

Andrzej ŻELAŻNIEWICZ
Marek GRAD

Co dzieje się we wnętrzu Ziemi?



W BROSZURZE:

Jak zbudowana jest Ziemia?

Ziemia – maszyna cieplna

***O czym mówi sejsmologia
i termodynamika?***

Płyty litosferyczne i ich ruch

***Deformacje tektoniczne
i trzęsienia Ziemi***

***Jak będzie wyglądała mapa świata
za 50 milionów lat?***

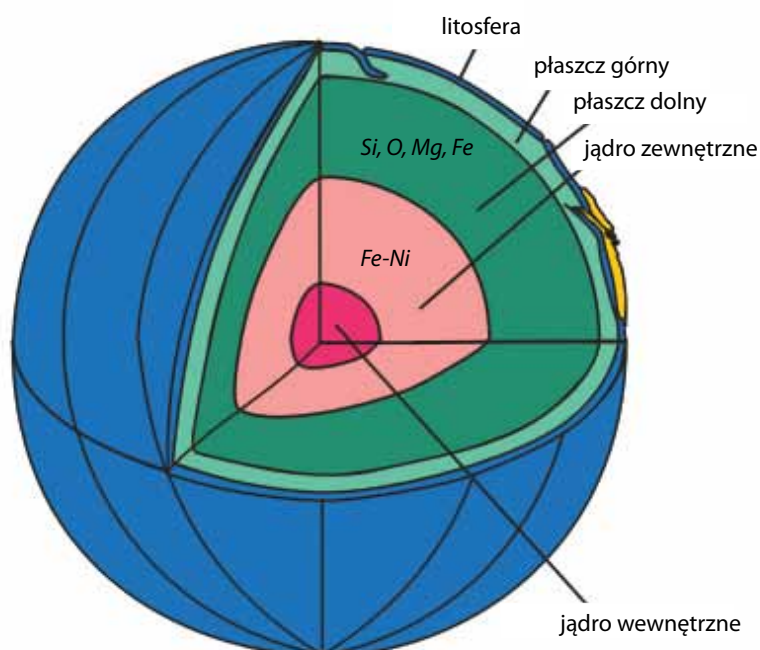


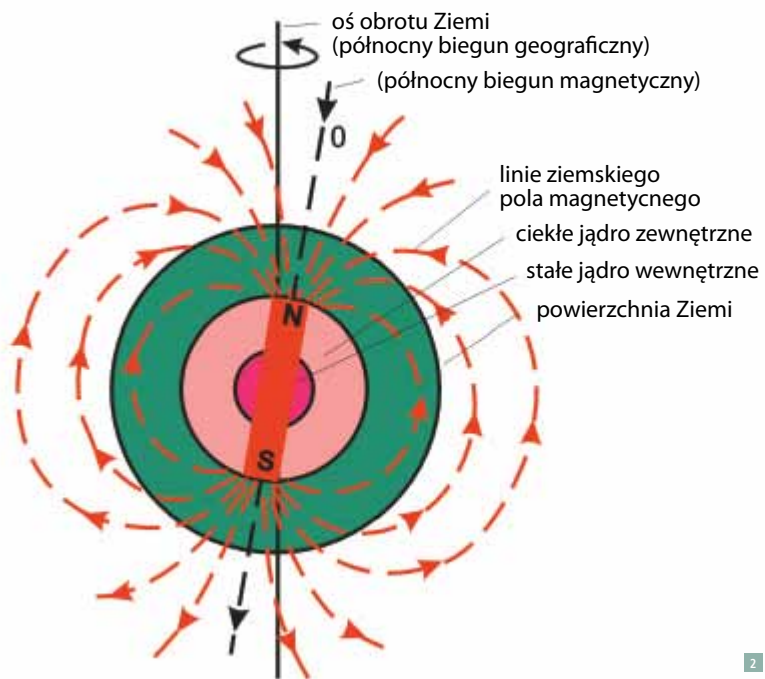
Jak zbudowana jest Ziemia?

Ziemia, podobnie jak inne planety Układu Słonecznego i samo Słońce, powstała około 4,6 mld lat temu z kondensacji pyłów i gazów kosmicznych. Glob nasz składa się w ponad 95% z żelaza (Fe), tlenu (O), krzemu (Si), magnezu (Mg), niklu (Ni) i siarki (S), a reszta przypada na pozostałe pierwiastki układu okresowego.

Ziemia ma strukturę sferyczną (1). Sferę zewnętrzną, najlepiej nam znaną, stanowi **skorupa ziemska** o grubości 25-70 km pod kontynentami, natomaist 7-9 km pod oceanami. Skorupa wraz z najwyższą, skalną częścią płaszcza tworzy **litosferę**. **Płaszcz** (mezosfera) poniżej niej sięga głębokości około 2890 km, a jego najniższa **warstwa D** graniczy z **jądrem** Ziemi o promieniu blisko 3500 km. Jądro Ziemi jest dwudzielne. Jego środek to metaliczna kula o promieniu 1250 km, tworzona przez stop głównie **żelaza z niklem** oraz przymieszką około 10% lżejszych pierwiastków (O, S, K, C), zestalony pod ciśnieniem sięgającym 300 GPa przy temperaturze rzędu 5000-6000°C. W części zewnętrznej jądra stop ten jest w stanie bardzo gęstej **cieczy**, przypuszczalnie zawierającej też promieniotwórczy uran i tor – znajduje się on pod mniejszym ciśnieniem i ma niższą temperaturę (~ 4000°C).

