

## Paleomagnetyzm, a odrodzenie teorii Wegenera: synopsis

Marek Lewandowski<sup>1,2</sup>



Palaeomagnetism and revival of Wegener's theory: a synopsis. *Prz. Geol.*, 63: 1284–1291.

*Abstract.* This article envisages turning points in the process of implementation of the continental drift hypothesis to the knowledge on the development of the Earth's crust. In the author's opinion, they were most of all linked with the development of palaeomagnetism, a discipline integrating methods of geophysics and geology. Alfred Wegener has been included into the Science Hall of Fame, thanks to studies by Brunhes on inversely magnetized rocks of Auvergne, discovery of geomagnetic inversions of Icelandic lavas by Hospers, polar wander paths construction by Creer and Irving, ending with Pangea reconstruction by Bullard, Everett and Smith, bridging the concept of continental drift and plate tectonics theory.

**Keywords:** palaeomagnetism, continental drift, Wegener, Pangea

*Iść i padać  
Z – padłych – wstawać.  
Edward Stachura – „Prefacja”*

Intencją tego eseju jest przybliżenie Czytelnikowi historii badań paleomagnetycznych w kontekście rozwoju poglądów na ideę wędrówki (dryftu) kontynentów. Punktem zwrotnym tej historii było odkrycie inwersyjnej natury pola geomagnetycznego, sformułowanie hipotezy osiowego, geocentrycznego dipola magnetycznego oraz zdefiniowanie pojęcia bieguna paleomagnetycznego, a w konsekwencji konstrukcja kontynentalnych krzywych pozornej wędrówki bieguna (wyjaśnienie terminów – patrz tekst). Apogeum rewolucji w naukach o Ziemi, w której niepoślednią rolę odegrały badania paleomagnetyczne, przypadło co prawda na przełom lat 50. i 60. XX w., w okresie narodzin teorii ekspansji den oceanicznych i fundamentów tektoniki płyt litosfery, lecz jej początki sięgają 1912 r. i hipotezy Alfreda Wegenera o istnieniu dawnego kontynentu Pangei, który uległ rozpadowi, dając początek współczesnej konfiguracji kontynentów.

### DAWNO TEMU

Wielu autorów piszących o Pangei przywołuje dzieło *Novum Organum* Francisca Bacona (1620) na dowód, że Bacon pierwszy zauważył podobieństwo linii brzegowych Afryki i Ameryki Południowej. Jednak przesłanie Bacona jest głębsze, aniżeli tylko banalna konstatacja o (geometrycznym) podobieństwie<sup>3</sup> dwóch kontynentów. Na str. 177 znajdziemy następujący fragment: „...*similar instances are not to be neglected, in the greater portions of the world's conformation; such as Africa and Peruvian continent, which reaches to the Straits of Magellan; both of which possess a similar isthmus and similar capes, a circumstance not to be attributed to mere accident*” [podkreślenie autora]. Zdaniem Bacona podobieństwo kontynentów nie może być przypadkowe. W kwestii Ameryki Południowej i Afryki, Francis Bacon miał rację.

### PRZED I WOJNĄ ŚWIATOWĄ

Przystawalność linii brzegowych kontynentów wokół atlantyckich została po raz pierwszy przedyskutowane, w sensie naukowym, w dziele Antonio Snider-Pellegriniego (1858), który uważał, że kontynenty, dziś rozdzielone Atlantykiem, mogły być złączone w karbonie wzdłuż swoich obecnych linii brzegowych. Zdaniem tego autora, jedność kontynentów była najlepszym wytłumaczeniem podobieństwa skał i fauny karbońskiej po obu stronach oceanu. Austriacki geolog Edward Suess postulował istnienie superkontynentu Gondwany oraz istnienie dawnego oceanu Tetydy (Suess, 1885, 1893), implikując poziome ruchy kontynentów. Na początku XX w., hipotezę istnienia dawnego superkontynentu i jego rozpadu rozwijali (zapewne niezależnie) Taylor (1910) oraz Baker (1911).

Mobilne kontynenty nie były zatem obce filozofii nauk przyrodniczych 100 lat temu. Alfred Wegener musiał je znać (choć cytuje tylko Suessa oraz Taylora i aż dwukrotnie Maurycego Piusa Rudzkiego, profesora UJ i ojca polskiej geofizyki – patrz Wegener, 1920), jednak potrafił nadać dawnym koncepcjom nowy, interdyscyplinarny kształt.

W dniu 6 stycznia 1912 Wegener zaprezentował swoją hipotezę (Wegener, 1912) na dorocznym spotkaniu Geologische Vereinigung w Muzeum Senckenberg we Frankfurcie. W trakcie wystąpienia wskazywał, że wiele obserwacji geologicznych, w tym paleoklimatycznych, można lepiej wytłumaczyć po złożeniu kontynentów w jeden superkontynent, nazywany dziś Pangeą<sup>4</sup>. Dowód potwierdzający poprawność tej idei nadszedł od strony dyscypliny naukowej, która dopiero się rodziła, jednocześnie z ideą Wegenera. Tą dyscypliną był paleomagnetyzm, badający naturalne namagnesowanie skał (ang. *natural remanent magnetization* – NRM) w celu poznania historii pola geomagnetycznego.

<sup>1</sup> Instytut Nauk Geologicznych, Polska Akademia Nauk, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa; lemar@twarda.pan.pl.

<sup>2</sup> Instytut Geofizyki, Polska Akademia Nauk, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa; lemar@igf.edu.pl.

<sup>3</sup> Z formalnego punktu widzenia, kształty kontynentów Afryki i Ameryki Północnej w części atlantyckiej nie są podobne (ang. *similar*), lecz dopasowane lub zazębiające się (ang. *fitting, interlocking*).

<sup>4</sup> Nie jest jasne, kto pierwszy użył nazwy Pangea w kontekście karbońsko-permskiego superkontynentu, choć zwykle przypisuje się to Wegenerowi. Jednak słowo Pangea pojawia się dopiero w II wydaniu dzieła Wegenera (1920) i to tylko raz, jako Pangäa.

Początków profesjonalnego paleomagnetyzmu należy upatrywać w pracach Bernarda Brunhesa. W latach 1900–1910 był on dyrektorem do dziś czynnego obserwatorium, zbudowanego na wierzchołku wygasłego wulkanu Puy-de-Dôme w Owerni oraz profesorem Uniwersytetu w Clermond-Ferrand. W roku 1906 Brunhes, inspirowany badaniami Giuseppe Folgheraitera nad namagnesowaniem wypalanych cegieł, pisał tak: „... if the direction of the magnetization in beds of natural baked clay is well defined and different from that of the present field, then we are entitled to admit that the direction of magnetization is that of the geomagnetic field existing when the volcanic flow baked the clays.” (Brunhes, 1906; przekład angielski – Laj i in., 2002).

