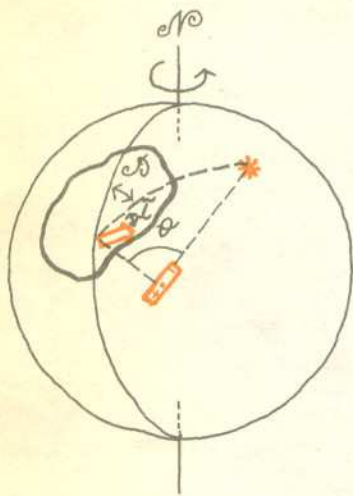


# Konwekcja w płaszczu Ziemi

Dr Leszek

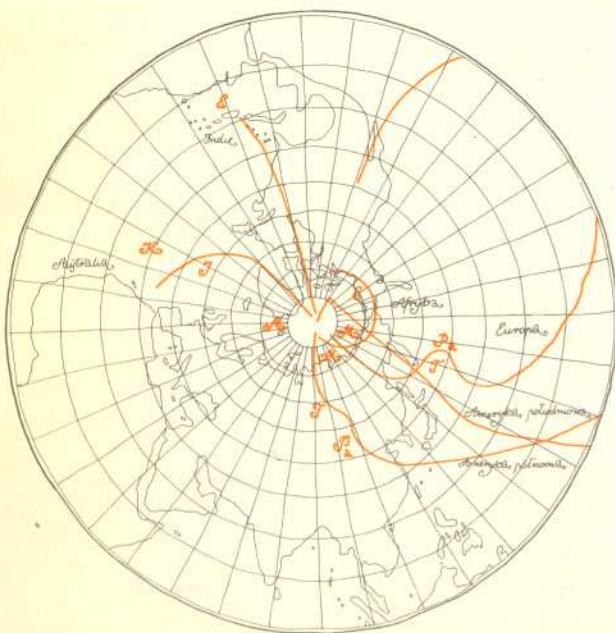
CZECHOWSKI



→ kierunek pola magnetycznego  
\* biegun geometryczny

Rys. 1  
Inklinacja to kąt, który tworzy wektor natężenia pola magnetycznego z poziomem, a deklinacja to kąt między wektorem pola i płaszczyzną południka.

Rys. 2. Trasy biegunów geomagnetycznych względem kontynentów. Literami oznaczono położenie bieguna w danym okresie geologicznym: Pa — paleozoik, E — kambryj, K — kreda, J — jura, T — trias, M — mezozoik.



„Patrząc na mapę, upewniamy się dowodnie, że Ameryka oderwała się od Starego Świata i na całej swej długości odpowiada doskonale zachodniej części naszego kontynentu, poprzez wybrzeża, które znajdują się naprzeciwko Europy i Afryki”. Tak napisał w 1859 roku A. Snider. Jest on też autorem pierwszego w historii rysunku przedstawiającego połączone kontynenty. Ich rozerwanie przypisuje kataklizmowi, który zdarzył się parę tysięcy lat temu, a na poparcie tej tezy przytacza liczne podobieństwa kultur Starego i Nowego Świata, które dziś tak chętnie cytują zwolennicy hipotezy o istnieniu Atlantyny.

Obecnie, kiedy zdajemy sobie sprawę, że rozdzielenie kontynentów nastąpiło dziesiątki milionów lat przed pojawieniem się człowieka na Ziemi, tylko pierwszy z powyższych argumentów zachował swą wartość. Pełną i zadowalającą z punktu widzenia nauki argumentację przedstawił dopiero w 1915 roku niemiecki geograf Alfred Wegener.

Ruch kontynentów, według Wegenera, rozpoczął się od rozpadu jednego pierwotnie kontynentu — Pangei. Na poparcie tej hipotezy przytaczał on argumenty geofizyczne, geologiczne, paleontologiczne, a także geodezyjne. Wśród argumentów geologicznych na uwagę zasługuje fakt, że niektóre struktury geologiczne Europy i Afryki znajdują swoją kontynuację na obszarze obu Ameryk.

Podobieństwo fauny i flory różnych kontynentów skłaniało paleontologów do wysunięcia hipotezy o istnieniu w przeszłości przesmyków lądowych, którymi zwierzęta i rośliny przedostawały się na kontynenty rozdzielone obecnie oceanem. Hipoteza Wegenera zakładająca zespolenie, dziś oddalonych, kontynentów wyjaśnia to podobieństwo gatunków biologicznych w sposób bardziej chyba przekonywający.