1. Budowa Ziemi.



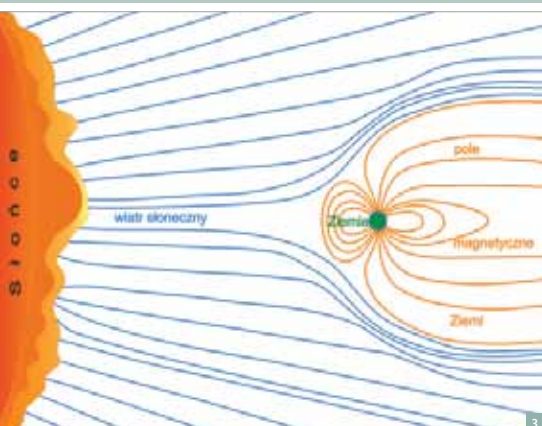


2

Odmienne stan fizyczny obu części jądra sprawia, że jego zestalona część wykonuje swój dobowy obrót, wynikający z rotacji całej Ziemi, o 2/3 sekundy szybciej niż ciepła część jądra i płaszcz ze skorupą. Suma tych dobowych różnic w prędkości kątowej w ciągu 400 lat daje jądro wewnętrznemu przewagę jednego obrotu więcej w stosunku do pozostałych sfer Ziemi i wystarcza do przełożenia tak powstającej energii mechanicznej na elektryczną, wywołania efektu prądnicy w układzie stała-ciepła część jądra i wytworzenia pola elektromagnetycznego. W ten sposób, dzięki procesom zachodzącym w jądrze globu, cała Ziemia zostaje otoczona **polem magnetycznym** (2), które tworzy ponad nią swoistą osłonę przed szkodliwym dla żywych organizmów promieniowaniem korpuskularnym Słońca – wiatrem słonecznym (3). Ta magnetyczna ochrona ma zasadnicze znaczenie dla bezpiecznego życia człowieka na Ziemi.

2. Ziemia jako dipol magnetyczny.

3. Pole magnetyczne Ziemi chroni ją przed wiatrem słonecznym.



3

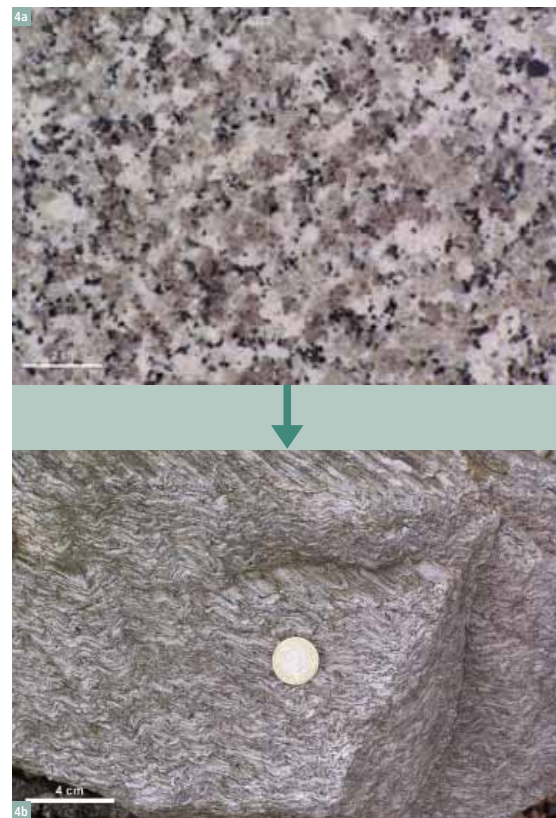
Płaszcz Ziemi tworzony jest przez krzemiany – minerały zawsze zawierające tlen i krzem w połączeniach z różnymi pierwiastkami, najczęściej z metalami. Skorupę również tworzą głównie krzemiany oraz inne substancje mineralne, wśród których dominują węglany (wapnienie, dolomity) – skądinąd dla nas ważne, bo skały te powstając wiążą nadmiar dwutlenku węgla z atmosfery.

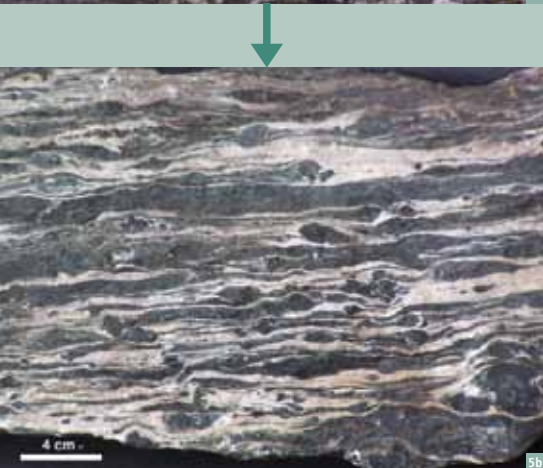
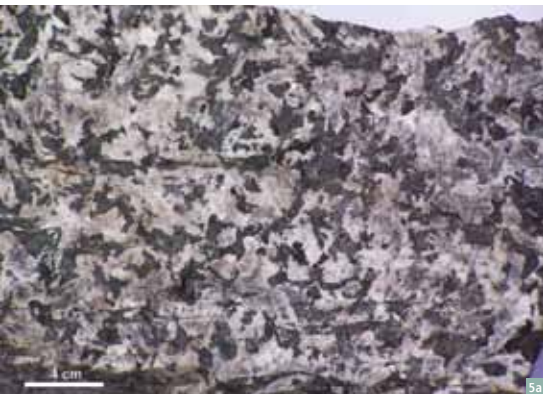
Bezpośrednio dostępna badaniom geologicznym jest tylko górna część skorupy – skały odsłaniające się na powierzchni Ziemi oraz w zboczach głębokich dolin rzecznych, kanionów, w wyrobiskach kopalniach, oraz w rdzeniach wierceń badawczych, z których najgłębsze ledwie przekroczyło 12 km (12 261 m, Półwysep Kola w Rosji; w Polsce najgłębszy otwór wiertniczy to Kuźmina w rejonie Przemyśla, 7 541 m). Jest to mniej niż 1/500 część promienia Ziemi, który wynosi 6371 km.

