i asymilowana jest część skał skorupy kontynentalnej, często tworzą się pośrednie rezerwuary magmy, w których zachodzi jej różnicowanie się, głównie na skutek grawitacji (frakcjonalna krystalizacja). Nierzadko dochodzi do mieszania się kolejnych porcji magmy, których skład chemiczny jest różny, co prowadzi do tzw. mixingu i powstawania stopów o chemicznie pośrednim składzie. Dlatego w tych strefach spotkać można różnorodne skały wulkaniczne, powstające w wyniku mieszania się pochodzących z górnego płaszcza stopów bazaltowych z powstającymi z wytopienia części skorupy kontynentalnej stopami ryolitowymi. Powstają więc magmy od bazaltowych, nie skontaminowanych (nie zanieczyszczonych) materiałem kontynentalnym, poprzez bardzo charakterystyczne dla tej sytuacji geotektonicznej andezyty (o tzw. obojętnym chemizmie), aż do kwaśnych dacytów i ryolitów, gdzie dominuje przetopiony materiał ze skorupy kontynentalnej. Wskutek pro-



Ryc. 4. Schemat strefy subdukcji płyty litosfery ze skorupą oceaniczną pod inną płytę tego samego rodzaju. Źródło: <http://www.cotf.edu/etc/modules/volcanoes/islandarc.html>.



Ryc. 5. Schemat strefy subdukcji płyty litosfery ze skorupą oceaniczną pod płytę zawierającą skorupę kontynentalną. Źródło: <http://sio.ucsd.edu/volcano/about/subduction.html>.

cesów różnicowania się magmy możliwe są sytuacje, w których z tego samego wulkanu generowana jest magma o różnym składzie chemicznym (tzw. wulkanizm bimodalny). Typowymi obszarami, gdzie mamy do czynienia z wulkanizmem związanym z subdukcją skorupy oceanicznej pod skorupę kontynentalną jest zachodnie wybrzeże Ameryki Południowej, gdzie od ponad dwudziestu milionów lat trwa pogrążanie się płyty litosfery ze skorupą oceaniczną (płyta Nazca) pod płytę litosfery ze skorupą kontynentalną (płyta południowoamerykańska). Zjawisku temu towarzyszą liczne erupcje wulkaniczne (ostatnio

w czerwcu w południowym Chile ponownie eksplodował wulkan Puyehue).

SUBDUKCJA SKORUPY KONTYNENTALNEJ POD SKORUPĘ KONTYNENTALNĄ (KOLIZJA KONTYNENTÓW)

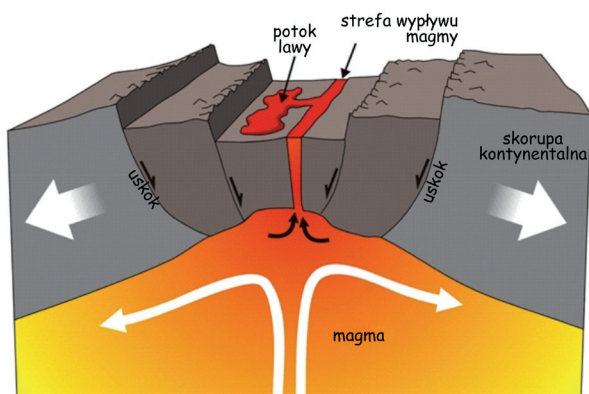
Proces ten charakteryzują przede wszystkim zróżnicowane zjawiska metamorfizmu. W najwyższych facjach metamorfizmu (facja granulitowa) mogą być generowane stopy magmowe, przeważnie kwaśne, jednak zwykle nie dostają się one na powierzchnię, zastygając kilka do kilkunastu kilometrów pod powierzchnią i tworząc masywy plutoniczne.

PROCESY RYFTINGU (ROZCIĄGANIA I ROZPADU)

RYFTING W OBRĘBIE SKORUPY KONTYNENTALNEJ

Generalnie w strefach rozciągania zarówno skorupy kontynentalnej (Ryc. 6), jak i oceanicznej generowane są przede wszystkim magmy o składzie chemicznym zbliżonym do bazaltów. Taki w przybliżeniu skład stopu jest typowy dla wytapiania części górnego płaszczu. W strefie rozciągania płyty ze skorupą kontynentalną dochodzi najpierw do dużego ścienienia skorupy, a potem do jej pęknięcia i powstania ryftu. Postępujące rozrywanie skorupy kontynentalnej i rozsuwanie całej płyty litosferycznej rozpoczyna proces tworzenia nowej skorupy oceanicznej i oceanicznego ryftu. Magma w strefie ryftingu

