

## Hot spoty a ekspansja Ziemi

**Agata Kowalewska**

*Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii, Instytut Oceanografii  
agata.kowalewska96@interia.pl*

**Tutor: dr Ewa Szymczak**

*Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii, Instytut Oceanografii,  
Zakład Geologii Morza*

**Słowa kluczowe** – *hot spoty, pióropusze płaszczu, strefy nieciągłości, tektonika płyt, ekspansja Ziemi, konwekcja*

Naukowcy od lat próbują wyjaśnić genezę powstawania pióropuszy płaszczu oraz hot spotów. Wiele pytań rodzi także zjawisko konwekcji we wnętrzu Ziemi i występowanie stref nieciągłości. Najwięcej trudności sprawia jednak pogodzenie istnienia plam gorąca z teorią tektoniki płyt litosfery. Nie są one bowiem bezpośrednio związane z procesami tektonicznymi, a niekiedy wręcz są z nimi sprzeczne. Wydaje się, że teoria ta niedostatecznie tłumaczy mechanizmy konwekcji oraz powstawania hot spotów. Rozwiązaniem może okazać się budząca liczne kontrowersje hipoteza ekspandującej Ziemi.

### Definicja i podział plam gorąca

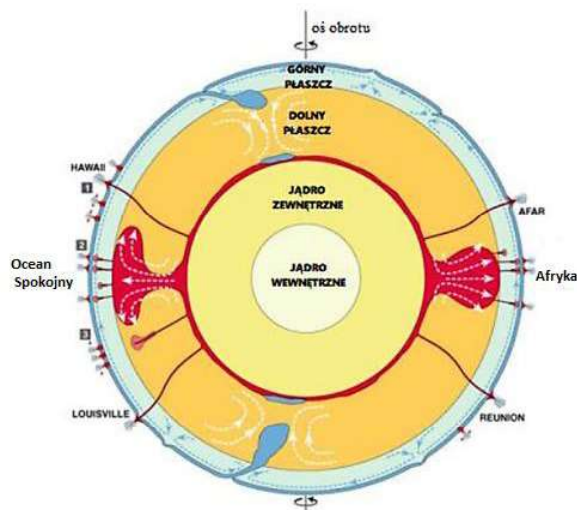
Hot spoty, inaczej plamy gorąca to wybrzuszenia na powierzchni Ziemi, powstałe w wyniku konwekcji we wnętrzu planety (Wilson, 1963). Strumienie gorącej materii pochodzącej z płaszczu ziemskiego, zwane pióropuszcami płaszczu (Morgan, 1972), posiadające mniejszą lepkość i gęstość, ale za to wyższą temperaturę niż materia, która je otacza, przez co unoszą się w kierunku powierzchni Ziemi. Po zetknięciu z nią, podgrzewają ją aż do powstania nabrzmienia o średnicy około 1 000–2 000 km (Cwojdzński, 2004). Każdy pióropuszc płaszczu jest złożony z ogona i chłodniejszej od niego, ale bardziej lepkiej głowy (Choudhuri i Nemcok, 2017). Z hot spotami związane są zjawiska wulkaniczne, między innymi tworzenie łańcuchów wysp wulkanicznych oraz pokryw bazaltowych (Cwojdzński, 2004).

Wyróżnia się kilka rodzajów hot spotów (Ryc. 1). Pod Afryką i Oceanem Spokojnym znajdują się wielkie wybrzuszenia, określane jako „superswells”. Pióropusze, które je utworzyły, prawdopodobnie powstały na granicy jądra zewnętrznego i płaszczu dolnego (Burke, 2011). Z granicy tej pochodzą również pióropusze tworzące „primary hotspots”. „Secondary hotspots” wywodzą się natomiast ze strumieni mających swój początek między płaszczem dolnym a górnym. Ponadto wyróżnia się również „tertiary hotspots”, które tworzy materia wznosząca się z granicy między astenosferą a litosferą (Courtillot i in., 2003).