Skorupę ziemską tworzy w wielu miejscach bardzo skomplikowana mozaika **skał magmowych, metamorficznych i osadowych**. Podlega ona ewolucji, przekształca się, a jej przyrost zapewnia materia zarówno pochodzenia **płaszczowego** jak i **biogenicznego**. To dzięki tej geologicznej różnorodności możliwe jest życie człowieka na powierzchni Ziemi.

4a. Granit – skała plutoniczna. Fot. A. Żelaźniewicz

4b. Łupek kwarcowo-muskowitowy powstały z silnie zdeformowanego i zmetamorfizowanego granitu (a). Fot. A. Żelaźniewicz





Skały metamorficzne znajdowały się w przeszłości znacznie głębiej. Po-
wszechnie w skorupie ziemskiej granity (4a) zmieniają się w gnejsy a na-
wet w łupki kwarcowo-muskowitowe (4b). Pochodzące z płaszczu Ziemi
gabra (5a) zmieniają się w amfibolity (5b). Metamorfizowane skały prze-
chodziły przeobrażenia pod wpływem temperatury i ciśnienia oraz ule-
gały deformacjom na głębokościach rzędu 10-200 km, a następnie część
z nich została odsłonięta na powierzchni Ziemi wskutek późniejszego
współdziałania procesów tektonicznych i erozji. Dzięki badaniom geo-
logicznym potrafimy określić kolejność wydarzeń i odtwarzać ewolu-
cję skorupy ziemskiej (6). Niektóre skały z głębi Ziemi zostały wydoby-
te – jako porwaki – przez lawy wulkaniczne wytworzone w procesie
częściowego topienia płaszczu. I one jednak nie pochodzą z głębokości
większych niż około 150 km.

- 5a. Gabro – maficzna skała magmowa wywodząca się z płaszczu Ziemi.
- 5b. Amfibolit – skała metamorficzna powstała z przeobrażenia z gabra (a)
w trakcie silnej deformacji tektonicznej w skorupie ziemskiej.
- 6. Przyrost skorupy kontynentalnej następuje w wyniku formowania się skał
osadowych i intruzji magmowych w czasie geologicznym. Na zdjęciu:
w wapienie (1) intrudowały kolejno trzy zespoły żył bazaltowych (2–4),
potem żyły o składzie pośrednim (5) i na końcu granitowe (6), po czym
całość została wydzwignięta, poddana erozji i przykryta nową serią
osadową (7).

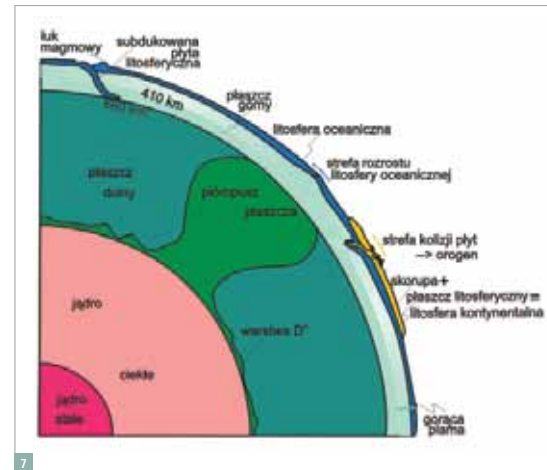
Ziemia – maszyna cieplna

Chemiczna dwudzielność Ziemi – metaliczne (Fe, Ni) jądro i krzemianowa reszta – decyduje o ich niemieszalności oraz o odmienności zachodzących w nich procesów termodynamicznych (7). Warstwa D” – najniższa część płaszcza – poddana jest bezpośrednio wpływowi termalnemu gorącego jądra. Podgrzewanie płaszcza wymusza konwekcyjne rozchodzenie się w nim ciepła, co rodzi gradient termiczny między domenami płaszcza o różnej temperaturze i prowadzi do wytworzenia w nim nieregularnych „bąbli” relatywnie bardziej gorącej i przez to lżejszej materii, która przemieszcza się ku górze w postaci tzw. **pióropuszy płaszcza** (7). Dwa największe z nich rozmiściły się przeciwstawnie – jeden pod Pacyfikiem, drugi pod Afryką. Pióropusze, które powstają także w górnej części płaszcza i stowarzyszone z nimi tzw. **plamy gorąca** są przejawem aktywności maszyny cieplnej, jaką stanowi Ziemia.

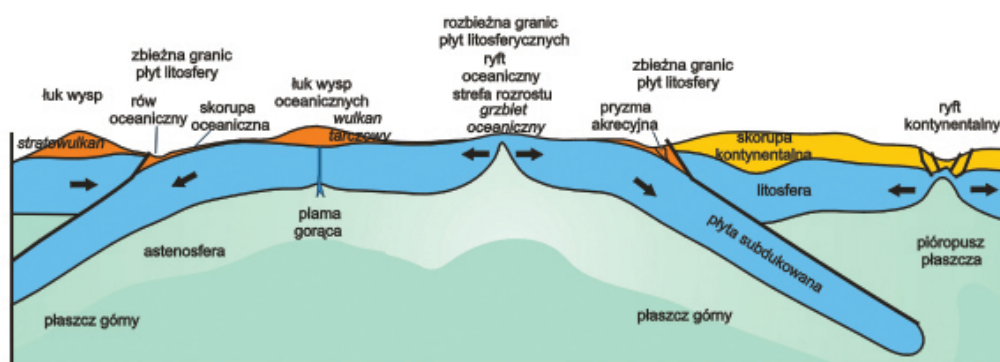
Istnienie pióropuszy płaszcza ma zasadnicze znaczenie dla dynamiki zewnętrznej części globu – **litosfery**. Tworzy ją skalna skorupa ziemska wraz z leżącą pod nią bezpośrednią warstwą płaszcza zachowującą sztywność aż do głębokości, na której temperatura wynosi 1280°C, co umożliwia konwekcyjny transport ciepła w znajdującej się niżej **astenosferze**. Gorące pióropusze płaszcza oddziałują na litosferę powodując jej pionowe wybrzuszenie ku górze i poziome rozciąganie, a w dalszych stadiach prowadzą do jej pęknięcia i rozłamywania na **płyty litosferyczne**, które rozpoczynają horyzontalną wędrówkę (8), znaną pod nazwą **dryfu kontynentalnego** odkrytego przez Alfreda Wegenera.