skorupy kontynentalnej ma w przeważającej objętości skład zbliżony do bazaltu. Procesy kontaminacji materiałem kontynentalnym zachodzą, ale na mniejszą skalę niż w przypadku ryftingu w obrębie skorupy oceanicznej. Pewne objętości skorupy kontynentalnej ulegają topieniu wskutek oddziaływania migrującej ku górze gorącej magmy bazaltowej, dając kwaśne stopy ryolitowe i dacytowe, które mogą w dalszej kolejności ulegać interakcji z magmą bazaltową. Ilości magmy wylewające się w strefach ryftu kontynentalnego (zwłaszcza w strefach, gdzie występują proste, głębokie pęknięcia w skorupie kontynentalnej) są wielokrotnie większe niż w przypadkach przedstawionych wcześniej, a dotyczących subdukcji. Dość powiedzieć, że pokryw

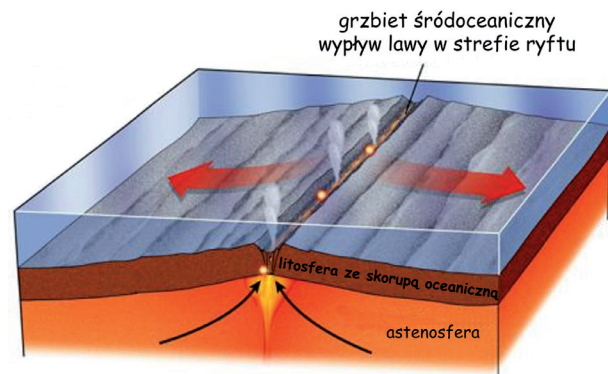


Ryc. 6. Schemat strefy ryftu kontynentalnego z wydostającą się na powierzchnię magmą bazaltową. (wg CLAGUE i współaut. 2006).

law bazaltowych powstałe wskutek ryftingu płyty kontynentalnej ok. 65 mln lat temu na terenie obecnych Indii tzw. trapy Dekanu zajmowały pierwotnie powierzchnię niemal pięciokrotnie większą od powierzchni naszego kraju (obecnie w wyniku erozji pozostało jedynie ok. 512 000 km²) a ilość magmy jaka wylała się wtedy na powierzchnię wynosiła ok. 500 tys. km³. Dzieje się tak dlatego, że zasadowa magma bazaltowa ma niewielką lepkość i nie posiada charakteru eksplozywnego, wylewa się więc, a nie powoduje eksplozji, jak to ma często miejsce w przypadku bardziej kwaśnych odmian, zwłaszcza magm ryolitowych (więcej na temat typów magmy i oraz form i produktów PAŃCZYK, w tym ze-szytcie KOSMOSU).

RYFTING W OBRĘBIE SKORUPY OCEANICZNEJ (TWORZENIE SIĘ NOWEJ SKORUPY OCEANICZNEJ)

Ryfting w obrębie skorupy oceanicznej, to sytuacja geotektoniczna, w której generowane są największe ilości magmy (Ryc. 7), która po zastygnięciu buduje nowe objętości świeżej skorupy oceanicznej. Rozciąganie stref skorupy oceanicznej, która jest stosunkowo cienka (grubość jej nie przekracza



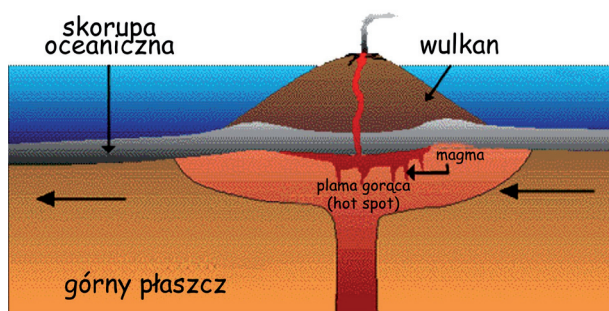
Ryc. 7. Schemat strefy ryftu w obrębie skorupy oceanicznej (wg TARBUCK i współaut. 2006).