### Konwekcja a strefy nieciągłości

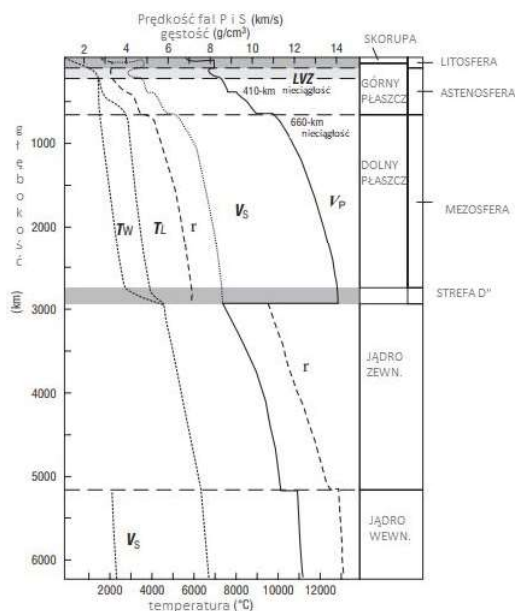
#### Strefy nieciągłości

Konwekcja we wnętrzu Ziemi budzi wiele kontrowersji poczynając od genezy poprzez mechanizm oraz jej rodzaje. Obecnie trwa bardzo intensywna debata, mająca na celu dogłębne zrozumienie i wyjaśnienie przyczyn oraz źródła wzniosów gorącej materii. Prawdopodobnie związane są one ze strefami nieciągłości, które oddzielają od siebie geosfery (Ryc. 2). Wiążą się one ze skokowymi zmianami prędkości fal podłużnych i poprzecznych, a także temperatury, gęstości i lepkości. Najpłytsza nieciągłość, Mohorovicica znajduje się na głębokości około 40 km pod kontynentami oraz 5–8 km pod oceanami i oddziela skorupę ziemską od płaszczu. Około 410 km pod powierzchnią występuje nieciągłość Golicyna, która charakteryzuje się różnicą prędkości fal wynoszącą 1 km/s. Powstała ona w wyniku przemiany fazowej oliwinów oraz piroksenów i oddziela astenosferę od mezosfery. Na głębokości około 660 km znajduje się



Ryc. 1. Przekrój przedstawiający dynamikę Ziemi i źródła trzech typów hot spotów:  
 1 – „primary plumes”, 2 – „secondary plumes”, 3 – „tertiary plumes”  
 (opracowano na podstawie Choudhuri i Nemcok, 2017)

nieciągłość Repettiego, rozdzielająca płaszcz dolny i górny. Za skokowe zmiany prędkości odpowiedzialna jest w tym przypadku przemiana spinela magnezowego w perowskit. Gęstość materii rośnie tutaj o 8%, natomiast prędkość o 5–7%. Ważną granicą mineralogiczną i termiczną jest strefa D<sup>''</sup>, która znajduje się pomiędzy płaszczem a jądrem ziemskim, ok. 2 800–2 900 km pod powierzchnią. Jej górna część jest wybrzuszona. Wzrost prędkości fal jest już tu wolniejszy, a gęstość znacznie maleje, ale u jej podstawy następuje gwałtowna zmiana parametrów chemicznych i fizycznych. Temperatura (ok. 5 000°C) nie jest jednak wystarczająca by stopić perowskit i magnesiowustyt (ferroperyklaz). Wysokie temperatury pochodzą prawdopodobnie od ciepła generowanego w jądrze Ziemi oraz z mieszania się stopionego żelaza (jądro) z wysoko-ciśnieniową fazą krzemionkową z płaszczu (Cwojdzński, 2004).