7. Elementy struktury wnętrza Ziemi.

8. Dynamika płaszcza i litosfery – tektonika płyt litosfery.



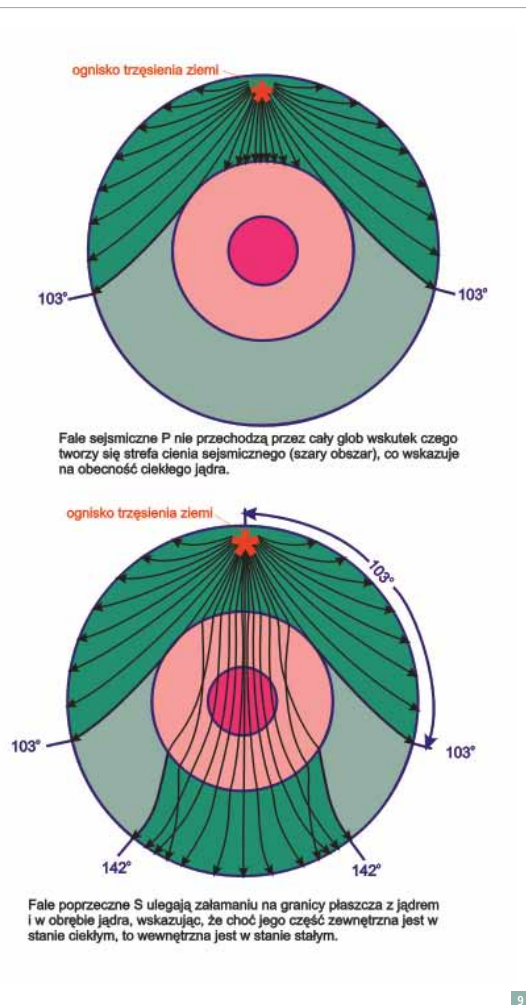
7



8

O czym mówią sejsmologia i termodynamika?

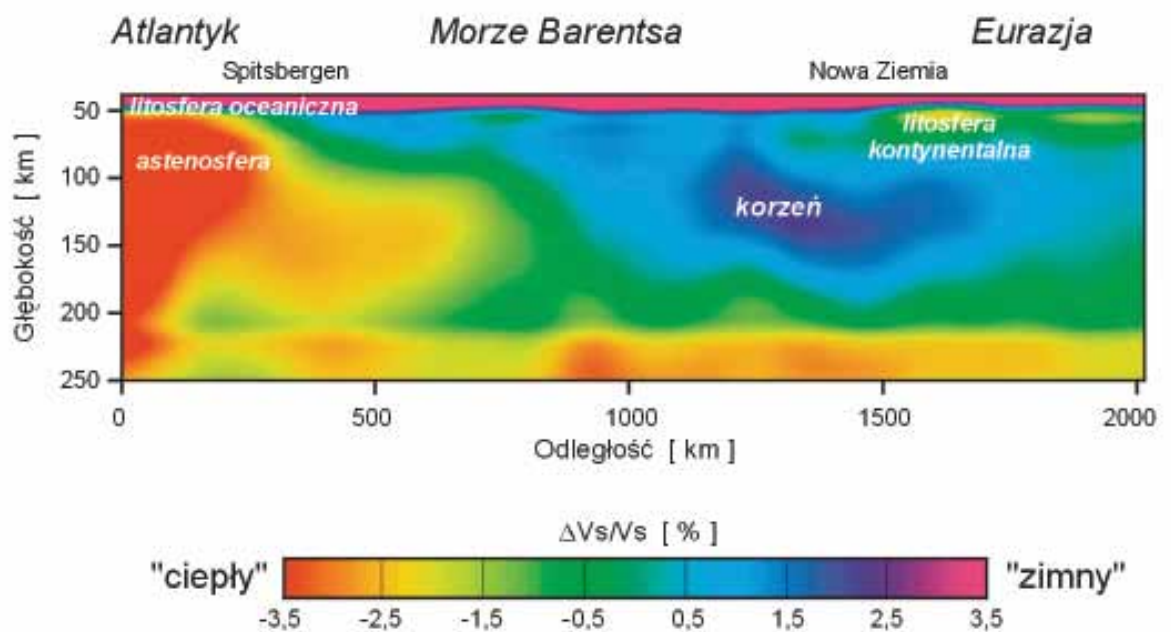
O tym, jaka jest struktura skorupy i co dzieje się w płaszczu dowiadujemy się głównie poprzez badania geofizyczne. Wykorzystują one **fale sprężyste** (zwane falami sejsmicznymi) generowane przez silne trzęsienia ziemi, albo ładunkami wybuchowymi w trakcie specjalnie prowadzonych eksperymentów sejsmicznych. Fale te przechodzą przez wnętrze naszej planety i są rejestrowane przez stacje sejsmologiczne rozmieszczone na całym globie (9). Najważniejsze z nich to fale podłużne P, które przemieszczają się w głębi Ziemi jako drgania zachodzące w kierunku rozchodzenia się fali, oraz fale poprzeczne S, które charakteryzują się drganiami poprzecznymi do kierunku rozchodzenia się fali. Analiza fal sejsmicznych pozwala określić własności sprężyste materii tworzącej wnętrza Ziemi, przede wszystkim prędkość rozchodzenia się fali w danym ośrodku i załamania kierunku jej przebiegu na granicy ośrodków o różnej prędkości. Interpretacja opracowywanych komputerowo danych sejsmicznych dostarcza poszukiwanych informacji o strukturze globu. Na przykład obecność jądra Ziemi jest interpretowana na podstawie faktu, że zarówno fale P jak i fale S są rejestrowane przez stacje sejsmiczne położone w odległościach kątowych nie większych niż 103° od ogniska trzęsienia ziemi. Dalej tworzy się obszar tzw. „**strefy cienia**”, do której fale P i S nie docierają, co wyjaśnia się istnieniem w środku Ziemi ośrodków o mniejszych prędkościach fal – jest nim właśnie jądro. W odległościach większych od 145° fale P pojawiają się ponownie, ale nie towarzyszą im fale S. Brak fal S uważany jest za dowód na to, że **jądro zewnętrzne** jest w stanie ciekłym (fale poprzeczne nie rozchodzą się w cieczach).