Pomiary geodezyjne również potwierdzają tę hipotezę. Okazuje się, na przykład, że odległość Waszyngtonu i Paryża rośnie obecnie z prędkością około 1,5 cm/rok.

Podobnych argumentów można przytoczyć jeszcze wiele, my jednak ograniczymy się do szczegółowego omówienia jednego, opartego na wynikach badań paleomagnetycznych, czyli badań pola magnetycznego Ziemi w przeszłości.

Kierunek pola istniejącego w minionych epokach geologicznych określamy na podstawie kierunku namagnesowania skał powstałych w tym czasie. Okazuje się bowiem, że skała najtrwalej zachowuje to namagnesowanie, które miała w momencie swego powstania. W chwili, gdy stygnąca magma osiąga temperaturę punktu Curie, jest ona namagnesowana zgodnie z zewnętrznym polem magnetycznym. Powyżej punktu Curie namagnesowanie to niszczone jest przez ruch cieplny cząsteczek, a później utrzymuje się niezależnie od działania innych zewnętrznych pól magnetycznych. Dla magnetytu, który jest odpowiedzialny za namagnesowanie większości skał, temperatura punktu Curie wynosi 580°C.

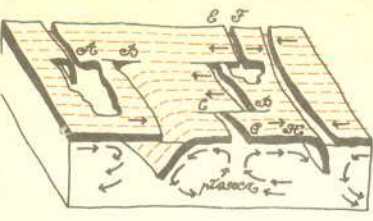
Tak więc kierunek namagnesowania skał pozwala znaleźć deklinację ( $D$ ) i inklinację ( $I$ ) pola magnetycznego w przeszłości. Sama znajomość tych wielkości niewiele by nam jednak dała, gdyby nie fakt, że pole Ziemi jest (z dokładnością około 10%) polem dipolowym. Dla takiego pola istnieje ścisły związek pomiędzy odległością kątową od bieguna ( $\theta$ ) i inklinacją pola magnetycznego:

$$\operatorname{tg} I = 0,5 \operatorname{ctg} \theta.$$

Ponieważ znając  $D$  możemy ustalić kierunek wskazujący biegun północny, więc  $I$  i  $D$  pozwalają wyznaczyć położenie bieguna geomagnetycznego (rys. 1).

Przebadanie tysięcy próbek skał o różnym wieku pozwoliło ustalić drogę bieguna względem każdego z kontynentów (rys. 2). Wniosek jest jednoznaczny — kontynenty poruszały się zarówno względem bieguna jak i względem siebie. Nie można bowiem wytłumaczyć jedynie ruchem bieguna, dlaczego badania skał pochodzących z jednego kontynentu wyznaczają odmienną drogę jego wędrówki niż podobne wyniki uzyskane na podstawie badań skał innego kontynentu.

W początkach lat pięćdziesiątych szczegółowe sondowanie Atlantyku doprowadziło do odkrycia doliny ryftowej przebiegającej wzdłuż Grzbietu Środkowo-Atlantyckiego. Podobną dolinę odkryto później także na dnie Pacyfiku. Grzbiet Wschodniopacyficzny (patrz mapka na okładce) jest wzniesieniem szerokości kilku tysięcy kilometrów, ciągnącym się na przestrzeni prawie 10 000 km. Wysokość jego wynosi około 2000 m ponad średni poziom dna oceanu. Niektóre, niewielkie jego fragmenty wystają nad powierzchnię, tworząc małe wyspy. Środkiem grzbietu biegnie stosunkowo wąska, lecz wyraźna dolina. To właśnie dolina ryftowa. Odkrycie dolin ryftowych stało się bodźcem do sformułowania nowej teorii zwanej tektoniką płyt, która w latach sześćdziesiątych zastąpiła teorię Wegenera. Podstawowe założenia tektoniki płyt zamknąć można w trzech punktach:



Rys. 3

1. Litosfera Ziemi podzielona jest na poruszające się względem siebie niemal sztywne płyty. Jeżeli na płycie znajduje się kontynent, to dryfuje on razem z płytą.
2. Granicami płyt są ryfty oceaniczne, rowy oceaniczne i uskoki transformujące.
3. Rozsuwanie się płyt odbywa się w strefie grzbietów oceanicznych, zbliżanie — w strefie rowów oceanicznych, zaś w uskokach transformujących następuje równoległe przesuwanie się płyt względem siebie.