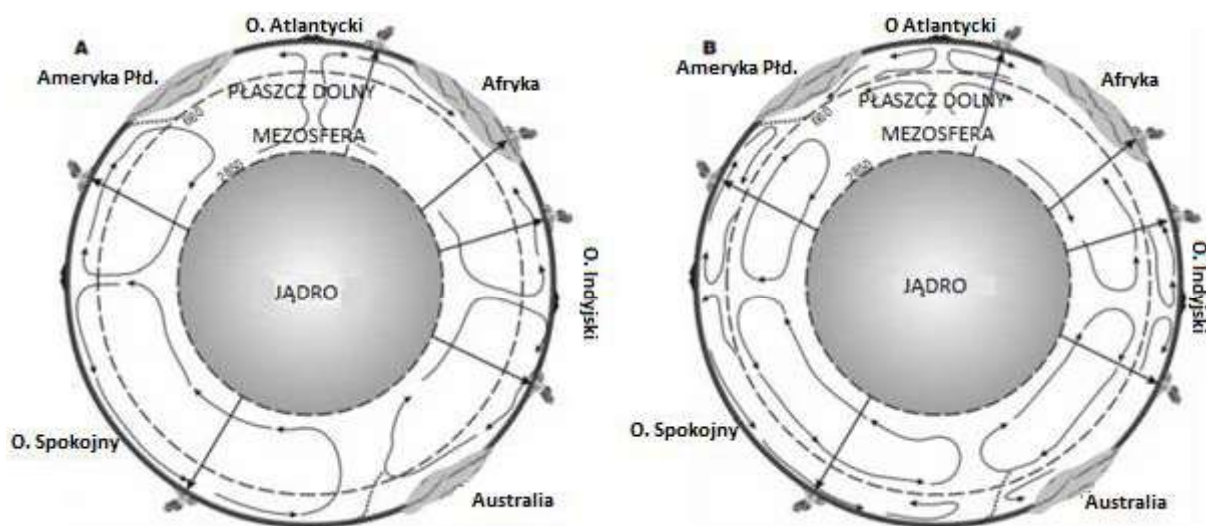
RRyc. 2. Wewnętrzna struktura Ziemi i zmiana parametrów (VP – prędkość fal podłużnych, VS – prędkość fal poprzecznych, TW – temperatura dla modelu jednej konwекcji, TL – temperatura dla modelu dwóch konwекcji)  
 (opracowano na podstawie Cwojdzński, 2004)

Naukowcy prowadzą także intensywne badania strefy niskich prędkości fal poprzecznych - Low Velocity Zone (LVZ). Charakteryzuje się ona również silną dyspersją energii fal oraz wysokim przewodnictwem energetycznym. Jej górna granica występuje nieopodal granicy litosfery z astenosferą, a dolna na głębokości około 200 km, utożsamiana niekiedy z nieciągłością Lehmana i związana z ubywaniem płynnej

frakcji magmy. Według teorii tektoniki płyt litosfery LVZ umożliwia poziomy ruch płyt litosferycznych. Dzięki niskiej lepkości płyty mogą „ślizgać” się na niej z niewielkim tarcieniem (Condie, 2011).

### Modele konwekcji

Podstawowym problemem związanym ze wzniosem materii jest niepewność czy istnieje jedna, czy też dwie współdziałające konwekcje (Ryc. 3). Model jednej konwekcji zakłada istnienie dużej zamkniętej komórki konwekcyjnej w płaszczu ziemskim (Ryc. 3A), która zaczyna się od okolic strefy D'' i dociera do astenosfery. Na głębokości około 660 km znajduje się jednak bariera wymiany materii, co oznacza, że konwekcja jest tu bardzo powolna. Fakt ten czyni bardzo trudnym do wytłumaczenia miejscami bardzo szybki ruch płyt litosferycznych. Natomiast według drugiego modelu (Ryc. 3B) istnieją dwie osobne strefy konwekcji, w płaszczu dolnym (dystrybucja materii i ciepła w mezosferze) oraz górnym (kontrola ruchu



Ryc. 3. Dwa modele konwekcji: A – jedna konwekcja w całym płaszczu, B – dwie konwekcje (opracowano na podstawie Cwojdzński, 2004)

płyt). Jednak obecność nieciągłości związanych ze strefą LVZ oraz korzeni płyt kontynentalnych na głębokości od 250 do 450 km podważa słuszność tej teorii (Cwojdzński, 2004).