Znaczne zróżnicowanie lepkości i temperatury domen płaszczowych wywołane **konwekcyjnym** ruchem materii transportującej ciepło uwiódchnia **tomografia sejsmiczna**. Jest to swego rodzaju „prześwietlenie” globu [obrazek], które wykorzystuje fale sprężyste i ich własność rozchodzenia się z różną prędkością w różnych ośrodkach – nieco podobnie do tomografii medycznej wykorzystującej fale ultradźwiękowe. Tomografia wykazała obecność swoistych **korzeni** pod kontynentalnymi fragmentami płyt litosferycznych. Tworzą je chłodniejsze i sztywniejsze partie płaszcza zespolone tam z litosferą i sięgające do głębokości 200-300 km (10).

Analiza przebiegu fal sejsmicznych wykazała, że własności fizyczne wnętrza Ziemi zmieniają się na pewnych głębokościach w sposób skokowy wzdłuż powierzchni granicznych faz o różnej prędkości rozchodzenia się fal sprężystych i różnej gęstości. Pierwszą taką granicą jest powierzchnia Moho (przejście gabbro → eklogit) oddzielająca skorupę od litosferycznej części płaszcza (11). Poniżej w płaszczu istnieją dwie ważne **granice fazowe**: na głębokości **~410 km** i **~680 km**. Ta ostatnia granica rozdziela płaszcz górny i dolny. Im głębiej, tym większe ciśnienie panuje we wnętrzu globu. To rosnące w głąb ciśnienie zmusza minerały płaszcza do **przemian fazowych**, tak by atomy w ich minerałach były coraz ciaśniej upakowane. Wprowadza to zmiany w ich sieci krystalograficznej, co sprawia, że minerały zachowując ten sam skład przybierają inną formę strukturalną. Poniżej 410 km oliwin – $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, może istnieć tylko w strukturze właściwej spinelowi, a więc tlenkowi – $(\text{Mg, Fe, Cr})\text{Al}_2\text{O}_4$. Poniżej 680 km występuje kolejna transformacja i krzemiany $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ przyjmują strukturę właściwą perowskitowi (tlenkowi tytanu i wapnia, CaTiO_3), a część z nich zmienia się tlenki $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ – magnesiowustyt. W warstwie D' krzemiany przyjmują strukturę post-perowskitową.

10. Korzenie kontynentów – pod kontynentami płaszcz jest chłodniejszy i bardziej sztywny.

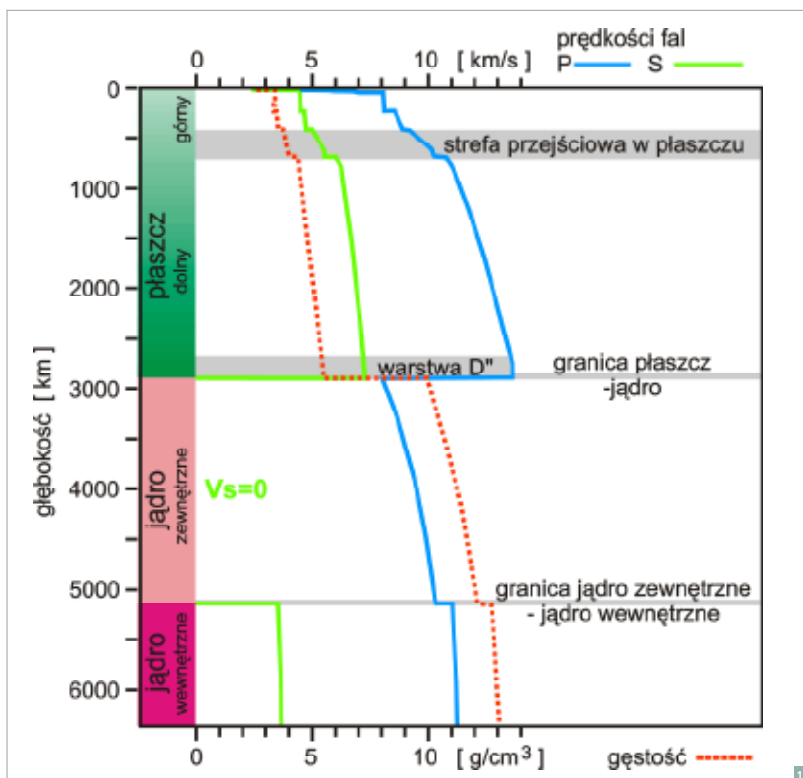


wg Levshin i in., *Geophysical Journal International*, 2007

Przemiana fazowa na głębokości 680 km jest **endotermiczna** – pochłania ona ciepło, przez co warstwa ta staje się o kilka rzędów bardziej lepka, chłodniejsza i sztywniejsza niż materia pod i ponad nią. Ta graniczna strefa przejściowa jest z jednej strony źródłem „chłodnych” kaskad spadających ku spągowi płaszczu i komplikującym konwekcyjny transport ciepła ku górze, a z drugiej strony stanowi swoistą barierę dla większości tonących w płaszczu płyt litosferycznych.