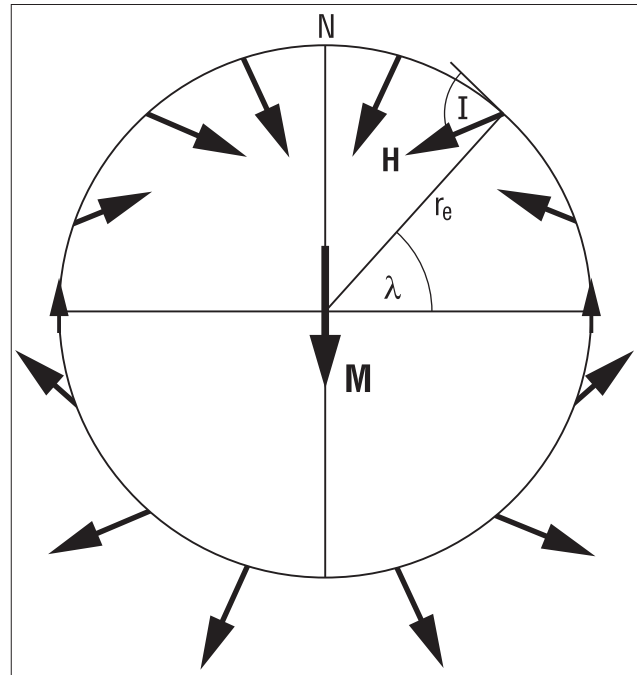
Z tego właśnie powodu, Brunhes zajął się badaniem namagnesowania przeobrażonych ilów wieku miocenijskiego i stwierdził, że mają one polarność odwrotną do dzisiejszej, sugerując po raz pierwszy, że pole geomagnetyczne mogło zmienić biegunowość. Zbiegiem okoliczności, w tym samym roku Richard D. Oldham (1906) wykazał, że jądro Ziemi jest płynne (jądro wewnętrzne okazało się stałe dzięki pracom Inge Lehman w latach trzydziestych), czym zburzył paradygmat Wiliama Gilberta o stałym magnesie we wnętrzu planety. Ta wiedza przyda się później do stworzenia pierwszej koncepcji geodynamy, które mogłoby generować pole geomagnetyczne zdolne do odwracania polarności.

## PO I WOJNIE ŚWIATOWEJ

Kolejne prace pojawiły się w 1925 r., kiedy Raymond Chevallier (1925) z Uniwersytetu w Paryżu wykazał, że kilka prób pobranych z law Etny (erupcja 1610 r.) jest namagnesowanych zgodnie z polarnością dzisiejszego pola geomagnetycznego i w podobnym do niego kierunku. Wkrótce potem, bo w roku 1926, francuski glaciolog Paul-Louis Mercanton z Uniwersytetu w Lozannie zaproponował wykorzystanie namagnesowania skał do testowania idei Wegenera. Mercanton wyszedł z założenia, że jeżeli skały, tak jak dowodził Brunhes, magnesowały się zgodnie z kierunkiem lokalnego wektora geomagnetycznego, a oś geomagnetyczna pokrywała się z osią obrotu Ziemi, to ruch kontynentu powinien być znaleźć swoje odbicie poprzez zmianę kierunku NRM (Mercanton, 1926).

W ogólności, idea Mercantona była poprawna. Dla osiowego, centralnego dipola geomagnetycznego (ang. *geocentric axial dipole* – GAD), istnieje prosty związek pomiędzy szerokością geograficzną, a geomagnetyczną, przy czym na równiku wektor geomagnetyczny jest poziomy (inklinacja = 0), a na biegunach – pionowy (inklinacja +90, -90, odpowiednio na biegunach geograficznych N i S). Z kąta inklinacji można zatem wywodzić paleoszerokość geograficzną, na której powstawały badane skały (ryc. 1). To esencja paleomagnetyzmu, jeżeli pominąć szczególności, w których wiadomo co tkwi...

W listopadzie 1926 r. odbyło się w Nowym Yorku sympozjum zorganizowane przez American Association of Petroleum Geologists, na którym Alfred Wegener po raz kolejny zaprezentował swoją hipotezę. Obrady prowadził Charles Schuchert, wybitny paleontolog z Uniwersytetu w Yale, który nie zostawił na niej suchej nitki. Wegener spokojnie wysłuchał tyrady Schucherta, który swoją krytykę



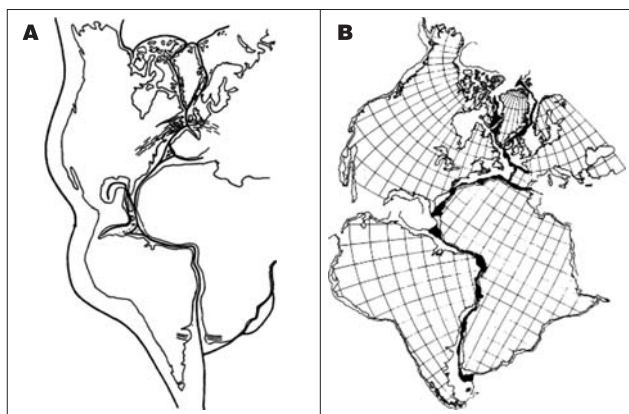
**Ryc. 1.** Schematyczny obraz związku inklinacji (I) lokalnego wektora geomagnetycznego (H) z szerokością geograficzną (wg McElhinny, 1973).  $r_e$  – promień Ziemi,  $\lambda$  – szerokość geograficzna. Oś umieszczonego centralnie dipola geomagnetycznego (M) pokrywa się z osią obrotu Ziemi, ilustrując koncepcję GAD (patrz tekst)

**Fig. 1.** Scheme of the magnetic inclination (I) vs geographic latitude for the geocentric axial dipole model (after McElhinny, 1973).  $r_e$  – Earth's radius,  $\lambda$  – geographic latitude. The axis of the centrally located geomagnetic dipole (M) coincides with the Earth's rotation axis, illustrating the GAD concept (see text)

skierował pod adresem głównej, jego zdaniem, wady koncepcji Wegenera. Miał nią być argument podobieństwa konturów atlantyckich linii brzegowych Ameryk oraz Europy i Afryki. Schuchert argumentował, że linie brzegowe kontynentów miliony lat temu nie mogły być takie same, jak są dziś. Oczywiście, miał rację, tyle tylko, że przekład angielski dzieła Wegenera nie był ścisły, przez co Schuchert walczył z nieistniejącym bytem. Wegener składał bowiem kontynenty wzdłuż granic szelfów, co jest jasne dla każdego, kto przeczytał jego pracę i wnikliwie obejrzał narysowaną przez autora rekonstrukcję. Wegener był na sali, ale nie protestował – jak się przypuszcza z wrodzonej nieśmiałości lub słabej znajomości angielskiego... Paląc fajkę wymruczał tylko: „Nevertheless, it moves!” (patrz Hughes, 2001).

## II WOJNA ŚWIATOWA

W czasie wojny mało kto zajmował się wędrującymi kontynentami. Znacznie bardziej istotne było precyzyjne namierzanie celów wojskowych, szczególnie na morzach i oceanach, także pod ich powierzchnią. Potencjalne zaburzenia pola magnetycznego mogły utrudniać precyzyjną nawigację okrętów podwodnych, dlatego marynarka USA przeprowadzała dokładne pomiary anomalii magnetycznych dna Atlantyku. Dane pomiarowe przez długi czas miały klauzulę tajności, jednak po wojnie udostępniono je do prac naukowych. Miało to swoje konsekwencje dla zrozumienia genezy skorupy oceanicznej, do czego jeszcze powrócę.