zwykle 7–8 km) prowadzi do powstawania stref rozłamowych, z których wylewa się na powierzchnię oceanu magma generowana przez częściowe topienie skał budujących górny płaszcz. Topienie to zachodzi zwykle na skutek spadków ciśnienia lub pojawienia się roztworów wodnych (fluidów) w górnym płaszczu. Skład powstającej w strefach ryftu oceanicznego magmy jest zazwyczaj określany jako bazalt MORB (ang. Mid Ocean Ridge Basalt). Skład takiego bazaltu jest wzbogacony w tzw. pierwiastki niekompatybilne (ALBOREDE 2003), czyli takie, które nie wchodzą w strukturę minerałów tworzących kryształy, ale koncentrują się głównie w szkliwie wulkanicznym stanowiącym zazwyczaj podstawową masę skały. Są to K, Rb, Cs, Sr, Ba, Zr, Nb, Hf, pierwiastki ziem rzadkich (REE), Th, U i Ta. Strefy powstawania nowej skorupy oceanicznej są największymi (przede wszystkim ze względu na ich długość) strukturami geologicznymi na Ziemi. Ich nieprzerwana długość wynosi bowiem 40 000 km a najdłuższą jej część stanowi grzbiet śródoceaniczny (EWING i współaut. 1953) ciągnący się na przestrzeni ok. 20 000 km.

STREFY PLAM GORĄCA („HOTSPOT”)

Mianem „hotspotu” określane są miejsca w obrębie litosfery, gdzie pojawiają się wyraźne anomalie termiczne spowodowane pojawieniem się silnego strumienia ciepła z górnego płaszczu (Ryc. 8), który w tych miejscach pojawia się wyjątkowo płytko (tzw. pióropusze lub diapiry płaszczu). Sytuacja

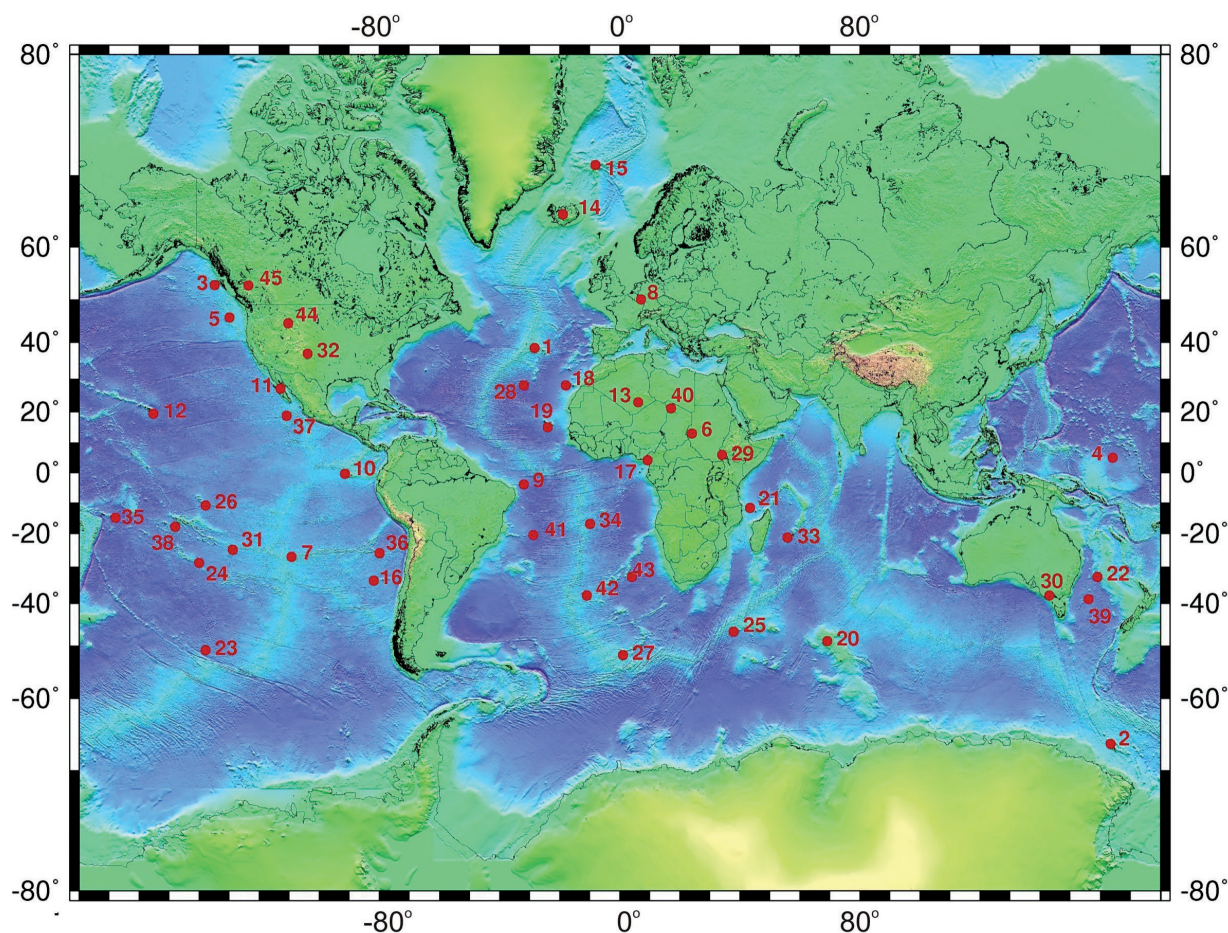
taka powoduje intensywne topienie litosfery i często prowadzi do pojawienia się w tych strefach intensywnej działalności wulkanicznej. Rodzaj i styl wulkanizmu zależy od składu powstającej magmy, a ten od miejsca i rodzaju skał (składu chemicznego), które podlegają topieniu. Ponieważ „hotspoty” po-