Główną ideę teorii przedstawia rys. 3. Dwie płyty (grubości kilkudziesięciu kilometrów) rozdzielone grzbietem *E-G* rozsuwają się w przeciwnych kierunkach. Po dotarciu do rowu oceanicznego *H-F*, prawa płyta zagina się i zagłębia w płaszcz Ziemi. Bardziej skomplikowana jest lewa płyta. Jej część również zagłębia się w płaszcz, część natomiast nasuwa się na płytę zagłębiającą się z prawej strony.

Nieciągłości, które rozdzielają płyty poruszające się równoległe do siebie, to uskoki transformujące. Na rys. 3 uskoki *C-D* łączy grzbiet z grzbietem, a *A-B* rów z rowem. Dno Pacyfiku na przykład składa się z kilku płyt o bardzo różnych rozmiarach. Największą z nich jest Płyta Pacyficzna stanowiąca 21% powierzchni Ziemi. Porusza się ona w kierunku północno-zachodnim w stronę wielkich rowów oceanicznych: Aleuckiego, Kurylsko-Kamczackiego, Japońskiego i Mariańskiego.

Pouczające jest prześledzenie granicy płyty na mapce na okładce. Rowy oceaniczne i grzbiety są widoczne na tle rzeźby dna. Łatwo odnaleźć też uskoki transformujące dla typu grzbiet-grzbiet. Dotychczas staraliśmy się odpowiedzieć na pytanie: czy i jak poruszają się kontynenty lub płyty litosfery. Czytelnik ma jednak prawo zapytać, jaka jest przyczyna dryfu. Otóż przyczyną ruchu płyt jest konwekcja w płaszczu Ziemi, źródłem energii natomiast — energia cieplna wydzielana przy rozpadzie pierwiastków radioaktywnych zawartych w płaszczu.

Konwekcja stanowi jeden ze sposobów transportu ciepła. Jest to makroskopowy ruch cieczy lub gazu. Dzięki zwykłemu przewodnictwu ciecz pobiera ze źródła ciepło, które następnie jest przenoszone z cieczą do chłodnicy, gdzie — znowu dzięki przewodnictwu — zostaje oddane. Przykładem może być konwekcja w podgrzewanym naczyniu z wodą. Woda pobiera od dna ciepło i oddaje je powietrzu nad naczyniem. Okazuje się, że ilość energii przenoszonej drogą konwekcji jest na ogół większa niż dzięki przewodnictwu i promieniowaniu.

Rozważmy to zjawisko na przykładzie cieczy w płaskim naczyniu podgrzewanym od dołu, a chłodzonym od góry. Jeśli ogrzewalibyśmy naczynie idealnie równomiernie, to najniższej utworzyłaby się warstwa gorącej cieczy, a nad nią warstwy coraz chłodniejsze. Ale ogrzewana ciecz zwiększa swoją objętość, a więc cieplejsza jest lżejsza od zimniejszej. Dlatego taki warstwowy układ cieczy jest niestabilny. Wystarczy minimalne zaburzenie cieczy, aby rozpoczął się ruch. Wydzielmy myślowo pewną objętość cieczy. Jeżeli wskutek zaburzenia przeniesie się ona choćby minimalnie w górę, to zostanie otoczona cieczą trochę chłodniejszą, a więc i cięższą. Siła wyporu zgodnie z prawem Archimedeasa znacznie wypychać rozpatrywaną objętość cieczy w górę, gdzie różnice temperatur staną się większe, a więc i większa siła wyporu. Ostatecznie ciepła ciecz znajdzie się w pobliżu powierzchni, pociągając za sobą strumień ciepłej cieczy z dna. Jednocześnie na jej miejsce napływają znacznie z góry ciecz chłodna — cięższa. Na powierzchni ciepły płyn odda swoje ciepło i jako cięższy znów znacznie opadać w dół. Utworzy się w ten sposób obszar, gdzie ciecz porusza się po zamkniętym torze, tworząc tzw. komórki konwekcyjną.