**Ryc. 2.** Rekonstrukcja Pangei wg: **A** – Wegenera (1915) i **B** – Bullarda i in. (1965). Obie rekonstrukcje opierają się na zbieżności krawędzi szelfów (wg Drake’a, 1976)

**Fig. 2.** Pangea reconstruction according to **A** – Wegener (1915) and **B** – Bullard et al. (1965). Both reconstructions are based on continental shelves compliance (after Drake, 1976)

## PO II WOJNIE ŚWIATOWEJ

Mylny obraz istoty rekonstrukcji Wegenera przetrwał przez lata (patrz Drake, 1976) i nawet Bullard i in. (1965), układając puzzle z kontynentów wokółatlantycznych, podkreślali ich dopasowanie wzdłuż linii szelfów, w kontraście do rekonstrukcji Wegenera, opartej (rzekomo) na przebiegu linii brzegowych. Jednak ich rekonstrukcja (w literaturze anglojęzycznej określana jako *Bullard's fit*), nie różniła się zasadniczo od oryginalnej wersji Wegenera (ryc. 2).

Wielu zwolenników Wegenera już wcześniej wskazywało, że składał on kontynenty wzdłuż szelfów kontynentalnych, a nie linii brzegowych. Dopiero jednak Ellen Drake (1976) przywróciła honor Wegenerowi w tej kwestii, wskazując przy tym, że tłumaczenia prac naukowych wymaga nie tylko znajomości języków, ale i odrobiny zrozumienia istoty rzeczy. Poniżej fragment listu Alfreda Wegenera ze stycznia 1911 do jego żony, Elsy: „*Look at the world map again please: doesn't the east coast of South America fit precisely with the west coast of Africa, as if they had been connected formerly? It agrees even better when one considers the bathymétrie chart of the Atlantic Ocean and compares not the present continental coastline, but the margin of the continental slope in the deep sea.*” [tłumaczenie na angielski za Ellen Drake, 1976; podkreślenie autora].

Rekonstrukcja Bullarda i in. (1965), wykorzystująca teorem rotacji Eulera, czysto kinematyczna i nie odwołująca się *explicité* do paleomagnetyzmu, miała swoją siłę oddziaływania na sceptyków. Potwierdzała przy tym wiarygodność badań paleomagnetycznych (o czym niżej). Dzięki temu hipoteza Wegenera zyskała mocne, niezależne wsparcie teoretyczne i eksperymentalne, stając się teorią, odnajdującą pełny wyraz w tektonice płyt.

## USA

Zanim jednak Bullard i in. (1965) zaprezentowali zrekonstruowaną Pangeę, paleomagnetyzm przeszedł prawdziwą rewolucję i stał się impulsem do istotnych przewartościowań w naukach o Ziemi. Paleomagnetyczny

przezwrot miał swój początek w latach 1949–1951. Dzięki blisko 400-letniej historii obserwacji geomagnetycznych, szybkie zmiany elementów ziemskiego pola magnetycznego – tzw. zmiany wiekowe – były już dobrze poznane. W Carnegie Institution w Waszyngtonie grupa młodych geofizyków, podobnie jak Chevalier, starała się poznać przedhistoryczną zmienność tego pola, wykorzystując naturalne namagnesowanie skał, zebranych w rejonie północno-wschodnich Appalachów. W wyniku podjętych badań Torreson i in. (1949) stwierdzili, że płasko leżące skały osadowe od dolnego paleozoiku po neogen były namagnesowane w kierunku współczesnego bieguna geograficznego i mają polarność normalną, tzn. taką samą jak dziś. Był to miód na serce tych, którzy wyznawali stabilność kontynentów w czasie geologicznym i niezmienną polarność pola geomagnetycznego.

John Waren Graham (współautor pracy Torresona z 1949 r.) nie czuł się jednak komfortowo, gdyż sfałdowane skały osadowe wieku sylurskiego z Rosehill Formation (Maryland, USA) wykazywały kierunek znacząco odmienny od współczesnego. Poszukując przyczyn tego stanu rzeczy, Graham wpadł na pomysł, żeby sprawdzić rozkład kierunków NRM po sprowadzeniu skrzydeł struktury fałdowej do paleohoryzontu. Musiał być zaskoczony, kiedy stwierdził, że kierunki namagnesowania wykazywały teraz znacznie lepsze skupienie, z kierunkami NRM zdecydowanie odbiegającymi od kierunku współczesnego. Wniosek był oczywisty – kierunki były przedfałdowe, a ponieważ wiek fałdowania był hercyński, to namagnesowanie musiało przetrwać miliony lat. Jeżeli tak, to paleomagnetyzm może być testem dla ruchu kontynentów (Graham, 1949), tak jak postulował to Mercanton. W kolejnej pracy z Torresonem (Graham & Torreson, 1951) Graham zdecydował się na przedstawienie innej interpretacji i odrzucił przedfałdową genezę NRM, stwierdzając, że kierunki w sfałdowanych warstwach sylurskich są kontrolowane przez wewnętrzną deformację skał. Jak pisał Irving (1988) „... *this is a classic instance of not seeing forest from the trees.*”

Test fałdowy Grahama wszedł do metodyki paleomagnetycznej, jednak on sam nie wykorzystał szansy, jaką dał mu ten błyskotliwy pomysł. Zresztą, w pragmatycznie i aplikacyjnie nastawionej geologii w USA, pomysł badań nad absurdalnie wyglądającą koncepcją wędrówki kontynentów budził niechęć tak wielką, że Amerykanie z uporem budowali antytezę mobilizmu. Presja środowiska naukowego mogła być, moim zdaniem, jedną z przyczyn myślowego zwrotu Grahama. Geolodzy w USA obudzili się dopiero na początku lat 60. XX w., kiedy Hary Hess zrozumiał i opisał znaczenie topografii dna Atlantyku (w istocie, dzielił się swoimi spostrzeżeniami już kilka lat wcześniej) jako przejawu lateralnej ekspansji dna oceanicznego względem współbieżnego z krawędziami kontynentów grzbietu transatlantycznego. Jego praca (Hess, 1962) była inspiracją dla tektoniki płyt i była też najczęściej cytowaną pracą geofizyczną tamtych czasów. W kontekście mechanizmu powodującego ruch kontynentów, Hess (1962) pisał: „*The Mid-Atlantic Ridge is truly median because each side of the convecting cell is moving away from the crest at the same velocity, ca. 1 cm/yr. A more acceptable mechanism is derived for continental drift whereby continents ride passively on convecting mantle instead of having to plow through oceanic crust.*”



## WIELKA BRYTANIA

Ted Irving i jego dwaj koledzy z Uniwersytetu w Cambridge, Ken Creer oraz Ian Hospers, byli pod mentorską opieką Keitha Runcorna, osobowości nieprzeciętnej pod każdym względem. Prace Runcorna obejmowały zagadnienia konwekcji we wnętrzu Ziemi, pól magnetycznych planet, magneto hydrodynamiki jądra Ziemi, geodezji planetarnej, wędrówki biegunów, wędrówki kontynentów, a w końcu tektoniki płyt. Wspólnym mianownikiem pierwszych badań paleomagnetycznych w Cambridge było podejście stratygraficzne w metodyce pobierania prób. Hospers zaczął pierwszy. Latem 1950 r. został członkiem holenderskiej ekspedycji naukowej na Islandię. Jednym z szefów tej wyprawy był Willem van Bemellen, który zasugerował Hospersowi podjęcie próby korelacji law na podstawie intensywności ich namagnesowania (patrz Irving, 2008). Jak często się zdarza, hipoteza robocza okazała się nietrafna, jednak wyniki badań przyniosły wiekopomne odkrycie. Hospers (1951) wykazał bowiem bez cienia wątpliwości, że polarność law islandzkich jest skorelowana z ich pozycją stratygraficzną. Wyniki te, stanowiące pierwszą część jego pracy doktorskiej i będące zwieńczeniem badań nad naturą skał namagnesowanych odwrotnie do pola współczesnego (patrz Brown, 2010), została opublikowane w *Nature* w ciągu dwóch tygodni (*sic!*) od wpłynięcia manuskryptu do redakcji.