### Hot spoty a teoria tektoniki płyt litosfery

Cały czas podejmowane są próby pogodzenia hipotez o występowaniu pióropuszy płaszczu i hot spotów z teorią tektoniki płyt litosfery. Pewne rozbieżności są jednak bardzo trudne do wytłumaczenia i od lat powodują wiele sporów wśród geologów i geofizyków. Podstawowym problemem jest stacjonarna pozycja pióropuszy płaszczu przy założeniu konwekcji. Zastanawiające jest, dlaczego nie podlegają one deformacjom spowodowanym prądami konwekcyjnymi. Poza tym stacjonarny pióropusz teoretycznie powinien zawsze tworzyć łańcuch wysp wulkanicznych w wyniku ruchu płyt, podobnie jak na Hawajach. Tymczasem model hawajski spotykany jest bardzo rzadko, a nawet nie pokrywa się z lokalną tektoniką. Między innymi wiek poszczególnych wulkanów nie jest zgodny z oczekiwanym. Ponadto model konwekcji nie jest zgodny z danymi dotyczącymi lepkości materii oraz obecności sejsmicznych nieciągłości. Zagadkowa jest również możliwość poziomego ruchu płyt nad strefą LVZ, która jest nieciągłą warstwą, zanikającą pod głęboko osadzonymi korzeniami kontynentalnymi. Kontrowersje wzbudza także promieniście rosnący dystans między grzbietami śródoceanicznymi i Afryką oraz ich niezgodność z danymi geologicznymi. Grzbiet Śród atlantycki oraz Środkowoindyjski i Arabsko-Indyjski początkowo były oddzielone tylko przez kontynent afrykański. Aktualnie dzieli je długość połowy Oceanu Atlantycznego i 1/3 Oceanu Indyjskiego. Również odległość między hot spotami w sąsiadujących ze sobą płytach. Oprócz tego problemem jest fakt, iż dostawa materii i energii z jądra do płaszczu ziemskiego nie jest wystarczająco rekompensowana przez wymianę pomiędzy płaszczem dolnym a górnym (Cwojdzński, 2004).

Powyższe wątpliwości zaczęły skłaniać do szukania zupełnie nowych modeli, takich jak multikonwekcja, zwana również modelem tektoniczno-konwekcyjnym (Kellog i in., 1999). Między innymi właśnie dzięki temu powstał opisany wyżej podział hot spotów. Stwierdzono bowiem, że nie każdy pióropusz ma swój początek w tym samym miejscu. Nowoczesne modele biorą pod uwagę możliwość braku istnienia zamkniętej komórki konwekcyjnej. Prądy konwekcyjne byłyby lokalne i wznosiły się przede wszystkim

pod grzbietami w wyniku ruchów materii płaszczu. Materia powracałaby do strefy D” w wyniku zapadania postsubdukcyjnego. Nie wyjaśnia to jednak do końca między innymi ruchu kontynentów głęboko zakorzenionych w płaszczu oraz tego, w jaki sposób subdukujące fragmenty litosfery przekraczają strefę nieciągłości znajdującą się na głębokości około 660 km. Problemem jest także fakt, iż według badań m.in. geochemicznych, większość ciepła generowana jest w dolnym płaszczu. W związku z powyższymi niejasnościami, rozwiązanie zaproponowali zwolennicy teorii ekspansji Ziemi (Cwojdziański, 2004).

### Hipoteza ekspandującej Ziemi

Hipoteza ekspandującej Ziemi (Ryc. 4) swoje początki miała już w XIX wieku. Po raz pierwszy opublikował ją Jan Jarkowski w 1888 r., a w następnym dziesięcioleciach była rozwijana aż do obecnej postaci, powstałej po odkryciu stref spreadingu, czyli rozrostu dna oceanicznego. Z hipotezą ekspansji szczegól-



Ryc. 4. Ekspansja Ziemi według Hilgenberga  
(źródło: Koziar, 2017)

nie związany był Samuel Warren Carey, Roberto Mantovani, Otto Christoph Hilgenberg, Bruce Heezen. Obecnie jednak cieszy się ona znikomym poparciem i jest szeroko krytykowana przez środowiska naukowe. W Polsce do ekspansjonistów należy między innymi Stefan Cwojdziański, Jan Koziar (Koziar, 2017; Scalera, 2001) oraz Andrzej Pawuła.