Przemiana fazowa na głębokości 410 km jest **egzotermiczna** – wydzielone ciepło przyczynia się do wzmożenia konwekcji w górnym płaszczu oraz częściowego topienia jego minerałów. W ten sposób tworzą się w płaszczu pierwotne źródła magm, które – jako cieplejsze i lżejsze niż otoczenie – przebijają się ku powierzchni Ziemi w konwekcyjnych prądach wstępujących. Magmy te ewoluują i pojawiają się przede wszystkim w strefach **spredingu** (rozrostu) – w grzbietach oceanicznych i w ryftach kontynentalnych (7, 8) – często ulegając po drodze znacznym zmianom geochemicznym. Dzięki temu w strefach tych stale tworzy się nowa bazaltowa skorupa oceaniczna – średnio rocznie przybywa jej 17 km³.

11. Wykres zmian prędkości fal sejsmicznych i gęstości wewnątrz Ziemi wraz z głębokością.



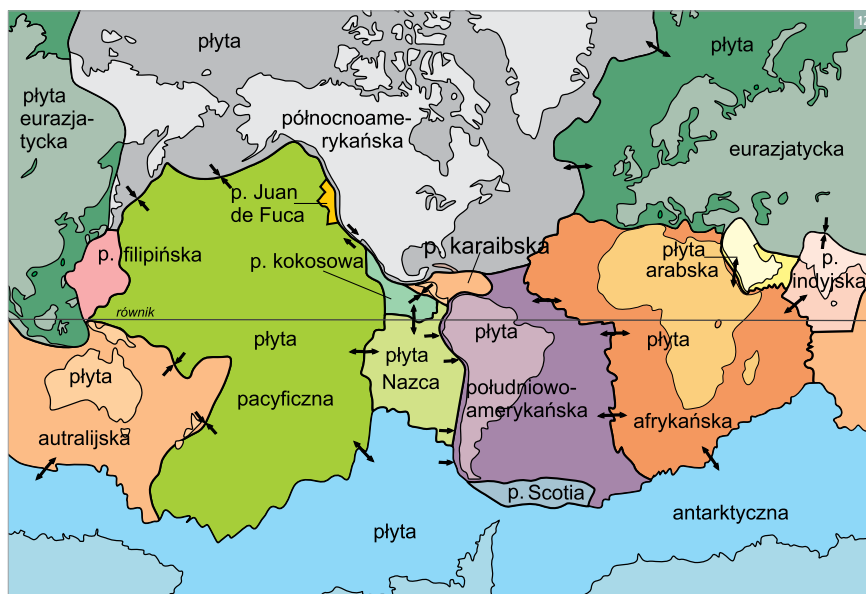
Płyty litosferyczne i ich ruch

Cała litosfera Ziemi dzieli się obecnie na kilka wielkich **plyt** (np. płyta pacyficzna, płyta euro-azjatycka, płyta afrykańska) uzupełnionych mozaiką mniejszych płyt i mikroplyt (np. płyta arabska, płyta karaibska). Każda z ogólnej liczby 15 płyt tworzona jest przez litosferę oceaniczną, znaczna ich część posiada także litosferę kontynentalną (12). Ich granice pokrywają się ze strefami o dużej aktywności sejsmicznej, przejawiającej się trzęsieniami ziemi (14).

Poddane dryfowi **plyty litosferyczne**, które niosą kontynenty wraz z ich korzeniami, przemieszczają się poziomo, „pływając”, w bardziej gorącej i nieco mniej lepkiej materii płaszcza. Prędkość tego przemieszczania wydaje się niewielka w skali życia człowieka, wynosi od 0,5-1 cm/rok do 16-18 cm/rok – wyznacza się ją dziś metodami geodezji satelitarnej. W czasie geologicznym ten pozornie powolny ruch prowadzi jednak do przesunięć na odległość setek czy nawet tysięcy kilometrów. Przemieszczenia kontynentów w ciągu ostatnich kilkuset milionów lat przedstawiane są na mapach **paleogeograficznych** (palinspastycznych), rekonstruowanych na podstawie wyników badań geofizycznych (liniowe anomalie magnetyczne), paleomagnetycznych (ścieżki pozornej wędrówki biegunów), paleobiogeograficznych (skamieniałości) paleoklimatycznych, geologicznych i geochronologicznych.

12. Podział litosfery Ziemi na płyty. Wg USGS.

13a. Rozwarta szczelina uskokowa spowodowana trzęsieniem ziemi, Kaszmir.





Dryfujące płyty litosferyczne odsuwają się od siebie lub nasuwają się na siebie. Poziome rozsuwanie płyt, zapoczątkowane procesem ryftowania (8), następuje w strefach **spredingu**. W trakcie nasuwania natomiast jedna (górną) przemieszcza się ponad drugą (dolną). Płyta podsuwana, dolna, ulega **subdukcji**, która sprawia, że jej ciężka część tworzona przez chłodną litosferę zanurza się pod płytę górną i tonie w gorącym płaszczu (7, 8). To tonięcie, z różnych powodów, bywa po pewnym czasie zahamowane. Jedną z przyczyn jest kolizja dwóch płyt kontynentalnych. Spektakularnymi przejawami tego typu kolizji są wypiętrzenia potężnych pasm górskich, takich jak Alpy czy Himalaje.



Przemieszczenia płyt litosferycznych i mniejszych bloków skorupy są przyczyną powstawania uskoków (13). Względne przesunięcie skrzydeł uskoku może mieć charakter przesuwczy (13b) albo zrzutowy (13c), albo zrzutowo-przesuwczy (13d).

13b. Zdeformowana droga wskutek przesuwu prawostronnego (strzałki) wzdłuż pionowego uskoku, wywołanego trzęsieniem ziemi, Anatolia.