Efektom pracy doktorskiej Hospersa, obronionej na Uniwersytecie w Utrechcie w 1953 r., było wykazanie osiowego charakteru pola dipolowego w neogenie (patrz ryc. 1), niezależnie od polarności tego pola. Ponadto Hospers przedstawił nowatorski sposób obrazowania wyników paleomagnetycznych, polegający na obliczaniu położenia paleobieguna z kierunków NRM (Hospers, 1954). Wykazał on w ten sposób, że obliczając biegun paleomagnetyczny ze średniego kierunku NRM, wyznaczamy *de facto* dawny biegun geograficzny. Jednocześnie w błyskotliwy sposób udowodnił, że rezultaty z Carnegie (Torreson i in., 1949) były efektem przemagnesowania skał w polu współczesnym.

Nie wszyscy akceptowali idee Hospersa. Patrick M.S. Blackett (fizyk nuklearny, laureat nagrody Nobla, 1948) w trakcie swojego wykładu w 1954 r. powiedział: „*It is still just possible, even if unlikely, that all reversed rocks have become so by such mechanism [self-reversal], so that perhaps, after all, the earth's magnetic field may never have reversed!*” (patrz Laj i in., 2002). Jak pokazała historia, Hospers miał jednak rację, a bez jego odkrycia zrozumienie genezy pasowej struktury anomalii magnetycznych den oceanicznych (Vine & Matthews, 1963), a w konsekwencji potwierdzenie hipotezy Hessa (1962) o ekspansji skorupy oceanicznej, nie byłoby możliwe<sup>5</sup>.

Ted Irving rozpoczął badania tuż po Hospersie. Historia Irvinga to przykład, że uprawianie *frontier science* może być równie fascynujące, co frustrujące. Runcorn pozostawił sporo swobody swoim podopiecznym, dbając bardziej o naukowe, aniżeli organizacyjne aspekty ich

działań. W słowach podziękowania za medal Wollastona (Geological Society of London, 2005) Irving wspominał tamte czasy: „*These were fluid even chaotic years. No-one was really in charge, although some may have thought they were. Out of this disparate group of workers (to which I should add the name R.A. Fisher who created our statistics) came the procedures for drawing ancient latitudes and eventually the general framework for the palaeogeography of Earth's surface features. Were it not for the help and encouragement from this group in the early 1950s I would not be standing here today*”. Wspomniany przez Irvinga R.A. Fisher był profesorem genetyki w Cambridge i twórcą fundamentalnej dla analiz paleomagnetycznych statystyki na sferze (Fisher, 1953). Podobno stworzenie tej statystyki zajęło mu kilka dni. Swoją pracę wykonał na prośbę Runcorna specjalnie dla Hospersa, żeby ten mógł ją wykorzystać do obliczania średniego kierunku NRM. Sam też wykonał pierwsze obliczenia dla Hospersa w roku 1951.

W czerwcu 1951 roku Irving, świeżo upieczony licencjusz (*bachelor*) geologii Uniwersytetu w Cambridge, ni stąd, ni z owąd dostał od Runcorna list z pytaniem, czy nie chciałby zająć się badaniem zmian wiekowych pola geomagnetycznego w skałach proterozoiku. Irving, jak sam przyznawał, nie miał pojęcia co to są zmiany wiekowe, ale ofertę z miejsca przyjął. Z kolei Runcorn nie był geologiem ale, kierując się sugestią profesora geologii, T.C. Phemistera z Uniwersytetu w Aberdeen, pobrał wraz z Irvingiem kilka prób z drobnoziarnistych czerwonych piaskowców paleoproterozoiku Loch Torridon, zwanych lokalnie Craigianan (*Sunny Rock*). W tamtych czasach szukanie zapisu zmian wiekowych w piaskowcach prekambryjskich było głównie stratą czasu i zajęciem dla paleomagików<sup>6</sup>, ale kto nie wie, ten się nie boi. Nawet dziś takie badania stanowią duże wyzwanie. Wskazują one jednak, że 1,5 mld lat temu frekwencja inwersji geomagnetycznych była niższa, stabilność geodynamy większa, a jądro wewnętrzne było znacząco mniejsze od dzisiejszego (Veikkolainen & Pesonen, 2014), co oznacza, że jądro płynne ulega powolnej krystalizacji. Niedobrze to wróży życiu na Ziemi, które zawdzięcza wiele magnetycznej tarczy, generowanej przez płynne jądro...

Pomiary NRM nie były w latach 50. XX w. sprawą banalną, bo jedyny wystarczająco czuły magnetometr znajdował się w Manchesterze, w laboratorium lorda Blacketta. Runcorn dobrze znał Blacketta, więc Irving mógł szybko przystąpić do pomiarów namagnesowania pobranych prób. Okazało się, że odbiega ono znacznie od kierunku współczesnego. Z kolei próby z innych formacji wiekowych dawały takie same wyniki, jak te z USA – skały były namagnesowane zgodnie z kierunkiem współczesnym. Irving skoncentrował się zatem na badaniach stabilnych piaskowców prekambryjskich, co wkrótce przyniosło mu sukces. Udokumentował nie tylko odmienny od dzisiejszego kierunek NRM, ale także sekwencję zmian polarności magnetycznej w profilu stratygraficznym oraz wykazał

<sup>5</sup> Blackett też miał częściowo rację, gdyż w skałach magmowych zjawisko samoodwrócenia rzeczywiście może niekiedy występować. Skala tego zjawiska nie miała i nie ma jednak wpływu na globalne rekonstrukcje oparte na paleomagnetyzmie.

<sup>6</sup> Badania zmian wiekowych są wiarygodne tylko w najmłodszych skałach, czas geologiczny nie jest sprzymierzeńcem badań paleomagnetycznych w tak subtelnej skali tego czasu.

stabilność NRM, wykorzystując w tym celu, jak na ironię, niechciany przez samego pomysłodawcę test Grahama.

Przy okazji i niezależnie od badań piaskowców z Loch Torridon, Irving analizował namagnesowanie skał Dekanu, dzięki dwudziestu próbom, przysłanych na jego prośbę przez Indyjską Służbę Geologiczną. Siedem z tych prób, pobranych z bazaltowych trapów Dekanu, wskazywało namagnesowanie odległe od pola współczesnego, ale za to zgodne z położeniem Dekanu na rekonstrukcji Wegenera...