Ryc. 8. Schemat geologiczny występowania plamy (punktu) gorąca czyli tzw. „hotspot”.. Źródło: <http://www.cotf.edu/ete/modules/volcanoes/hotspot.html>

jawiają się w różnych miejscach (lokalizacja największych przedstawiona jest na Ryc. 9) zarówno (choć zdecydowanie rzadziej) w obrębie skorupy kontynentalnej (Yellowstone nr 44 na Ryc. 9), Tibesti w Afryce (nr 40 na Ryc. 9), jak i oceanicznej (Hawaje (nr 12 na

Ryc. 9), Galapagos (nr 10 na Ryc. 9), Azory (nr 1 na Ryc. 9) czy Islandia (nr 12 na Ryc. 9)). Magma pojawiająca się podczas erupcji wulkanicznych w strefach „hotspotów” ma zasadniczo, w strefach znajdujących się w obrębie skorupy oceanicznej, skład bazaltowy. W obszarach skorupy kontynentalnej bazaltowa magma będąca źródłem ciepła topi duże objętości skorupy kontynentalnej prowadząc do powstawania głównie magmy riolitowej. Mogą powstawać również inne typy magm pośrednich, w wyniku mieszania się skrajnych składników (bazaltowego i ryolitowego). Proces wytapiania skał skorupy kontynentalnej przez gorący diapir płaszcza może prowadzić do powstawania gigantycznych rezerwuarów kwaśnej, eksplozywnej magmy. Tak działo się i dzieje w obszarze Yellowstone, gdzie kilkakrotnie eksplodował superwulkan, a obecnie „napęnia się” powoli kolejny wielki zbiornik magmy, który nieuchronnie eksploduje w nieodległej przyszłości geologicznej (więcej na ten temat w AWDANKIEWICZ, w tym zeszycie KOSMOSU).

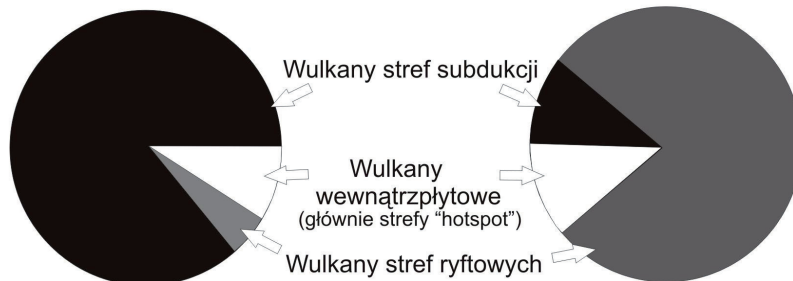


Ryc. 9. Mapa prezentująca miejsca występowania najbardziej wyrazistych punktów gorąca („hot-spot”). Źródło: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hotspots.jpg> wg STEINBERGER 2000.

PODSUMOWANIE

Erupcje w czasach historycznych

n=5337



Ilość wyrzuconej lawy/tefry

n~4 km³/rok

stycznych w porównaniu z mniej licznymi wulkanami stref ryftowych, gdzie ilości wypływającej magmy są olbrzymie (przypominam wspomniane wcześniej trapy Dekanu).

Wracając zatem do pytań postawionych na początku artykułu możemy stwierdzić, że występowanie wulkanów powiązane jest ze ściśle określonymi strefami geotektonicznymi

Ryc. 10. Diagramy prezentujące częstość występowania oraz ilość na Ziemi. Oznacza to, że produktów działalności wulkanicznej w powiązaniu z głównymi strefami pojawiania się wulkanów (wg SIMKIN i SIEBERT 1994).