Okazuje się jednak, że do powstania konwekcji nie wystarczy, by temperatura na dole była wyższa niż na górze. Istnieją bowiem dwa zjawiska, które utrudniają pojawienie się konwekcji. Są to lepkość (tarcie wewnętrzne) cieczy oraz przewodnictwo cieplne.

Tarcie wewnętrzne charakteryzuje współczynnik lepkości cieczy  $\eta$ . Przykładowo siła oporu stawiana przez ciecz kuli o promieniu  $r$  poruszającej się z prędkością  $v$  jest równa

$$F_0 = 6\pi r\eta v, \quad \text{a więc jest proporcjonalna do } \eta.$$

W cieczy łatwo przewodzącej ciepło konwekcja także będzie utrudniona. Wynika to z faktu, że temperatura w rozpatrywanej uprzednio objętości może w takim przypadku szybko zrównać się z temperaturą otaczającej cieczy i w efekcie siła wyporu zaniknie. Ilość ciepła przewodzonego w jednostce czasu jest proporcjonalna do współczynnika przewodnictwa cieplnego  $K$ . Interesuje nas jednak nie ilość przewodzonego ciepła, a raczej szybkość wyrównywania się temperatur. Dlatego też wygodnie jest wprowadzić tzw. współczynnik dyfuzji temperaturowej  $\kappa$ . Ilość ciepła odpowiadająca zmianie temperatury jednostki objętości o  $\delta T$  wynosi  $Q = c\rho\delta T$ , gdzie  $c$  jest ciepłem właściwym, a  $\rho$  gęstością cieczy. Ponieważ  $Q \sim K$  mamy

$$\delta T \sim \frac{K}{c\rho} =: \kappa.$$

Siła wyporu jest proporcjonalna do różnicy gęstości chłodnej i gorącej cieczy  $\Delta\rho$  oraz przyspieszenia grawitacyjnego  $g$ . Możemy więc napisać

$$F_w \sim \Delta\rho \cdot g \sim \alpha\Delta Tg,$$

gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem rozszerzalności objętościowej cieczy, a  $\Delta T$  różnicą temperatur chłodnej i gorącej cieczy.

O konwekcji pisaliśmy w numerze 4/1981.

**Rozwiązanie zadania F 107.**  
 Zbliżenie naelektryzowanego ciała wywołuje przegrupowanie elektronów w monecie (zjawisko indukcji elektrostatycznej) oraz polaryzację dielektryka, jakim jest woda. W efekcie zarówno moneta, jak i ciecz są przyciągane przez ciało. Ciecz ulega jednak deformacji, na powierzchni tworzy się „wzgórek”, z którego, niczym z równi pochyłej, zeslizguje się pięćdziesięciogroszówka. Skutek jest więc taki, jak gdyby ciało ją odpychało. Czytelnikowi proponujemy zastanowienie się nad przytoczonymi poniżej pytaniami i eksperymentalne zweryfikowanie odpowiedzi. Ujawnią się wtedy pewne szczegóły, które pominięto w rozwiązaniu.

1. Jak wynik doświadczenia zależy od wielkości monety?
2. Jakie będzie zachowanie pływającej igły?
3. Czy przebieg doświadczenia uległby zmianie, gdyby zamiast monety użyć krążka z dielektryka?

Charakterystyczne rozmiary komórek konwekcyjnych są zwykle rzędu głębokości cieczy. Tylko taka konwekcja jest stabilna, tzn. tylko wtedy po „zamieszaniu” cieczy szybko wraca do pierwotnego stanu. Każda komórka o szerokości dużo większej niż wysokość jest niestabilna i chętnie rozpada się na kilka mniejszych. Na przykład proces dzielenia się „za szerokiej” komórki w płaszczu Ziemi przebiega następująco:

Biorąc pod uwagę trzy omówione wyżej czynniki: siłę wyporu, siłę oporu i przewodnictwo cieplne cieczy widzimy, że o pojawieniu się konwekcji decyduje następująca wielkość:

$$\frac{F_w}{F_o \cdot \kappa} \sim \frac{\alpha \rho^2 g \Delta T}{\eta K}$$

Zbadajmy jej wymiar:

$$\left[ \frac{\alpha \rho^2 g \Delta T}{\eta K} \right] = \frac{\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \frac{1}{\text{K}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)^2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{K}}{\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \frac{\text{J}}{\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s}}} = \frac{1}{\text{m}^3}$$

Chcielibyśmy oczywiście, żeby nasze rozważania nie zależały od tego, jakimi jednostkami się posługujemy. Żeby otrzymać wielkość bezwymiarową wystarczy pomnożyć  $F_w/F_o \cdot \kappa$  przez wielkość o wymiarze  $\text{m}^3$ . Jedyną wielkością o wymiarze długości występującą w tym problemie jest grubość warstwy cieczy  $h$ . Wiemy ponadto z doświadczenia, że konwekcja występuje łatwiej, gdy grubość ta jest duża.