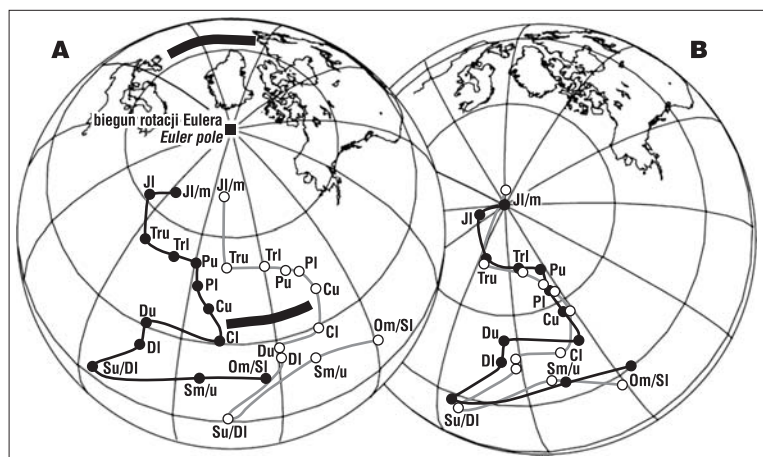
Nowatorskie tezy pracy doktorskiej Irvinga (1954) nie znalazły uznania komisji uniwersyteckiej, opuścił on więc Cambridge bez dyplomu i wyjechał na dziesięć lat do Australii. Publikacja Irvinga (1956), za którą w roku 1979 otrzymał medal AGU im. Waltera Buchera (paradoksalnie Walter Bucher był przeciwnikiem dryftu kontynentów...), była kulminacją wiedzy paleomagnetycznej tamtego okresu. W pracy tej, uznawanej przez samego autora za jego najbardziej oryginalne dzieło, przedstawiono całą gamę argumentów paleomagnetycznych i paleoklimatycznych, obejmujących swoim zasięgiem większość kontynentów. Irving przekonująco wykazał, że bez wegenerowskiej Pangei wyniki badań paleomagnetycznych i paleoklimatycznych tworzą niespójny zbiór elementów. Dwa lata później, wraz z Greenem (Irving & Green, 1958), podsumowali badania paleomagnetyczne w Australii, wskazując na ruch także tego kontynentu. Co ciekawe, manuskrypt tej pracy, dziś kanonicznej z punktu widzenia historii badań nad geotektoniką Australii, został rok wcześniej odrzucony przez redakcję *Journal of Geophysical Research*. W 1965 r., po przesłaniu swoich nowych publikacji do Cambridge, Irving uzyskał wreszcie wymarzony doktorat. W tym czasie jednak jego poglądy nie odbiegały już rażąco od coraz szerzej akceptowanego paradygmatu o dryfcie kontynentów...

W połowie lat 50., ekipa w Cambridge potrzebowała dopływu nowych sił, więc Runcorn wziął pod swoje skrzydła jeszcze Kena Creera i Davida Collinsona. To byli właściwi ludzie na właściwym miejscu. Creer, inspirowany magnetometrem Blacketta, we współpracy z Collinsonem zbudował podobny (lecz o wyższej czułości), dając instrumentalne podwaliny pod badania NRM (patrz Collinson, 1960). Creer szybko zauważył, że średni kierunek NRM, obliczany metodą Fishera, pozostaje prawie niezmienny, jeżeli tylko liczba niezależnie orientowanych prób w danym profilu nie jest mniejsza niż kilkanaście. To bardzo przyspieszyło prace, gdyż Irving i Hospers pobierali dziesiątki prób.

Na marginesie wydarzeń wypada podkreślić, że Graham i jego koledzy z Carnegie w Waszyngtonie, podobnie jak Runcorn i jego podopieczni w Cambridge, nie byli zwolennikami dryftu kontynentów. Runcorn (1955) uważał, że kontynenty pozostawały w tym samym miejscu, tylko oś geomagnetyczna zmieniała swoje położenie (tzw. prawdziwa wędrówka bieguna, ang. *True Polar Wander* – TPW). Żaden z nich nie przystępował do badań naturalnego magnetyzmu skał, inspirowany teorią Wegenera. Głównym celem badań grupy Runcorna było poznanie prehistorii pola geomagnetycznego.

Irving i Creer byli pierwszymi, którzy zorientowali się, że mają w ręku klucz do weryfikacji mobilizmu kontynentów. Pod wpływem faktów, Runcorn niemal z dnia na dzień uznał, że mieli rację (Runcorn, 1955). Jego wolta, spowodowana dopływem nowych danych z USA (np. Doell, 1955), była szokiem dla ówczesnego środowiska nauk o Ziemi, ale też uwiarygodniła badania jego podopiecznych.

W krótkim czasie Creer skompletował wyniki dla dewonu, permu, triasu i jury Wielkiej Brytanii i we wrześniu 1954 r., na forum British Association, wygłosił referat „Rock magnetism and polar wandering”, gdzie po raz pierwszy przedstawił publicznie ideę krzywej wędrówki bieguna. W ujęciu Creera, który niezależnie od Hospersa zdefiniował pojęcie bieguna paleomagnetycznego, krzywa ta pokazywała zmianę położenia bieguna względem Wielkiej Brytanii, bez jednoznacznej interpretacji genezy tej zmienności. Nie była to jeszcze stosowana dziś krzywa pozornej wędrówki bieguna (ang. *Apparent Polar Wander Path* – APWP), którą po raz pierwszy w ten sposób określił Irving (1963). Zapoczątkowała jednak debatę o naturze zmian położenia bieguna względem kontynentu, a pytanie – co porusza się względem czego – pozostawało bez odpowiedzi. Co prawda Creer zauważał, że skały syluru Wielkiej Brytanii i Rosehill Formation w USA (badane przez Grahama) wykazują różnice kierunku NRM, dające się wytłumaczyć zachodnim dryftem Ameryki względem Europy, jednak właściwą odpowiedź mogło przynieść tylko porównanie dwóch krzywych z różnych kontynentów. Gdyby krzywe były identyczne w dzisiejszej konfiguracji kontynentów, hipoteza GAD straciłaby sens, gdyż oś dipola geomagnetycznego musiałaby migrować w stosunku do osi obrotu Ziemi i stabilnych kontynentów (TPW). Gdyby były odmienne, mobilizm kontynentów byłby niepodważalnym faktem, z niewykluczonym jednak udziałem TPW.



**Ryc. 3.** Krzywe pozornej wędrówki bieguna (APWP) dla Ameryki Północnej i Europy (odpowiednio pełne i puste kółka) przed (A) i po (B) rekonstrukcji Bullarda i in. (1965). Pokazano biegun rotacji Eulera (*Euler pole*) oraz wielkość kątową rotacji, zamykającej Atlantyk (czarne grube linie – A). Ordowik – O, sylur – S, dewon – D, karbon – C, perm – P, trias – Tr, jura – J; dolny – l; środkowy – m, górny – u (wg Butlera, 1992)

**Fig. 3.** Apparent polar wanderpaths (APWPs) for North America and Europe full and open symbols, respectively) before (A) and after (B) Bullard's fit (Bullard et al., 1965). Euler pole of rotation for both continents to close the Atlantic Ocean, as well as a magnitude of angular rotation (bold black lines – A), are shown. Ordovician – O, Silurian – S, Devonian – D, Carboniferous – C, Permian – P, Triassic – Tr, Jurassic – J; lower – l, middle – m, upper – u (after Butler, 1992)



Myszę, że Czytelnik potrafi sobie odpowiedzieć na pytanie, jakie byłoby położenie paleobiegunów, niezależnie od wieku badanych skał i ich macierzystych kontynentów, gdyby litosfera była nieruchoma względem GAD...