Fot. A. Żelaźniewicz

13c. Zespół drobnych uskoków normalnych w tufie wulkanicznym, Lanzerote.

Fot. A. Żelaźniewicz

13d. W wyniku przemieszczenia wzdłuż uskoku (strzałka) obecnie sąsiadują ze sobą dwa (różna barwa), niegdyś oddalone, zespoły skalne; synklinorium podhalańskie, Bukowina Tatrzańska. Fot. A. Żelaźniewicz

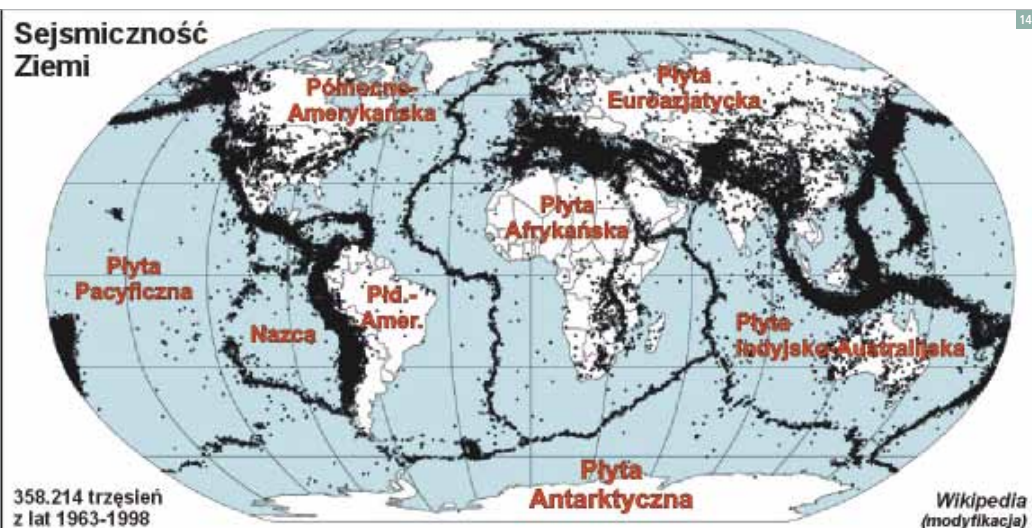


Deformacje tektoniczne i trzęsienia Ziemi

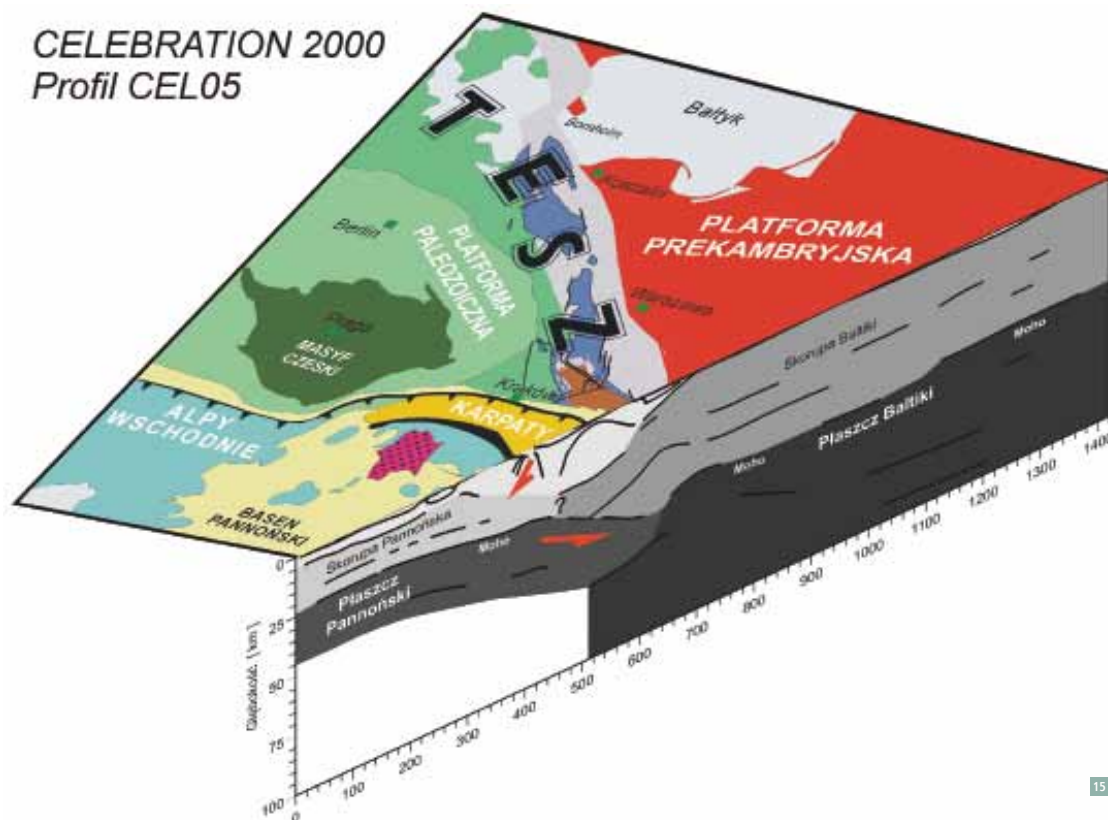
Zarówno rozsuwanie jak i nasuwanie płyt, powodowane przez procesy termodynamiczne w płaszczu, generują w litosferze **naprężenia**, które prowadzą do deformacji tektonicznych. Przesunięcia, jakie zachodzą wzdłuż **uskoków** podczas silnych **trzęsień ziemi**, są przejawem tych deformacji i czasem w dotkliwy dla człowieka sposób demonstrują aktywność współczesnych ruchów poziomych i pionowych (13, 14). Decydują one o znacznym zróżnicowaniu struktury skorupy (15). Przyczyny ruchów pionowych płyt nie zawsze jednak leżą tylko we wnętrzu Ziemi. Holocenijskie ocieplenie zapoczątkowane blisko 12 tysięcy lat temu doprowadziło do stopienia lądolodu skandynawskiego. Wskutek tego, uwolniona od ciężaru kilkukilometrowej grubości pokrywy lodowej Skandynawia do dziś powoli porusza się ku górze; obserwowane w Zatoce Botnickiej tempo podnoszenia wynosi obecnie 1 cm na rok (15).