Tak więc konwekcja pojawi się wtedy, gdy bezwymiarowa liczba (liczba Rayleigha)

$$R = \frac{\alpha \rho^2 g \Delta T h^3}{\eta K}$$

będzie miała wartość większą od pewnej wartości krytycznej. Przykładowo dla nieskończonej warstwy cieczy o skończonej grubości krytyczna wartość liczby Rayleigha wynosi 657, jeżeli nie występuje tarcie między cieczą i ściankami, i około 1800, jeśli tarcie to występuje. W przypadku konwekcji w warstwie kulistej wartość ta jest rzędu kilkudziesięciu tysięcy.

Zanim zaczniemy mówić o warunkach pojawienia się konwekcji w płaszczu Ziemi, musimy jednak rozstrzygnąć, czy materiał, z którego zbudowany jest płaszcz, ma własności cieczy. Próbowano to zrobić już w pierwszej połowie XIX wieku. Obliczono w tym celu precesję osi Ziemi przy założeniu, że jej wnętrze wypełnia ciecz. Porównanie z obserwacjami wykazało jednak, że założenie to jest niesłuszne — wnętrze Ziemi jest ciałem stałym. Wniosek ten potwierdziły później także obserwacje fal sejsmicznych rozchodzących się w płaszczu.

Jednak to, że płaszcz zachowuje się jak ośrodek sprężysty dla fal o okresie drgań równym kilka sekund, nie oznacza, że podobnie będzie dla sił działających miliony lat. Wosk, ciało miękkie i deformowalne, wytrzymuje długotrwałe działanie małych sił. Dzięki temu w londyńskim gabinecie figur woskowych postacie wykonane z wosku nie deformują się pod własnym ciężarem. Ale bywa też i tak, że ciało dość twarde, np. smoła, zachowuje się jak gęsta ciecz. Podobnie ruch lodowca spowodowany jest rozplywaniem się lodu pod własnym ciężarem. Może własności takie mają również skały, z których zbudowany jest płaszcz Ziemi?

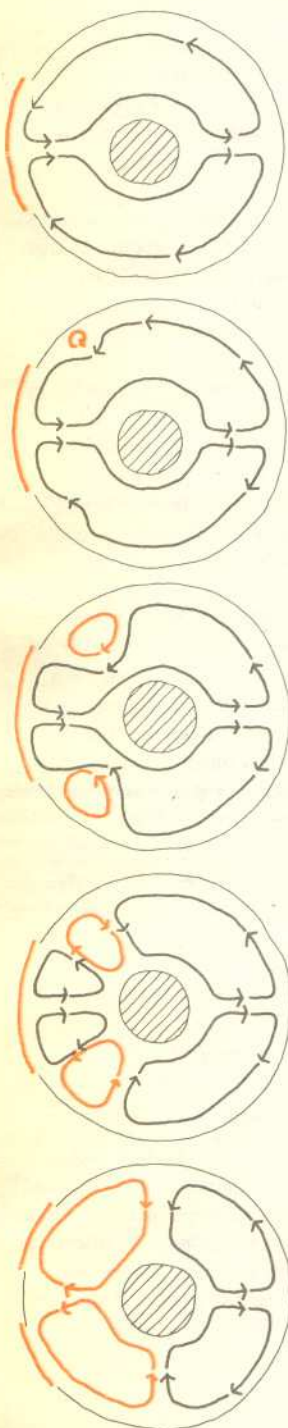
Jednym z argumentów przemawiających za taką możliwością jest istnienie na Ziemi obszarów, obciążonych lodowcem podczas ostatniego zlodowacenia, które po ustąpieniu lodowca (ok. 15 tys. lat temu) zaczęły się podnosić! Ruch ten trwa do dzisiaj z prędkością rzędu kilku centymetrów na stulecie.