Kolejne dane z Ameryki Płn. i Europy dowiodły, że ich APWP przebiegały odmiennie (choć na pierwszy rzut oka były podobne, co podgrzewało kontrowersje – patrz ryc. 3). Pierwszym, który jednoznacznie stwierdził, że różnice w położeniu paleobiegunów Ameryki Płn. i Europy znikają, kiedy kontynenty te zostaną połączone w Pangeę, był DuBois (1957), kolejny student Runcorna. Był to argument za ruchem kontynentów, choć nie wykluczał on udziału TPW. Dyskusja nad udziałami TPW i APWP trwa zresztą do dziś (patrz Evans, 2003).

Na marginesie – w latach 70. XX w. Ken Creer współpracował z paleomagnetkami polskimi, na czele ze Zdzisławem Małkowskim oraz Elżbietą Król i Piotrem Tuchołką (patrz Kądziałko-Hofmokl i in., 2014), badając zmiany wiekowe utrwalone w osadach jeziornych.

### KRYTYKA

Hipotezy kilku młodych zapaleńców z jednego ośrodka naukowego (Cambridge), wywracające do góry nogami dotychczasowy porządek rzeczy, niosły dla ówczesnych autorytetów naukowych spore zagrożenie. W tym czasie nauka była uprawiana w skostniałej, hierarchicznej strukturze, w której uczeni mandaryni decydowali o poglądach swoich następców. Dotyczyło to zarówno USA (np. Walter Bucher, Charles Drake czy Maurice Ewing), Wlk. Brytanii (Sir Harold Jeffreys – także w USA), jak i ZSRR, gdzie Zonenshain, Natapow i Kuzmin mogli w pełni zaprezentować mobilistyczne podejście do geologii ZSRR (Zonenshain i in., 1990) dopiero po śmierci Władimira W. Bielousowa, eminentnego geologa w byłym Związku Radzieckim i zagorzałego przeciwnika tektoniki płyt<sup>7</sup>. Ted Runcorn, osobistość wpływowa najpierw w Anglii, a potem w USA, był tu wyjątkiem, dlatego paleomagnetyzm, a z nim cały ośrodek Uniwersytetu z Cambridge rozwinął się tak szybko (Fred Vine, Drummond Matthews, Tuzo Wilson, Dan McKenzie – te nazwiska z Cambridge mówią same za siebie...).

Oczywiście, nowe idee z reguły nie są witane z aplauzem, a w nauce obowiązkowo są poddawane krytycznej wnikliwości. Jednak krytyczny stosunek do nowego to jedno, a upór trwania na plaży, gdy nadciąga tsunami – to sprawa druga. Pewnym wytłumaczeniem uczonych, zawziętych w krytyce paleomagnetyzmu, jest anagram Chrisa Scotese'a: PALAEOMAGNETISM = NOT A SIMPLE GAME. Zasadniczą bowiem kwestią dla akceptacji wyników paleomagnetycznych było (i jest...) zrozumienie, że wszystkie kontynenty były w ruchu, w związku z czym fakt, że paleobiegun ordowicki dla Ameryki Północnej znajduje się w dzisiejszej Angoli nie oznacza, że w ordowiku ten kawałek Afryki leżał na biegunie... Problemem były też rekonstrukcje oparte na danych paleomagnetycznych, pochodzących ze słabo jeszcze wtedy datowanych skał magmowych. Pamiętam ulgę paleomagnetyków, kiedy

okazało się, że marokański Msissi Norite jest wieku wczesnokredowego (Salmon i in., 1986), a nie dewońskiego, jak przez lata sądzono. Dzięki nowemu datowaniu norytów, rekonstrukcje paleogeograficzne nabrały sensu (położenie paleobiegunu z Msissi nie uległo wszakże zmianie, zmienił się tylko jego wiek, ale odium błędu rekonstrukcji paleogeograficznej dla dewonu i tak spoczęło na paleomagnetyzmie). Większość badaczy krytykowała (bezpodstawnie) niską jakość danych paleomagnetycznych – np. Rozanov (1962) pisał w tym kontekście: „According to available geological data, no continental drift occurred in the case of India and China.” Takie opinie nie ułatwiały życia idei Wegenera. Dziś wiemy, że Himalaje zrodziły się ze starcia „matki” Azji z „ojcem” Dekanem, a migracja Dekanu od Gondwany do Azji jest jednym z najlepiej udokumentowanych paleomagnetycznie epizodów tektoniki płyt (Kumar i in, 2007).

Mimo zastrzeżeń do paleomagnetyzmu, na początku lat 60. XXw. argumenty za dryftem kontynentów były na tyle mocne, że Hess (1962) mógł stwierdzić: „...one may quibble over details, but the general picture on paleomagnetism is sufficiently compelling that it is more reasonable to accept it than disregard it.”

W 1965 r. nastąpił przełom w akceptacji wyników paleomagnetycznych. W tym roku odbyło się w Royal Institution w Londynie sympozjum poświęcone teorii dryftu kontynentalnego. Organizatorami byli Blackett, Bullard i Runcorn. W sprawozdaniu z tego sympozjum, David W. Evans (1966) napisał: „Unquestionably, the most imaginative and stimulating data were provided by the papers dealing with the location of polar positions at various period of geological time. This stemmed from studies of the Earth's magnetism made possible by the development of a refined magnetometer by Professor P.M.S. Blackett.” Bez wątplenia Evans miał rację, bo w wygłoszonych referatach nie pojawiły się żadne nowe dane geologiczne. Pojawiły się natomiast ich nowe interpretacje.

Interesujące, jak mało się zmienił się od czasu tej konferencji ogólny obraz ewolucji litosfery w fanerozoiku, w porównaniu do obecnego stanu wiedzy, mimo nadzwyczajnego postępu w paleomagnetycznych technikach pomiarowych! Magnetometr Blacketta, podobnie jak i magnetometr rotacyjny Johnsona (Johnson & McNish, 1938), były przecież mniej czułe od dzisiejszych magnetometrów nadprzewodzących. Co ciekawe, Blackett skonstruował swój magnetometr dla wykazania, że każde rotujące ciało wytwarza pole magnetyczne (przez analogię do pól magnetycznych rotujących gwiazd). Na potrzeby eksperymentu wykonano m.in. ważący 15,2 kg cylinder ze złota (patrz Nye, 2004), który puszczono w ruch obrotowy. Wirująca masa złota, podobnie jak i inne wirujące cylindry wykonane ze stopów różnych metali, nie generowała jednak mierzalnego pola magnetycznego i hipoteza Blacketta, noblisty z zawilim życiorysem politycznym (Nye, 2004), została eksperymentalnie unicestwiona przez samego jej twórcę (Blackett, 1947, 1952). Złoto wróciło do mennicy,

<sup>7</sup> Bielousow był twórcą teorii radiomigracji (lata 1942–1943), nadającej pierwiastkom promieniotwórczym zasadniczą rolę w generowaniu ciepła we wnętrzu Ziemi. Ciepło migrujące do powierzchni prowadziło do oceanizacji skorupy kontynentalnej, co tłumaczyło różnice petrofizyczne pomiędzy tymi typami skorupy ziemskiej. Teoria radiomigracji i jej pochodna, teoria transformacji skorupy ziemskiej, nie potrzebowała teorii ekspansji den oceanicznych i tektoniki płyt, dlatego Bielousow całkowicie ją odrzucił.

ale magnetometr pozostał i okazał się przydatny do udowodnienia teorii Wegenera. Pokręcona historia...