### Założenia i dowody

Głównym założeniem omawianej hipotezy jest rosnący promień Ziemi. Według Carey’a promień ziemski wzrósł od 4 000 km do 6 400 km, a stała grawitacyjna Newtona stopniowo zmniejszała się w historii istnienia Wszechświata (Tsuchiya i in., 2013). Dokładne przyczyny wzrostu promienia nie są znane, ale przyjmuje się, że rozrost dna oceanicznego, będący głównym dowodem na ekspansję Ziemi, nie jest wystarczająco rekompensowany, np. przez subdukcję; stąd prowadzi on do zwiększenia objętości, powierzchni oraz promienia Ziemi (Koziar, 2017). Z kolei Hilgenberg za przyczynę ekspansji Ziemi wskazywał dodatni bilans cieplny (Hilgenberg, 1933). Oprócz tego jedna z teorii mówi, iż przyrost promienia oraz masy wynika z uderzania w Ziemię licznych meteorytów (Carter, 2003).

### Najważniejsze dowody na ekspansję Ziemi:

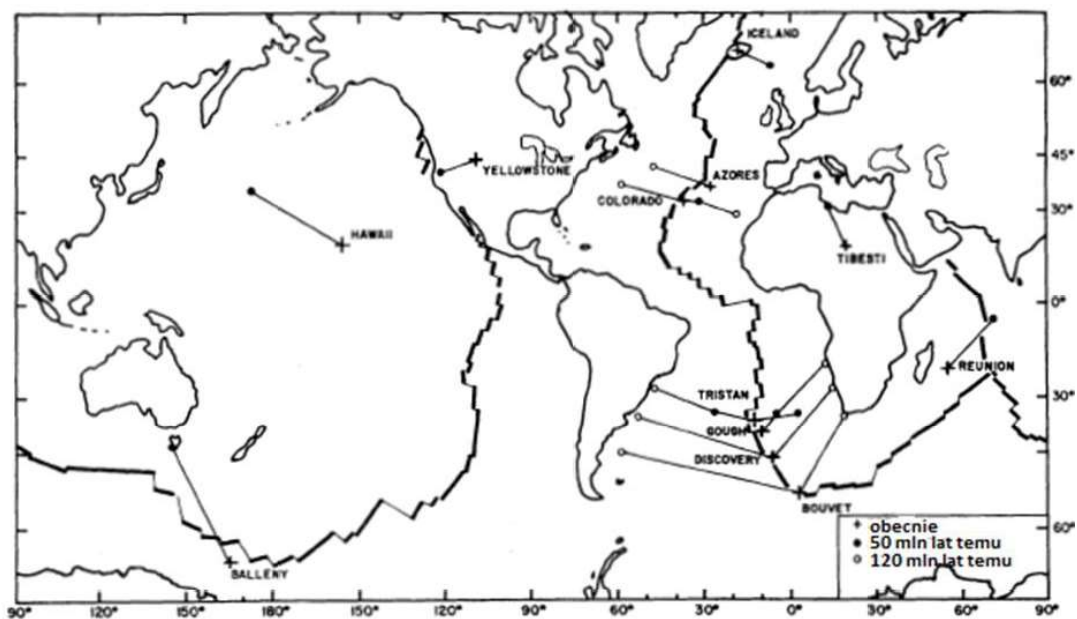
- Test Carey’a – po rozpadzie Pangei kontynenty powinny rozsuwać się kosztem Pacyfiku, tymczasem zwiększał on swoją powierzchnię. Skoro powiększała się zarówno powierzchnia rozpadającej Pangei, jak i Pacyfik, Ziemia musiała ekspandować. Ponadto powiększają się także inne oceany w wyniku oddalania się od siebie kontynentów.
- Wydłużenie grzbietów śródoceanicznych w stosunku do konturów kontynentów, które im odpowiadają. Podczas rozdzielania się Ameryki Płd. oraz Afryki, Grzbiet Środkowoatlantycki idealnie odpowiadał ich konturom. Musiało jednak nastąpić nie tylko równoleżnikowe rozsuwanie, ale i południkowe powiększanie się grzbietu. Strefy spreadingu mają przebieg południkowy i równoleżnikowy, skorupa rośnie więc wzdłuż oraz w poprzek, a strefy subdukcji nie rekompensują tego wzrostu.
- Powiększanie się granic płyt: afrykańskiej, antarktycznej, pacyficznej i brak stref subdukcji wokół niektórych płyt. Dla przykładu, wokół Afryki zaznaczają się aż trzy strefy ryftowe.
- Paradoks arktyczny – płyty oddalają się od Antarktydy i powinny zderzać się przy Arktyce, ale tam rów-