Najbardziej znanymi przykładami takich obszarów jest Półwysep Skandynawski i północno-wschodnia część Kanady. Badania grawimetryczne wykazują niezbicie, że podnoszenie się nie jest wynikiem rozprężania ściśniętych skał, lecz wywołane jest dopływem materii spod sąsiednich obszarów. A więc jednak płaszcz ma własności cieczy. Na podstawie szybkości podnoszenia się można było obliczyć jej lepkość.

Badania większości obszarów polodowcowych wskazują na to, że górną część płaszczu (ok. 100 km) traktować trzeba jak ciało sprężyste. Poniżej jest dość cienka astenosfera o lepkości  $5 \cdot 10^{19}$  kg/m·s, zaś lepkość reszty płaszczu jest rzędu  $10^{21}$  kg/m·s.

O tym, czy konwekcja jest możliwa, decyduje, jak już wiemy, wartość liczby Rayleigha. Na podstawie badań laboratoryjnych skał, z których najprawdopodobniej zbudowany jest płaszcz, określono ciepło właściwe, współczynnik przewodnictwa cieplnego i współczynnik rozszerzalności cieplnej. Wynoszą one odpowiednio  $1,3 \cdot 10^3$  J/kg·K,  $4,6$  J/m·K·s,  $4 \cdot 10^{-5}$  1/K. Wielkości te słabo zależą od ciśnienia i temperatury, dlatego można przyjąć, że są one w całym płaszczu stałe. Gęstość wyznacza się zwykle na podstawie badań sejsmicznych. Do określenia liczby Rayleigha konieczne są jeszcze dwie wielkości: grubość warstwy konwekcyjnej i różnica temperatur.

Nie zostało dotychczas rozstrzygnięte, jaką część płaszczu Ziemi obejmuje konwekcja. Ponieważ w grubej warstwie konwekcja pojawia się łatwiej (duża liczba Rayleigha) można sądzić, że obejmuje ona cały płaszcz, a więc sięga do głębokości 2900 km. Istnieją jednak argumenty za tym, że grubość komórek konwekcyjnych wynosi około 700 km. Trzęsienia Ziemi występują tylko do tej głębokości. Brak głębszych trzęsień może świadczyć o braku wzajemnych ruchów w dolnej części płaszczu. Na głębokości tej następuje również gwałtowny skok gęstości płaszczu. Mógłby on stanowić przeszkodę dla prądów konwekcyjnych. Problem grubości warstwy objętej konwekcją pozostaje więc otwarty.



Niewielkie początkowo zaburzenie rozrasta się w coraz większą komórkę, która po pewnym czasie rozrywa tę „za szeroką”. Jedna z trzech powstałych w ten sposób komórek znika, a dwie pozostałe osiągają stabilne rozmiary.

miliony lat wstecz

3 000

2 000

1 000

300

dziś

○ jądro Ziemi,  
G komórka konwekcyjna,  
— kontynent.

Rys. 4

Oszacujemy liczbę Rayleigha od dołu. Dla  $h = 10^{21}$  kg/m $\cdot$ s,  $\eta = 700$  km,  $\Delta T = 1000^\circ$  C

$$R \approx 34\,000\,000.$$

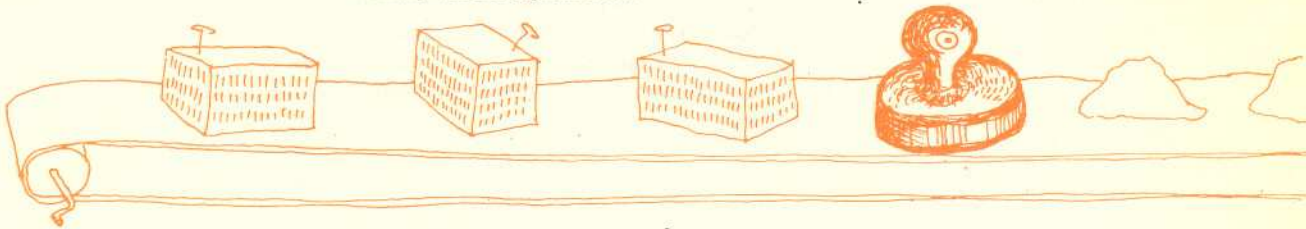
Czyli nawet przy wyborze najgorszych, z punktu widzenia konwekcji, wartości parametrów liczba Rayleigha znacznie przekracza wielkość krytyczną. Tak więc konwekcja musi się pojawić.