## DZIŚ

Paleomagnetyzm miał swoje pięć minut w latach 50. XX w. i ciągle rozkwitał, choć nie bez wątpliwości co do wiarygodności wyników. Badania niektórych struktur geologicznych na zachodnim wybrzeżu USA ujawniły odmienne kierunki NRM dla skał tego samego wieku co skały na kontynencie. Kontestacja niezrozumiałych początkowo rezultatów, szybko zamieniła się w fascynację nową koncepcją ewolucji litosfery, przy której mobilizm w wydaniu Wegenera był tylko tłem do procesów daleko bardziej dynamicznych. Okazało się, że prakontynenty obrastały przyklejanymi do nich i przemieszczonymi na ogromne odległości fragmentami skorupy ziemskiej, w tym także blokami odspojonymi od innych kontynentów. Tak narodziła się koncepcja terranów (patrz też Nawrocki – ten tom), tłumacząca ewolucję i budowę aktywnych krawędzi kontynentalnych. Mobilizm okazał się bardziej mobilistyczny, niż przypuszczali jego najwięksi zwolennicy! Geodezja satelitarna potwierdziła wywiedzione z badań paleomagnetycznych kierunki ruchu płyt litosfery oraz prędkości ich ruchu (Howell, 1989). Magnetostratygrafia, dzięki swojej globalnej naturze, pozwoliła na lepszą korelację stratygraficzną i lepsze zrozumienie dynamiki basenów sedymentacyjnych. APWP stawały się krzywymi referencyjnymi dla paleomagnetycznego datowania wieku procesów tektonicznych i diagenety. Stowarzyszone z paleomagnetyzmem badania minerałów magnetycznych pozwoliły lepiej zrozumieć deformacje wewnętrzne skał (anizotropia podatności magnetycznej) czy zmiany środowiska przyrodniczego, opisywane za pomocą metod (paleo)magnetyzmu środowiskowego. Paleomagnetyzm jest dziś dojrzałą metodą naukową, o bardzo szerokich możliwościach aplikacji w naukach przyrodniczych. Alfred Wegener z pewnością wiele jej zawdzięczał...

## ZAKOŃCZENIE

Współcześni Wegenerowi stawiali mu zarzut, że nie wskazywał przyczyny ruchu kontynentów (zob. też Jurewicz – ten tom). Ale przecież i dzisiaj nie do końca rozumiemy tektonofizyczne aspekty ruchu płyt litosfery; interpretujemy go jako powierzchniową ekspresję konwekcji w płaszczu Ziemi (np. Czechowski, 1994), co nie oznacza jednak, że rozumiemy procesy napędzającą tę konwekcję (np. Foulger, 2010).

Nadal nie wiemy, dlaczego pole geomagnetyczne zmienia polarność i jaka jest dynamika tego procesu. Nie zmienia to faktu, że kontynenty są w ruchu, a pole geomagnetyczne musiało zmieniać swoją polarność. Tak już jest, świat widzimy, opisując procesy i ich skutki, nie do końca jednak pojmując istotę zjawisk przyrodniczych.

Włodkowi Mizerskiemu dziękuję za zaproszenie do napisania niniejszego eseju dla Przeglądu Geologicznego oraz pomoc w redakcji tekstu. Moim przewodnikiem po historii paleomagnetyzmu były głównie artykuły E. Irvinga (1988, 2008) oraz dzieło H.R. Frankla (2012). Ken Creer, dzięki wstawiennictwu Piotra Tuchołki, zamienił ze mną kilka słów i doradzał w moich pierwszych krokach na polu minowym paleomagnetyzmu w czasie

mojej miesięcznej wizyty w Edynburgu i w laboratorium Uniwersytetu w Newcastle-upon-Tyne (1979). Ted Irving w 1982 r. uczynił mi zaszczyt propozycją stażu podoktorskiego, co niestety nie doszło do skutku z różnych przyczyn. Madzi, Joannie, Jurkowi, Tosi i Agacie dziękuję za wyrozumiałość dla mojego kaprysu pisania tego artykułu w trakcie urlopu pod słońcem Toskanii. Dziękuję internetowi za dostęp do unikalnych prac Blacketta, Brunhesa, Snidera, Suessa i Wegenera. Jackowi Grabowskiemu oraz Włodkowi Mizerskiemu dziękuję za życzliwe recenzje, dzięki czemu tekst stał się bardziej przejrzysty, zachowując przy tym oryginalny, autorski styl narracji. Ewie Słaby dziękuję za dyskusję nad końcową wersją tekstu.

## LITERATURA

- BACON F. 1620 – *Novum Organum*. P.F. Collier & Son, New York: 1–290. [http://lf-oll.s3.amazonaws.com/titles/1432/0415\\_Bk.pdf](http://lf-oll.s3.amazonaws.com/titles/1432/0415_Bk.pdf).
- BAKER H.B. 1911 – *The origin of the moon*. Detroit Free Press.
- BESSE J., COURTILLOT V., WESTPHAL M. & ZHOU Y.X. 1984 – Palaeomagnetic estimates of crustal shortening in the Himalayan thrusts and Zangbo suture. *Nature*, 311: 621–626.
- BLACKETT P.M.S. 1947 – Distributed theory of Earth's magnetism. *Nature*, 159: 658.
- BLACKETT P.M.S. 1952 – A negative experiment relating to magnetism and the Earth's rotation. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 245: 309.
- BROWN M. 2010 – The Early History of Geomagnetic Field Reversals. *The IRM Quarterly*, 20 (3), 1 cont.: 8–11. <http://www.irm.umn.edu/quarterly/irmq20-3.pdf>
- BRUNHES B. 1906 – Recherchessur la direction de l'aimantation des roches volcaniques, *J. Phys.Theor. Appl.*, 5: 705–724. <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00241149/document>
- BUTLER R.F. 1992 – Paleomagnetism: Magnetic domains to geologic terranes. Blackwell Sci. Public.: 1–319.
- BULLARD E.C., EVERETT J.E. & SMITH A.G. 1965 – The fit of the continents around the Atlantic. *Royal Soc. London Philos. Trans.*, A258 (1088): 41–51.
- CHEVALLIER R. 1925 – L'aimantation des laves de l'Etna et l'orientation du champ terrestre Sicile du XIIe au XVIIe siècle. *Annales de Physique*, 4, 5-1.
- COLLINSON D.W. 1960 – Polar wandering and continental drift: evidence from paleomagnetic observations in the United States. *Geol. Soc. America Bull.*, 71(7): 915.
- CZECHOWSKI L. 1994 – Tektonika płyt i konwekcja w płaszczu Ziemi. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa: 1–251.
- DOELL R.R. 1955 – Paleomagnetic study of rocks from the Grand Canyon of the Colorado River. *Nature*, 176: 1167.
- DRAKE E. 1976 – Alfred Wegener's reconstruction of Pangea. *Geology*, 4: 41–44.
- DUBOIS P.M. 1957 – Comparison of paleomagnetic results from selected rocks of Great Britain and North America. *Philos. Mag. Adv. Phys.*, 6: 177–186.
- EVANS W.D. 1966 – The theory of continental drift: Review. *The Geograph. J.*, 132 (3): 397–400.
- EVANS D.A.D. 2003 – True polar wander and supercontinents. *Tectonophysics*, 362: 303–320.
- FISHER R. 1953 – Dispersion on the sphere. *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 217: 295–305.
- FOULGER G.R. 2010 – *Plates vs Plumes: A geological controversy*. Wiley-Blackwell: 1–328.
- FRANKEL H.F. 2012 – *The continental drift controversy*. Cambridge Univ. Press, vol. I–IV, s. 2169.
- GRAHAM J.W. 1949 – The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks, *J. Geophys. Res.*, 54: 131–167.
- GRAHAM J.W. & TORRESON O.W. 1951 – Contrasting magnetizations of flat-lying and folded Paleozoic sediments. *Am. Geophys Union Trans.*, 32, s. 336.
- HESS M.M. 1962 – History of ocean basins. [W:] Engel A.E.J., James H.L. & Leonard B.F. (red.), *Petrological studies, a volume in honor of A.F. Buddington*. Geol. Soc. America. Boulder, Colorado: 599–620.
- HOSPERS J. 1951 – Remanent magnetism of rocks and the history of geomagnetic field. *Nature*, 168: 1111.
- HOSPERS J. 1954 – Rock magnetism and polar wandering. *Nature*, 173: 1183.
- HOWELL D.G. 1989 – *Tectonics of suspect terranes*; Chapman & Hall, New York: 232.