Trzęsienia ziemi są nieuniknione i stanowią charakterystyczną cechę naszej planety powodowaną przez stały ruch płyt litosferycznych. Na mapie sejsmiczności wyraźnie widać obszary koncentracji **ognisk** trzęsień ziemi (13). Z reguły stanowią one stosunkowo wąskie strefy pokrywające się z granicami płyt litosferycznych, gdzie płyty ulegają kolizyjnym „zderzeniom” lub – przeciwnie – rozspojeniu umożliwiającemu wylew bazaltowej lawy:

14. Rozmieszczenie stref aktywnych sejsmicznie na Ziemi.



CELEBRATION 2000
Profil CEL05



15

- trzęsienia ziemi w strefach subdukcji są bardzo silne i mogą sięgać głębokości 300–700 km – wywołuje je działanie sił ściskających, związane z nasuwaniem się płyt na siebie;

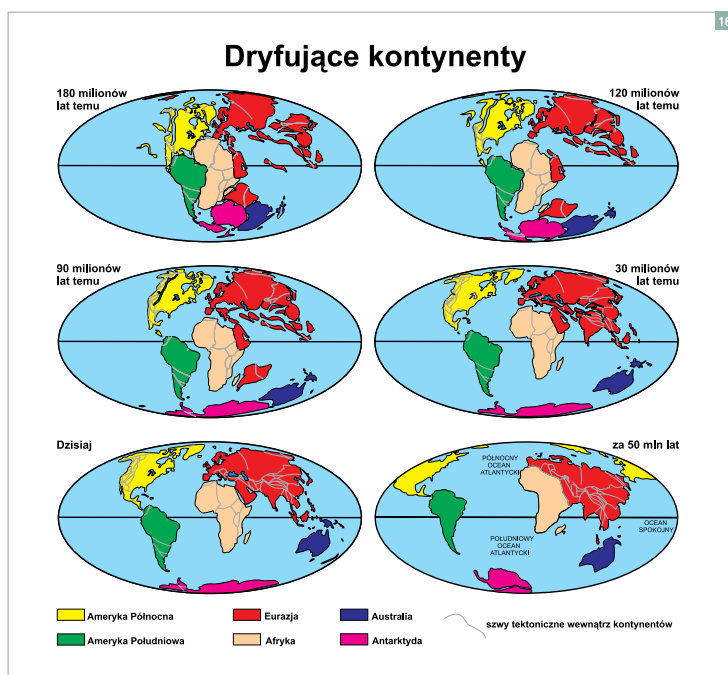
- trzęsienia ziemi w strefach ryftowych są znacznie słabsze, a ich ogniska tworzą się płycej, na głębokości 10–30 km – wywołuje je działanie sił rozciągających.

15. Profil sejsmiczny CEL 05 pokazuje różnorodność budowy skorupy na obszarze przejścia od kratonu wschodnioeuropejskiego przez Karpaty do Basenu Pannonskiego, gdzie grubość skorupy zmienia się w granicach 25–52 km, a rozdzielającą je strefa TESZ, to tzw. strefa szwu transeuropejskiego.

Jak będzie wyglądała mapa świata za 50 milionów lat?

Stała wędrówka płyt litosferycznych, proces spredingu i subdukcji, sprawiają, że widoczne ponad powierzchnią oceanów lądy zmieniają swoje położenie na globie. W historii Ziemi było kilka okresów, kiedy to wszystkie kontynenty zderzając się, stanowiły przez pewien czas jedną całość – tzw. **superkontynent**. W ciągu ostatniego miliarda lat wydarzyło się to dwukrotnie – Atlantyk w tym czasie dwa razy zniknął i dwa razy pojawiał się. 300-250 mln lat temu, poruszając się po ostatnim superkontynencie, Pangei, można było „suchą nogą” dostać się z Europy do Ameryki. Położenie kontynentów w przeszłości ukazują wspomniane już rekonstrukcje paleogeograficzne. Dziś, mając wiedzę o przeszłych jak i współcześnie zachodzących procesach, możemy prognozować, jak będzie wyglądała mapa świata za 10-50-100 mln lat. Za 50 mln lat w wyniku kolizji Europy z Afryką zniknie **Morze Śródziemne**, a jego miejscu powstaną Góry Śródziemne. Antarktyda wyraźnie przemieści się na północ odsuwając się od bieguna, a Atlantyk osiągnie rozmiary Oceanu Spokojnego, powiększając odległość między Europą i Ameryką Północną niemal dwukrotnie (16).

16. Zmiany w położeniu kontynentów w wyniku ich dryfu od jury do dzisiaj i za 50 mln lat, wg C. R. Scotese.



AUTORZY:



Andrzej ŻELAŻNIEWICZ

Instytut Nauk
Geologicznych
PAN



Marek GRAD

Uniwersytet
Warszawski



Wszystkie informacje o Światowym Roku Planeta Ziemia (International Year of Planet Earth) można znaleźć na stronie internetowej IYPE (www.yearofplanetearth.org) oraz Komitetu Planeta Ziemia PAN (www.planetaziemia.pan.pl).

Komitet Planeta Ziemia PAN
Przewodniczący – prof. dr hab. Andrzej Żelaźniewicz
Sekretariat: Podwale 75, 50-449 Wrocław
tel. 71-3376345, fax 71-3376342
e-mail: rokziemi@planetaziemia.pan.pl