Interesująco wygląda zestawienie ilości erupcji wulkanicznych, jakie miały miejsce w czasach historycznych, w powiązaniu z miejscem pojawiania się wulkanów. Jak widać na Ryc. 10 (lewy diagram) większość wulkanów (liczbowo) występuje w strefach subdukcji (jak np. chilijski wulkan Puyehue, który eksplodował w czerwcu 2011 r.). Mniej jest ich w obrębie „hotspotów” (np. wulkany islandzkie) czy w strefach ryftów. Jednak jak wskazuje Ryc. 10 (prawy diagram), wulkany stref subdukcji „produkują” stosunkowo niewielkie ilości magmy i materiałów pirokla-

dzic, że zarówno Islandia jak i Chile, gdzie zanotowano ostatnio spektakularne (w sensie zauważone powszechnie przez media) erupcje, leżą w strefach „normalnej” działalności wulkanicznej. Czy taka sytuacja może się zmienić? Zapewne tak, może to nastąpić w związku z mobilnością płyt litosfery, ale zmian należy oczekiwać w przeciągu czasu geologicznego, liczonego w setkach tysięcy i milionach lat. Oznacza to, że w Polsce w najbliższym czasie żaden wulkan na pewno nie wybuchnie.

W JAKICH MIEJSCACH NA ZIEMI POJAWIAJĄ SIĘ WULKANY?

Streszczenie

Erupcje wulkaniczne w ciągu ostatnich dwóch lat przyciągnęły, za sprawą mediów, uwagę miliardów ludzi. Stało się to przede wszystkim z powodu zakłóceń ruchu lotniczego spowodowanych emitowanym przez wulkany pyłem wulkanicznym, który dostał się aż na granicę stratosfery. Pamiętajmy, że co roku na Ziemi wybucha kilkadziesiąt wulkanów. Większość erupcji nie jest w ogóle komentowana, a nawet zauważana. Media nagłaśniają temat nie ze względu na szczególne niebezpieczeństwo tych erupcji dla życia i zdrowia ludzi (choć te oczywiście jest duże), ale ze względów ekonomicznych.

Pojawianie się nowych erupcji wulkanicznych z punktu widzenia geologii jest, generalnie rzecz ujmując, przewidywalne. Wulkany tworzą się, z punktu widzenia geotektoniki, w określonych miejscach Ziemi. Do miejsc tych należą strefy subdukcji, strefy ryftingu i strefy występowania tzw. punktów czy płam gorąca (hotspot). W niniejszym artykule zjawiska te są nieco przybliżone czytelnikowi. Zarysowany jest również związek pomiędzy ilością pojawiających się wulkanów, ich produktywnością (w sensie ilości generowania magmy) a pozycją geotektoniczną w jakiej ta działalność wulkaniczna ma miejsce.

WHERE DO VOLCANOES OCCUR ON THE EARTH?

Summary

The substantial disruption to air traffic resulting from several volcanic eruptions during the last two years has focused society's attention on volcanoes. Many are asking the questions: are we safe? is the present situation anomalous? Every year roughly 60 eruptions take place on Earth and the last two years were no exception to the rule. Geologist understand very well where we can expect volcanoes to appear. The answer is given by plate tectonics, a

scientific theory that describes the large scale motions of the Earth's lithosphere. Geological settings named subduction zones, rift zones and hotspots are where volcanoes are formed. The paper gives a short description of these environments and shows the connections between tectonic setting and magma budget and productivity, and between tectonic setting and frequency of eruption.

LITERATURA

- ALBARÈDE F., 2003. *Geochemistry: an introduction*. Cambridge University Press.
- CLAGUE J., YORATH C., FRANKLIN R., TURNER B., 2006. *At Risk: Earthquakes and Tsunamis on the West Coast*. Tricouni Press.
- EWING W. M.; DORMAN H. J.; ERICSON J. N., HEEZEN B. C., 1953: *Exploration of the northwest Atlantic mid-ocean canyon*. Bull. Geol. Soc. Am. 64, 865-868.
- SIMKIN T., SIEBERT L., 1994. *Volcanoes of the World*, 2nd edition. Geoscience Press, Tucson, 349 s.
- SIMKIN T., SIEBERT L., KIMBERLY P., 2010. *Volcanoes of the World*. Wyd. 3. University of California Press.
- STEINBERGER B., 2000, *Plumes in a convecting mantle: Models and observations for individual hotspots*. J. Geophys. Res. 105, 11127-11152.
- TARBUCK E. J., LUTGENS F. K., TASA D., 2006. *Earth Science*. Wyd. 11. Prentice Hall.