- HUGHES P. 2001 – On the shoulder of giants; Alfred Wegener. NASA, Earth Observatory. [http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Wegener/wegener\\_5.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Wegener/wegener_5.php).
- IRVING E. 1954 – Palaeomagnetism of the Torridonian Sandstone Series, NW Scotland. Thesis, Univ. of Cambridge, England.
- IRVING E. 1956 – Paleomagnetic and paleoclimatic aspects of polar wander. *Geophys. Pura Appl.*, 33: 1–20.
- IRVING E. 1963 – Palaeomagnetism and its application to geological and geophysical problems. J. Wiley and Sons, Ltd., New York, 1964, s. 399.
- IRVING E. 1988 – The Paleomagnetic Confirmation of Continental Drift. *Eos*, 69 (44): 994–1014.
- IRVING E. 2008 – Jan Hospers key contributions to geomagnetism, *Eos Trans. AGU*, 89: 457–468.
- IRVING E. & GREEN R.R. 1958 – Polar wandering relative to Australia. *Geophys. J.*: 64–72.
- JOHNSON E.A. & McNISH A.G. 1938 – An alternating-current apparatus for measuring small magnetic moments. *J. Geoph. Research*, 43 (4): 393–399. DOI: 10.1029/TE043i004p00393.
- KADZIAŁKO-HOFMOKL M., WERNER T. & KRUCZYK J. 2014 – Fifty years of palaeomagnetic studies in the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences. [W:] Bialik R., Majdański M. & Moskałik M. (red.), Achievements, history and challenges in Geophysics; 60th Anniversary of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences. *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*, Springer: 1–417.
- KUMAR P., YUAN X., KUMAR R., KIND R., LI X., & CHADHA R.K. 2007 – The rapid drift of the Indian tectonic plate. *Nature*, 449: 894–897.
- LAJ C., KISSEL C. & GUILLOU H. 2002 – Brunhes' research revisited: Magnetization of volcanic flows and Baked Clays. *Eos Trans. AGU*, 83 (35): 386–387. <http://www.irm.umn.edu/quarterly/irmq20-3.pdf>.
- McELHINNY M.W. 1973 – Palaeomagnetism and plate tectonics. *Cambridge Earth Sci. Ser.*: 1–358.
- MERCANTON P.L. 1926 – Aimantation de basaltes groenlandais, *C.R. Hebd. Sci.*, 182: 859–860.
- NYE M.J. 2004 – Blackett: physics, war, and politics in the twentieth century. Harvard University Press: 2004–255.
- OLDHAM R.D. 1906 – The constitution of the interior of the Earth as revealed by Earthquakes. *G.T. Geol. Soc. London*, 62: 459–486.
- ROZANOV I.A. 1962 – On continental drift (from paleomagnetic data). *International Geology Review*. 10/1962 (4): 1118–1134. DOI: 10.1080/00206816209473747.
- RUNCORN S.K. 1955 – Palaeomagnetic comparisons between Europe and North America. *Proc. Geol. Assoc. Can.*, 8: 77–85.
- SALMON E., MONTIGNY R., EDEL J.B., PIQUE A., THUIZAT R. & WESTPHAL M. 1986 – The Msissi Norite revisited: K/Ar dating, petrography and paleomagnetism. *Geophys. Research Lett.*, 13 (8): 741–743.
- SNIDER-PELLEGRINI A. 1858 – La Création et ses mystères dévoilés: 1–487. <https://ia600501.us.archive.org/9/items/lacrationetsesm00pelgoog/lacrationetsesm00pelgoog.pdf>.
- SUESS E. 1885 – Das Antlitz der Erde. F. Tempsky, Pragand G. Freytag, Leipzig (Wyd.), Ib: 311–778. <http://www.geology.19thcenturyscience.org/books/1904-Suess-Antlitz/Vol-I/htm/doc.html>
- SUESS E. 1893 – Are ocean depths permanent?. *Natural Science: A Monthly Review of Scientific Progress (London)*, 2: 180–187.
- TAYLOR F.B. 1910 – Bearing on the Tertiary mountain belt on the origin of the Earth's plan. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 21: 176–226.
- TORRESON O.W., MURPHY T. & GRAHAM J. 1949 – Magnetic polarization of sedimentary rocks and the Earth's magnetic history. *J. Geophys. Res.*, 54: 111–129.
- VEIKKOLAINEN T., PESONEN L.J. 2014 – Palaeosecular variation, field reversals and the stability of the geodynamo in the Precambrian. *Geophys. J. Int.* 199 (3): 1515–1526.
- VINE F.J. & MATTHEWS D.H. 1963 – Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199: 947–949.
- WEGENER A. 1912 – Die Entstehung der Kontinente. [W:] Petermanns Mitteilungen: 185-95, 253-56, 305-09.
- WEGENER A. 1915 – Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Vieweg & Sohr., Braunschweig: 1–94.
- WEGENER A. 1920 – Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. II wyd. niemieckie. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig: 1–132. [http://www.gutenberg.org/files/45460/45460-h/45460-h.htm#Seite\\_130](http://www.gutenberg.org/files/45460/45460-h/45460-h.htm#Seite_130).
- ZONENSHAIN L.P., KUZMIN M.I. & NATAPOV L.M. 1990 – Geology of the USSR: A plate-tectonic synthesis. *AGU Geodynamics Series*, 21, B.M. Page (red.), American Geophysical Union, Washington, s. 242.