niez dominują rozbieżne granice płyt litosfery.

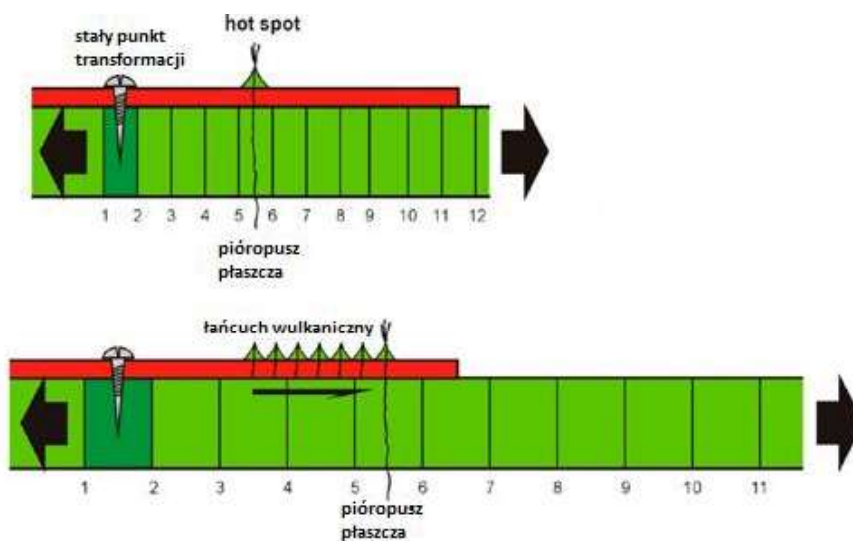
- Krawędzie kontynentów nie są do siebie idealnie dopasowane, powstają luki, ale jeśli by pomniejszyć Ziemię, zgadzają się ze sobą (Koziar, 2017).
- Brak dna oceanicznego starszego niż jurajskie (Scalera, 2001).
- Europa oddala się od Afryki, ale rozwijają się alpidy. Nie powstają one zatem w wyniku kolizji, tylko w wyniku tensji. Rodzi to sprzeczność.
- Obliczenia związane z paleopromieniem – doba wydłuża się, liczba dni w roku zmniejsza. Dodatkowo linie przyrostu w koralach świadczą o tym, że we wczesnym dewonie rok miał 400 dni.
- Dowody paleontologiczne – gigantyzm organizmów (w jaki sposób były w stanie się poruszać przy obecnej sile grawitacji?), znajdowanie organizmów kopalnych o ograniczonej możliwości przemieszczania się po dwóch stronach Oceanu Spokojnego.

### Ekspansja Ziemi a hot spoty

Zwolennicy hipotezy ekspandującej Ziemi odnaleźli także dowody związane z hot spotami. Odległości między plamami gorąca cały czas się powiększają (Ryc. 5), podczas gdy ich zakorzenienie w płaszczu jest



Ryc. 5. Rosnąca odległość między plamami gorąca w czasie (źródło: Stewart, 1976)



Ryc. 6. Tworzenie się łańcucha wulkanicznego przy stabilnej pozycji pióropusza płaszcz (opracowano na podstawie Koziar, 2017)

stale i znajdują się w tym samym miejscu w stosunku do podłoża (Ryc. 6). Według teorii tektoniki płyt litosfery płaszcz ziemski nie jest stabilny i nie może zapewnić stabilności pióropuszm. Tymczasem ekspandyści twierdzą, iż płaszcz rozciąga się izotropowo i rozsuwa płyty (Koziar, 2017). Ponadto, odkryto korzenie płyt litosferycznych będące chłodną częścią płaszcza, która sięga do głębokości nawet 400 km, uniemożliwiające dryf płyt oraz przemieszczanie się prądów konwekcyjnych (Cwojdziański, 2004).