Ciekawą hipotezę wiążącą rozmieszczenie kontynentów z konwekcją w płaszczu Ziemi i rozmiarami jądra Ziemi wysunął w 1956 roku fizyk angielski Stanky Runcorn. Założył on, że jądro wydzielalo się stopniowo z początkowo jednorodnego materiału, z którego zbudowana była Ziemia. Materiał ten zawierał trzy składniki: najcięższy — żelazo i nikiel, ciężkie ultrazasadowe skały i najlżejsze skały kwaśne. Żelazo i nikiel tworzyły jądro, a lekkie skały wydzielaly się na powierzchnię. Jednocześnie w płaszczu zachodziła konwekcja. Okazuje się, że wielkość komórek konwekcyjnych określona jest przez rozmiary jądra. Dla małego jądra cały płaszcz Ziemi może obejmować jedna wielka komórka konwekcyjna w kształcie torusa (rys. 4). W miarę wzrostu jądra przepływ taki staje się niestabilny i komórka rozpada się na dwie mniejsze.

Dopóki istniała jedna komórka konwekcyjna, lekki materiał spiętrzał się nad obszarem, gdzie chłodny strumień konwekcyjny opadał w dół tworząc jeden kontynent. Gdy promień jądra zwiększył się do 0,06 promienia Ziemi, nastąpił rozpad komórki na dwie mniejsze. Nowy system prądów konwekcyjnych rozerwał kontynent i rozsunął jego części. Dalszy wzrost jądra powodował dalszy podział komórek konwekcyjnych. Obecnie, gdy promień jądra wynosi 0,55 promienia Ziemi, należy się spodziewać pięciu komórek konwekcyjnych.

Rozpad komórek musi być katastrofą na ogólnoziemską skalę, należy się więc spodziewać w tym okresie wzrostu aktywności wulkanicznej. Rzeczywiście — badania wieku skał magmowych wykazały istnienie czterech okresów, kiedy aktywność była wyjątkowo duża: 2600, 1800, 1000 i 250 mln lat temu. Przyjmując, że ilość żelaza osadzająca się w jądrze jest proporcjonalna do powierzchni jądra oraz do ilości żelaza pozostałego w płaszczu można wyznaczyć okresy, kiedy następować powinny zmiany konwekcji. Wyniki tych obliczeń przedstawione są na rys. 4.

Hipoteza Runcorna choć, jak się okazało, oparta na zbyt prostych założeniach wskazuje na niezwykle interesującą możliwość powiązania wędrówki kontynentów ze zmianami konwekcji w miarę wzrostu jądra Ziemi.



## Zadania

Redaguje mgr Krzysztof S. NOWIŃSKI

M 283. Przekątne  $AC$  i  $BD$  dzielą czworokąt  $ABCD$  na trójkąty  $OAB$ ,  $OBC$ ,  $OCD$  i  $ODA$ , przy czym promienie okręgów wpisanych w te trójkąty są równe. Pokazać, że  $ABCD$  jest rombem. Rozwiązanie na str. 10

M 284. Znaleźć ostatnią cyfrę liczby  $[(6 + \sqrt{31})^{1982}]$ .  $[x]$  oznacza największą liczbę całkowitą nie większą od  $x$ .

Rozwiązanie na str. 9

M 285. Pokazać, że jeżeli dowolnie ponumerujemy punkty zaznaczone na rysunku liczbami 1, 2, ..., 18, to znajdzie się odcinek, dla którego różnica numerów końców będzie większa od trzech.

Rozwiązanie na str. 11

Redaguje mgr Tomasz TRATKIEWICZ

F 106. Różnoimienne ładunki przyciągają się w próżni silniej niż w dielektryku. Przenosząc zatem równocześnie dane ładunki po torach:  $AA'CDA$  i  $BB'EFB$  (patrz rysunek) uzyskujemy „perpetuum mobile”. Znaleźć lukę w rozumowaniu.

Rozwiązanie na str. 8

F 107. Na powierzchni wody pływa moneta (np. pięćdziesięciogroszówka). Co nastąpi, gdy zbliży się do niej naelektryzowane ciało?

Rozwiązanie na str. 3