Hipoteza ekspandującej Ziemi w kontekście konwekcji oraz hot spotów zakłada, że: płyty litosferyczne są zakorzenione w płaszczu ziemskim i znajdują się cały czas w tej samej pozycji w stosunku do centrum Ziemi, nie zachodzi konwekcja komórkowa, energia i materia, pochodzące z granicy między płaszczem a jądrem ziemskim są radialnie transportowane do powierzchni, wznoszenie się materii zachodzi na różnych głębokościach i w różnych rodzajach skał. Koncepcja ta rozwiązuje wiele problemów (których nie rozwiązywał m.in. model tektoniki płyt litosfery), takich jak: nadmiar ciepła i materii generowany na granicy płaszcza i jądra, obecność sejsmicznych nieciągłości, niezaburzony wertykalny kierunek wznoszenia się pióropusza, różna miąższość LVZ, geochemiczna odmienność strefy D<sup>2</sup>, występowanie korzeni pod kratonami, symetryczny rozkład grzbietów śródoceanicznych, np. wokół Afryki, łatwość przechodzenia strumieni materii zarówno przez płaszcz ziemski, jak i litosferę (Cwojdziański, 2004).

Według ekspansjonistów strefa LVZ tworzy się na szczycie górnego płaszcza z powodu wznoszenia się lotnych, gorących mas materii płaszcza. Balans materiału pochodzącego z płaszcza nie jest konieczny, materia i energia są dostarczane z jądra ziemskiego i oddziałują one na płaszcz radialnie. „Superplumes” są natomiast efektem stałego wzniosu materii z jądra. Brak zakłóceń pióropuszy płaszcza jest naturalnym zjawiskiem i wynika z ekspansji wnętrza Ziemi. Z kolei łańcuchy wulkaniczne tłumaczone są jako rozciąganie się górnego płaszcza nad pióropusząmi. Rosnące odległości między hot spotami wynikają z powiększania się rozmiarów planety. Naturalne jest również to, że większość aktywnych hot spotów wykazuje relacje przestrzenne z regionami związanymi z wielkim wybrzuszeniem na Pacyfiku oraz Atlantyku (Cwojdziański, 2004).

Niektórzy zakładają ponadto, iż pióropusze płaszcza mogą być wręcz kluczowe dla ekspansji Ziemi. Możliwe, że są one w stanie nieść taką ilość energii, która powoduje powolne powiększanie się globu. Nadal jednak zagadką pozostaje, co jest źródłem tak wysokiej energii (Edwards, 2014).

### **Wady**

Hipoteza ekspandującej Ziemi ma jednak swoje wady, które szczególnie usilnie wytykają zwolennicy teorii tektoniki płyt litosfery. Ekspansjoniści krytykowani są przede wszystkim za to, że nie potrafią wskazać przyczyn ekspansji Ziemi. Problemem jest także kwestia masy ziemskiej, która teoretycznie powinna wzrastać, jeśli wzrastają jej wymiary. Ponadto pojawiają się rozbieżności odnośnie tempa powiększania się promienia oraz tego, czy wzrost ten jest stały. Według najnowszych danych satelitarnych promień Ziemi się nie zmienia. Dokładność tych pomiarów wynosi 0,2 mm, ale jest to wielkość mniejsza niż zakładany przez ekspansjonistów wzrost (średnio 2,6 cm) (Wu i in., 2011). Ponadto tomografia sejsmiczna wykazuje we wnętrzu Ziemi takie struktury, które mogłyby być fragmentami subdukowanych płyt.

### **Podsumowanie**

Pochodzenie hot spotów oraz mechanizm działania pióropuszy płaszcza nadal nie został w pełni odkryty. Zwolennicy tektoniki płyt litosfery mają duży problem z dopasowaniem plam gorąca do swoich założeń. Wykorzystują to naukowcy, którzy opowiadają się za hipotezą ekspansji Ziemi. Wydaje się, że bardzo dobrze tłumaczy ona stacjonarne położenie pióropuszy przy jednoczesnym oddalaniu się od siebie hot spotów oraz tworzeniu się łańcuchów wysp wulkanicznych. Pozwala także pogodzić pióropusze z istnieniem stref nieciągłości. Niestety, hipoteza ekspansji Ziemi ma wiele wad, związanych przede wszystkim z brakiem dowodów na bezpośrednią przyczynę ekspansji oraz niezgodnością z aktualnymi pomiarami Ziemi.

Nieścisłości nie muszą jednak oznaczać całkowitej omyłności teorii i tyczy się to zarówno tektoniki, jak i ekspansji. Ich zwolennicy nawzajem wytykają sobie sprzeczności oraz błędy, a jednocześnie próbują je wyjaśniać. Można przypuszczać, że najlepszym sposobem na rozwiązanie tej oraz innych tajemnic Ziemi jest szukanie tych nieścisłości, bowiem to one mogą doprowadzić do powstania zupełnie nowej teorii, skuteczniej niż próby znalezienia „naciąganych” dowodów na potwierdzenie swojej hipotezy. Czy spór między zwolennikami jednej i drugiej teorii kiedyś się rozwiąże? Prawdopodobnie tak, za sprawą sformułowania trzeciej teorii, która, całkiem możliwe, że będzie łączyła ze sobą te powyższe.

## Literatura

- Burke, K., 2011, Plate Tectonics, the Wilson Cycle, and Mantle Plumes: Geodynamics from the Top, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 1–29.
- Carter, L., 2003, *How many meteorites hit Earth each year?*, Cornell University.
- Choudhuri, M., Némecok, M., 2017, *Mantle Plumes and Their Effects*, Springer.
- Condie, K., 2011, *Earth as an Evolving Planetary System (Second Edition)*, Elsevier.
- Courtilot, V., Davaille, A., Besse, J., Stock, J., 2003, Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3–4), 295–308.
- Cwojdzński, S., 2004, Mantle plumes and dynamics of the Earth interior – towards a new model, *Geological Review*, vol. 52, no.8/2, 817–826.
- Edwards, M., 2011, Gravity, Cosmology and Expanding Earth, *The Earth Expansion Evidence*, 161–176.
- Hilgenberg, O., 1933, *Vom wachsenden Erdball*, Berlin.
- Jarkowski, J., 1888, *Hypothese cinétique de la Gravitation universelle et connexion avec la formation des éléments chimiques*, Moskwa
- Kellog, L. H., Hager, B. H., van der Hilst, R. D., 1999, Compositional stratification in the deep mantle, *Science* 283, 1881–1884.
- Koziar, J., 2017, *Ekspansja Ziemi i jej dowody*, Wrocław.
- Morgan, W.J., 1972, Plate motions and deep mantle convection, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 132, 7–22.
- Scalera, G., 2001, The expanding Earth: a sound idea for the new millenium.
- Stewart, I., 1976, Mantle Plume Separation and the Expanding Earth, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, (1976) 46, 505–511.
- Tsuchiya, T., Kawai, K., Maruyama, S., 2012, Expanding-contracting Earth, *Geoscience Frontiers*, 4 (2013), 341–347.
- Wilson, J.T., 1963, A possible origin of the Hawaiian Islands, *Canadian Journal of Physics*, 41, 863–870.
- Wu, X. i in., 2011, Accuracy of the International Terrestrial Reference Frame origin and Earth Expansion, *Geophysical Research Letters*, 38, DOI: 10.1029/2011GL047450.

## Notka o Autorce

*Studentka III roku geologii, zainteresowana przede wszystkim paleontologią oraz procesami endogenicznymi Ziemi. W wolnych chwilach czyta książki oraz próbuje pisać własne teksty. Chętnie podróżuje, szczególnie w polskie góry.*